Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

Mikell P. Groover

Unidades estándar empleadas en este libro

A lo largo de este libro de texto se utilizan tanto las unidades del Sistema Internacional (SI, métrico), como las del Sistema Tradicional de Estados Unidos (USCS) en ecuaciones y tablas. Las unidades métricas se consideran como unidades primarias, y las unidades del USCS se dan entre paréntesis.

Prefijos para las unidades del SI

Prefijo	Símbolo	Multiplicador	Ejemplos de unidades (y sus símbolos)
nano-	n	10^{-9}	nanómetro (nm)
micro-	μ	10^{-6}	micrómetro (μm)
mili-	m	10^{-3}	milímetro (mm)
centi-	c	10^{-2}	centímetro (cm)
kilo-	k	10^{-3}	kilómetro (km)
mega-	M	10^{6}	megaPascal (MPa)
giga-	G	10^{9}	gigaPascal (GPa)

Tabla de equivalencias entre las unidades del SI y las del Sistema Tradicional de Estados Unidos (USCS)

Variable	Unidades del SI	Unidades del USCS	Equivalencias
Longitud	metro (m)	pulgada (in)	1.0 in = 25.4 mm = 0.0254 m
		pie (ft)	1.0 ft = 12.0 in = 0.3048 m = 304.8 mm
		yarda	1.0 yarda = 3.0 ft = 0.9144 m = 914.4 mm
		milla	1.0 milla = 5 280 ft = 1 609.34 m = 1.60934 km
		micro-pulgada (μ-in)	1.0 μ-in = 1.0×10^{-6} in = 25.4×10^{-3} μm
Área	m^2, mm^2	in^2, ft^3	1.0 in^2 = 645.16 mm^2
			1.0 ft^2 = 144 in^2 = 92.90×10^{-3} m^2
Volumen	m^3, mm^3	in^3, ft^3	1.0 in^3 = 16 387 mm^3
			1.0 ft^2 = 1 728 in^3 = 2.8317×10^{-2} m^3
Masa	kilogramo (kg)	libra (lb)	1.0 lb = 0.4536 kg
		tonelada	1.0 ton (corta) = 2 000 lb = 907.2 kg
Densidad	kg/m^3	lb/in^3	1.0 lb/in^3 = 27.68×10^3 kg/m^3
		lb/ft^3	1.0 lb/ft^3 = 16.0184 kg/m^3
Velocidad	m/min	ft/min	1.0 ft/min = 0.3048 m/min = 5.08×10^{-3} m/s
	m/s	in/min	1.0 in/min = 25.4 mm/min = 0.42333 mm/s
Aceleración	m/s^2	ft/seg^2	1.0 ft/seg = 0.3048 m/s^2
Fuerza	Newton (N)	libra (lb)	1.0 lb = 4.4482 N
Torque	N-m	ft-lb, in-lb	1.0 ft-lb = 12.0 in-lb = 1.356 N-m
			1.0 in-lb = 0.113 N-m
Presión	Pascal (Pa)	lb/in^2	1.0 lb/in^2 = 6 895 N/m^2 = 6 895 Pa
Carga	Pascal (Pa)	lb/in^2	1.0 lb/in^2 = 6.895×10^{-3} N/mm^2 = 6.895×10^{-3} MPa
Energía, trabajo	Joule (J)	ft-lb, in-lb	1.0 ft-lb = 1.365 N-m = 1.365 J
			1.0 in-lb = 0.113 N-m = 0.113 J
Energía térmica	Joule (J)	Unidad térmica británica (Btu)	1.0 Btu = 1 055 J
Potencia	Watt (W)	Caballo de fuerza (hp)	1.0 hp = 33 000 ft-lb/min = 745.7 J/s = 745.7 W
			1.0 ft-lb/min = 2.2597×10^{-2} J/s = 2.2597×10^{-2} W
Calor específico	J/Kg-°C	Btu/lb-°F	1.0 Btu/lb - °F = 1.0 calorías/g-°C = 4 187 J/kg-°C
Conductividad térmica	J/s-mm-°C	Btu/hr-in-°F	1.0 Btu/hr-in - °F = 2.077×10^{-2} J/s-mm-°C
Expansión térmica	(mm/mm)/°C	(in/in)/°F	1.0 (in/in)/ °F = 1.8 (mm/mm)/°C
Viscosidad	Pa-s	$lb\text{-}seg/in^2$	1.0 $lb\text{-}seg/in^2$ = 6 895 Pa-s = 6 895 $N\text{-}s/m^2$

Conversión entre las unidades del USCS y el SI

Para convertir del sistema USCS al SI: Para convertir el valor de una variable que esté en unidades de USCS a su equivalente en unidades del SI, ***multiplique*** el valor que desea convertir por el valor que aparece al lado derecho de la equivalencia correspondiente en la Tabla de equivalencias.

Ejemplo: Convierta una longitud L = 3.25 a su valor equivalente en milímetros.

Solución: La equivalencia que le corresponde es: 1.0 in = 25.4 mm

$$L = 3.25 \text{ in} \times (25.4 \text{ mm/in}) = \mathbf{82.55 \text{ mm}}$$

Para convertir unidades del SI al sistema USCS: Para convertir el valor de una variable de unidades del SI a su equivalente en unidades del USCS, ***divida*** el valor que desea convertir entre el valor asentado en el lado derecho de la equivalencia que le corresponde en la Tabla de equivalencias.

Ejemplo: Convierta un área A = 1 000 mm^2 a su equivalente en pulgadas cuadradas.

Solución: La equivalencia que le corresponde es: 1.0 in^2 = 645.16 mm^2

$$A = 1\,000 \text{ mm}^2 / (645.16 \text{ mm}^2/\text{in}^2) = \mathbf{1.55 \text{ in}^2}$$

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Materiales, procesos y sistemas

Tercera edición

Mikell P. Groover
Profesor de ingeniería industrial
y de sistemas
Lehigh University

Revisión técnica:

Ing. Antonio Barrientos Morales
Académico de Ingeniería Mecánica
Universidad Iberoamericana, Ciudad de México

Ing. Javier León Cárdenas
Jefe de Ingeniería Mecánica
Universidad La Salle, campus Ciudad de México

Ing. Rosendo Reyes Rosales
Coordinador de Talleres y Laboratorios de Ingeniería
Universidad La Salle, campus Ciudad de México



MÉXICO • BOGOTÁ • BUENOS AIRES • CARACAS • GUATEMALA
LISBOA • MADRID • NUEVA YORK • SAN JUAN • SANTIAGO • SÃO PAULO
AUCKLAND • LONDRES • MILÁN • MONTREAL • NUEVA DELHI
SAN FRANCISCO • SINGAPUR • SAN LUIS • SIDNEY • TORONTO

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA
Tercera edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.

McGraw-Hill Interamericana

DERECHOS RESERVADOS © 2007 respecto a la tercera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
*A Subsidiary of **The McGraw-Hill** Companies, Inc*.
Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1
ISBN-10: 970-10-6240-X

Traducido de la tercera edición en inglés de la obra *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING. Materials, Processes and Systems*. Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ISBN-10: 0-471-74485-9
ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890 0986543217

Impreso en México *Printed in Mexico*

The McGraw·Hill Companies

PREFACIO

Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas está diseñado para un primer curso, o una serie de dos, de la materia de manufactura en los primeros años de los planes de estudio de las carreras de ingeniería mecánica, industrial y de manufactura. Dada su cobertura a los materiales de la ingeniería, también es apropiado para los cursos de ciencia e ingeniería de materiales que hacen énfasis en el procesamiento de materiales. Por último, es apropiado para programas de tecnología relacionados con las especialidades mencionadas de la ingeniería. La mayor parte del contenido del libro se relaciona con los procesos de manufactura (alrededor de 65% del texto), pero también da cobertura significativa a los materiales y sistemas de producción de la ingeniería. Los materiales, procesos y sistemas son los fundamentos básicos con los que se estructura la manufactura moderna, y en el libro se estudian esos tres grandes temas.

ENFOQUE

El objetivo del autor es tratar a la manufactura con un enfoque que es más ***moderno*** y ***cuantitativo*** que el de los libros de manufactura de otros autores. La afirmación de que es "moderno" se basa en que 1) cubre en forma más balanceada los materiales básicos de la ingeniería (metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos); 2) incluye procesos de manufactura desarrollados recientemente, además de los tradicionales que se han empleado y perfeccionado durante muchos años, y 3) su cobertura más completa de tecnologías de manufactura electrónica. Los libros de texto de otros autores tienden a hacer énfasis en los metales y su procesamiento, sin tomar mucho en cuenta los demás materiales de uso en la ingeniería cuyas aplicaciones y métodos de aprovechamiento han crecido en forma significativa en las últimas décadas. Por ejemplo, el volumen de polímeros que se comercian en el mundo de hoy, excede el de los metales procesados. Asimismo, otros libros cubren mínimamente la manufactura electrónica y sin embargo, la importancia comercial de los productos electrónicos y sus industrias asociadas se ha incrementado de manera sustancial durante las décadas más recientes.

La afirmación de que el libro es más "cuantitativo" que otros libros de texto de manufactura se basa en su énfasis en la ciencia de la manufactura y el gran uso que hace de ecuaciones y problemas cuantitativos (al final de cada capítulo). En el caso de ciertos procesos, fue el primer libro de procesos de manufactura que les dio un tratamiento cuantitativo de ingeniería.

LO NUEVO EN ESTA EDICIÓN

Esta tercera edición es una versión actualizada de la segunda, con un capítulo nuevo sobre procesos de fabricación con nanotecnología, y varias secciones actualizadas. El autor trata de ser exhaustivo en el contenido del libro, sin dejar que su tamaño sea excesivo. Entre los elementos clave de la edición nueva se incluyen los siguientes:

- Un capítulo nuevo sobre los procesos de fabricación con nanotecnología.
- Problemas de tarea nuevos y revisados, que en total suman 565. Casi todos requieren de un análisis cuantitativo.

- ➢ Preguntas de repaso nuevas y revisadas, así como cuestionarios de opción múltiple en todos los capítulos. Hay más de 740 preguntas de repaso al final de los capítulos y casi 500 de opción múltiple. Estas últimas se han reformulado para que sean más accesibles para el estudiante.
- ➢ En el libro se incluye un DVD para los profesores que así lo soliciten, que muestra videos de las acciones de muchos de los procesos de manufactura. Los capítulos se han actualizado para que incluyan referencias a ellos, y se han añadido preguntas al final de cada capítulo relacionadas con los videos.

Otros elementos clave

1. Secciones acerca de la ***Guía del procesamiento*** en cada uno de los cuatro capítulos sobre los materiales de ingeniería.
2. Secciones llamadas ***Consideraciones sobre el diseño del producto*** en muchos de los capítulos que tratan procesos de manufactura.
3. Hay ***Notas históricas*** en muchas de las tecnologías que se estudian.
4. Como en la segunda edición, en todo el libro se emplea el Sistema Internacional de Unidades (métrico), que más se usa en ingeniería, pero también se utiliza el Sistema de Unidades Tradicionales de Estados Unidos.

MATERIALES DE APOYO PARA LOS MAESTROS

Esta obra cuenta con interesantes complementos que fortalecen los procesos de enseñanza-aprendizaje, así como la evaluación de los mismos, los cuales se otorgan a profesores que adoptan este texto para sus cursos. Para obtener más información y conocer la política de entrega de estos materiales, contacte a su representante McGraw-Hill o envíe un correo electrónico a marketinghe@mcgraw-hill.com

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi agradecimiento a las personas siguientes, que fungieron como revisores técnicos de conjuntos individuales de los capítulos de la primera edición: Iftikhar Ahmad (George Mason University), J. T. Black (Auburn University), David Bourell (University of Texas en Austin), Paul Cotnoir (Worcester Polytechnic Institute), Robert E. Eppich (American Foundryman's Society), Osama Eyeda (Virginia Polytechnic Institute and State University), Wolter Fabricky (Virginia Polytechnic Institute and State University), Keith Gardiner (Lehigh University), R. Heikes (Georgia Institute of Technology), Jay R. Geddes (San Jose State University), Ralph Jaccodine (Lehigh University), Steven Liang (Georgia Institute of Technology), Harlan MacDowell (Michigan State University), Joe Mize (Oklahoma State University), Colin Moodie (Purdue University), Michael Philpott (University of Illinois en Champaign-Urbana), Corrado Poli (University of Massachusetts en Amherst), Chell Roberts (Arizona State University), Anil Saigal (Tufts University), G. Sathyanarayanan (Lehigh University), Malur Srinivasan (Texas A&M University), A. Brent Strong (Brigham Young University), Yonglai Tian (George Mason University), Gregory L. Tonkay (Lehigh University), Chester Van Tyne (Colorado School of Mines), Robert Voigt (Pennsylvania State University) y Charles White (GMI Engineering and Management Institute).

Por sus revisiones valiosas de ciertos capítulos de la segunda edición, agradezco a John T. Berry (Mississippi State University), Rajiv Shivpuri (Ohio State University), James B. Taylor (North Carolina State University). Joel Troxler (Montana State University) y Ampere A. Tseng (Arizona State University).

Por sus consejos y estímulos provechosos para la tercera edición, doy gracias a varios de mis colegas en Lehigh, entre quienes se encuentran John Coulter, Keith Gardiner, Andrew Herzing, Wojciech Misiolek, Nicholas Odrey, Gregory Tonkay y Marvin White. En especial agradezco a Andrew Herzing del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales, de Lehigh, por la revisión que hizo del capítulo nuevo sobre nanofabricación, así como a Greg Tonkay, de mi propio departamento, por desarrollar muchos de los problemas y preguntas nuevas y actualizadas en esta nueva edición.

Además, es apropiado dar crédito a todos los colegas que participaron con sus consejos en la preparación de esta tercera edición. Las preguntas o comentarios individuales se pueden dirigir personalmente al autor, en la dirección Mikell.Groover@Lehigh.edu

ACERCA DEL AUTOR

Mikell P. Groover es profesor de Ingeniería Industrial y de Sistemas en Lehigh University, donde también funge como Director del Laboratorio de Tecnología de Manufactura, George E. Kane y es miembro del cuerpo docente del Programa de Ingeniería de Sistemas de Manufactura. Obtuvo grados de B.A. en Ciencias y Artes (1961), B.S. en Ingeniería Mecánica (1962), M.S. en Ingeniería Industrial (1966) y Ph. D. (1969), todos en Lehigh. Es Ingeniero Profesional Registrado en Pennsylvania. Su experiencia industrial incluye varios años como ingeniero de manufactura en Eastman Kodak Company. Desde que ingresó a Lehigh ha efectuado trabajos de consultoría, investigación y proyectos para varias compañías industriales.

Sus áreas de investigación y enseñanza incluyen procesos de manufactura, sistemas de producción, automatización, manejo de materiales, planeación de instalaciones y sistemas de trabajo. Ha obtenido varios premios por su enseñanza en Lehigh University, así como el ***Albert G. Holzman Outstanding Educator Award***, del Institute of Industrial Engineers (1965) y el ***SME Education Award***, de la Society of Manufacturing Engineers (2001). Entre sus publicaciones están 75 artículos técnicos y siete libros (que se mencionan más adelante). Sus textos se emplean en todo el mundo y han sido traducidos al francés, alemán, español, portugués, ruso, japonés, coreano y chino. La primera edición del texto presente, ***Fundamentals of Modern Manufacturing***, recibió el ***IIE Joint Publishers Award*** (1996) y el ***M. Eugene Merchant Manufacturing Textbook Award***, de la Society of Manufacturing Engineers (1996).

El Dr. Groover es miembro del Institute of Industrial Engineers, American Society of Mechanical Engineers (ASME), la Society of Manufacturing Engineers (SME), el North American Manufacturing Research Institute (NAMRI) y ASM International. Es miembro del IIE (1987) y del SME (1996).

OTROS LIBROS DEL AUTOR

Automation, Production Systems, and Computer-Aided Manufacturing. Prentice Hall. 1980.

CAD/CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. Prentice-Hall, 1984 (en colaboración con E. W. Zimmers, Jr.).

Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications. McGraw-Hill Book Company, 1986 (en colaboración con M. Weiss, R. Nagel y N. Odrey).

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Prentice Hall, 1987.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, publicado originalmente por Prentice Hall en 1996, y después por John Wiley & Sons, Inc, en 1999.

Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing. Segunda edición, Prentice Hall, 2001.

Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems. Segunda edición, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN Y PANORAMA DE LA MANUFACTURA 1

1.1 ¿Qué es la manufactura? 2
1.2 Los materiales en la manufactura 8
1.3 Procesos de manufactura 10
1.4 Sistemas de producción 17
1.5 Organización del libro 20

Parte I Propiedades de los materiales y atributos del producto 23

2 LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES 23

2.1 Estructura atómica y los elementos 23
2.2 Enlaces entre átomos y moléculas 26
2.3 Estructuras cristalinas 28
2.4 Estructuras no cristalinas (amorfas) 34
2.5 Materiales de ingeniería 35

3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES 38

3.1 Relaciones esfuerzo-deformación 39
3.2 Dureza 51
3.3 Efecto de la temperatura sobre las propiedades 55
3.4 Propiedades de los fluidos 57
3.5 Comportamiento viscoelástico de los polímeros 60

4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES 67

4.1 Propiedades volumétricas y de fusión 68
4.2 Propiedades térmicas 70
4.3 Difusión de masa 72
4.4 Propiedades eléctricas 74
4.5 Procesos electroquímicos 75

5 DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y SUPERFICIES 79

5.1 Dimensiones, tolerancias y atributos relacionados 80
5.2 Superficies 81
5.3 Efecto de los procesos de manufactura 87

Parte II Materiales de la ingeniería 90

6 Metales 90

6.1 Aleaciones y diagramas de fase 91
6.2 Metales ferrosos 96
6.3 Metales no ferrosos 111
6.4 Superaleaciones 122
6.5 Guía para el procesamiento de metales 123

7 CERÁMICOS 127

7.1 Estructura y propiedades de los cerámicos 129
7.2 Cerámicos tradicionales 131
7.3 Nuevos materiales cerámicos 133
7.4 Vidrio 136
7.5 Algunos elementos importantes relacionados con los cerámicos 139
7.6 Guía para el procesamiento de los materiales cerámicos 142

8 POLÍMEROS 144

8.1 Fundamentos de la ciencia y tecnología de los polímeros 147
8.2 Polímeros termoplásticos 156
8.3 Polímeros termofijos 163
8.4 Elastómeros 167
8.5 Guía para el procesamiento de polímeros 174

9 MATERIALES COMPUESTOS 176

9.1 Tecnología y clasificación de los materiales compuestos 177
9.2 Compuestos de matriz metálica 185
9.3 Compuestos de matriz cerámica 188
94 Compuestos de matriz de polímero 188
9.5 Guía para el procesamiento de los materiales compuestos 191

Parte III Procesos de solidificación 194

10 FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES 194

10.1 Panorama de la tecnología de fundición 197
10.2 Calentamiento y vertido 199
10.3 Solidificación y enfriamiento 203

11 PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES 214

11.1 Fundición en arena 215
11.2 Otros procesos de fundición con moldes desechables 220
11.3 Procesos de fundición con moldes permanentes 226
11.4 La práctica de la fundición 234
11.5 Calidad del fundido 238

11.6 Los metales para fundición 240
11.7 Consideraciones sobre el diseño del producto 242

12 TRABAJO DEL VIDRIO 247

12.1 Preparación y fundición de las materias primas 247
12.2 Los procesos de conformación en el trabajo del vidrio 248
12.3 Tratamiento térmico y acabado 254
12.4 Consideraciones sobre el diseño del producto 255

13 PROCESOS DE CONFORMADO PARA PLÁSTICOS 257

13.1 Propiedades de los polímeros fundidos 259
13.2 Extrusión 261
13.3 Producción de hojas y película 271
13.4 Producción de fibras y filamentos (hilado o hilandería) 273
13.5 Procesos de recubrimiento 275
13.6 Moldeo por inyección 275
13.7 Moldeo por compresión y transferencia 286
13.8 Moldeo por soplado y moldeo rotacional 288
13.9 Termoformado 293
13.10 Fundición 297
13.11 Procesamiento y formado de espuma de polímero 298
13.12 Consideraciones sobre el diseño del producto 300

14 TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO (HULE) 307

14.1 Procesamiento y formado del caucho 307
14.2 Manufactura de llantas y otros productos de caucho 313
14.3 Consideraciones sobre el diseño del producto 316

15 PROCESOS DE FORMADO PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA 319

15.1 Materias primas para materiales compuestos con matriz polimérica (PMC) 321
15.2 Procesos con molde abierto 324
15.3 Procesos con molde cerrado 327
15.4 Bobinado de filamentos 330
15.5 Procesos de pultrusión 332
15.6 Otros procesos de formado para PMC 333

Parte IV Procesamiento de partículas para metales y cerámicos 337

16 METALURGIA DE POLVOS 337

16.1 Características de los polvos en ingeniería 340
16.2 Producción de polvos metálicos 343
16.3 Prensado convencional y sinterizado 345
16.4 Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado 351
16.5 Materiales y productos para metalurgia de polvos 354
16.6 Consideraciones de diseño en metalurgia de polvos 355

17 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS Y CERMETS 362

17.1 Procesamiento de cerámicas tradicionales 363
17.2 Procesamiento de cerámicas nuevas 370
17.3 Procesamiento de cermets 373
17.4 Consideraciones para el diseño de productos 375

Parte V Formado de metal y trabajo de láminas metálicas 378

18 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES 378

18.1 Panorama del formado de metales 378
18.2 Comportamiento del material en el formado de metales 381
18.3 Temperatura en el formado de metales 382
18.4 Sensibilidad a la velocidad de deformación 384
18.5 Fricción y lubricación en el formado de metales 386

19 PROCESOS DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICA EN EL TRABAJO DE METALES 390

19.1 Laminado 391
19.2 Otros procesos de deformación relacionados con el laminado 398
19.3 Forjado 400
19.4 Otros procesos de deformación relacionados con el forjado 412
19.5 Extrusión 416
19.6 Estirado de alambres y barras 427

20 TRABAJADO METÁLICO DE LÁMINAS 440

20.1 Operaciones de corte 441
20.2 Operaciones de doblado 448
20.3 Embutido 452
20.4 Otras operaciones de formado de láminas metálicas 459
20.5 Troqueles y prensas para procesos con láminas metálicas 462
20.6 Operaciones con láminas metálicas no realizadas en prensas 469
20.7 Doblado de material tubular 474

Parte VI Procesos de remoción de material 481

21 TEORÍA DE MAQUINADO DE METALES 481

21.1 Panorama general de la tecnología del maquinado 483
21.2 Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales 486
21.3 Relaciones de fuerza y la ecuación de Merchant 490
21.4 Relaciones entre potencia y energía en el maquinado 495
21.5 Temperatura de corte 498

22 OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS HERRAMIENTA 505

22.1 Torneado y operaciones afines 508
22.2 Taladrado y operaciones afines 518
22.3 Fresado 522
22.4 Centros de maquinado y centros de torneado 529
22.5 Otras operaciones de maquinado 531
22.6 Maquinado de alta velocidad 536

23 TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE 542

23.1 Vida de las herramientas 543
23.2 Materiales para herramientas 549
23.3 Configuración geométrica de las herramientas 558
23.4 Fluidos para corte 566

24 CONSIDERACIONES ECONÓMICAS Y PARA EL DISEÑO DEL PRODUCTO EN MAQUINADO 574

24.1 Maquinabilidad 574
24.2 Tolerancias y acabado superficial 577
24.3 Selección de las condiciones de corte 581
24.4 Consideraciones para el diseño del producto en maquinado 587

25 ESMERILADO Y OTROS PROCESOS ABRASIVOS 594

25.1 Esmerilado 595
25.2 Procesos abrasivos relacionados 612

26 PROCESO DE MAQUINADO NO TRADICIONAL Y DE CORTE TÉRMICO 618

26.1 Procesos de energía mecánica 619
26.2 Procesos de maquinado electroquímico 623
26.3 Procesos de energía térmica 627
26.4 Maquinado químico 635
26.5 Consideraciones para la aplicación 641

Parte VII Operaciones para la mejora de propiedades y el procesamiento superficial 647

27 TRATAMIENTO TÉRMICO DE METALES 647

27.1 Recocido 648
27.2 Formación de martensita en el acero 648
27.3 Endurecimiento por precipitación 652
27.4 Endurecimiento superficial 654
27.5 Métodos e instalaciones para el tratamiento térmico 655

28 LIMPIEZA Y TRATAMIENTOS SUPERFICIALES 660

28.1 Limpieza química 660
28.2 Limpieza mecánica y preparación superficial 663
28.3 Difusión e implantación iónica 665

29 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO Y DEPOSICIÓN 669

29.1 Chapeado y procesos relacionados 670
29.2 Recubrimientos por conversión 674
29.3 Deposición física de vapor 675
29.4 Deposición química de vapor 678
29.5 Recubrimientos orgánicos 681
29.6 Esmaltado en porcelana y otros recubrimientos cerámicos 683
29.7 Procesos de recubrimiento térmicos y mecánicos 684

Parte VIII Procesos de unión y ensamble 689

30 FUNDAMENTOS DE SOLDADURA 689

30.1 Perspectiva de la tecnología de la soldadura 691
30.2 Unión soldada 693
30.3 Física de la soldadura 696
30.4 Características de una junta soldada por fusión 699

31 PROCESOS DE SOLDADURA 705

31.1 Soldadura con arco 706
31.2 Soldadura por resistencia 716
31.3 Soldadura con oxígeno y gas combustible 723
31.4 Otros procesos de soldadura por fusión 726
31.5 Soldadura de estado sólido 729
31.6 Calidad de la soldadura 734
31.7 Soldabilidad 739

32 SOLDADURA DURA, SOLDADURA SUAVE Y PEGADO ADHESIVO 745

32.1 Soldadura dura 746
32.2 Soldadura suave 751
32.3 Pegado adhesivo 755

33 ENSAMBLE MECÁNICO 763

33.1 Sujetadores roscados 764
33.2 Remaches y ojillos 770
33.3 Métodos de ensamble basados en ajustes por interferencia 772
33.4 Otros métodos de sujeción mecánica 775
33.5 Insertos en moldeado y sujetadores integrales 776
33.6 Diseño para ensambles 778

Parte IX Procesamiento especial y tecnologías de ensamble 784

34 CREACIÓN RÁPIDA DE PROTOTIPOS 784

34.1 Fundamentos de la creación rápida de prototipos 785
34.2 Tecnologías para la creación rápida de prototipos 786
34.3 Aspectos de aplicación en la creación rápida de prototipos 794

35 PROCESAMIENTO DE CIRCUITOS INTEGRADOS 798

35.1 Panorama del procesamiento de CI 799
35.2 Procesamiento del silicio 803
35.3 Litografía 807
35.4 Procesos de formación de capas en la fabricaciónde CI 811
35.5 Integración de los pasos de fabricación 818
35.6 Encapsulado de CI 820
35.7 Rendimientos en el procesamiento de CI 825

36 ENSAMBLE Y ENCAPSULADO DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS 830

36.1 Encapsulado de dispositivos electrónicos 830
36.2 Tableros de circuitos impresos 832
36.3 Ensamble de tableros de circuitos impresos 841
36.4 Tecnología de montaje superficial 845
36.5 Tecnología de conectores eléctricos 850

37 TECNOLOGÍAS DE MICROFABRICACIÓN 855

37.1 Productos de microsistemas 855
37.2 Procesos de microfabricación 861

38 TECNOLOGÍAS DE NANOFABRICACIÓN 870

38.1 Introducción a la nanotecnología 872
38.2 Procesos de nanofabricación 877
38.3 La national nanotechnology initiative 884

Parte X Sistemas de manufactura 887

39 CONTROL NUMÉRICO Y ROBÓTICA INDUSTRIAL 887

39.1 Control numérico 888
39.2 Robótica industrial 900

40 TECNOLOGÍA DE GRUPOS Y SISTEMAS FLEXIBLES DE MANUFACTURA 910

40.1 Tecnología de grupos 910
40.2 Sistemas flexibles de manufactura 915

41 LÍNEAS DE PRODUCCIÓN 922

41.1 Fundamentos de las líneas de producción 922
41.2 Líneas de ensamble manual 926
41.3 Líneas de producción automatizadas 930

Parte XI Sistemas de apoyo a la manufactura 937

42 INGENIERÍA DE MANUFACTURA 937

42.1 Planeación de procesos 938
42.2 Solución de problemas y mejora continua 946
42.3 Ingeniería concurrente y diseño para la manufacturabilidad 946

43 PLANEACIÓN Y CONTROL DE LA PRODUCCIÓN 953

43.1 Planeación agregada y el programa maestro de producción 955
43.2 Control de inventarios 956
43.3 Planeación de requerimientos de materiales y de capacidad 960
43.4 Producción justo a tiempo y ajustada 964
43.5 Control de piso del taller 967

44 CONTROL DE CALIDAD 972

44.1 ¿Que es la calidad? 972
44.2 Capacidad del proceso 973
44.3 Tolerancia estadística 974
44.4 Métodos de Taguchi 977
44.5 Control estadístico de procesos 980

45 MEDICIÓN E INSPECCIÓN 989

45.1 Metrología 990
45.2 Principios de inspección 993
45.3 Instrumentos de medición y calibradores convencionales 995
45.4 Mediciones de superficies 1002
45.5 Tecnologías avanzadas de medición e inspección 1004

ÍNDICE 1015

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

1 INTRODUCCIÓN Y PANORAMA DE LA MANUFACTURA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

1.1 ¿Qué es la manufactura?
- 1.1.1 Definición de manufactura
- 1.1.2 Las industrias manufactureras y sus productos
- 1.1.3 Capacidad de manufactura

1.2 Los materiales en la manufactura
- 1.2.1 Metales
- 1.2.2 Cerámicos
- 1.2.3 Polímeros
- 1.2.4 Compuestos

1.3 Procesos de manufactura
- 1.3.1 Operaciones de procesamiento
- 1.3.2 Operaciones de ensamblado
- 1.3.3 Máquinas de producción y herramientas

1.4 Sistemas de producción
- 1.4.1 Instalaciones de producción
- 1.4.2 Sistemas de apoyo a la manufactura

1.5 Organización del libro

La manufactura es importante en lo tecnológico, económico e histórico. La ***tecnología*** se define como la aplicación de la ciencia para proporcionar a la sociedad y a sus miembros aquellos objetos que necesitan o desean. La tecnología influye de muchas formas en nuestras vidas diarias, directa e indirectamente. Considere la lista de productos de la tabla 1.1. Representan distintas tecnologías que ayudan a los miembros de nuestra sociedad a vivir mejor. ¿Qué tienen en común esos productos? Todos son manufacturados. Esas maravillas tecnológicas no estarían disponibles para la sociedad si no pudieran manufacturarse. La manufactura es el factor esencial que hace posible a la tecnología.

En cuanto a la economía, la manufactura es un medio importante con el que una nación crea bienestar material. En Estados Unidos, las industrias manufactureras generan alrededor de 20% del producto interno bruto (PIB). Los recursos naturales de un país, como las tierras agrícolas, depósitos minerales y reservas petrolíferas, también crean bienestar.

TABLA 1.1 Productos que representan distintas tecnologías, la mayor parte de los cuales influyen a casi todas las personas.

Automóvil deportivo utilitario (ADU) con tracción en las cuatro ruedas, bolsas de aire, frenos antibloqueo, control de manejo y radio AM-FM con reproductor de discos compactos	Escáner óptico	Raqueta de tenis de materiales compuestos
Avión supersónico	Foco incandescente	Reloj de pulsera de cuarzo
Bolígrafo	Fotocopiadora	Reproductor de cintas de video
Cajero automático	Horno de microondas	Reproductor de discos compactos
Calculadora electrónica portátil	Impresora de inyección de tinta	Reproductor digital de discos
Cámara digital	Juegos de video	Robot industrial
Circuito integrado	Latas de fácil apertura	Silla de plástico para el jardín, moldeada en una pieza
Computadora personal (PC)	Lavadora de trastos	Sistema de seguridad para el hogar
Disco compacto (CD)	Lavadora y secadora	Teléfono celular
Disco de video digital (DVD)	Lentes de contacto	Televisión a colores de pantalla grande
Disquete de alta densidad para PC	Máquina de fax	Zapatos deportivos
	Máquina para el diagnóstico médico por medio de imágenes de resonancia magnética (IRM)	
	Podadora autopropulsada	

En Estados Unidos, la agricultura, minería e industrias similares generan menos del 5% del PIB. La construcción y las empresas públicas producen algo más del 5%. Y el resto corresponde a industrias de servicios, entre las que se incluyen el menudeo, el transporte, la banca, las comunicaciones, la educación y el gobierno. El sector de los servicios agrupa el 70%, aproximadamente, del PIB de Estados Unidos. Tan sólo el gobierno de ese país genera tanto PIB como el sector de manufactura, pero los servicios gubernamentales no crean riqueza. En la economía moderna internacional, una nación debe poseer una base fuerte de manufactura (o tener recursos naturales significativos) si ha de contar con una economía fuerte y estándares de vida elevados para su pueblo.

Históricamente, por lo general se subestima la importancia de la manufactura en el desarrollo de la civilización. Pero a lo largo de la historia, las culturas humanas que han sido mejores para fabricar objetos han tenido más éxito. Al elaborar herramientas mejores, tuvieron destrezas y armas mejores. Las mejores destrezas les permitieron vivir mejor. Con armas mejores pudieron conquistar a las culturas vecinas en épocas de conflicto. En la Guerra Civil de Estados Unidos (1861-1865), una de las grandes ventajas del Norte sobre el Sur fue su fortaleza industrial, es decir, su capacidad de manufactura. En la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), Estados Unidos superó en producción a Alemania y Japón —ventaja decisiva para triunfar en la guerra. En gran parte, la historia de la civilización es la historia de la capacidad de la humanidad para fabricar cosas.

En este capítulo de apertura, se consideran temas generales sobre la manufactura. ¿Qué es la manufactura? ¿Cómo se organiza en la industria? ¿Cuáles son los materiales, procesos y sistemas con los que se logra la producción?

1.1 ¿QUÉ ES LA MANUFACTURA?

La palabra ***manufactura*** se deriva de las palabras latinas ***manus*** (mano) y ***factus*** (hacer); la combinación de ambas significa *hecho a mano*. La palabra *manufactura* tiene varios siglos de antigüedad, y "hecho a mano" describe en forma adecuada los métodos manuales que se utilizaban cuando se acuñó la expresión.[1] La mayor parte de la manufactura moderna se lleva a cabo por medio de maquinaria automatizada y controlada por computadora que se supervisa manualmente (véase la nota histórica 1.1).

1 Alrededor de 1567 d. C., apareció por primera vez la palabra ***manufactura*** como sustantivo, y hacia 1863 d. C., apareció como verbo.

Nota *histórica* 1.1 *Historia de la manufactura*

La historia de la manufactura puede dividirse en dos partes: 1) el descubrimiento y la invención por parte del hombre de los materiales y los procesos para fabricar cosas, y 2) el desarrollo de los sistemas de producción. Los materiales y procesos para hacer objetos preceden a los sistemas en varios milenios. Algunos de dichos procesos —fundición, trabajo con martillo (forjar), y rectificado— se remontan a 6 000 años o más. La fabricación temprana de implementos y armas se llevó a cabo más mediante destrezas y oficios, que mediante la manufactura en el sentido actual. Los antiguos romanos tenían lo que podrían llamarse "fábricas" para producir armas, pergaminos, cerámica y vidrio, así como otros productos de esa época, pero los procedimientos se basaban por mucho en el trabajo con las manos.

En este momento se examinarán los aspectos de los sistemas de manufactura, y los materiales y procesos se dejarán para la nota histórica 1.2. La expresión ***sistemas de manufactura*** se refiere a las formas de organizar a las personas y a los equipos de modo que la producción se lleve a cabo con más eficiencia. Son varios los sucesos históricos y descubrimientos que tuvieron un efecto grande en el desarrollo de los sistemas modernos de manufactura.

Es claro que un descubrimiento significativo fue el principio de la ***división del trabajo***, es decir, dividir el trabajo total en tareas, y hacer que los trabajadores individuales se convirtieran en especialistas en hacer solo una. Este principio se había practicado durante siglos, pero al economista Adam Smith (1723-1790) se le ha adjudicado el crédito por haber sido el primero en explicar su significado económico en su obra **La *riqueza de las naciones***.

La **Revolución Industrial** (alrededor de 1760 a 1830) tuvo en diversos modos un efecto grande sobre la producción. Marcó el cambio entre una economía basada en la agricultura y el oficio manual, a otra con base en la industria y la manufactura. El cambio comenzó en Inglaterra, donde se inventó una serie de máquinas y la potencia del vapor remplazó a la del agua, a la del viento y a la animal. Esas ventajas dieron a la industria británica la delantera sobre las de otras naciones, e Inglaterra trató de impedir la exportación de las tecnologías nuevas. Sin embargo, finalmente la revolución se extendió a otros países europeos y a Estados Unidos. Varios inventos de la revolución industrial contribuyeron mucho al desarrollo de la manufactura: 1) la ***máquina de vapor de* Watt**, una tecnología nueva de generación de energía para la industria, 2) las ***máquinas herramienta***, que comenzaron con la perforadora de John Wilkinson, alrededor de 1775 (véase la nota histórica 22.1); 3) la ***hiladora con varios husillos, el telar mecánico***, y otras para la industria textil, que permitieron incrementos significativos de la productividad; y 4) el ***sistema fabril,*** forma nueva de organizar números grandes de trabajadores de la producción con base en la división del trabajo.

En tanto Inglaterra lideraba la revolución industrial, en Estados Unidos surgía un concepto importante: la manufactura de ***piezas intercambiables***. Se concede gran parte del crédito por este concepto a Eli Whitney (1765-1825), aunque su importancia ha sido reconocida a través de otros [6]. En 1797, Whitney negoció un contrato para producir 10 000 mosquetes para el gobierno de Estados Unidos. En esa época, la manera de fabricar armas era artesanal, fabricar cada pieza por separado para un arma en particular, y luego ajustarlas a mano. Cada mosquete era único, y el tiempo de fabricación era considerable. Whitney creía que los componentes podían hacerse con la exactitud suficiente para permitir su ensamblado sin ajustarlas. Después de varios años de desarrollo en su fábrica de Connecticut, en 1801 viajó a Washington para demostrar el principio. Puso los componentes de 10 mosquetes ante funcionarios gubernamentales, entre ellos Thomas Jefferson, y procedió a seleccionar piezas al azar para ensamblar las armas. No se requirió sensibilidad o ajuste especial, y todas las armas funcionaron a la perfección. El secreto detrás de su logro era el conjunto de máquinas, refacciones y medidores especiales que había perfeccionado en su fábrica. La manufactura de piezas intercambiables requirió muchos años de desarrollo antes de convertirse en una realidad práctica, pero revolucionó los métodos de manufactura y es un prerrequisito para la producción en masa. Debido a que su origen tuvo lugar en Estados Unidos, la producción de piezas intercambiables se conoció como el ***sistema americano*** de manufactura.

De su segunda mitad y hasta al final del siglo XIX se presenció la expansión de los ferrocarriles, barcos de vapor y otras máquinas que crearon la necesidad creciente de hierro y acero. Se crearon métodos nuevos de producción para satisfacer esa demanda (véase la nota histórica 6.1). Asimismo, durante ese periodo se inventaron varios productos de consumo, entre éstos: la máquina de coser, la bicicleta y el automóvil. A fin de satisfacer la demanda masiva de esos artículos, se requirieron métodos más eficientes de producción. Algunos historiadores identifican los desarrollos durante ese periodo como la **Segunda *Revolución* Industrial**, que se caracterizó en términos de sus efectos sobre los sistemas de manufactura a través de lo siguiente: 1) producción en masa, 2) movimiento de la administración científica, 3) líneas de ensamblado, y 4) electrificación de las fábricas.

A finales del siglo XIX, surgió en Estados Unidos el movimiento de la ***administración científica***, en respuesta a la necesidad de planear y controlar las actividades de un número en aumento de trabajadores. Los líderes del movimiento incluían a Frederick W. Taylor (1856-1915), Frank Gilbreth (1868-1924) y su esposa Lilian (1878-1972). La administración científica tenía varias características [2]: 1) el ***estudio de movimientos***, motivado por descubrir el método mejor para ejecutar una tarea dada; 2) el ***estudio de tiempos***, para establecer estándares de trabajo para cierta labor; 3) el uso amplio de ***estándares*** en la industria; 4) el ***sistema de pago a destajo*** y otros planes similares de incentivos del trabajo; y 5) el uso de conjuntos de datos,

conservación de registros y contabilidad de costos en las operaciones fabriles.

Henry Ford (1863-1947) introdujo la ***línea de ensamblado*** en 1913, en su planta de Highland Park (véase la nota histórica 41.1). La línea de ensamblado hizo posible la producción en masa de productos de consumo complejos. Sus métodos permitieron a Ford vender un automóvil modelo T a un precio tan bajo como $500, lo que hizo que poseer un coche fuera algo factible para un segmento grande de la población estadounidense.

En 1881, se construyó en la ciudad de Nueva York la primera planta de generación de energía eléctrica, y pronto se utilizaron los motores eléctricos como fuente de energía para operar la maquinaria de las fábricas. Éste era un sistema que convenía más que las máquinas de vapor para distribuir energía, pues para llevarla a las máquinas se necesitaban bandas de transmisión. Alrededor de 1920, la electricidad había sustituido al vapor como la fuente principal de energía de las fábricas de Estados Unidos. El siglo xx fue la época en la que hubo más avances tecnológicos que en todos los siglos pasados juntos. Muchos de esos desarrollos dieron origen a la ***automatización*** de la manufactura.

1.1.1 Definición de manufactura

Como campo de estudio en el contexto moderno, la manufactura se puede definir de dos maneras: una tecnológica y la otra económica. En el sentido tecnológico, la ***manufactura*** es la aplicación de procesos físicos y químicos para alterar la geometría, propiedades o apariencia de un material de inicio dado para fabricar piezas o productos; la manufactura también incluye el ensamble de piezas múltiples para fabricar productos. Los procesos para llevar a cabo la manufactura involucran una combinación de máquinas, herramientas, energía y trabajo manual, como se ilustra en la figura 1.1*a*). Casi siempre, la manufactura se ejecuta como una secuencia de operaciones. Cada una de éstas lleva al material más cerca del estado final que se desea.

En el sentido económico, la ***manufactura*** es la transformación de los materiales en artículos de valor mayor por medio de uno o más operaciones de procesamiento o ensamblado, según lo ilustra la figura 1.1*b*). La clave es que la manufactura ***agrega valor*** al material cambiando su forma o propiedades, o mediante combinar materiales distintos también alterados. El material se habrá hecho más valioso por medio de las operaciones de manufactura ejecutadas en él. Cuando el mineral de hierro se convierte en acero se le agrega valor. Si la arena se transforma en vidrio se le añade valor. Cuando el petróleo se refina y se convierte en plástico su valor aumenta. Y cuando el plástico se modela en la geometría compleja de una silla de jardín, se vuelve más valioso.

Es frecuente que las palabras manufactura y producción se usen en forma indistinta. El punto de vista del autor es que la producción tiene un significado más amplio que la manufactura. Para ilustrar esto, se puede utilizar la expresión "producción de petróleo crudo", pero la frase "manufactura de petróleo crudo" parece fuera de lugar. Sin embargo,

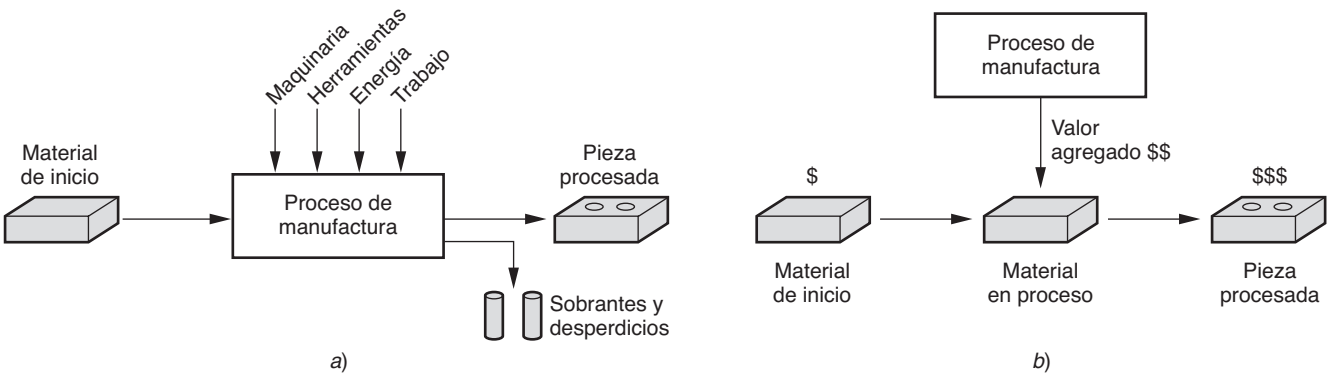


FIGURA 1.1 Dos maneras de definir manufactura: *a*) como proceso técnico, y *b*) como proceso económico.

cuando se emplea en el contexto de productos tales como piezas metálicas o automóviles, cualquiera de ambas palabras es aceptable.

1.1.2 Las industrias manufactureras y sus productos

La manufactura es una actividad importante, pero no se lleva a cabo sólo por sí misma. Se ejecuta como una actividad comercial de las compañías que venden productos a los clientes. El tipo de manufactura que una empresa realiza depende de la clase de producto que fabrica. Esta relación se va a analizar primero con el examen de los tipos de industrias manufactureras, y después con la identificación de los productos que generan.

Industrias manufactureras La industria consiste en empresas y organizaciones que producen o suministran bienes y servicios. Las industrias se clasifican como primarias, secundarias o terciarias. Las ***industrias primarias*** cultivan y explotan recursos naturales, tales como la agricultura y minería. Las ***industrias secundarias*** toman las salidas de las primarias y las convierten en bienes de consumo y capital. En esta categoría, la manufactura es la actividad principal, pero también quedan incluidas las construcciones y la generación de energía. Las ***industrias terciarias*** constituyen el sector de servicios de la economía. En la tabla 1.2 se presenta una lista de industrias específicas de dichas categorías.

Este libro se dedica a las industrias secundarias de la tabla 1.2, que incluyen las compañías que se dedican a la manufactura. Sin embargo, la Clasificación Internacional Estándar de Industrias, que se empleó para compilar la tabla 1.2, incluye varias industrias cuyas tecnologías de producción no se estudian en este texto; por ejemplo, las bebidas, los productos químicos y los alimentos procesados. En el libro, manufactura significa producción de ***hardware***, que va desde tuercas y tornillos hasta computadoras digitales y armas. Se incluyen productos plásticos y cerámicos, pero se excluyen la ropa, las bebidas, los productos químicos, la comida y el software. En la tabla 1.3 se presenta nuestra lista corta de industrias manufactureras.

Productos manufacturados Los productos finales fabricados por las industrias que se enlistan en la tabla 1.3 se dividen en dos clases principales: bienes de consumo y bienes de capital. Los ***bienes de consumo*** son productos que los consumidores compran en forma directa, como autos, computadoras personales, televisiones, neumáticos y raquetas de tenis, entre muchos otros más. Los ***bienes de capital*** son aquellos que adquieren otras compañías para producir bienes y prestar servicios. Algunos ejemplos de bienes de capital incluyen aviones, computadoras grandes, equipo ferroviario, máquinas herramienta y equipo para la construcción.

TABLA 1.2 Industrias específicas de las categorías primaria, secundaria y terciaria.

Primaria	Secundaria		Terciaria (servicios)	
Agricultura	Aerospacial	Maquinaria pesada	Banca	Legales
Canteras	Alimentos procesados	Materiales para construcción	Bienes raíces	Reparaciones y mantenimiento
Forestal	Aparatos de consumo	Metales procesados	Comercio al mayoreo	Restaurantes
Ganadería	Automotriz	Metalurgia básica	Comercio al menudeo	Salud y cuidados médicos
Minería	Bebidas	Neumáticos y caucho	Comunicaciones	Seguros
Pesca	Computadoras	Papel	Educación	Servicios financieros
Petróleo	Construcción	Plásticos (formados)	Entretenimiento	Transporte
	Editorial	Productos químicos	Gobierno	Turismo
	Electrónica	Refinación de petróleo	Hotel	
	Equipos	Textiles	Información	
	Farmacéutica	Vestido		
	Instalaciones de generación de energía	Vidrio, cerámicos		
	Madera y muebles			

TABLA 1.3 Industrias de manufactura cuyos materiales, procesos y sistemas se estudian en este libro.

Industria	Productos típicos	Industria	Productos típicos
Aerospacial	Aviones comerciales y militares	Equipos	Maquinaria industrial, equipo ferroviario
Automotriz	Autos, camiones, autobuses, motocicletas	Metales procesados	Piezas maquinadas, acuñación, herramientas
Metalurgia básica	Hierro, acero, aluminio, cobre, etc.	Vidrio, cerámicos	Productos de vidrio, herramientas cerámicos, vajillas
Computación	Computadoras grandes y personales	Maquinaria pesada	Máquinas herramientas, construcción de equipos
Aparatos de consumo	Aparatos domésticos grandes y pequeños	Plásticos (formados)	Plásticos moldeados, extrusiones de plástico
Electrónica	Equipo de audio, televisiones, reproductoras de video	Neumáticos y caucho	Llantas, suelas de calzado, pelotas de tenis

Además de los productos finales, otros artículos manufacturados incluyen los ***materiales, componentes*** y ***suministros*** que emplean las compañías para fabricar los artículos terminados. Algunos ejemplos de ellos incluyen la lámina de acero, barras de acero, acuñación, piezas maquinadas, plásticos moldeados y extrusiones, herramientas de corte, troqueles, moldes y lubricantes. Así, las industrias manufactureras son una infraestructura compleja con categorías y niveles distintos de proveedores intermedios con quienes el consumidor final nunca tratará.

Este libro por lo general estudia ***artículos discretos*** —piezas individuales y productos ensamblados— en lugar de aquellos producidos por ***procesos continuos***. Un estampado metálico es un producto discreto, pero el rollo de metal laminado del que se fabrica es continuo o semicontinuo. Muchas piezas discretas comienzan como productos continuos o semicontinuos, tales como las extrusiones o el cable eléctrico. Secciones grandes de longitudes casi continuas se cortan al tamaño que se desea. Una refinería de petróleo es un ejemplo aún mejor del proceso continuo.

Cantidad de producción y variedad de productos La cantidad de productos elaborados por una fábrica tiene una influencia importante en la manera en que están organizados su personal, sus instalaciones y sus procedimientos. Las cantidades de producción anual se clasifican en tres categorías: 1) producción ***baja***, en el rango de 1 a 100 unidades por año; 2) producción ***media***, de 100 a 10 000 unidades anuales; y 3) producción ***alta***, de 10 000 a varios millones de unidades. Los límites de los tres rangos son algo arbitrarias (son a juicio del autor). En función de las clases de productos pueden cambiar su orden de magnitud.

La cantidad de producción se refiere al número de unidades de cierto tipo de producto que se producen en un año. Algunas plantas producen una variedad de productos distintos, cada uno de los cuales se hace en cantidades bajas o medias. Otras plantas se especializan en la producción alta de un solo tipo de producto. Es instructivo identificar la variedad de productos como parámetro distintivo de la cantidad de producción. La variedad de productos se refiere a los diseños o tipos distintos de productos que se producen en la planta. Productos diferentes tienen formas y tamaños diferentes; desempeñan funciones distintas; se destinan a mercados distintos; algunos tienen más componentes que otros; y así sucesivamente. Es posible contar el número de tipos distintos de productos fabricados cada año. Cuando el número de tipos de productos de la fábrica es elevado, eso indica una variedad de productos alta.

Existe una correlación inversa entre la variedad de productos y la cantidad de producción, en términos de las operaciones de la fábrica. Si la variedad de los productos de una fábrica es elevada, entonces es probable que su cantidad de producción sea baja; pero si la cantidad de producción es alta, entonces la variedad de productos será baja, como se ilustra con la banda diagonal en la figura 1.2.

Aunque se ha identificado la variedad de productos como un parámetro cuantitativo (número de tipos diferentes de productos que hace la planta o la compañía), éste es mucho menos exacto que la cantidad de producción ya que los detalles en que difieren los diseños

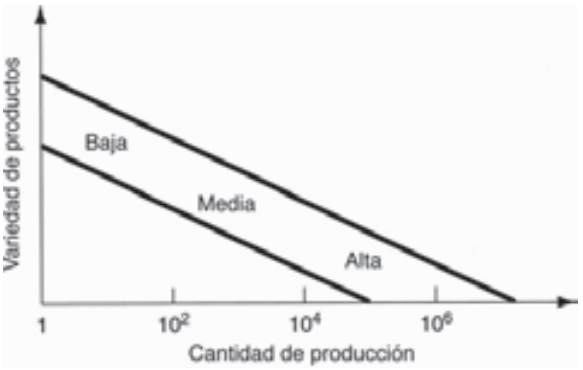


FIGURA 1.2 Relación entre la variedad de productos y la cantidad de producción en la manufactura de productos discretos.

no se capturan sólo con el número de diseños distintos. Las diferencias entre un automóvil y un acondicionador de aire son mucho mayores que entre este último y una bomba de calor. Y dentro de cada tipo de producto existen diferencias entre modelos específicos.

El grado de las diferencias del producto puede ser pequeño o grande, como se manifiesta en la industria automotriz. Cada una de las compañías automotrices de Estados Unidos. produce dos o tres modelos de automóvil distintos en la misma planta de ensamblado, aunque los estilos de la carrocería y otras características del diseño son virtualmente las mismas. En plantas distintas, la compañía construye camiones pesados. Para describir dichas diferencias de la variedad de productos, se utilizan los términos "suave" y "dura". La ***variedad suave de productos*** ocurre cuando sólo existen diferencias pequeñas en la variedad de productos, como aquellas entre autos fabricados en la misma línea de producción. En un producto ensamblado, la variedad de productos se caracteriza por una proporción elevada de piezas comunes entre los modelos. La ***variedad dura de productos*** sucede cuando éstos varían en forma sustancial, y hay pocas piezas en común, o ninguna. La diferencia entre un automóvil y un camión es dura.

1.1.3 Capacidad de manufactura

Una planta de manufactura consiste en un conjunto de ***procesos*** y ***sistemas*** (y personas, por supuesto) diseñados para transformar cierto rango limitado de ***materiales*** en productos de valor incrementado. Esos tres bloques constitutivos —materiales, procesos y sistemas— integran la materia de la manufactura moderna. Entre esos factores existe una interdependencia fuerte. Una compañía manufacturera no puede hacer todo. Sólo debe hacer ciertas cosas y hacerlas bien. La ***capacidad de manufactura*** se refiere a las limitaciones técnicas y físicas de una empresa de manufactura y cada una de sus plantas. Es posible identificar varias dimensiones de dicha capacidad: 1) capacidad tecnológica de proceso, 2) tamaño físico y peso del producto, y 3) capacidad de producción.

Capacidad tecnológica de proceso La ***capacidad tecnológica de proceso*** de una planta (o compañía) es el conjunto de procesos de manufactura con que dispone. Ciertas plantas realizan operaciones de maquinado, otras convierten lingotes de acero en lámina, y unas más construyen automóviles. Una planta de maquinado no puede laminar acero, y una planta de laminación no puede fabricar autos. La característica subyacente que distingue a esas plantas son los procesos que pueden ejecutar. La capacidad de procesamiento tecnológico se relaciona de cerca con el tipo de material. Ciertos procesos de manufactura se ajustan a ciertos materiales, mientras que otros se adaptan a unos distintos. Al especializarse en determinado proceso o grupo de procesos, la planta se especializa en forma simultánea en ciertos tipos de materiales. Las capacidades tecnológicas de proceso incluyen no sólo los procesos físicos, sino también la experiencia que tiene el personal de la planta en dichas tecnologías. Las compañías deben concentrarse en el diseño y la manufactura de productos que son compatibles con su capacidad tecnológica de proceso.

Limitaciones físicas del producto Un segundo aspecto de la capacidad de manufactura lo impone el ***producto físico***. Una planta con un conjunto dado de procesos está limitada en los términos del tamaño y el peso de los productos que pueden alojarse. Los productos grandes y pesados son difíciles de mover. Para hacerlo, la planta debe equiparse con grúas con la capacidad de carga requerida. Piezas y productos pequeños que se fabrican en cantidades grandes se trasladan por medio de bandas u otros medios. La limitante del tamaño y peso de un producto también se extiende a la capacidad física del equipo de manufactura. Las máquinas de producción tienen tamaños distintos. Las más grandes deben utilizarse para procesar piezas grandes. El conjunto del equipo de producción, manejo de materiales, capacidad de almacenamiento y tamaño de planta, debe planearse para los productos que están dentro de cierto rango de tamaño y peso.

Capacidad de producción Una tercera limitante de la capacidad de una planta de manufactura, es la cantidad de producción que puede obtenerse en un periodo de tiempo dado (por ejemplo, mes o año). Es común llamar a dicha limitante de cantidad ***capacidad de planta***, o ***capacidad de producción***, y se define como la tasa máxima de producción que una planta puede alcanzar en condiciones dadas de operación. Estas condiciones se refieren al número de turnos por semana, horas por turno, niveles de la mano de obra directa, entre otros. Esos factores representan entradas de la planta. Dadas estas entradas, ¿cuál es la salida que puede generar la empresa?

Por lo general, la capacidad de planta se mide en términos de las unidades producidas, tales como las toneladas de acero que produce al año una fundición, o el número de automóviles producido por una planta de ensamblado final. En estos casos, las producciones son homogéneas. En los casos en que las unidades de producción no son homogéneas, otros factores más apropiados de medición, son las horas hombre de capacidad productiva en un taller de maquinado que produce piezas varias.

Los materiales, procesos y sistemas son los bloques constitutivos básicos de la manufactura, y las tres amplias áreas temáticas de este libro. A continuación se dará un panorama de dichos temas.

1.2 LOS MATERIALES EN LA MANUFACTURA

La mayor parte de los materiales para ingeniería se clasifican en una de tres categorías básicas: 1) ***metales***, 2) ***cerámicos*** y 3) ***polímeros***. Sus características químicas son diferentes, sus propiedades mecánicas y físicas no se parecen y afectan los procesos de manufactura susceptibles de emplearse para obtener productos de ellos. Además de las tres categorías básicas, hay 4) ***compuestos*** —mezclas no homogéneas de los otros tres tipos fundamentales. La relación entre los cuatro grupos se ilustra en la figura 1.3. En esta sección se revisa a dichos materiales. En los capítulos 6 a 9, se estudian con más detalle los cuatro tipos de material.

1.2.1 Metales

Los metales que se emplean en la manufactura, por lo general son ***aleaciones***, que están compuestos de dos o más elementos, con al menos uno en forma metálica. Los metales se dividen en dos grupos básicos: 1) ferrosos y 2) no ferrosos.

Metales ferrosos Los ***metales ferrosos*** se basan en el hierro: el grupo incluye acero y hierro colado. Dichos metales constituyen el grupo comercial más importante, más de las tres cuartas partes del peso total de los metales de todo el mundo. El hierro puro tiene un uso comercial limitado, pero cuando se mezcla con carbono tiene más usos y mayor valor

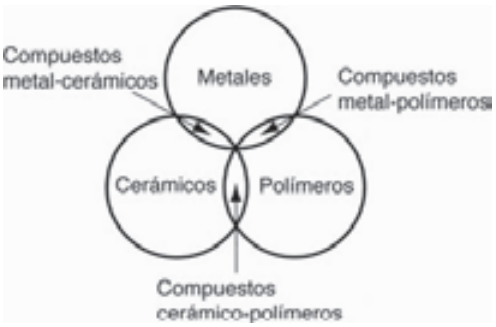


FIGURA 1.3 Diagrama de Venn que muestra los tres tipos de materiales básicos más los compuestos.

comercial que cualquier otro metal. Las aleaciones de hierro y carbono forman acero y hierro colado.

El ***acero*** se define como una aleación de hierro-carbono que contiene 0.02%-2.11% de carbono. Es la categoría más importante dentro del grupo de metales ferrosos. Es frecuente que su composición incluya otros elementos de la aleación, tales como manganeso, cromo, níquel y molibdeno, para mejorar las propiedades del metal. Las aplicaciones del acero incluyen la construcción (por ejemplo: puentes, vigas tipo I, y clavos), transporte (camiones, rieles y equipo rodante para vía férrea), y productos de consumo (automóviles y aparatos).

El ***hierro colado*** es una aleación de fierro y carbono (2%-4%) que se utiliza en el moldeado (sobre todo en el moldeado en arena verde). El silicio también está presente en la aleación (en cantidades que van de 0.5% a 3%), y es frecuente que también se agreguen otros elementos para obtener propiedades deseables en el elemento fundido. El hierro colado se encuentra disponible en distintas formas, de las que la más común es el hierro colado gris; sus aplicaciones incluyen bloques y cabezas para motores de combustión interna.

Metales no ferrosos Los metales no ferrosos incluyen los demás elementos metálicos y sus aleaciones. En casi todos los casos, las aleaciones tienen más importancia comercial que los metales puros. Los metales no ferrosos incluyen los metales puros y aleaciones de aluminio, cobre, oro, magnesio, níquel, plata, estaño, titanio, zinc y otros metales.

1.2.2 Cerámicos

Un **cerámico** se define como un compuesto que contiene elementos metálicos (o semimetálicos) y no metálicos. Los elementos no metálicos comunes son oxígeno, nitrógeno y carbono. Los cerámicos incluyen una variedad de materiales tradicionales y modernos. Los productos cerámicos tradicionales, algunos de los cuales se han utilizado durante miles de años, incluyen: ***arcilla*** (se dispone de ella en abundancia, consiste en partículas finas de silicatos de aluminio hidratados y otros minerales que se utilizan en la fabricación de ladrillos, baldosas y vajillas); ***sílice*** (es la base para casi todos los productos de vidrio); y ***alúmina*** y ***carburo de silicón*** (dos materiales abrasivos que se emplean en el rectificado). Los cerámicos modernos incluyen algunos de los materiales anteriores, tales como la ***alúmina***, cuyas propiedades se mejoran en varios modos a través de métodos modernos de procesamiento. Los más nuevos incluyen ***carburos*** —los carburos metálicos tales como el carburo de tungsteno y el de titanio, se emplean mucho como materiales para herramientas de corte—, y los ***nitruros*** —los nitruros metálicos y semimetálicos como el nitruro de titanio y el de boro, se utilizan como herramientas de corte y abrasivos para rectificar.

Con fines de procesamiento, los cerámicos se dividen en 1) cerámicos cristalinos y 2) vidrios. Para cada tipo se requieren diferentes métodos de manufactura. Los cerámicos cristalinos se forman de distintos modos a partir de polvos que después se calientan (a una temperatura inferior del punto de fusión a fin de lograr la unión entre los polvos). Los cerámicos vidriados (vidrio, sobre todo) se mezclan y funden para después formarse en procesos tales como el vidrio soplado tradicional.

1.2.3 Polímeros

Un ***polímero*** es un compuesto formado por unidades estructurales repetidas denominadas ***meros***, cuyos átomos comparten electrones que forman moléculas muy grandes. Por lo general, los polímeros consisten en carbono más uno o más elementos tales como hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Los polímeros se dividen en tres categorías: 1) polímeros termoplásticos o termovariables, 2) polímeros termoestables o termofijos, y 3) elastómeros.

Los ***polímeros termoplásticos*** pueden sujetarse a ciclos múltiples de calentamiento y enfriamiento sin que se altere en forma sustancial la estructura molecular del polímero. Los termoplásticos comunes incluyen polietileno, poliestireno, cloruro de polivinilo y nailon. Los ***polímeros termoestables*** sufren una transformación química (curado) hacia una estructura rígida después de haberse enfriado a partir de una condición plástica calentada; de ahí el nombre de "termoestables". Los miembros de este tipo incluyen los fenoles, resinas amino y epóxicas. Aunque se emplea el nombre "termoestable", algunos de dichos polímeros se curan por medio de mecanismos distintos del calentamiento. Los ***elastómeros*** son polímeros que muestran un comportamiento muy elástico; de ahí el nombre de elastómeros. Incluyen el caucho natural, neopreno, silicón y poliuretano.

1.2.4 Compuestos

Los compuestos no constituyen en realidad una categoría separada de materiales; son mezclas de los otros tres tipos. Un ***compuesto*** es un material que consiste en dos o más fases que se procesan por separado y luego se unen para lograr propiedades superiores a las de sus constituyentes. El término ***fase*** se refiere a una masa homogénea de material, tal como la agregación de granos de estructura celular idéntica y unitaria en un metal sólido. La estructura usual de un compuesto consiste en partículas o fibras de una fase mezclada en una segunda que se llama la ***matriz***.

Los compuestos se encuentran en la naturaleza (por ejemplo, madera), y se pueden producir en forma sintética. El tipo sintetizado es de mayor interés aquí, e incluye fibras de vidrio en una matriz de polímero, por ejemplo fibra reforzada de plástico; fibras de polímero de un tipo en una matriz de un segundo polímero, tal como un compuesto epóxico de Kevlar; y un cerámico en una matriz metálica, tal como carburo de tungsteno en una sustancia aglutinante de cobalto para formar una herramienta de corte a base de carburo cementado.

Las propiedades de un compuesto dependen de sus componentes, las formas físicas de éstos, y la manera en que se combinan para formar el material final. Algunos compuestos combinan una resistencia elevada con el poco peso, y son apropiadas para aplicarlos en componentes aeronáuticos, carrocerías de automóviles, cascos de barcos, raquetas de tenis, y cañas de pescar. Otros compuestos son fuertes, duros y capaces de conservar dichas propiedades a temperaturas elevadas, por ejemplo, las herramientas cortadoras de carburo cementado.

1.3 PROCESOS DE MANUFACTURA

Los procesos de manufactura se dividen en dos tipos básicos: 1) las operaciones del proceso, y 2) las del ensamblado. Una ***operación del proceso*** hace que un material de trabajo pase de un estado de acabado a otro más avanzado que está más cerca del producto final que se desea. Se agrega valor cambiando la geometría, las propiedades o la apariencia del material de inicio. En general, las operaciones del proceso se ejecutan sobre partes discretas del trabajo, pero algunas también son aplicables a artículos ensamblados. Una ***operación de ensamblado*** une dos o más componentes a fin de crear una entidad nueva, llamada ensamble, subensamble o algún otro término que se refiera al proceso de unión (por ejemplo, un ensamble soldado se denomina ***soldadura***). En la figura 1.4 se presenta una

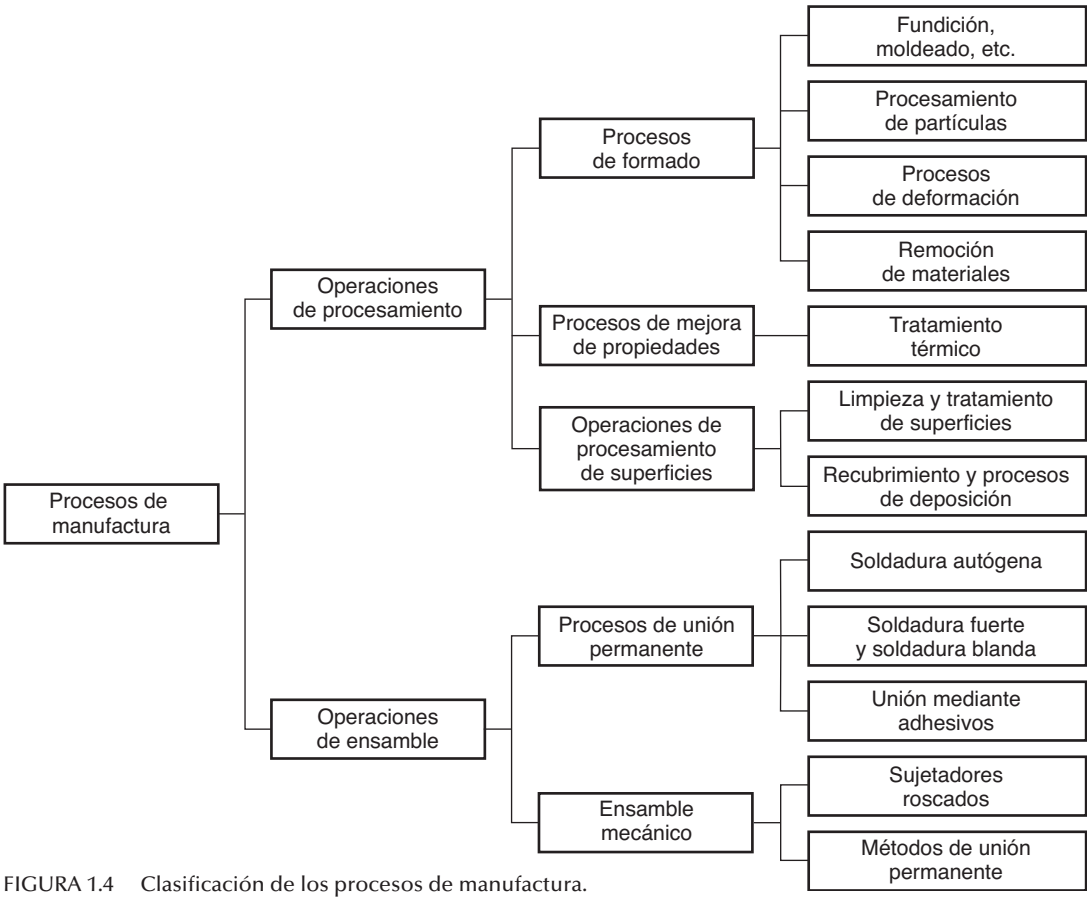


FIGURA 1.4 Clasificación de los procesos de manufactura.

clasificación de procesos de manufactura. La mayor parte de los procesos de manufactura que se estudian en este libro se pueden observar en el disco de video digital (DVD) que viene adjunto. A lo largo del texto se dan avisos sobre dichos cortos de video. Algunos de los procesos básicos que se emplean en la manufactura moderna datan de la antigüedad (véase la nota histórica 1.2).

Nota histórica 1.2 *Materiales y procesos de manufactura*

En tanto que la mayor parte de los desarrollos históricos que constituyen la práctica moderna de la manufactura han tenido lugar sólo durante los últimos siglos (véase la nota histórica 1.1), varios de los procesos básicos de fabricación datan del periodo Neolítico (alrededor de 8000-3000 a. C.). Fue durante ese periodo que se desarrollaron procesos tales como los siguientes: tallar y ***trabajar la madera***, formar a mano y ***cocer*** vasijas de arcilla, ***tallar*** y ***pulir*** piedra, ***hilar*** y ***tejer*** textiles, y ***teñir*** la ropa.

La metalurgia y el trabajo de los metales también comenzaron en el Neolítico, en Mesopotamia y otras áreas alrededor del Mediterráneo. Se extendió hacia regiones de Europa y Asia o se desarrolló en ellas de manera independiente. El ser humano primitivo encontraba el oro en la naturaleza en forma relativamente pura. Podía ***martillarlo*** para darle forma. Es probable que el cobre sea el primer metal que se extraía de yacimientos, lo que requería del ***fundido*** como técnica de procesamiento. El cobre no podía ser martillado con facilidad debido a que se endurecía, en su lugar, se le daba forma por medio de la ***fundición*** (véase la nota histórica 10.1). Otros metales utilizados durante este periodo fueron la plata y el estaño. Se descubrió que la aleación de cobre con estaño producía un metal más fácil de trabajar que el cobre puro (podía usarse tanto la fundición como el martillado). Esto anunció el periodo importante que se conoce como la **Edad de Bronce** (alrededor de 3500-1500 a. C.).

El hierro también fue fundido por primera vez durante la Edad de Bronce. Es posible que los meteoritos hayan sido una fuente de ese metal, pero también se explotaban yacimientos. Las temperaturas requeridas para reducir el mineral de hierro a metal son significativamente más

elevadas que aquellas que se requieren para el cobre, lo que hace más difíciles las operaciones de los hornos. Por la misma razón, otros métodos de procesamiento también eran más difíciles. Los primeros herreros aprendieron que cuando ciertas clases de hierro (los que contenían cantidades pequeñas de carbono) se ***calentaban*** lo suficiente y después se ***enfriaban por inmersión***, se volvían muy duras. Esto permitía formar un borde muy afilado y cortante en los cuchillos y armas, pero también hacía que el metal fuera quebradizo. Podía incrementarse la dureza con el recalentamiento a una temperatura más baja, proceso conocido como ***templado***. Lo que se ha descrito es, por supuesto, el ***tratamiento térmico*** del acero. Las propiedades superiores del acero ocasionaron que sustituyera al bronce en muchas aplicaciones (armamento, agricultura y artefactos mecánicos). El periodo de su utilización se denominó posteriormente como **E*dad de* H*ierro*** (comenzó alrededor de 1000 a. C.). No fue hasta mucho después, bien entrado el siglo XIX, que la demanda de acero creció en forma significativa y se inventaron técnicas más modernas para su fabricación (véase la nota histórica 6.1).

Los principios de la tecnología de las máquinas herramienta ocurrieron durante la Revolución Industrial. En el periodo de 1770 a 1850, se crearon máquinas herramienta para la mayoría de los ***procesos de remoción de material*** convencionales, tales como ***perforar***, ***tornear***, ***rectificar***, ***fresar***, ***perfilar*** y ***cepillar*** (véase la nota histórica 22.1). Muchos de los procesos individuales anteceden en siglos a las máquinas herramienta; por ejemplo, perforar y aserrar (madera) datan de tiempos antiguos, y tornear (madera) se remonta a la época de Cristo.

Los métodos de ensamble se empleaban en las culturas antiguas para hacer barcos, armas, herramientas, implementos agrícolas, maquinaria, carruajes y carretas, muebles y prendas de ropa. Los procesos incluían ***sujetar*** con lianas y cuerdas, ***remachar*** y ***clavar***, y ***soldar***. Aproximadamente en tiempos de Cristo, se desarrollaron la ***soldadura con forja*** y la ***unión mediante adhesivos***. El uso extendido de tornillos, remaches y tuercas como sujetadores —tan común en el ensamble de hoy—, requirió la creación de máquinas herramienta capaces de cortar con exactitud las formas helicoidales que se requerían (por ejemplo, el torno de Maudsley para cortar tornillos, 1800). No fue sino hasta alrededor de 1900 que se empezaron a desarrollar los procesos de ***soldadura autógena por fusión*** como técnicas de ensamble (véase la nota histórica 30.1).

El caucho natural fue el primer polímero que se usó en la manufactura (si se excluye la madera, que es un polímero compuesto). El proceso de ***vulcanización***, descubierto por Charles Goodyear en 1839, hizo del caucho un material útil para la ingeniería (véase la nota histórica 8.2). Los desarrollos posteriores incluían a los plásticos tales como el nitrato de celulosa en 1870, la baquelita en 1900, el cloruro de polivinilo en 1927, el polietileno en 1932, y el nailon al final de la década de 1930 (véase la nota histórica 8.1). Los requerimientos de procesamiento para los plásticos condujeron al desarrollo del ***moldeo por inyección*** (con base en el vaciado en molde, uno de los procesos de fundición de metales) y otras técnicas para dar forma a los polímeros.

Los productos electrónicos han impuesto demandas inusuales a la manufactura en cuanto a miniaturización. La evolución de la tecnología ha ido en dirección de agrupar más y más dispositivos en un área cada vez más pequeña —en algunos casos, un millón de transistores en una pieza plana de material semiconductor que sólo mide 12 mm (0.50 in) por lado. La historia del procesamiento y el montaje electrónicos se remonta a sólo unas cuantas décadas (véanse las notas históricas 35.1, 36.1 y 36.2).

1.3.1 Operaciones de procesamiento

Una operación de procesamiento utiliza energía para modificar la forma, las propiedades físicas o la apariencia de una pieza, a fin de agregar valor al material. Las formas de la energía incluyen la mecánica, térmica, eléctrica y química. La energía se aplica en forma controlada por medio de maquinaria y herramientas. También se requiere de la energía humana, pero los trabajadores se emplean por lo general para controlar las máquinas, supervisar las operaciones y cargar y descargar las piezas antes y después de cada ciclo de operación. En la figura 1.1*a*) se ilustra un modelo general de operación de procesamiento. El material alimenta al proceso, las máquinas y herramientas aplican energía para transformar el material, y la pieza terminada sale del proceso. La mayoría de las operaciones de producción generan desperdicios o sobrantes, sea como un aspecto natural del proceso (por ejemplo, remoción de material como en el maquinado) o en forma de piezas defectuosas ocasionales. Un objetivo importante de la manufactura es reducir el desperdicio en cualquiera de esas formas.

Por lo general se requiere más de una operación de procesamiento para transformar el material de inicio a su forma final. Las operaciones se llevan a cabo en la secuencia particular que se requiere para alcanzar la geometría y condición definidas por las especificaciones del diseño.

Se distinguen tres categorías de operaciones de procesamiento: 1) operaciones de formado, 2) operaciones de mejoramiento de una propiedad, y 3) operaciones de procesamiento de una superficie. Las ***operaciones de formado*** alteran la geometría del material inicial de trabajo por medio de varios métodos. Los procesos comunes de formado incluyen al moldeado, la forja y el maquinado. Las ***operaciones de mejoramiento de una propiedad*** agregan valor al material con la mejora de sus propiedades físicas sin cambio de la forma. El ejemplo más común es el tratamiento térmico. Las ***operaciones de procesamiento de una superficie*** se ejecutan para limpiar, tratar, recubrir o depositar material sobre la superficie exterior del trabajo. Ejemplos comunes del recubrimiento son el cromado y el pintado. Los procesos de formado se estudian en las partes III a VI, y corresponden a las cuatro categorías principales de los procesos de formado que se muestran en la figura 1.4. Los procesos de mejoramiento de una propiedad y de procesamiento de una superficie se estudian en la parte VII.

Procesos de formado La mayor parte de los procesos de formado aplican calor o fuerzas mecánicas o una combinación de ambas para que surtan un efecto en la geometría del material de trabajo. Hay varias maneras de clasificar los procesos de formado. La clasificación que se utiliza en este libro se basa en el estado del material de inicio, y tiene cuatro categorías: 1) ***procesos de moldeado***, en los que el material con que se comienza es un ***líquido*** calentado o ***semifluido*** que se enfría y solidifica para formar la geometría de la pieza; 2) ***procesos de sinterizado o procesamiento de partículas***, en los que los materiales de inicio son ***polvos***, que se forman y calientan con la geometría deseada; 3) ***procesos de deformación***, en los que el material con que se comienza es un ***sólido dúctil*** (metal, por lo común) que se deforma para crear la pieza; y 4) ***procesos de remoción de material***, en los que el material de inicio es un ***sólido*** (dúctil o quebradizo), a partir del cual se retira material de modo que la pieza resultante tenga la geometría que se busca.

En la primera categoría, el material de inicio se calienta lo suficiente para transformarlo a un líquido o a un estado altamente plástico (semifluido). Casi todos los materiales se pueden procesar de esta manera. Los metales, vidrios cerámicos y plásticos pueden calentarse a temperaturas suficientemente elevadas para convertirlos en líquidos. El material en forma líquida o semifluida se vacía o se le fuerza para que fluya en una cavidad llamada molde, donde se enfría hasta la solidificación, con lo que adopta la forma del molde. La mayoría de procesos que operan de esta manera se denominan fundición o moldeado. ***Fundición*** es el término que se emplea para los metales, y ***moldeado*** es el nombre común usado para plásticos. En la figura 1.5 se ilustra esta categoría de procesos de formado.

En el ***procesamiento de partículas***, el material de inicio son polvos metálicos o cerámicos. Aunque estos dos materiales son muy diferentes, los procesos para darles forma a partir del procesamiento de partículas son muy similares. La técnica común involucra la presión y el sinterizado, que se ilustran en la figura 1.6, en las que los polvos primero se fuerzan hacia una cavidad llamada matriz o dado a una gran presión, y después se calientan para unir las partículas individuales.

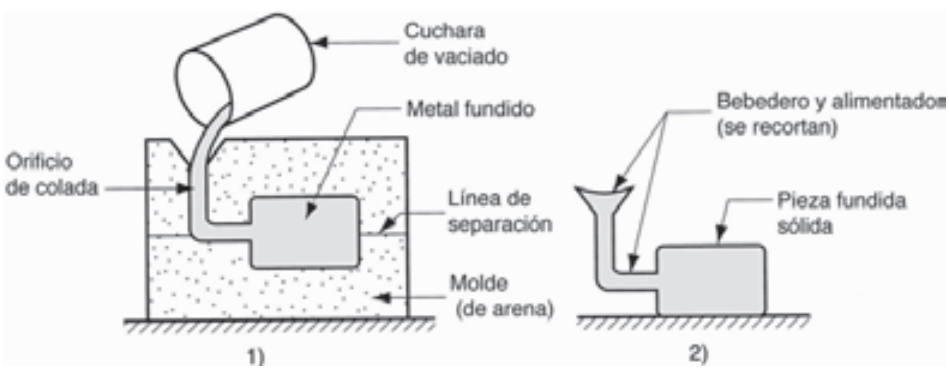


FIGURA 1.5 Los procesos de fundición y moldeado comienzan con un material de trabajo calentado hasta alcanzar un estado fluido o semifluido. Los procesos consisten en 1) vaciar el fluido en un molde, y 2) permitir que el fluido se enfríe hasta solidificarse, después de lo cual la pieza sólida se retira del molde.

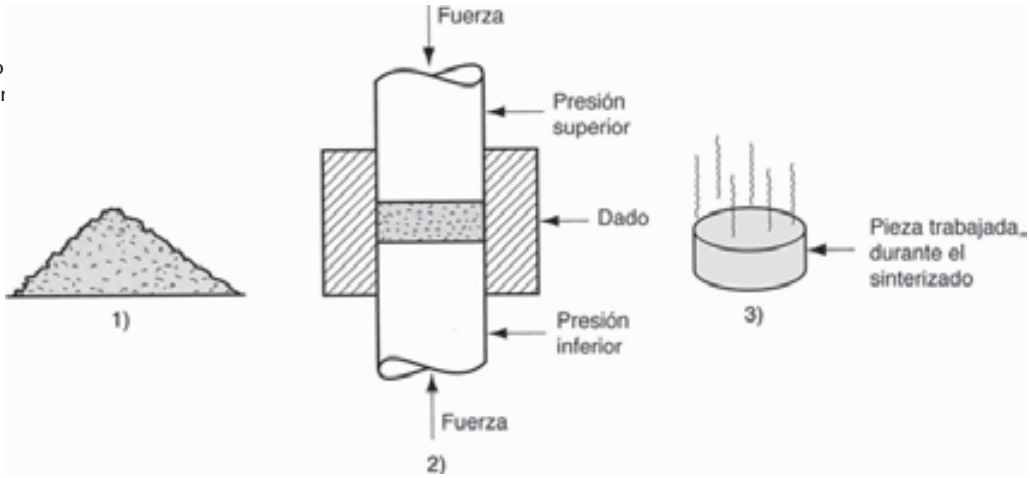


FIGURA 1.6 Procesamiento de partículas 1) el material de inicio es un polvo; el proceso usual consiste en 2) presionar y 3) sinterizar.

En los ***procesos de deformación***, la pieza inicial que se trabaja se conforma por medio de la aplicación de fuerzas que exceden la resistencia del material. Para que el material se forme de este modo, debe ser suficientemente dúctil para evitar que se fracture durante la deformación. Para incrementar su ductilidad (y por otras razones), es común que antes de darle forma, el material de trabajo se caliente hasta una temperatura por debajo del punto de fusión. Los procesos de deformación se asocian de cerca con el trabajo de los metales, e incluyen operaciones tales como el ***forjado*** y la ***extrusión***, que se ilustran en la figura 1.7.

Los ***procesos de remoción de material*** son operaciones que retiran el exceso de material de la pieza de trabajo con que se inicia, de modo que la forma que resulta tiene la geometría buscada. Los procesos más importantes de esta categoría son las operaciones de ***maquinado*** tales como ***torneado***, ***perforado*** y ***fresado***, que se muestran en la figura 1.8. Estas operaciones de corte se aplican más comúnmente a metales sólidos, y se llevan a cabo con el empleo de herramientas de corte más duras y fuertes que el metal de trabajo. Otro proceso común de esta categoría es el ***rectificado***. Otros procesos de remoción de material se conocen como ***no tradicionales*** debido a que utilizan láser, haces de electrones, erosión química, descargas eléctricas o energía electroquímica para retirar el material, en vez de herramientas de corte o rectificado.

Cuando una pieza inicial de trabajo se transforma en una geometría subsecuente, es deseable minimizar el desperdicio y los desechos. Ciertos procesos de conformación son más eficientes que otros, en términos de conservación del material. Los procesos de remoción de materiales (por ejemplo, el maquinado) tienden a desperdiciar material, tan sólo por la forma en que operan. El material que se retira de la forma inicial se desperdicia, al menos en lo referente a la operación unitaria. Otros procesos, tales como ciertas operaciones de fundición y moldeado, con frecuencia convierten casi el 100% del material con que se comienza en el producto final. Los procesos de manufactura que transforman casi todo el material de inicio

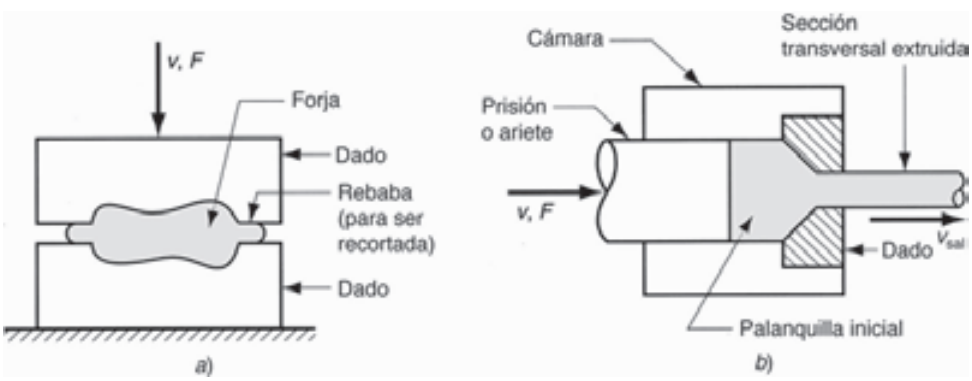


FIGURA 1.7 Algunos procesos de deformación comunes: *a*) **forjado**, en los que dos herramentales llamados dados comprimen la pieza de trabajo, lo que ocasiona que adopte la forma de los dos dados; y *b*) **extrusión**, en la que se fuerza a una palanquilla a fluir a través de un dado, por lo que adopta la sección transversal del orificio.

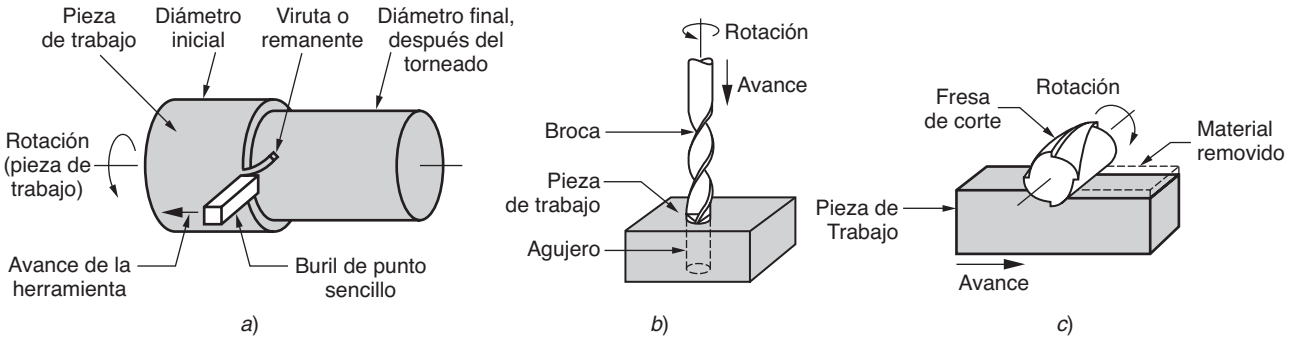


FIGURA 1.8 Operaciones comunes de maquinado: *a)* ***torneado***, en el que una herramienta de corte de un filo retira metal de una pieza de trabajo que gira, a fin de reducir su diámetro; *b)* ***taladrado***, en la que una broca en rotación avanza dentro de la pieza de trabajo, con lo que crea un agujero redondo; y *c)* ***fresado***, en la que una pieza de trabajo se hace avanzar por un cortador giratorio con filos múltiples.

en el producto, y no requieren maquinado posterior para alcanzar la geometría definitiva de la pieza, se llaman ***procesos de forma neta***. Otros procesos que requieren de un maquinado mínimo para producir la forma final, reciben el nombre de ***procesos de forma casi neta***.

Procesos de mejoramiento de una propiedad El segundo tipo principal de procesamiento de una pieza se lleva a cabo para mejorar las propiedades mecánicas o físicas del material de trabajo. Estos procesos no alteran la forma de la pieza, salvo de manera accidental en algunos casos. Los procesos más importantes de mejoramiento de una propiedad involucran los ***tratamientos térmicos***, que incluyen varios procesos de recocido y templado de metales y vidrios. El ***sinterizado*** de metales y cerámicos pulverizados, que se mencionó antes, también es un tratamiento a base de calor que aglutina una pieza de metal pulverizado y comprimido.

Procesamiento de una superficie Las operaciones de procesamiento de una superficie incluyen 1) limpieza, 2) tratamientos de una superficie, y 3) procesos de recubrimiento y deposición de una película delgada. La ***limpieza*** incluye procesos tanto químicos como mecánicos para retirar de la superficie suciedad, aceite y otros contaminantes. Los ***tratamientos de una superficie*** incluyen trabajos mecánicos tales como granallado y chorro de arena, así como procesos físicos tales como difusión e implantación de iones. Los procesos de ***recubrimiento*** y ***deposición de una película delgada*** aplican una capa de material a la superficie exterior de la pieza que se trabaja. Los procesos comunes de recubrimiento incluyen la ***galvanoplastia*** y ***anodización*** del aluminio, el ***recubrimiento*** orgánico (llamado ***pintado***), y el ***barnizado*** de porcelana. Los procesos de deposición de película incluyen la ***deposición física y química de vapor (PVD, QVD)***, a fin de formar recubrimientos de varias sustancias delgadas en extremo.

Se han adaptado varias operaciones severas de procesamiento de superficies para fabricar materiales semiconductores de los circuitos integrados para la microelectrónica. Esos procesos incluyen deposición química de vapor, deposición física de vapor y oxidación. Se aplican en áreas muy localizadas de la superficie de una oblea delgada de silicio (u otro material semiconductor) con objeto de crear el circuito microscópico.

1.3.2 Operaciones de ensamblado

El segundo tipo básico de operaciones de manufactura es el ***ensamblado***, en el que dos o más piezas separadas se unen para formar una entidad nueva. Dichos componentes se conectan ya sea en forma permanente o semipermanente. Los procesos de unión permanente incluyen la ***soldadura homogénea***, ***soldadura fuerte***, ***soldadura blanda***, y ***unión mediante adhesivos***. Forman una unión de componentes que no puede separarse con facilidad. Los métodos de ***ensamblado mecánico*** existen para sujetar dos (o más) partes en una pieza que se puede

desarmar a conveniencia. El uso de tornillos, remaches y otros ***sujetadores mecánicos***, son métodos tradicionales importantes de esta categoría. Otras técnicas de ensamblado mecánico que forman una conexión permanente incluyen los ***remaches***, ***ajustes de presión*** y ***ajustes de expansión***. En el ensamble de productos electrónicos, se emplean métodos de unión y sujeción especiales. Algunos de los métodos son idénticos a los procesos anteriores o adaptaciones de éstos, por ejemplo, la soldadura blanda. El ensamblado electrónico se relaciona en primer lugar con el ensamble de componentes tales como paquetes de circuitos integrados a tarjetas de circuitos impresos, para producir los circuitos complejos que se utilizan en tantos productos de la actualidad. En la parte VIII se estudian los procesos de unión y ensamblado, y en la IX, las técnicas de ensamblado especiales para la electrónica.

1.3.3 Máquinas de producción y herramientas

Las operaciones de manufactura se llevan a cabo con el uso de maquinaria y herramienta (y personas). El empleo extenso de maquinaria en la manufactura comenzó con la Revolución Industrial. Fue en esa época que las máquinas cortadoras de metal se desarrollaron y comenzaron a utilizarse en forma amplia. Recibían el nombre de ***máquinas herramienta*** que eran máquinas impulsadas por energía para operar herramientas de corte que antes se usaban con las manos. Las máquinas herramienta modernas se describen con la misma definición básica, excepto que la energía es eléctrica en lugar de hidráulica o de vapor, y su nivel de precisión y automatización es mucho mayor hoy día. Las máquinas herramienta están entre las más versátiles de todas las que se aplican en la producción. Se emplean no sólo para hacer piezas de productos para el consumidor, sino también para elaborar componentes para otras máquinas de la producción. Tanto en un sentido histórico como de reproducción, la máquina herramienta es la madre de toda la maquinaria.

Otras máquinas para la producción incluyen ***prensas*** para las operaciones de estampado, ***martillos forjadores*** para forjar, ***molinos de laminación*** para la fabricar lámina metálica, ***máquinas soldadoras*** para soldar, y ***máquinas de inserción*** para insertar componentes electrónicos en tarjetas de circuitos impresos. Por lo general, el nombre del equipo antecede al nombre del proceso.

El equipo de producción puede ser de propósito general o especial. El ***equipo de propósito general*** es más versátil y adaptable a una variedad de trabajos. Se halla disponible en el comercio para cualquier compañía manufacturera que quiera invertir en él. El ***equipo de propósito especial*** por lo general está diseñado para producir una pieza o un producto específico en cantidades muy grandes. La economía de la producción en masa justifica las grandes inversiones en maquinaria de propósito especial a fin de alcanzar eficiencias elevadas en ciclos cortos de tiempo. Ésta no es la única razón de ser del equipo de propósito especial, pero es la principal. Otra razón es que el proceso puede ser único y el equipo comercial no se encuentre disponible. Algunas compañías con requerimientos únicos de proceso desarrollan su propio equipo de propósito especial.

Por lo general, la maquinaria de producción requiere ***herramientas*** que se integren en el equipo para el trabajo de la pieza o producto en particular. En muchos casos, el herramental debe diseñarse específicamente para la configuración de la pieza o producto. Cuando se utiliza con equipo de propósito general, está diseñada para ser intercambiable. Las herramientas se sujetan a la máquina para cada tipo de producto y se fabrica el volumen de producción. Al terminar, se cambian las herramientas para el tipo siguiente de producto por trabajar. Cuando se emplean con máquinas de propósito especial, es frecuente que las herramientas estén diseñadas como parte integral de la máquina. Debido a que es probable que para la producción en masa se empleen máquinas de propósito especial, las herramientas quizá nunca cambien, excepto para reemplazar componentes usados o reparar superficies desgastadas.

El tipo de herramientas depende del tipo de proceso de manufactura. En la tabla 1.4 se enlistan ejemplos de herramientas especiales que se emplean en operaciones diversas. Los detalles se dan en los capítulos en que se estudian los procesos respectivos.

TABLA 1.4 Equipo de producción y las herramientas que se emplean para varios procesos de manufactura.

Proceso	Equipo	Herramientas especiales (función)
Fundición	[a]	Molde (cavidad para metal fundido)
Moldeado	Máquina de moldeado	Molde (cavidad para polímeros calientes)
Laminado	Molino de laminación	Rodillo (reduce espesor de la pieza)
Forjado	Martillo o prensa forjadora	Dado o matriz (comprime el trabajo para darle forma)
Extrusión	Prensa	Dado de extrusión (reduce la sección transversal)
Estampado	Prensa	Matrices y punzones (corte y conformación de lámina metálica)
Maquinado	Máquina herramienta	Herramienta de corte (remoción de material) Accesorio (sujeta la pieza de trabajo) Guía (sujeta la pieza y guía la herramienta)
Rectificado	Rectificadora	Rueda de rectificado (remoción de material)
Soldadura	Soldadora	Electrodo (funde el metal que se trabaja) Sujetador (sujeta las piezas durante la soldadura)

[a] Tipos distintos de dispositivos y equipos para fundir (véase el capítulo 11).

1.4 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Para operar con eficacia, una empresa de manufactura debe tener sistemas que le permitan llevar a cabo con eficiencia su tipo de producción. Los sistemas de producción consisten en personas, equipos y procedimientos diseñados para combinar materiales y procesos que constituyen las operaciones de manufactura de la compañía. Los sistemas de producción se dividen en dos categorías: 1) instalaciones de producción, y 2) sistemas de apoyo a la manufactura. Las ***instalaciones de producción*** se refieren al equipo físico y su arreglo dentro de la fábrica. Los ***sistemas de apoyo a la manufactura*** son los procedimientos utilizados por la compañía para administrar la producción y resolver los problemas técnicos y logísticos que se encuentran en la ordenación de los materiales, el movimiento del trabajo por la fábrica, y asegurar que los productos satisfagan estándares de calidad. Ambas categorías incluyen personas. Son éstas las que hacen que los sistemas funcionen. En general, la mano de obra directa (*trabajadores de cuello azul*) es responsable de operar el equipo de manufactura, y el personal profesional (*trabajadores de cuello blanco*) es el encargado de dar apoyo a la manufactura.

1.4.1 Instalaciones de producción

Las instalaciones de producción consisten en el equipo de producción y el de manejo de materiales. El equipo entra en contacto físico directo con las piezas o ensambles durante su fabricación. Las instalaciones "tocan" el producto. Éstas también incluyen la manera en que el equipo se acomoda dentro de la fábrica —la ***distribución de la planta (layout)—***. Por lo general, el equipo se organiza en agrupamientos lógicos, llamados ***sistemas de manufactura***, tales como una línea de producción automatizada, o una celda de manufactura que consiste en un robot industrial y dos o más máquinas herramienta.

Una compañía de manufactura trata de diseñar sus sistemas de manufactura y organizar sus fábricas para que sirvan a la misión particular de cada planta del modo más eficiente. A lo largo de los años, ciertos tipos de instalaciones de producción han llegado a ser reconocidos como la forma más apropiada de organizar una combinación dada de diversos productos y cantidad de producción, según se estudió en la sección 1.1.2. Se requieren instalaciones diferentes para cada uno de los tres rangos de cantidades anuales de producción.

Producción de bajas cantidades En el rango de cantidad baja (1 a 100 unidades por año), es frecuente utilizar el término ***taller de trabajo*** para describir el tipo de instalación productiva. Un taller hace cantidades bajas de productos especializados y personalizados. Es común

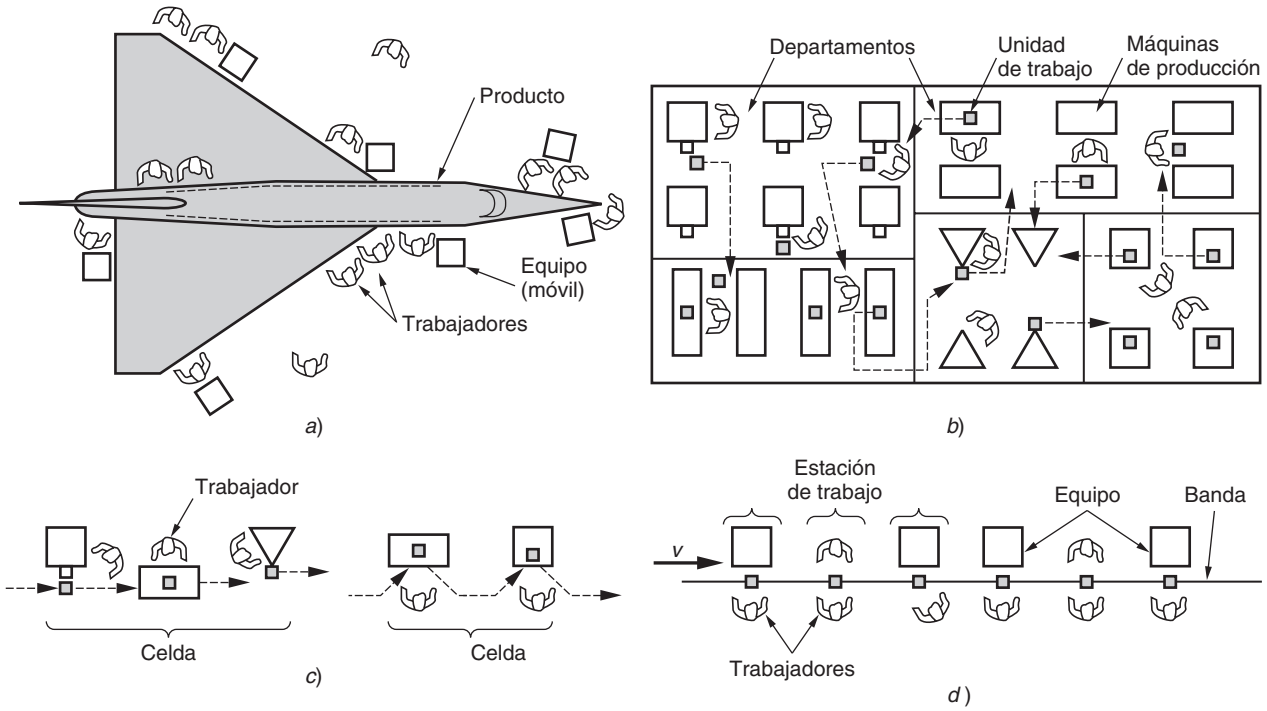


FIGURA 1.9 Tipos distintos de distribución de planta, *a*) distribución de posiciones fijas, *b*) distribución por procesos, *c*) distribución celular, y *d*) distribución por productos.

que éstos sean complejos, tales como cápsulas espaciales, aviones prototipo y maquinaria especial. El equipo de un taller de trabajo es de propósito general y el personal está muy capacitado.

Un taller de trabajo debe diseñarse para tener flexibilidad máxima a fin de poder enfrentar las variaciones amplias que se encuentren en el producto (variedad dura de producto). Si el producto es grande y pesado, y por tanto difícil de mover, es común que permanezca en una sola ubicación durante su fabricación o ensamble. Los trabajadores y el equipo de procesamiento van al producto, en vez de moverlo hacia el equipo. Este tipo de distribución se conoce como ***distribución de posiciones fijas***, como se ve en la figura 1.9*a*). En la situación pura, el producto permanece en un solo sitio durante toda la producción. Algunos ejemplos de tales productos incluyen barcos, aeronaves, locomotoras y maquinaria pesada. En la práctica, por lo general esos productos se construyen en módulos grandes, en ubicaciones únicas, y después los módulos terminados se reúnen para el ensamble final por medio de grúas de gran capacidad.

Con frecuencia, los componentes individuales de esos productos grandes se elaboran en fábricas en las que el equipo está situado de acuerdo con su función o tipo. Este acomodo se denomina ***distribución por procesos***. Como se aprecia en la figura 1.9*b*), los tornos están en un departamento, las fresadoras en otro, y así sucesivamente. Las distintas piezas, cada una de las cuales requiere una secuencia distinta de operaciones, se conducen por los departamentos en el orden particular que se necesita para procesarlas, por lo general por lotes. La distribución por procesos es notable por su flexibilidad; puede albergar una gran variedad de secuencias de operaciones para configuraciones distintas de las piezas. Su desventaja es que la maquinaria y métodos para producir una pieza no están diseñados para alcanzar una eficiencia elevada.

Producción de cantidad media En el rango de cantidad media (100 a 10 000 unidades por año), se distinguen dos tipos diferentes de instalaciones, en función de la variedad de productos. Cuando la variedad del producto es dura, el enfoque principal es la ***producción***

por lotes, en la que se fabrica un lote de un producto, después de lo cual el sistema de manufactura se cambia para producir un lote de otro producto, y así sucesivamente. La tasa de producción del equipo es mayor que la de demanda para cualquier tipo de producto, por lo que el mismo equipo puede compartirse para productos múltiples. El cambio entre los lotes de producción consume tiempo para cambiar las herramientas y preparar la maquinaria. Ese tiempo de preparación se pierde para la producción, y ésa es una desventaja de la manufactura por lotes. La producción por lotes se emplea comúnmente en situaciones de fabricación para el inventario, en las que los artículos se manufacturan para resurtir un inventario que ha disminuido por la demanda. Por lo general, el equipo se acomoda con una distribución por procesos (véase la figura 1.9*b*).

Es posible un enfoque alternativo para la producción de rango medio si la variedad del producto es suave. En ese caso, podrían no ser necesarios los cambios grandes entre un estilo de producto y el siguiente. Es frecuente que sea posible configurar el sistema de manufactura de modo que grupos de productos similares puedan hacerse en el mismo equipo sin pérdida significativa de tiempo por la preparación. El procesamiento o ensamblado de piezas o productos diferentes se lleva a cabo en celdas que consisten en varias estaciones de trabajo o máquinas. El término ***manufactura celular*** se asocia con frecuencia a este tipo de producción. Cada celda está diseñada para producir una variedad limitada de configuraciones de piezas; es decir, la celda se especializa en la producción de un conjunto dado de partes similares, de acuerdo con los principios de la ***tecnología de grupo*** (véase la sección 40.1). La distribución recibe el nombre de ***distribución celular*** (también es común el término ***distribución por tecnología de grupo***), y se ilustra en la figura 1.9*c*).

Producción alta El rango alto de cantidad (10 000 a millones de unidades por año) se conoce como ***producción masiva***. La situación se caracteriza por una tasa de demanda elevada para el producto, y el sistema de manufactura está dedicado a la producción de ese solo artículo. Se observan dos categorías de producción en masa: la producción por cantidad y la producción por línea de flujo. La ***producción por cantidad*** involucra la producción en masa de partes únicas sobre piezas únicas de equipo. Es común que sean máquinas estándar (tales como prensas de estampado) equipadas con herramientas especiales (por ejemplo, troqueles y dispositivos de manejo de materiales), que dedican efectivamente el equipo a la producción de un tipo de pieza. Las distribuciones típicas que se emplean en la producción por cantidad son por procesos y celular [véase la figura 1.9*b*) y *c*)].

La producción por línea de flujo incluye piezas múltiples de equipo o estaciones de trabajo situadas en secuencia, y las unidades de trabajo se mueven físicamente a través de ella a fin de que el producto se complete. Las estaciones de trabajo y el equipo están diseñados específicamente para que el producto maximice la eficiencia. La distribución se denomina ***por producto***, y las estaciones de trabajo se acomodan en una línea larga, como la de la figura 1.9*d*), o en una serie de segmentos de línea conectados. Generalmente, el trabajo se mueve entre las estaciones por medio de bandas mecanizadas. En cada estación se termina una cantidad pequeña del trabajo total sobre cada unidad del producto.

El ejemplo más familiar de producción en línea de flujo es la línea de ensamblado, que se asocia con productos como automóviles y aparatos domésticos. El caso puro de producción en línea de flujo es aquel en que no hay variación en los productos que se elaboran en la línea. Cada producto es idéntico y la línea se conoce como ***línea de producción de modelo único***. A fin de comercializar con éxito un producto dado, con frecuencia es benéfico introducir variaciones en las características y modelos, de modo que los clientes individuales puedan elegir la mercancía exacta que les agrade. Desde un punto de vista de la producción, las diferencias en las características representan un caso de variedad suave de productos. El término ***línea de producción de modelos mixtos*** se aplica a aquellas situaciones en las que hay variedad suave de productos que se fabrican en la línea. Un ejemplo de ello es el ensamble de los automóviles modernos. Los carros que salen de la línea de montaje tienen variaciones en las opciones y estilo, que representan modelos diferentes y en muchos casos diferentes placas para el mismo diseño básico de vehículo.

1.4.2 Sistemas de apoyo a la manufactura

Para operar las instalaciones de manera eficiente, una compañía debe organizarse para diseñar los procesos y equipos, planear y controlar las órdenes de producción, y satisfacer los requerimientos de la calidad del producto. Estas funciones se llevan a cabo por medio de sistemas de apoyo a la manufactura, es decir, gente y procedimientos con los que una compañía administra sus operaciones de producción. La mayoría de esos sistemas de apoyo no entran en contacto directo con el producto, pero planean y controlan su avance a través de la fábrica. Es frecuente que las funciones de apoyo a la manufactura se ejecuten en la empresa por personal organizado en departamentos como:

- ***Ingeniería de manufactura***. El departamento de ingeniería de manufactura es responsable de planear los procesos de manufactura, decidir cuáles procesos deben utilizarse para fabricar las piezas y ensamblar los productos. Este departamento también está involucrado en el diseño y el orden de las máquinas herramienta y otros equipos que usan los departamentos de operaciones para realizar el procesamiento y ensamble.
- ***Planeación y control de la producción***. Este departamento es responsable de resolver los problemas de logística de la manufactura: ordenar materiales y comprar piezas, programar la producción y asegurarse de que los departamentos de operación tengan la capacidad necesaria para cumplir los programas de producción.
- ***Control de calidad***. En el ambiente competitivo de hoy, producir artículos de alta calidad debe ser la prioridad máxima de cualquier empresa de manufactura. Eso significa diseñar y construir productos que cumplan las especificaciones y llenen o superen las expectativas de los consumidores. Gran parte del esfuerzo es responsabilidad de este departamento.

1.5 ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

Las tres secciones anteriores proporcionan una vista preliminar y un panorama general del libro. Los 44 capítulos siguientes están organizados en 11 partes. El diagrama de bloques de la figura 1.10 resume los temas principales que habrán de cubrirse. Muestra al sistema de producción (representado con línea punteada) con la entrada de los materiales de la ingeniería en el lado izquierdo, y la salida de los productos terminados en el derecho. La parte I, titulada "Propiedades de los materiales y atributos del producto", consiste en cuatro capítulos que describen las características y especificaciones importantes de

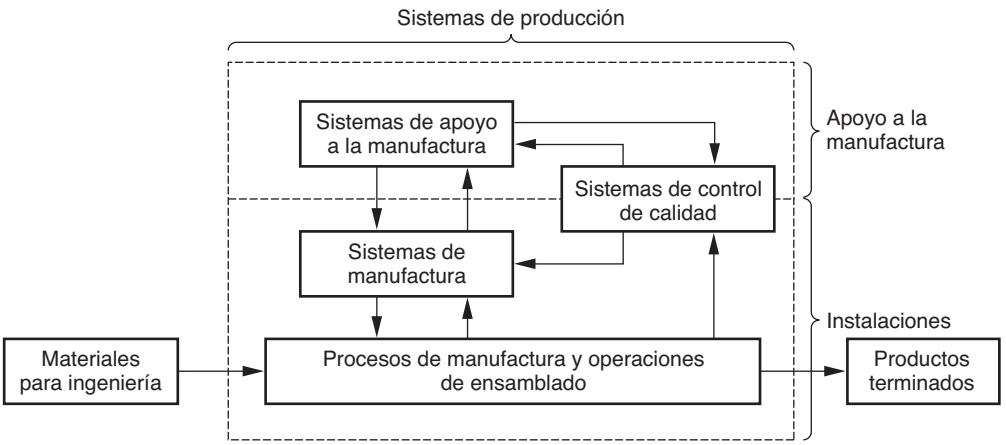


FIGURA 1.10 Panorama de los temas principales del libro.

los materiales, así como de los productos que se fabrican a partir de ellos. En la parte II se estudian los cuatro materiales fundamentales de la ingeniería: metales, cerámicos, polímeros y compuestos.

El bloque más grande de la figura 1.10 se identifica como "Procesos de manufactura y operaciones de ensamblado". Los procesos incluidos en el libro son aquellos que aparecen en la figura 1.4. La parte III comienza el estudio de las cuatro categorías de los procesos de perfilado. Consiste de seis capítulos acerca de los procesos de solidificación que incluyen la fundición de metales, el trabajo del vidrio, y la conformación de polímeros. En la parte IV, se estudia en dos capítulos el procesamiento de partículas de metales y cerámicos. En la parte V se analizan los procesos de deformación de los metales, tales como el laminado, forjado, extrusión, y el trabajo con láminas metálicas. Por último, en la parte VI se estudian los procesos de remoción de materiales. Son cuatro los capítulos que se dedican al maquinado, y dos los que cubren el esmerilado o rectificado (y otros procesos abrasivos relacionados) y las tecnologías no tradicionales de remoción de materiales.

Los otros tipos de operaciones de procesamiento, mejoramiento de las propiedades y procesamiento de superficies, se estudian en la parte VII. Sus tres capítulos son acerca de tratamiento térmico, limpieza y tratamiento de superficies, y recubrimiento y procesos de deposición.

Los procesos de unión y ensamblado se consideran en la parte VIII, que está organizada en cuatro capítulos acerca de soldadura homogénea, soldadura fuerte, soldadura blanda, unión mediante adhesivos y ensamblado mecánico.

En la parte IX, que lleva por título "Tecnologías especiales de procesamiento y ensamblado", se presentan varios procesos únicos que no se ajustan con exactitud en el esquema de clasificación de la figura 1.4. Sus cinco capítulos cubren la hechura de prototipos rápidos, el proceso de circuitos integrados, ensambles y empaques electrónicos, microfabricación y nanofabricación.

Los bloques restantes de la figura 1.10 se refieren a los sistemas de producción. La parte X, titulada "Sistemas de manufactura", cubre los sistemas principales de tecnologías y agrupamientos de equipos que se localizan en la fábrica: control numérico, robótica industrial, tecnología de grupos, manufactura celular, sistemas flexibles de manufactura, y líneas de producción. Por último, en la parte XI se estudian los sistemas de apoyo a la manufactura, tales como ingeniería de manufactura, planeación y control de la producción, control de calidad, e inspección.

REFERENCIAS

[1] DeGarmo, E. P., Black, J. T., y Kohser, R. A. ***Materials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[2] Emerson, H. P., y Naehring, D. C. E. ***Origins of Industrial Engineering***. Industrial Engineering & Management Press, Institute of Industrial Engineers, Norcross, Ga., 1988.

[3] Flinn, R. A., y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***. 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[4] Garrison, E. ***A History of Engineering and Technology.*** CRC Press, Inc., Boca Raton, Fla., 1991.

[5] Groover, M. P. ***Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing***, 2a. ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[6] Hounshell, D. A. ***From the American System to Mass Production***, ***1800-1932***. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md., 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

1.1. ¿Cuáles son las diferencias entre las industrias primaria, secundaria y terciaria? Proporcione un ejemplo de cada categoría.

1.2. ¿Qué es un bien de capital? Diga un ejemplo.

1.3. ¿Cómo se relacionan la variedad de productos y la cantidad de producción, al comparar fábricas comunes?

1.4. Defina la capacidad de manufactura.

1.5. Mencione las tres categorías básicas de materiales.

1.6. ¿En qué difiere un proceso de formado de una operación de procesamiento de una superficie?
1.7. ¿Cuáles son las dos subclases de procesos de ensamble? Proporcione un ejemplo de proceso de cada subclase.
1.8. Defina producción por lotes y describa por qué se utiliza con frecuencia para producir artículos en cantidades medias.
1.9. En las instalaciones de producción, ¿cuál es la diferencia entre una distribución por procesos y otra por producto?
1.10. Mencione dos departamentos que sean comúnmente clasificados como de apoyo a la manufactura.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 18 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

1.1. ¿Cuáles de las industrias siguientes se clasifican como de industria secundaria? (hay tres respuestas correctas): *a*) bebidas, *b*) servicios financieros, *c*) pesca, *d*) minería, *e*) instalaciones de generación de energía, *f*) editorial, y *g*) transporte.
1.2. En cuál de las siguientes industrias se clasifica la minería: *a*) industria agrícola, *b*) industria manufacturera, *c*) industria primaria, *d*) industria secundaria, *e*) industria de servicios, o *f*) industria terciaria.
1.3. Uno de los siguientes artículos incluye los inventos de la Revolución Industrial: *a*) automóviles, *b*) cañón, *c*) prensa de impresión, *d*) máquina de vapor, o *e*) espada.
1.4. ¿A cuáles de los siguientes metales incluyen los metales ferrosos? (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) hierro fundido, *c*) cobre, *d*) oro, y *e*) acero.
1.5. ¿Cuáles de los siguientes materiales de ingeniería se definen como un compuesto que contiene elementos metálicos y no metálicos?: *a*) cerámico, *b*) compuesto, *c*) metal, o *d*) polímero.
1.6. ¿Cuál de los procesos siguientes comienza con un material en estado fluido o semifluido, que se solidifica en un molde? (dos de estas respuestas son las mejores): *a*) fundido, *b*) forjado, *c*) maquinado, *d*) moldeado, *e*) prensado, y *f*) torneado.
1.7 ¿Cuáles de las siguientes etapas involucra el procesamiento de partículas de metales y cerámicos? (las dos respuestas mejores): *a*) uniones mediante adhesivos, *b*) deformación, *c*) forjado, *d*) remoción de material, *e*) fusión, *f*) prensado, y *g*) sinterizado.
1.8. ¿Cuáles de los siguientes incluyen los procesos de deformación? (dos respuestas correctas): *a*) fundido, *b*) perforado, *c*) extruido, *d*) forjado, *e*) fresado, *f*) pintado, y *g*) sintetizado.
1.9. ¿Cuál de las siguientes es una máquina que se usa para extruir?: *a*) martillo forjador, *b*) fresadora, *c*) laminadora, *d*) prensa, *e*) soplete.
1.10. La producción de volumen elevado de productos ensamblados se asocia más a alguno de los tipos de distribución siguientes: *a*) celular, *b*) de posición fija, *c*) por procesos, *d*) por productos.
1.11. ¿Cuáles de las funciones siguientes ejecuta un departamento de planeación y control de la producción, en cuanto a su papel de apoyar a la manufactura? (las dos respuestas mejores): *a*) diseñar y ordenar máquinas herramienta, *b*) desarrollar planes corporativos estratégicos, *c*) ordenar materias y adquirir piezas, *d*) efectuar inspecciones de calidad, y *e*) programar el orden de los productos sobre una máquina.

Parte I
Propiedades de los materiales y atributos del producto

2 LA NATURALEZA DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

2.1 Estructura atómica y los elementos
2.2 Enlaces entre átomos y moléculas
2.3 Estructuras cristalinas
  2.3.1 Tipos de estructuras cristalinas
  2.3.2 Imperfecciones en cristales
  2.3.3 Deformación en cristales metálicos
  2.3.4 Granos y límites de grano en metales
2.4 Estructuras no cristalinas (amorfas)
2.5 Materiales de ingeniería

La comprensión de los materiales es fundamental en el estudio de los procesos de manufactura. En el capítulo 1, se definió la manufactura como un proceso de transformación. Es el material lo que se transforma; y lo que determina el éxito de la operación es cómo éste se comporta cuando cumple con los requerimientos de resistencia a fuerzas, temperaturas y otros parámetros físicos particulares. Se observa que algunos materiales responden bien a ciertos tipos de procesos de manufactura, y mal, o nada, a otros. ¿Cuáles son las características y propiedades de los materiales que determinan su capacidad para transformarse a través de procesos diferentes?

En este capítulo se estudia la estructura atómica de la materia, y los enlaces entre los átomos y las moléculas. También se analiza la manera en que los átomos y moléculas de los materiales de ingeniería se organizan por sí solos en dos formas estructurales: cristalina y no cristalina. Se verá que los materiales básicos de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros— existen en cualquier forma, aunque por lo general cada material tiene una tendencia para adoptar alguna forma en particular. Por ejemplo, los metales en estado sólido casi siempre existen como cristales. El vidrio, por ejemplo, el utilizado en las ventanas, y otros cerámicos, adoptan una forma no cristalina.

2.1 ESTRUCTURA ATÓMICA Y LOS ELEMENTOS

La unidad estructural fundamental de la materia es el átomo. Cada átomo está compuesto de un núcleo con carga positiva, rodeado por un número suficiente de electrones con carga

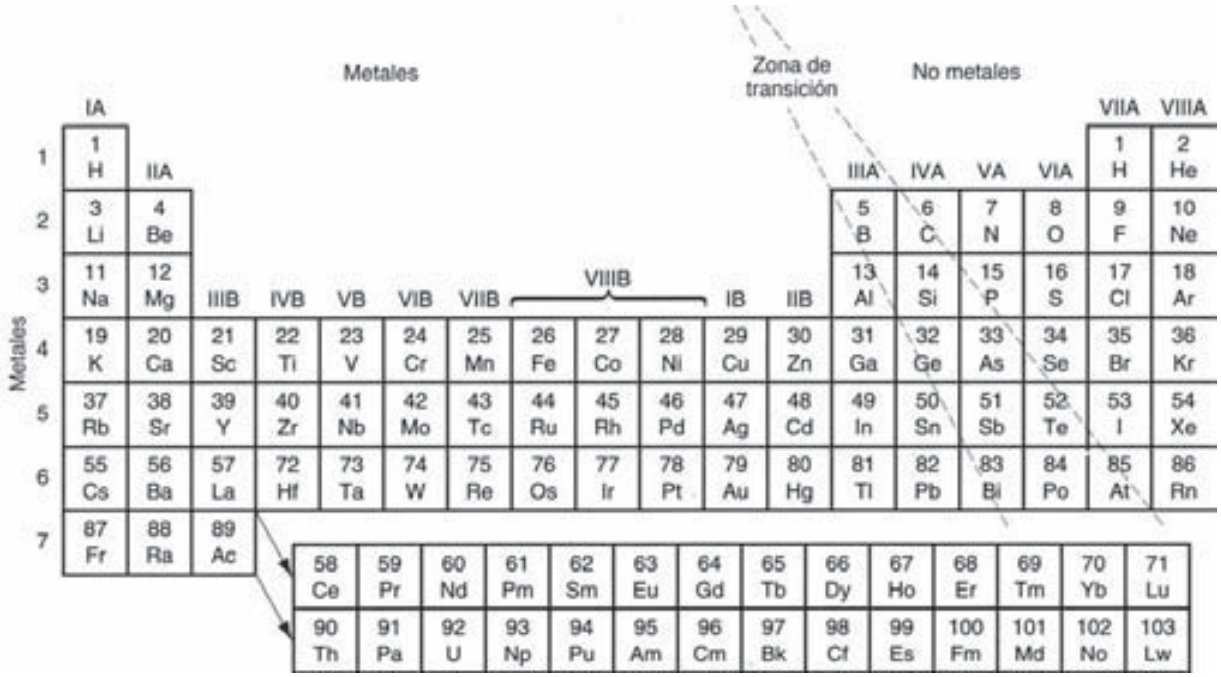


FIGURA 2.1 Tabla periódica de los elementos. Los símbolos y números atómicos están listados para los 103 elementos.

negativa de modo que las cargas quedan balanceadas. El número de electrones identifica el número atómico y el elemento del átomo. Hay poco más de 100 elementos (sin contar unos cuantos adicionales que se han sintetizado artificialmente), que constituyen los fundamentos químicos de toda la materia.

Así como existen diferencias entre los elementos, también hay similitudes. Los elementos se agrupan en familias y en relaciones que se establecen entre las familias y dentro de ellas por medio de la tabla periódica, la cual se muestra en la figura 2.1. En dirección horizontal hay cierta repetición o periodicidad en la disposición de los elementos. Los elementos metálicos ocupan la porción izquierda y central de la tabla; los no metálicos se ubican a la derecha. Entre ellos y a lo largo de una diagonal, hay una zona de transición que contiene los elementos llamados ***metaloides*** o ***semimetales***. En principio, cada elemento puede existir como sólido, líquido o gas, dependiendo de la temperatura y la presión. A temperatura y presión atmosférica ambientes, cada uno de ellos tiene una fase natural; por ejemplo, el hierro (Fe) es un sólido, el mercurio (Hg) es un líquido y el nitrógeno (N) es un gas.

Los elementos en la tabla están dispuestos en columnas verticales y en filas horizontales de tal manera que existen semejanzas entre los elementos que están en la misma columna. En la columna de la extrema derecha, por ejemplo, están los ***gases nobles*** (helio, neón, argón, kriptón, xenón y radón), todos los cuales presentan gran estabilidad química y una tasa de reacción baja. Los ***halógenos*** (flúor, cloro, bromo, yodo y astato) ubicados en la columna VIIA, comparten propiedades similares (el hidrógeno no está incluido en los halógenos). Los ***metales nobles*** (cobre, plata y oro) en la columna IB tienen propiedades semejantes. Por lo general hay correlaciones entre las propiedades de los elementos en una columna dada, en tanto que existen diferencias entre los elementos que están en columnas distintas.

Muchas de las similitudes y diferencias entre los elementos pueden explicarse por sus respectivas estructuras atómicas. El modelo de estructura atómica más simple, que se conoce como modelo planetario, muestra los electrones de los átomos orbitando alrededor del núcleo a ciertas distancias fijas, denominadas capas, como se muestra en la figura 2.2. El átomo de hidrógeno (número atómico 1) tiene un electrón en la órbita más cercana al

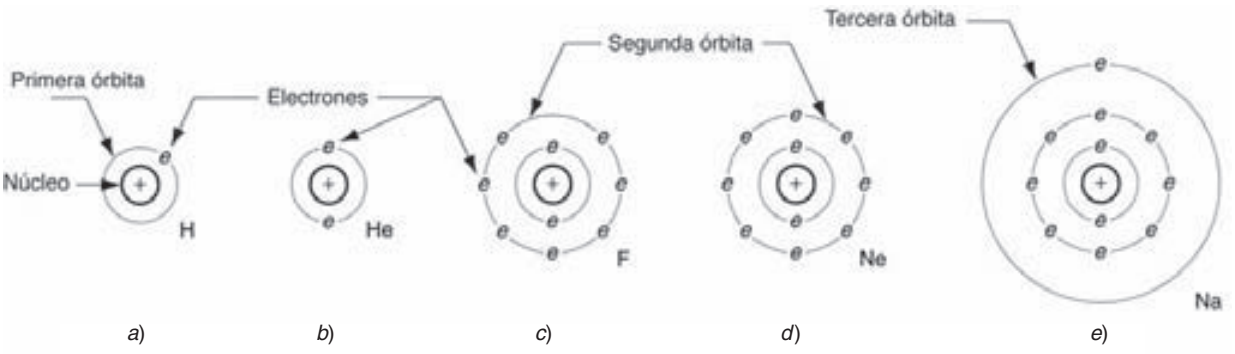


FIGURA 2.2 Modelo simple de la estructura atómica de varios elementos: *a*) hidrógeno, *b*) helio, *c*) flúor, *d*) neón, y *e*) sodio.

núcleo. El helio (número atómico 2) tiene dos. En la figura también se aprecian las estructuras atómicas del flúor (número atómico 9), neón (número atómico 10) y sodio (número atómico 11). De estos modelos se infiere que existe un número máximo de electrones que puede estar contenido en una órbita dada. Esto es correcto, y ese máximo está definido por la expresión

$$\text{Número máximo de electrones en una órbita} = 2n^2 \qquad (2.1)$$

donde n identifica la órbita, con $n = 1$ la más cercana al núcleo.

El número de electrones en la capa más externa, en relación con el número máximo permitido, determina en gran parte la afinidad química de un átomo con otros. Dichos electrones de la capa externa reciben el nombre de ***electrones de valencia***. Por ejemplo, debido a que un átomo de hidrógeno tiene tan sólo un electrón en su única órbita, se combina con facilidad con otro átomo de hidrógeno para formar la molécula del hidrógeno, H_2. Por esta misma razón, el hidrógeno también reacciona con facilidad con otros elementos (por ejemplo, para formar H_2O). En el átomo del helio, los dos electrones en su única órbita son el máximo permisible ($2n^2 = 2(1)^2 = 2$), por lo que el helio es muy estable. El neón es estable por la misma razón: su órbita exterior ($n = 2$) tiene ocho electrones (el máximo permisible), por lo que el neón es un gas inerte.

En contraste con el neón, el flúor tiene un electrón menos en su capa exterior ($n = 2$) que el máximo permisible, y es atraído con facilidad hacia otros elementos que pueden compartir un electrón para formar un conjunto más estable. El átomo del sodio parece hecho a la perfección para esa situación, con un electrón en su órbita externa. Reacciona con intensidad ante el flúor para formar el compuesto fluoruro de sodio, como se ilustra en la figura 2.3.

Para los números atómicos pequeños que se han considerado, la predicción del número de electrones en la órbita exterior es directa. Conforme el número atómico se incrementa a niveles más altos, la asignación de electrones a las órbitas diferentes se vuelve algo más complicada. Hay reglas y lineamientos, que basados en la mecánica cuántica, que

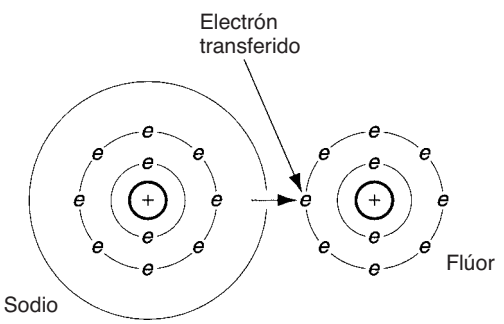


FIGURA 2.3 La molécula de fluoruro de sodio se forma por la transferencia del electrón "sobrante" del átomo del sodio para completar la órbita exterior del átomo del flúor.

se usan para predecir las posiciones de los electrones en las diferentes órbitas y así explicar sus características. El estudio de dichas reglas se encuentra más allá del alcance del estudio de los materiales para la manufactura.

2.2 ENLACES ENTRE ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

Los átomos se mantienen reunidos en forma de moléculas por medio de varios tipos de enlaces que dependen de los electrones de valencia. Por comparación, las moléculas se atraen unas con otras con enlaces más débiles, que por lo general resultan de la configuración de electrones en las moléculas individuales. Así, se tienen dos tipos de enlaces: 1) enlaces primarios, asociados por lo general con la formación de moléculas, y 2) enlaces secundarios, que se asocian generalmente con la atracción entre moléculas. Los enlaces primarios son mucho más fuertes que los secundarios.

Enlaces primarios Los enlaces primarios se caracterizan por atracciones fuertes de átomos con átomos que involucran el intercambio de electrones de valencia. Los enlaces primarios incluyen las formas siguientes: *a*) iónico, *b*) covalente, y *c*) metálico, como se ilustra en la figura 2.4. Los enlaces iónicos y covalentes se llaman ***intramoleculares*** debido a que involucran fuerzas de atracción entre los átomos de la molécula.

En el ***enlace iónico***, los átomos de un elemento entregan su(s) electrón(es) exterior(es), los que a su vez atraen a los átomos de algún otro elemento para incrementar a ocho su cuenta de electrones en la capa exterior. En general, ocho electrones en la capa exterior es la configuración más estable (excepto para los átomos muy ligeros), y la naturaleza proporciona un enlace muy fuerte entre átomos que adoptan esta configuración. El ejemplo anterior de la reacción del sodio con el flúor para formar fluoruro de sodio (véase la figura 2.3) ilustra esta forma de enlace atómico. El cloruro de sodio (sal de mesa) es un ejemplo más común. Debido a la transferencia de electrones entre los átomos, se forman ***iones*** de sodio y flúor (o de sodio y cloro), de los que se deriva el nombre de este enlace. Las propiedades de los materiales sólidos con enlaces iónicos incluyen baja conductividad eléctrica y deficiente ductilidad.

El ***enlace covalente*** es aquel en el que los átomos comparten electrones (a diferencia de los que se transfieren) en sus capas externas a fin de lograr un conjunto estable de ocho. El flúor y el diamante son dos ejemplos de enlaces covalentes. En el flúor, un electrón de cada dos átomos se comparte para formar gas F_2, como se ilustra en la figura 2.5*a*). En el caso del diamante, que es carbono (número atómico 6), cada átomo tiene cuatro vecinos con los que comparte electrones. Esto produce una estructura tridimensional muy rígida, que no está adecuadamente representada en la figura 2.5*b*), y que es responsable de la dureza extrema de este material. Otras formas de carbono (por ejemplo, grafito) no muestran

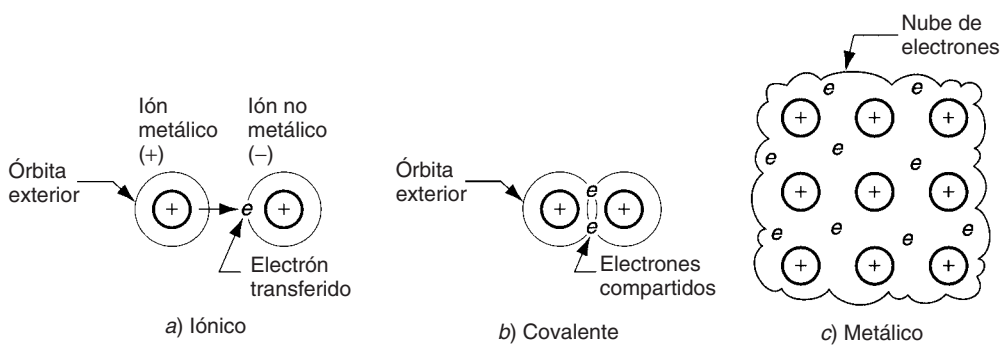


FIGURA 2.4 Tres formas de enlace primario: *a*) iónico, *b*) covalente, y *c*) metálico.

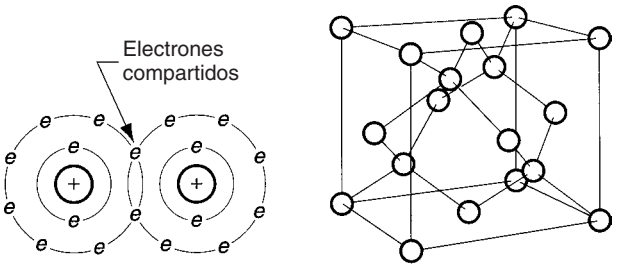


FIGURA 2.5 Dos ejemplos de enlace covalente: *a*) gas flúor F_2, y *b*) diamante.

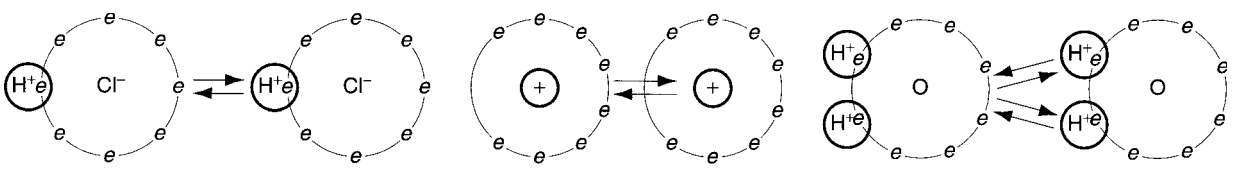
esta estructura atómica rígida. Los sólidos con enlaces covalentes por lo general tienen una dureza grande y conductividad eléctrica baja.

El enlace metálico es, por supuesto, el mecanismo de enlace atómico en los metales puros y sus aleaciones. Por lo general, los átomos de los elementos metálicos poseen muy pocos electrones en sus órbitas externas para completar las capas exteriores de todos los átomos, por decir, un bloque de metal dado. En consecuencia, en lugar de compartir una base de átomo con átomo, el ***enlace metálico*** involucra compartir los electrones de la capa exterior por medio de todos los átomos para formar una nube de electrones general que abarca al bloque entero. Esta nube proporciona las fuerzas de atracción para mantener juntos a los átomos y formar una estructura rígida y fuerte en la mayoría de los casos. Debido al modo en que comparten electrones y a la libertad que tienen éstos para moverse dentro del metal, el enlace metálico proporciona conductividad eléctrica buena. En contraste, los otros tipos de enlaces primarios involucran compartir localmente electrones sólo entre átomos vecinos, por lo que esos materiales son conductores eléctricos malos. Otras propiedades frecuentes de los materiales con enlace metálico incluyen la buena conducción del calor y una buena ductilidad. (Aunque ya se definieron algunos de estos términos, se espera que los conocimientos generales del lector le permitan entender las propiedades de los materiales.)

Enlaces secundarios Mientras que los enlaces primarios involucran fuerzas de atracción de átomo con átomo, los enlaces secundarios implican fuerzas entre moléculas, o ***intermoleculares***. En un enlace secundario no hay transferencia ni se comparten electrones, por lo que dichos enlaces son más débiles que los primarios. Hay tres formas de enlace secundario: *a*) fuerzas dipolares, *b*) fuerzas de London, y *c*) enlace de hidrógeno, los cuales se ilustran en la figura 2.6. Los tipos *a* y *b* con frecuencia reciben el nombre de fuerzas de ***Van der Waals***, en honor del científico que las estudió y cuantificó por primera vez.

Las ***fuerzas dipolares*** se presentan en una molécula formada por dos átomos con cargas eléctricas iguales y opuestas. Por tanto, cada molécula forma un dipolo, como se ilustra en la figura 2.6*a*) para el cloruro de hidrógeno. Aunque el material es eléctricamente neutro en su forma agregada, a escala molecular los dipolos individuales se atraen uno a otro, dando la orientación apropiada de los extremos positivo y negativo de las moléculas. Estas fuerzas dipolares proporcionan un enlace neto intermolecular dentro del material.

FIGURA 2.6 Tres tipos de enlaces secundarios: *a*) fuerzas dipolares, *b*) fuerzas de London, y *c*) enlace de hidrógeno.



Las ***fuerzas de London*** involucran fuerzas de atracción entre moléculas no polares; es decir, los átomos en la molécula no forman dipolos en el mismo sentido que el párrafo anterior. Sin embargo, debido al rápido movimiento de los electrones en la órbita alrededor de la molécula, cuando ocurre que más electrones quedan en un lado de la molécula que en el otro, se forman dipolos temporales, como se sugiere en la figura 2.6*b*). Esos dipolos instantáneos proporcionan una fuerza de atracción entre las moléculas del material.

Por último, el ***enlace de hidrógeno*** sucede en moléculas que contienen átomos de hidrógeno enlazados en forma covalente con otro átomo (por ejemplo, el oxígeno del H_2O). Debido a que los electrones que necesitan completar la capa del átomo de hidrógeno se alinean en un lado de su núcleo, el lado opuesto tiene carga neta positiva que atrae a los electrones de los átomos en las moléculas vecinas. En la figura 2.6*c*) se ilustra el enlace del hidrógeno para el agua, y generalmente es un mecanismo de enlace intermolecular más fuerte que las otras dos formas de enlace secundario. Éste es importante en la formación de muchos polímeros.

2.3 ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Los átomos y moléculas son los bloques de construcción de la mayoría de estructuras macroscópicas de la materia que se considerará en esta sección y la siguiente. Cuando los materiales se solidifican a partir de un estado fundido, tienden a quedar cerca y a empacarse en forma muy comprimida, en muchos casos se arreglan por sí mismos en una estructura muy ordenada y en otros no tanto. Se distinguen dos estructuras materiales diferentes fundamentales: 1) cristalina y 2) no cristalina. En esta sección se estudian las estructuras cristalinas, y en la siguiente las no cristalinas. El video clip acerca del tratamiento térmico muestra la manera en que los metales se arreglan de modo natural en estructuras cristalinas.

Muchos materiales forman cristales cuando se solidifican a partir de un estado de fusión o líquido. Esto es característico en prácticamente todos los metales, así como de muchas cerámicas y polímeros. Una ***estructura cristalina*** es aquella en la que los átomos se localizan en posiciones regulares y recurrentes en tres dimensiones. El patrón puede repetirse millones de veces dentro de un cristal dado. La estructura puede verse en forma de una ***celda unitaria***, que es el agrupamiento geométrico básico de los átomos y que se repite. Para ilustrar lo anterior, considere el lector la celda unitaria para la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) que se muestra en la figura 2.7, una de las más comunes que se encuentra en los metales. En la figura 2.7*a*) se representa el modelo más simple de la celda unitaria BCC. Aunque este modelo ilustra con claridad las ubicaciones de los átomos dentro de la celda, no indica el empaque tan estrecho de los átomos que tiene lugar en el cristal real, como se ilustra en la figura 2.7*b*).

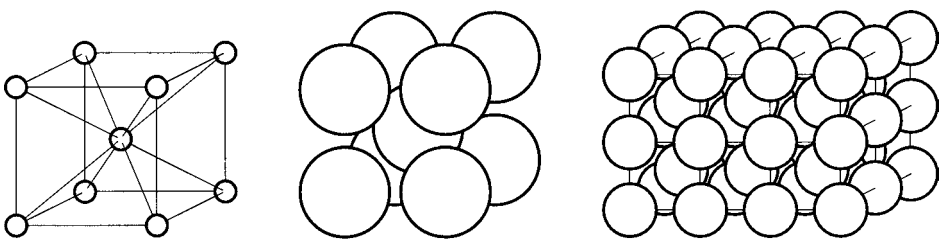


FIGURA 2.7 Estructura cristalina centrada en el cuerpo (BCC): *a*) celda unitaria, con los átomos indicados como ubicaciones puntuales en un sistema de ejes tridimensionales; *b*) modelo de celda unitaria que muestra a los átomos con un empaque muy estrecho (a veces denominado modelo de bola dura); y *c*) patrón repetido de la estructura BCC.

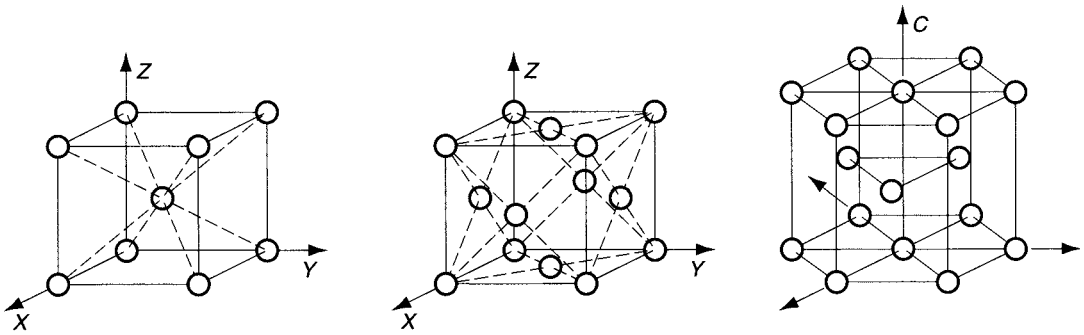


FIGURA 2.8 Tres tipos de estructuras cristalinas en los metales: *a*) cúbica centrada en el cuerpo y *b*) cúbica centrada en las caras, y *c*) hexagonal de empaquetamiento compacto.

En el inciso *c*) de la misma figura se muestra la naturaleza repetitiva de la celda unitaria dentro del cristal.

2.3.1 Tipos de estructuras cristalinas

En los metales son comunes tres tipos de estructuras de red: 1) cúbica centrada en el cuerpo (BCC), 2) cúbica centrada en las caras (FCC), y 3) hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP), como se ilustra en la figura 2.8. En la tabla 2.1 se presentan las estructuras cristalinas de los metales comunes a temperaturas diferentes. Por ejemplo, a temperatura ambiente el hierro es BCC; cambia a FCC por arriba de los 912 ºC (1 674 ºF) y regresa a BCC a temperaturas superiores a 1 400 ºC (2 550 ºF). Cuando un metal (u otro material) cambia su estructura según lo descrito, se le conoce como ***alotrópico***.

2.3.2 Imperfecciones en cristales

Hasta este momento se han estudiado las estructuras cristalinas como si fueran perfectas, la celda unitaria repetida en el material una y otra vez en todas direcciones. En ocasiones, para satisfacer propósitos estéticos o de ingeniería se prefiere un cristal perfecto. Por ejemplo, un diamante perfecto (sin defectos) es más valioso que otro que tenga imperfecciones. En la producción de chips para circuitos integrados, los cristales grandes y únicos de silicio poseen características de procesamiento deseables para formar los detalles microscópicos del patrón del circuito.

Sin embargo, hay varias razones por las que una estructura de red cristalina puede no ser perfecta. Es frecuente que surjan imperfecciones de manera natural debido a la incapacidad del material que se solidifica para continuar sin interrupción la repetición de

TABLA 2.1 Estructuras cristalinas de los metales comunes (a temperatura ambiente).

Cúbica centrado en el cuerpo (BCC)	Cúbica centrada en las caras (FCC)	Hexagonal de empaquetamiento compacto (HCP)
Cromo (Cr)	Aluminio (Al)	Magnesio (Mg)
Hierro (Fe)	Cobre (Cu)	Titanio (Ti)
Molibdeno (Mo)	Oro (Au)	Zinc (Zn)
Tantalio (Ta)	Plomo (Pb)	
Tungsteno (W)	Plata (Ag)	
	Níquel (Ni)	

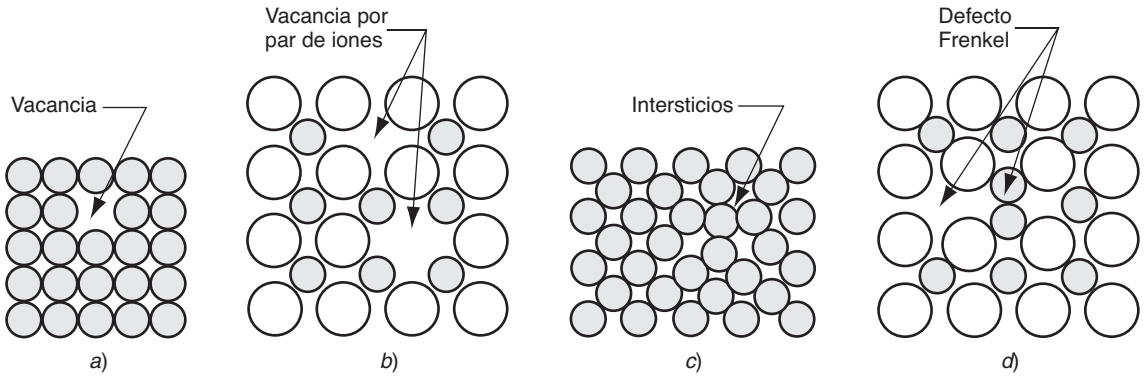


FIGURA 2.9 Defectos puntuales: *a*) vacancia, *b*) vacancia por par de iones, *c*) intersticios, y *d*) desplazamiento iónico.

la celda unitaria en forma indefinida. Un ejemplo de esto son los límites de grano de los metales. En otros casos, se introducen imperfecciones a propósito durante el proceso de manufactura, por ejemplo cuando se agrega a un metal un elemento de aleación para incrementar su resistencia.

Las distintas imperfecciones en los sólidos cristalinos también se denominan defectos. Ambos términos, ***imperfección*** o ***defecto***, se refieren a las desviaciones en el patrón regular de la estructura de red cristalina. Se catalogan como 1) defectos puntuales, 2) defectos lineales y 3) defectos superficiales.

Los ***defectos puntuales*** son imperfecciones en la estructura cristalina que involucran ya sea un solo átomo o varios de ellos. Los defectos adoptan varias formas, entre las cuales están las que se ilustran en la figura 2.9: *a*) ***vacancia***, es el defecto más simple, que involucra la falta de un átomo dentro de la estructura de red; *b*) ***vacancia por par de iones***, también llamado ***defecto Schottky***, que incluye un par faltante de iones de carga opuesta en un compuesto que tiene un balance de carga conjunta; *c*) ***intersticios***, distorsión de la red producida por la presencia de un átomo adicional en la estructura; y *d*) ***desplazamiento iónico***, conocido como ***defecto Frenkel***, que ocurre cuando un ion se retira de una posición regular en la estructura de red y se inserta en una posición intersticial cuya ocupación no es normal por parte de dicho ion.

Un ***defecto lineal*** es un grupo conectado de defectos puntuales que forman una línea en la estructura de red. El defecto lineal más importante es la ***dislocación***, que adopta dos formas: *a*) dislocación de borde y *b*) dislocación de tornillo. Una ***dislocación de borde*** es la arista de un plano adicional que existe en la red, como se ilustra en la figura 2.10*a*). Una ***dislocación de tornillo***, véase la figura 2.10*b*), es una espiral dentro de la estructura de red alabeada alrededor de una línea de imperfección, como un tornillo está alabeado alrede-

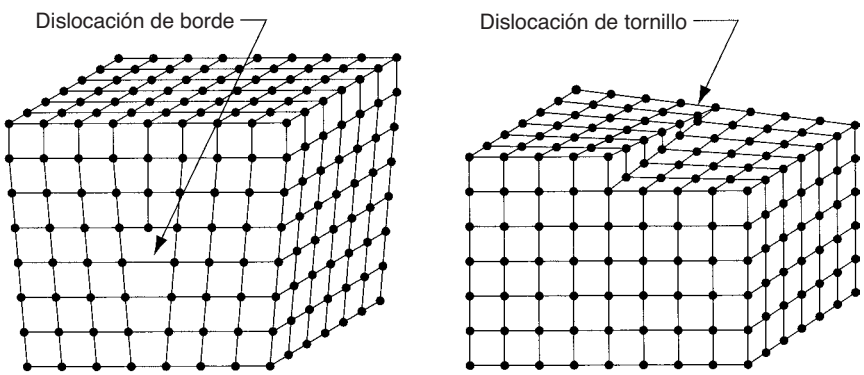


FIGURA 2.10 Defectos lineales: *a*) dislocación de borde, y *b*) dislocación de tornillo.

dor de su eje. Ambos tipos de dislocaciones surgen en la estructura cristalina durante la solidificación (por ejemplo, fundición), o se inician durante un proceso de deformación (por ejemplo, conformado de metales) que se realice sobre el material sólido. Las dislocaciones son útiles para explicar ciertos aspectos del comportamiento mecánico de los metales.

Los ***defectos superficiales*** son imperfecciones que se extienden en dos direcciones para formar una frontera. El ejemplo más obvio es la superficie externa de un objeto cristalino que define su forma. La superficie es una interrupción de la estructura de red. Las fronteras de la superficie también pueden quedar dentro del material. El mejor ejemplo de estas interrupciones superficiales internas son los límites de grano. Un poco más adelante se estudiarán los granos de los metales, pero primero se considerará la manera en que ocurre la deformación en una red cristalina, y cómo la presencia de dislocaciones favorece este proceso.

2.3.3 La deformación en cristales metálicos

Cuando un cristal se sujeta a fuerzas mecánicas que se incrementan en forma gradual, su respuesta inicial es deformarse de modo ***elástico***. Esto se parece a un alargamiento de la estructura de red sin que haya cambios en la posición de los átomos en la red, en la manera que se ilustra en la figura 2.11*a*) y *b*). Si se elimina la fuerza, la estructura de red (y por tanto el cristal), regresa a su forma original. Si el esfuerzo alcanza un valor alto en relación con las fuerzas electrostáticas que mantienen a los átomos en su lugar dentro de la red, ocurre un cambio permanente en la forma denominado ***deformación plástica***. Lo que ha sucedido es que los átomos en la red se han movido de manera permanente de las posiciones que ocupaban en forma previa, y se ha establecido un equilibrio nuevo en la red, como se sugiere en la figura 2.11*c*).

La deformación de la red que se aprecia en el inciso *c*) de la figura es un posible mecanismo, llamado deslizamiento, con el que puede ocurrir la deformación plástica de una estructura cristalina. El otro se denominan maclas* y se estudiará más adelante.

El ***deslizamiento*** implica el movimiento relativo de los átomos en los lados opuestos de un plano de la red, por lo que se denomina ***plano de deslizamiento***. El plano de deslizamiento debe estar aproximadamente alineado con la estructura red (como se indica en el esquema), por lo que hay ciertas direcciones preferentes a lo largo de las cuales es más probable que ocurra el deslizamiento. El número de estas ***direcciones de deslizamiento*** depende del tipo de red. Las tres estructuras cristalinas comunes son algo más complicadas, en especial en tres dimensiones, que la red cuadrada que se ilustra en la figura 2.11. Se observa que la HCP es la que tiene menos direcciones de deslizamiento, la BCC es la que más, y la FCC está entre ambas. Los metales HCP tienen mala ductilidad y por lo general son difíciles de deformar a temperatura ambiente. Los metales con estructura BCC tendrían la ductilidad mejor si el único criterio fueran el número de las direcciones de deslizamiento. Sin embargo, la naturaleza no es tan simple. Por lo general, esos metales son más fuertes que los demás, lo que complica la situación, y los metales BCC requieren normalmente esfuerzos mayores para que haya deslizamiento. De hecho, algunos de los metales BCC

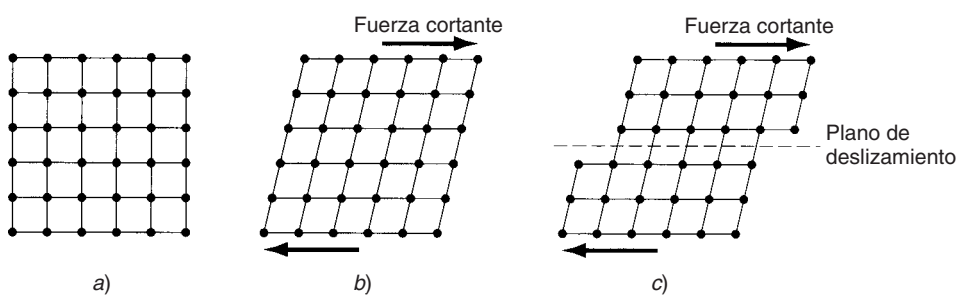


FIGURA 2.11 Deformación de una estructura cristalina: *a*) red original; *b*) deformación elástica, sin cambio permanente de la posición de los átomos; y *c*) deformación plástica, en la que los átomos de la red son forzados para moverse a nuevos "lugares".

* El término *macla* o *gemelo* se emplea en la bibliografía de la cristalografía de minerales. (N. del T.)

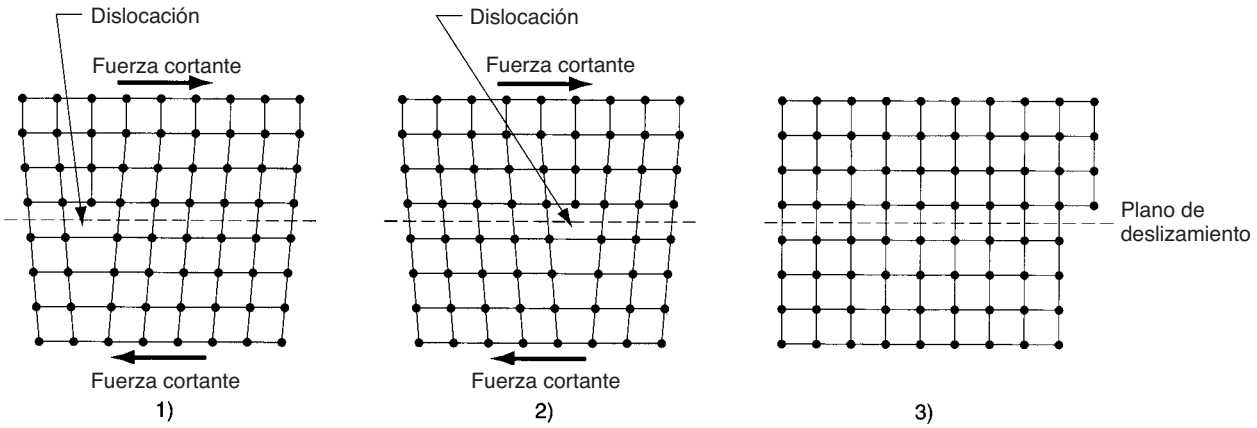


FIGURA 2.12 Efecto de las dislocaciones en la estructura de red bajo esfuerzo. En la serie de diagramas, el movimiento de la dislocación permite que haya deformación en condiciones de esfuerzo menor que en una red perfecta.

muestran ductilidad mala. Una excepción notable es el acero de bajo carbono aunque es relativamente fuerte, se utiliza mucho con éxito comercial en las operaciones de formado de metal en lámina para las que muestra ductilidad buena. Los metales FCC por lo general son los más dúctiles de las tres estructuras cristalinas, pues combinan un buen número de direcciones de deslizamiento con una resistencia (usualmente) relativamente baja o moderada. A temperaturas elevadas las tres estructuras de los metales se hacen más dúctiles, lo que se aprovecha con frecuencia para darles forma.

Las dislocaciones tienen un papel importante para facilitar el deslizamiento en los metales. Cuando una estructura de red que contiene una dislocación de borde se sujeta a una fuerza cortante, el material se deforma con mucha más facilidad que si se tratara de una estructura perfecta. Esto lo explica el hecho de que la dislocación entra en movimiento dentro de la red cristalina en presencia de la fuerza, como se ilustra en la serie de dibujos de la figura 2.12. ¿Por qué es más fácil mover una dislocación a través de la red de lo que es deformar la red misma? La respuesta es que los átomos en la dislocación de borde requieren un desplazamiento menor dentro de la estructura de red distorsionada a fin de alcanzar una posición nueva de equilibrio. Así, se necesita un nivel de energía menor para volver a alinear los átomos en posiciones nuevas que si la red no tuviera la dislocación. Se requiere entonces un nivel menor de fuerza para realizar la deformación. Debido a que la posición nueva manifiesta una red similar distorsionada, el movimiento de los átomos en la dislocación continúa a un nivel menor de fuerza.

Aquí se han explicado el fenómeno de deslizamiento y la influencia de las dislocaciones sobre una base microscópica. A escala mayor, cuando se somete el metal a una carga deformante el deslizamiento ocurre muchas veces en él, lo que ocasiona el comportamiento macroscópico que nos es familiar. Las dislocaciones representan una situación benéfica y perjudicial. Debido a ellas, el metal es más dúctil y alcanza con más facilidad la deformación plástica (conformado) durante su manufactura. Sin embargo, desde un punto de vista de diseño del producto, el metal no es tan fuerte como lo sería si no hubiera dislocaciones.

El maclado es la otra forma en que los cristales metálicos se deforman plásticamente. El ***maclado*** se define como el mecanismo de deformación plástica en el que los átomos en un lado del plano (llamado plano de macla) cambian para formar una imagen de espejo en el otro lado del plano. Esto se ilustra en la figura 2.13. Este mecanismo es importante en los metales HCP (por ejemplo, magnesio y zinc) debido a que no se deslizan con facilidad. Además de la estructura, otro factor de las maclas es la tasa de deformación. El mecanismo de deslizamiento requiere más tiempo que el del maclado, el cual puede ocurrir en forma casi instantánea. Así, en situaciones en las que la rapidez de deformación es muy alta, los metales que forman maclas se deslizarían. Un ejemplo que ilustra esta sensibilidad a la ra-

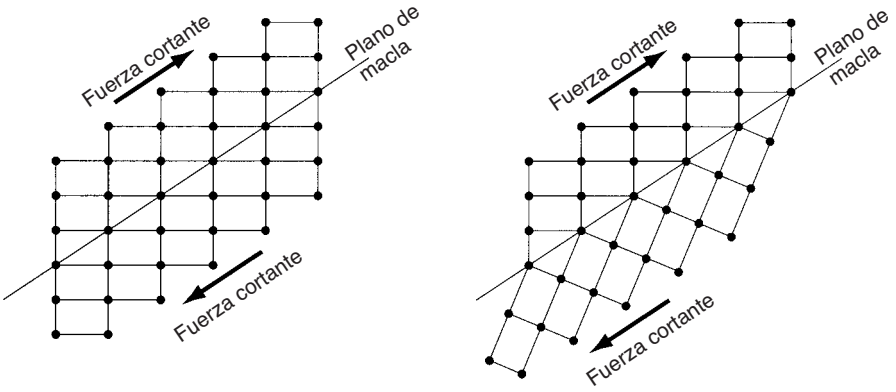


FIGURA 2.13 El maclado involucra la formación de una imagen especular atómica (es decir, un "gemelo") en el lado opuesto del plano de macla: *a*) antes, y *b*) después del maclado.

pidez es el acero al bajo carbono; cuando se somete a rapideces de esfuerzo elevadas forma maclas, mientras que a rapideces moderadas se deforma por deslizamiento.

2.3.4 Granos y límites de grano en metales

Un bloque dado de metal contiene millones de cristales individuales, llamados ***granos***. Cada grano tiene su propia orientación de red única; pero en forma colectiva los granos se orientan aleatoriamente dentro del bloque. Una estructura como ésa se denomina ***policristalina***. Es fácil de entender por qué esa clase de estructura es el estado natural del material. Cuando el bloque se enfría a partir de un estado de fusión y comienza a solidificarse, ocurre la formación de núcleos de cristales individuales en posiciones y orientaciones aleatorias a través del líquido. Conforme estos cristales crecen, acaban por interferir unos con otros, y forman en sus interfaces defectos superficiales —el **límite *de grano***. Éste consiste en una zona de transición, quizá con espesor de sólo unos cuantos átomos, en la que los átomos no están alineados con ningún grano.

El tamaño de los granos en el bloque metálico está determinado, entre otros factores, por el número de sitios de formación de núcleos en el material fundido, y por la rapidez de enfriamiento de la masa. En un proceso de fundición, es frecuente que los sitios de formación de núcleos sean creados por las paredes relativamente frías del molde, lo que motiva cierta preferencia de la orientación de los granos en ellas.

El tamaño del grano tiene relación inversa con la rapidez de enfriamiento: el enfriamiento más rápido promueve un tamaño de grano menor, mientas que el enfriamiento lento tiene el efecto opuesto. El tamaño del grano es importante en los metales debido a que afecta las propiedades mecánicas. Desde el punto de vista del diseño, por lo general es preferible un tamaño menor de los granos porque significa resistencia y dureza mayores. También es deseable en ciertas operaciones de manufactura (por ejemplo, conformado de metales), debido a que significa ductilidad mayor durante la deformación y una superficie mejor del producto terminado.

Otro factor que influye en las propiedades mecánicas es la presencia de límites de grano en el metal. Representan imperfecciones en la estructura cristalina que interrumpen el movimiento continuo de las dislocaciones. Esto ayuda a explicar por qué el tamaño menor de los granos —y por tanto mayor abundancia de granos y de sus límites— incrementa la resistencia del metal. Al interferir con el movimiento de dislocación, los límites de los granos también contribuyen con la propiedad característica de un metal de hacerse más fuerte a medida que se deforma. La propiedad a que se hace alusión es el ***endurecimiento por deformación***, que se estudiará más de cerca en el análisis de las propiedades mecánicas, en el capítulo 3.

2.4 ESTRUCTURAS NO CRISTALINAS (AMORFAS)

Muchos materiales importantes no son cristalinos —por ejemplo, los líquidos y gases. El agua y el aire no tienen estructuras cristalinas. Un metal pierde su estructura cristalina cuando se funde. A temperatura ambiente, el mercurio es un metal líquido cuyo punto de fusión es de –38 °C (–37 °F). Varias clases importantes de materiales de ingeniería tienen formas no cristalinas en su estado sólido, es frecuente que se utilice el término ***amorfo*** para describirlos. El vidrio, muchos plásticos y el caucho pertenecen a esta categoría. Muchos plásticos importantes son mezclas de formas cristalinas y no cristalinas. Incluso los metales pueden ser amorfos en vez de cristalinos, si la rapidez de enfriamiento durante su paso de líquido a sólido es lo suficientemente rápida como para inhibir que los átomos se acomoden por sí mismos en sus patrones regulares preferidos. Por ejemplo, esto ocurre si el metal fundido se vierte entre rodillos giratorios fríos poco espaciados.

Dos características relacionadas con las diferencias de los materiales no cristalinos de los cristalinos: 1) la ausencia de un orden de largo alcance en la estructura molecular de un material no cristalino, y 2) las diferencias entre las características de la fusión y la expansión térmica.

La diferencia en la estructura molecular se puede visualizar con ayuda de la figura 2.14. El empaquetamiento compacto y el patrón de repetición de la estructura cristalina se muestra en el lado izquierdo; y en el derecho aparece el arreglo menos denso y aleatorio de los átomos en el material no cristalino. La diferencia se manifiesta cuando el metal se funde. Uno de los efectos es que en el metal fundido el empaque más espaciado de los átomos muestra un incremento del volumen (reducción de la densidad) en comparación con el estado cristalino sólido del material. Este efecto es característico de la mayoría de los materiales cuando se funden (una excepción notable es el hielo; el agua líquida es más densa que el hielo en estado sólido). Una característica general de los líquidos y los materiales sólidos amorfos es que están ausentes de un orden de largo alcance, como el del lado derecho de la figura.

Ahora se examinará en detalle el fenómeno de la fusión, y al hacerlo se definirá la segunda diferencia importante entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas. Como ya se dijo, un metal experimenta un aumento de su volumen cuando se funde y pasa del estado sólido al líquido. Para un metal puro, este cambio volumétrico no ocurre en forma abrupta, a temperatura constante (es decir, la temperatura de fusión T_m), como se indica en la figura 2.15. El cambio representa una discontinuidad desde las pendientes en cada lado de la gráfica. Las pendientes graduales caracterizan la ***expansión térmica*** del metal —el cambio del volumen como función de la temperatura, que usualmente es diferente en los estados sólido y líquido. Asociado con el incremento súbito del volumen conforme el metal pasa de sólido a líquido en el punto de fusión, está la adición de cierta cantidad de calor, llamada ***calor de fusión***, que ocasiona que los átomos pierdan el arreglo denso y regular de la estructura cristalina. El proceso es reversible; opera en ambas direcciones. Si el metal fundido se enfría a través de su temperatura de fusión, ocurre el mismo cambio abrupto en el volumen (excepto que se tata una disminución), y el metal libera la misma cantidad de calor.

Un material amorfo presenta un comportamiento muy diferente al de un metal puro cuando cambia de sólido a líquido, como se aprecia en la figura 2.15. El proceso es,

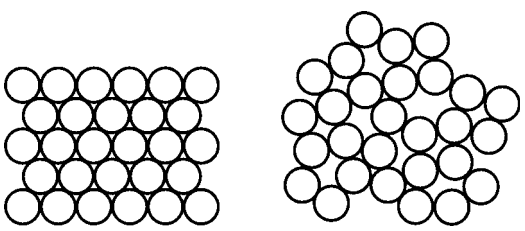


FIGURA 2.14 Ilustración de la diferencia de estructura entre materiales: *a*) cristalino, y *b*) no cristalino. La estructura cristalina es regular, repetitiva y más densa, en tanto que la no cristalina tiene un menor empaquetamiento y es aleatoria.

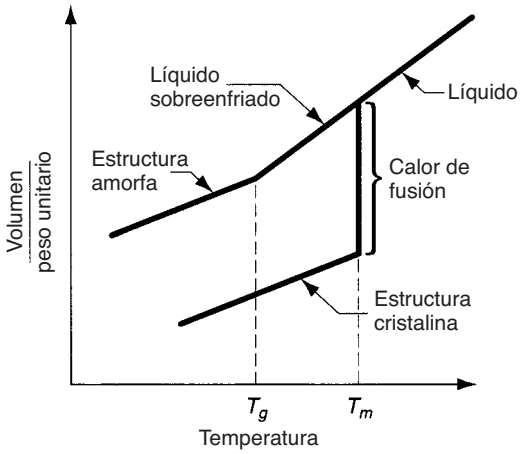


FIGURA 2.15 Cambio característico de volumen para un metal puro (estructura cristalina), en comparación con los mismos cambios volumétricos del vidrio (estructura no cristalina).

otra vez, reversible, y a continuación se analizará el comportamiento del material amorfo sólido, como se hizo antes. Para ilustrarlo se empleará vidrio (sílice, SiO_2). A temperaturas elevadas, el vidrio es un líquido verdadero, y sus moléculas son libres de moverse de acuerdo con la definición usual de un líquido. Conforme el vidrio se enfría, pasa en forma gradual al estado sólido, a través de una fase de transición, llamada ***líquido sobreenfriado***, antes de quedar, por fin, rígido. No muestra el cambio volumétrico súbito característico de los materiales cristalinos; en vez de ello cruza su temperatura de fusión T_m sin cambiar su pendiente de expansión térmica. En esa región de líquido sobreenfriado, el material se hace cada vez más viscoso conforme la temperatura disminuye. Al enfriarse aún más, se alcanza un punto en el que el líquido sobreenfriado se convierte en sólido. Esto se denomina ***temperatura de transición vítrea***, T_g. En ese momento, hay un cambio en la pendiente de la expansión térmica (es más preciso hablar de pendiente de contracción térmica; sin embargo, la pendiente es la misma para la expansión que para la contracción). La tasa de expansión térmica es más baja para el material sólido que para el líquido sobreenfriado.

La diferencia de comportamiento entre los materiales cristalinos y no cristalinos se debe a la respuesta de sus estructuras atómicas respectivas ante los cambios de temperatura. Cuando un metal puro se solidifica desde el estado de fusión, los átomos se arreglan por sí solos en una estructura regular y recurrente. Dicha estructura cristalina es mucho más compacta que el líquido aleatorio con empaquetamiento holgado del cual se formó. Así, para un material cristalino, el proceso de solidificación produce la contracción volumétrica abrupta que se observa en la figura 2.15. En contraste, a bajas temperaturas los materiales amorfos no alcanzan esa estructura estrechamente empaquetada y repetitiva. La estructura atómica es el mismo arreglo aleatorio que en el estado líquido; así, no hay cambio abrupto del volumen cuando esos materiales pasan de líquido a sólido.

2.5 MATERIALES DE INGENIERÍA

Ahora se hará un resumen de la manera en que la estructura atómica, enlaces y estructura cristalina (o ausencia de ésta), se relacionan con el tipo de material de ingeniería —metales, cerámicas y polímeros—.

Metales En estado sólido, los metales tienen estructuras cristalinas, casi sin excepción. Las celdas unitarias de dichas estructuras cristalinas siempre son BCC, FCC o HCP. Los átomos de los metales se mantienen unidos por medio de un enlace metálico, lo que significa que sus electrones de valencia pueden moverse con libertad relativa (en comparación con

los otros tipos de enlace atómico y molecular). Por lo general, estas estructuras y enlaces hacen que los metales sean fuertes y duros. Muchos de los metales son dúctiles (tienen la capacidad de deformarse, lo que es útil para la manufactura), en especial los metales FCC. Otras propiedades generales de los metales que se relacionan con su estructura y su enlace son las siguientes: conductividad térmica y eléctrica elevadas, opacidad (impenetrables al paso de la luz), y reflectividad (capacidad de reflejar la luz).

Cerámicos Los átomos de los cerámicos se caracterizan por tener enlaces iónicos o covalentes, o ambos. Los átomos metálicos liberan o comparten sus electrones exteriores con los átomos no metálicos, y existe una fuerza de atracción grande dentro de las moléculas. Las propiedades generales que resultan de estos mecanismos de enlace incluyen: dureza y rigidez elevadas (aun a temperaturas elevadas), fragilidad (no son dúctiles), eléctricamente aislantes (no conductores), refractarios (térmicamente resistentes), y químicamente inertes.

Los cerámicos poseen estructura ya sea cristalina o no cristalina. La mayor parte de los cerámicos tienen estructura critalina, mientras que el vidrios con base en el sílice (SiO_2) son amorfos. En ciertos casos, en el mismo material cerámico puede existir cualquier estructura. Por ejemplo, en la naturaleza el sílice ocurre como cuarzo cristalino. Cuando este mineral se funde y luego se enfría, se solidifica para formar sílice fundido, que tiene estructura no cristalina.

Polímeros Una molécula de polímero consiste en muchos ***meros*** que forman moléculas muy grandes que se mantienen unidas por medio de enlaces covalentes. Por lo general, los elementos de un polímero consisten en carbono más uno o más elementos tales como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Un enlace secundario (de Van der Waals) mantiene juntas a las moléculas dentro del material agregado (enlace intermolecular). Los polímeros tienen ya sea una estructura vítrea o una mezcla de vítrea y cristalina. Hay diferencias entre los tres tipos de polímero. En los ***polímeros termoplásticos***, las moléculas consisten en cadenas largas de meros con estructura lineal. Estos materiales pueden calentarse y enfriarse sin que se altere sustancialmente su estructura lineal. En los ***polímeros termoestables (termofijos)***, las moléculas se transforman en una estructura rígida y tridimensional al enfriarse a partir de su condición de plástico caliente. Si los polímetros termoestables se vuelven a calentar, se degradan químicamente en lugar de suavizarse. Los ***elastómeros*** tienen moléculas grandes con estructuras engarzadas Al estirar y volver a engarzar las moléculas cuando se las sujeta a fuerzas cíclicas, se motiva que el material agregado manifieste su comportamiento elástico característico.

La estructura y enlace molecular de los polímeros les da las propiedades comunes siguientes: baja densidad, resistividad eléctrica elevada (algunos polímeros se utilizan como aislantes), y baja conductividad térmica. La resistencia y rigidez de los polímeros varía mucho. Algunos son fuertes y rígidos (aunque no igualan la fuerza y rigidez de los metales o cerámicos), mientras que otros muestran un comportamiento muy elástico.

REFERENCIAS

[1] Dieter, G. E. ***Mechanical Metallurgy***, 3a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.

[2] Flinn, R. A., y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[3] Guy, A. G., y Hren., J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading Mass., 1974.

[4] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed., Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass. 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

2.1. Los elementos de la tabla periódica se dividen en tres categorías. ¿Cuáles son esas categorías? Dé tres ejemplos de cada una.
2.2. ¿Cuáles elementos son los metales nobles?
2.3. ¿Cuál es la diferencia entre los enlaces primarios y los secundarios en la estructura de los materiales?
2.4. Describa cómo funciona el enlace iónico.
2.5. ¿Cuál es la diferencia entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas de los materiales?
2.6. ¿Cuáles son algunos defectos puntuales comunes en una estructura de red cristalina?
2.7. Defina la diferencia entre la deformación elástica y la plástica en términos del efecto sobre la estructura de red cristalina.
2.8. ¿Cómo contribuyen los límites de grano entre los granos al fenómeno del endurecimiento por deformación de los metales?
2.9. Identifique algunos materiales con estructura cristalina.
2.10. Mencione algunos materiales que tengan estructura no cristalina.
2.11. ¿Cuál es la diferencia fundamental en el proceso de solidificación (o fusión) entre las estructuras cristalinas y las no cristalinas?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

2.1. ¿Cuál de los siguientes es la unidad estructural básica de la materia?: *a*) átomo, *b*) electrón, *c*) elemento, *d*) molécula, o *e*) núcleo.
2.2. ¿Aproximadamente cuántos elementos distintos se han identificado? (una respuesta es la mejor): *a*) 10, *b*) 50, *c*) 100, *d*) 200, o *e*) 500.
2.3. ¿En la tabla periódica, los elementos pueden dividirse en cuál de las categorías siguientes? (hay tres respuestas mejores): *a*) cerámicos, *b*) gases, *c*) líquidos, *d*) metales, *e*) no metales, *f*) polímeros, *g*) semimetales, y *h*) sólidos.
2.4. ¿Cuál de los siguientes es el elemento con menor densidad y peso atómico más pequeño?: *a*) aluminio, *b*) argón, *c*) helio, *d*) hidrógeno, o *e*) magnesio.
2.5. ¿Cuáles de los siguientes tipos de enlace se clasifican como primarios? (hay tres respuestas correctas): *a*) enlace covalente, *b*) enlace del hidrógeno, *c*) enlace iónico, *d*) enlace metálico, y *e*) fuerzas de Van der Waals.
2.6. ¿Cuántos átomos hay en la celda unitaria cúbica centrada en las caras (FCC)? (una respuesta correcta): *a*) 8, *b*) 9, *c*) 10, *d*) 12, o *e*) 14.
2.7. ¿Cuáles de los siguientes no son defectos puntuales en una estructura de red cristalina? (hay tres respuestas correctas): *a*) dislocación de borde, *b*) intersticios, *c*) defecto Schottky, y *d*) vacancia.
2.8. ¿Cuáles de las siguientes estructuras cristalinas tienen menos direcciones de deslizamiento y por tanto los metales con esa estructura por lo general son más difíciles de deformar a temperatura ambiente?: *a*) BCC, *b*) FCC, o *c*) HCP.
2.9. ¿Los límites de grano son un ejemplo de cuál de los tipos siguientes de defectos en la estructura cristalina?: *a*) dislocación, *b*) defecto Frenkel, *c*) defectos lineales, *d*) defectos puntuales, o *e*) defectos superficiales.
2.10. ¿Cuál de las respuestas siguientes corresponde al maclado? (tres respuestas): *a*) deformación elástica, *b*) mecanismo de deformación plástica, *c*) es más probable a altas tasas de deformación, *d*) es más probable en los metales con estructura HCP, *e*) mecanismo de deslizamiento, y *f*) tipo de dislocación.
2.11. ¿Los polímeros se caracterizan por cuáles de los siguientes tipos de enlace? (dos respuestas correctas): *a*) adhesivo, *b*) covalente, *c*) de hidrógeno, *d*) iónico, *e*) metálico, y *f*) Van der Waals.

3 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

3.1 Relaciones esfuerzo-deformación
- 3.1.1 Propiedades ante la tensión
- 3.1.2 Propiedades ante la compresión
- 3.1.3 Doblado y prueba de materiales frágiles
- 3.1.4 Propiedades ante la cortante

3.2 Dureza
- 3.2.1 Pruebas de dureza
- 3.2.2 Dureza de distintos materiales

3.3 Efecto de la temperatura sobre las propiedades

3.4 Propiedades de los fluidos

3.5 Comportamiento viscoelástico de los polímeros

Las propiedades mecánicas de un material determinan su comportamiento cuando se le sujeta a esfuerzos mecánicos. Estas propiedades incluyen el módulo de elasticidad, ductilidad, dureza y distintas medidas de la resistencia. Las propiedades mecánicas son importantes en el diseño porque el funcionamiento y rendimiento de un producto dependen de su capacidad para resistir la deformación ante los esfuerzos a que se le somete durante su uso. En el diseño, el objetivo usual del producto y sus componentes consiste en resistir dichos esfuerzos sin que su geometría cambie en forma significativa. Esta capacidad depende de propiedades tales como el módulo de elasticidad y la resistencia a la deformación. En la manufactura el objetivo es el opuesto. En ella se desea aplicar esfuerzos que excedan la resistencia a la deformación del material a fin de alterar su forma. Procesos mecánicos tales como el conformado y el maquinado tienen éxito gracias al desarrollo de fuerzas que excedan la resistencia del material ante la deformación. Así, se tiene el dilema siguiente: las propiedades mecánicas que resultan deseables para el diseñador, como resistencia elevada, por lo general hacen que la manufactura del producto sea más difícil. Es útil para el ingeniero de manufactura apreciar el punto de vista del diseño, y para el diseñador tomar en cuenta el de la manufactura.

En este capítulo se estudian las propiedades mecánicas de los materiales. Las limitaciones de alcance y espacio nos fuerzan a considerar sólo aquellas propiedades que son más relevantes para la manufactura.

3.1 RELACIONES ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Existen tres tipos de esfuerzo estáticos a los que se sujetan los materiales: tensión, compresión y cortante. Los esfuerzos de tensión tienden a estirar al material, las de compresión a compactarlo, y las cortantes comprenden tensiones que tienden a ocasionar que porciones adyacentes del material se deslicen una respecto a la otra. La curva esfuerzo-deformación es la relación básica que describe las propiedades mecánicas para los tres tipos.

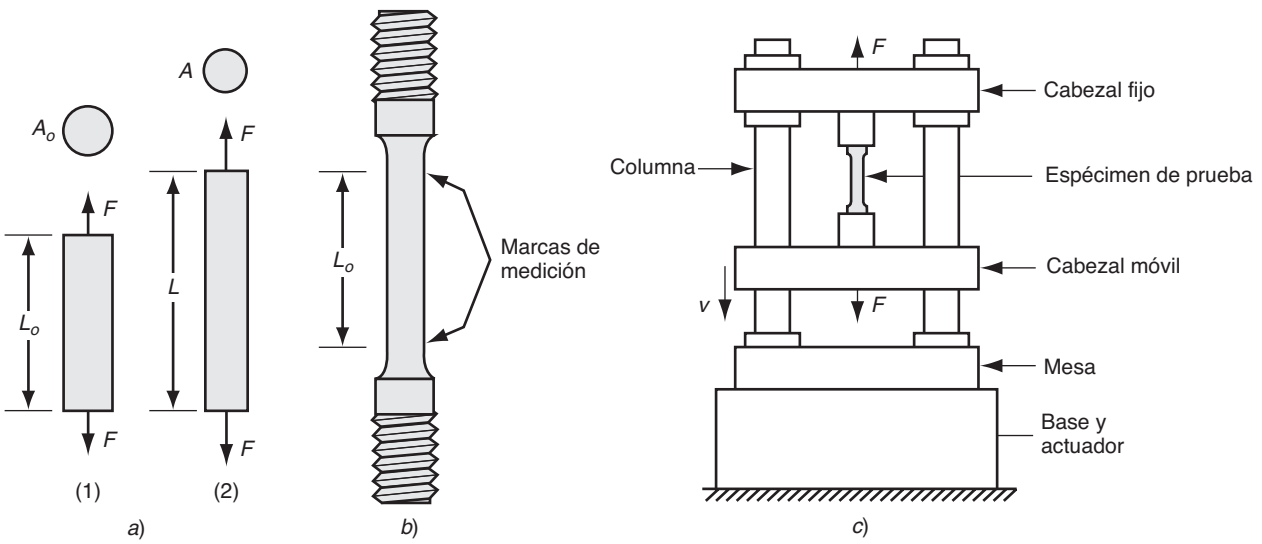
3.1.1 Propiedades ante la tensión

La prueba de tensión es el procedimiento más común para estudiar la relación esfuerzo-deformación, en particular para los metales. Durante la prueba, se aplica una fuerza que tira del material y tiende a estirarlo y reducir su diámetro, como se ilustra en la figura 3.1*a*). Los estándares de la ASTM (American Society for Testing and Materials) especifican el modo de preparación del espécimen de prueba y de la realización de la prueba misma. En la figura 3.1*b*) y *c*) se ilustran el espécimen común y la preparación general de la prueba, respectivamente.

El ejemplar con que se inicia la prueba tiene una longitud original L_o y un área A_o. La longitud se mide como la distancia entre las marcas de medición, y el área como la sección transversal (circular, por lo general) del espécimen. Durante la prueba de un metal, el ejemplar se estira, luego le aparece un estrangulamiento y por último se fractura, como se muestra en la figura 3.2. La carga y el cambio de longitud del espécimen se registran conforme la prueba se efectúa a fin de obtener los datos que se requieren para determinar la relación esfuerzo-deformación. Hay dos tipos diferentes de curvas esfuerzo-deformación: 1) la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería, y 2) la de esfuerzo-deformación verdadera. La primera es más importante para el diseño, y la segunda lo es para la manufactura.

Esfuerzo-deformación de ingeniería El esfuerzo deformación de ingeniería en una prueba de tensión que se define en relación con el área y longitud originales del espécimen de prueba. Dichos valores son de interés en el diseño debido a que el diseñador espera

FIGURA 3.1 Prueba de tensión: *a*) la fuerza de tensión que se aplica en 1) y 2) da como resultado el estiramiento del material; *b*) espécimen de prueba común; y *c*) disposición de la prueba de tensión.



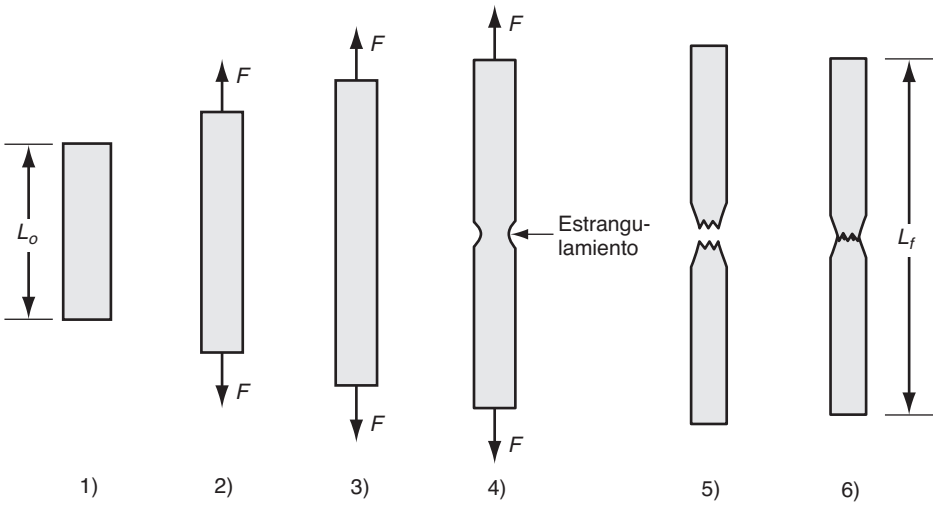


FIGURA 3.2 Desarrollo común de una prueba de tensión: 1) inicio de la prueba, sin carga; 2) estiramiento uniforme y reducción del área de la sección transversal; 3) continuación del estiramiento, se alcanza la carga máxima; 4) formación de un estrangulamiento, la carga comienza a disminuir; y 5) fractura. Si los elementos se unen como se ilustra en 6), es posible medir la longitud final.

que las tensiones-deformaciones experimentadas por cualquier componente del producto no cambiarán su forma de manera significativa. Los componentes están diseñados para soportar los esfuerzos que se prevé encontrarán durante su uso.

En la figura 3.3 se ilustra una curva común del esfuerzo-deformación de ingeniería de una prueba de tensión de un espécimen metálico. El ***esfuerzo de ingeniería*** en cualquier punto de la curva se define como la fuerza dividida entre el área original:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o} \tag{3.1}$$

donde σ_e = esfuerzo de ingeniería, MPa (lb/in^2), F = fuerza aplicada durante la prueba, N (lb), y A_o = área original del espécimen de prueba, mm^2 (in^2). La ***deformación de ingeniería***

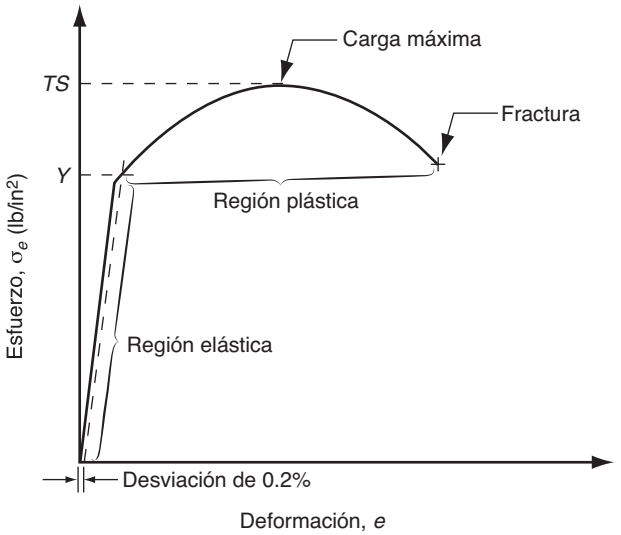


FIGURA 3.3 Gráfica normal del esfuerzo-deformación de ingeniería durante una prueba de tensión de un metal.

TABLA 3.1 Módulo de elasticidad para materiales seleccionados.

	Módulo de elasticidad			Módulo de elasticidad	
Metales	MPa	lb/in^2	Cerámicas y polímeros	MPa	lb/in^2
Aluminio y sus aleaciones	69×10^3	10×10^6	Alúmina	345×10^3	50×10^6
Hierro colado	138×10^3	20×10^6	Diamante[a]	1035×10^3	150×10^6
Cobre y sus aleaciones	110×10^3	16×10^6	Vidrio plano	69×10^3	10×10^6
Hierro	209×10^3	30×10^6	Carburo de silicio	448×10^3	65×10^6
Plomo	21×10^3	3×10^6	Carburo de tungsteno	552×10^3	80×10^6
Magnesio	48×10^3	7×10^6	Nailon	3.0×10^3	0.40×10^6
Níquel	209×10^3	30×10^6	Fenol formaldehído	7.0×10^3	1.00×10^6
Acero	209×10^3	30×10^6	Polietileno (de baja densidad)	0.2×10^3	0.03×10^6
Titanio	117×10^3	17×10^6	Polietileno (de alta densidad)	0.7×10^3	0.10×10^6
Tungsteno	407×10^3	59×10^6	Poliestireno	3.0×10^3	0.40×10^6

Compilado de las referencias [8], [10], [11], [14], [15] y otras fuentes.

[a] Aunque el diamante no es una cerámica, con frecuencia se le compara con esos materiales.

en cualquier punto de la prueba está dada por

$$e = \frac{L - L_O}{L_O} \tag{3.2}$$

donde e = deformación de ingeniería, mm/mm (in/in); L = longitud en cualquier punto durante el estiramiento, mm (in); y L_o = longitud de medición original, mm (in). Las unidades de la deformación de ingeniería se dan como mm/mm (in/in), pero puede concebirse que representan estiramiento por unidad de longitud, sin unidades.

La relación esfuerzo-deformación de la figura 3.3 tiene dos regiones que indican dos modos distintos de comportamiento: 1) elástico y 2) plástico. En la región elástica, la relación entre el esfuerzo y la deformación es lineal, y el material muestra un comportamiento elástico porque regresa a su longitud original si la carga (esfuerzo) se interrumpe. La relación está definida por la ***ley de Hooke:***

$$\sigma_e = Ee \tag{3.3}$$

donde E = ***módulo de elasticidad***, MPA (lb/in^2). E es una medida de la rigidez inherente del material. Es una constante de proporcionalidad cuyo valor es diferente para materiales distintos. En la tabla 3.1 se presentan valores comunes para varios materiales, metales y no metales.

Conforme el esfuerzo aumenta, se alcanza un punto final en la relación lineal en el que el material comienza a ceder. Ese ***punto de deformación***, Y, del material se identifica en la figura por el cambio de la pendiente al final de la región lineal. Debido a que el comienzo de la deformación por lo general es difícil de ver en una gráfica de datos de prueba (por lo general no ocurre como un cambio abrupto de la pendiente), es común definir a Y como el esfuerzo con el que ocurre un avance de la deformación del 0.2% a partir de la línea recta. En forma más específica, es el punto en el que la curva esfuerzo-deformación del material interseca una recta paralela a la porción recta de la curva, pero desviada de ella por una deformación de 0.2%. El punto de deformación es una característica de la resistencia del material, y por ello es frecuente hacer referencia a él como el ***límite de deformación*** (otros nombres que recibe son ***esfuerzo de deformación*** y ***límite elástico***).

El punto de deformación marca la transición hacia la región plástica y el comienzo de la deformación plástica del material. La relación entre el esfuerzo y la deformación ya no estará determinada por la ley de Hooke. Conforme se incrementa la carga más allá del punto de deformación, continúa la elongación del material, pero a una tasa mucho más rápida que la anterior, como se aprecia en la figura 3.3. La elongación va acompañada de una reducción uniforme del área de la sección transversal, consistente con el mantenimiento de un volumen constante. Por último, la carga aplicada F alcanza un valor máximo, y el

TABLA 3.2 Resistencia de vencimiento y resistencia a la tensión de metales seleccionados.

	Resistencia de deformación		Resistencia a la tensión			Resistencia de deformación		Resistencia a la tensión	
Metal	MPa	lb/in²	MPa	lb/in²	Metal	MPa	lb/in²	MPa	lb/in²
Aluminio, templado	28	4000	69	10000	Níquel, templado	150	22000	450	65000
Aluminio, CW[a]	105	15000	125	18000	Acero, bajo C[a]	175	25000	300	45000
Aleaciones de aluminio[a]	175	25000	350	50000	Acero, alto C[a]	400	60000	600	90000
Hierro colado[a]	275	40000	275	40000	Acero, aleaciones[a]	500	75000	700	100000
Cobre, templado	70	10000	205	30000	Acero, inoxidable[a]	275	40000	650	95000
Aleaciones de cobre[a]	205	30000	410	60000	Titanio, puro	350	50000	515	75000
Aleaciones de magnesio[a]	175	25000	275	40000	Aleaciones de titanio	800	120000	900	130 000

Compilada a partir de las referencias [8], [10], [11], [15] y otras fuentes.

[a] Los valores dados son comunes. Para las aleaciones, hay un rango amplio de los valores de resistencia, en función de su composición y tratamiento (por ejemplo, tratamiento térmico, y endurecimiento por trabajo).

esfuerzo de ingeniería calculado en ese punto se denomina ***resistencia a la tensión*** o ***resistencia final a la tensión*** del material. Se denota como TS, donde $TS = F_{máx}/A_o$. TS e Y son propiedades importantes de la resistencia para los cálculos del diseño (también se les usa para hacer los de manufactura). En la tabla 3.2 se enlistan algunos valores comunes de la resistencia a la deformación y resistencia a la tensión para metales seleccionados. Las pruebas convencionales de resistencia a la tensión son difíciles de hacer para las cerámicas, y se emplea una prueba alternativa para medir la resistencia de esos materiales frágiles (véase la sección 3.1.3). Los polímeros difieren de los metales y las cerámicas en sus propiedades de resistencia debido a la plasticidad (véase la sección 3.5).

A la derecha de la resistencia a la tensión, en la curva esfuerzo-deformación, la carga comienza a declinar y es común que el espécimen de prueba comience un proceso de elongación localizada que se conoce como ***estrangulamiento***. En lugar de continuar la deformación uniforme a todo lo largo de su longitud, comienza a concentrarse la deformación en una sección pequeña del espécimen. El área de esa sección se angosta (se estrangula) de manera significativa hasta que sobreviene la falla. El esfuerzo calculado inmediatamente antes de la falla se conoce como ***esfuerzo de fractura***.

La cantidad de deformación que el material es capaz de soportar antes de que ocurra la falla también es una propiedad mecánica de interés para muchos procesos de manufactura. La medición común de esta propiedad es la ***ductilidad***, que es la capacidad que tiene un material para deformarse plásticamente sin sufrir una fractura. Esta medición se toma ya sea como elongación o como reducción del área. La elongación se define como

$$EL = \frac{L_f - L_O}{L_O} \tag{3.4}$$

donde EL = elongación, que de manera frecuente se expresa como un porcentaje; L_f = longitud del espécimen al ocurrir la fractura, mm (in), medida como la distancia entre las marcas de medición después de que las dos partes del espécimen se han vuelto a unir; y L_o = longitud original del espécimen, mm (in). La reducción del área se define como

$$AR = \frac{A_O - A_f}{A_O} \tag{3.5}$$

donde AR = reducción del área, que se expresa con frecuencia como porcentaje; A_f = área de la sección transversal en el punto de fractura, mm² (in²); y A_o = área original, mm² (in²). Existen problemas con estas dos mediciones de ductilidad debido al estrangulamiento que ocurre en los especímenes de prueba metálicos y el efecto no uniforme asociado con la elongación y la reducción del área. A pesar de esas dificultades, la elongación y la reducción porcentual del área son las medidas de la ductilidad que se emplean con mayor frecuencia en la práctica de la ingeniería. Algunos valores frecuentes del porcentaje de elongación para distintos materiales (sobre todo metales) se enlistan en la tabla 3.3.

TABLA 3.3 Ductilidad como % de elongación (valores frecuentes) para varios materiales seleccionados.

Material	Elongación	Material	Elongación
Metales		***Metales, continuación***	
Aluminio recocido	40%	Acero, bajo C[a]	30%
Aluminio, trabajado en frío	8%	Acero, alto C[a]	10%
Aleaciones de aluminio, templadas[a]	20%	Acero, aleación[a]	20%
Aleaciones de aluminio, tratadas con calor[a]	8%	Acero, inoxidable, austenítico[a]	55%
Aleaciones de aluminio, fundidas[a]	4%	Titanio, casi puro	20%
Hierro colado, gris[a]	0.6%	Aleación de zinc	10%
Cobre, templado	45%	***Cerámicas***	0[b]
Cobre, trabajado en frío	10%	***Polímeros***	
Aleación de cobre: latón, templado	60%	Polímeros termoplásticos	100%
Aleaciones de magnesio[a]	10%	Polímeros termoestables	1%
Níquel, templado	45%	Elastómeros (por ejemplo, caucho)	1%[c]

Compilado a partir de las referencias [8], [10], [11], [15], y de otras fuentes.

[a] Los valores dados son comunes. Para las aleaciones, hay un rango de ductilidad que depende de la composición y el tratamiento (por ejemplo, tratamiento con calor y grado de endurecimiento por trabajo).

[b] Los materiales cerámicos son frágiles; muestran deformación elástica pero virtualmente ninguna plástica.

[c] Los elastómeros soportan bastante deformación elástica, pero su deformación plástica es muy limitada, lo común es de sólo 1%, aproximadamente.

Esfuerzo-deformación verdadero Los lectores acuciosos quizás hayan tenido problemas por el uso del área original del espécimen de prueba para calcular los esfuerzos de ingeniería, en lugar del área real (instantánea) que es cada vez más pequeña conforme la prueba avanza. Si se utilizara el área real, los esfuerzos calculados serían mayores. El valor del esfuerzo que se obtiene al dividir la carga aplicada entre el valor instantáneo del área se define como ***esfuerzo verdadero***:

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3.6}$$

donde σ = esfuerzo verdadero, MPa (lb/in^2); F = fuerza, N(lb); y A = área real (instantánea) que resiste la carga, mm^2 (in^2).

De manera similar, la ***deformación verdadera*** proporciona una evaluación más realista de la elongación "instantánea" por unidad de longitud del material. El valor de la deformación verdadera en una prueba de tensión se estima por medio de dividir la elongación total en incrementos pequeños, el cálculo de la deformación de ingeniería para cada incremento sobre la base de su longitud inicial, y después con la suma de los valores de la deformación. En el límite, la deformación verdadera se define como

$$\epsilon = \int_{L_o}^{L} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_O} \tag{3.7}$$

donde L = longitud instantánea en cualquier momento durante la elongación. Al final de la prueba (u otra deformación), el valor final de la deformación se calcula con el uso de $L = L_f$.

Cuando se grafican los datos del esfuerzo-deformación de ingeniería de la figura 3.3, con el empleo de los valores del esfuerzo y la deformación verdaderos, la curva que resulta tiene la apariencia de la que se muestra en la figura 3.4. En la región elástica, la gráfica es virtualmente la misma de antes. Los valores de la deformación son pequeños y la deformación verdadera es casi igual a la de ingeniería para la mayor parte de los metales de interés. Los valores de esfuerzo respectivos también están muy cerca el uno del otro. La razón de estas casi igualdades es que el área de la sección transversal del espécimen de prueba no se reduce significativamente en la región elástica. Así, puede utilizarse la ley de Hooke para relacionar el esfuerzo verdadero con la deformación verdadera: $\sigma = E\epsilon$.

La diferencia entre la curva esfuerzo-deformación verdaderos y su contraparte de ingeniería se encuentra en la región plástica. Los valores del esfuerzo son mayores en la región plástica porque en el cálculo ahora se emplea el área instantánea de la sección transversal del espécimen, que se redujo continuamente durante la elongación. Como en la curva anterior, al final ocurre una caída como resultado del estrangulamiento. En la figura

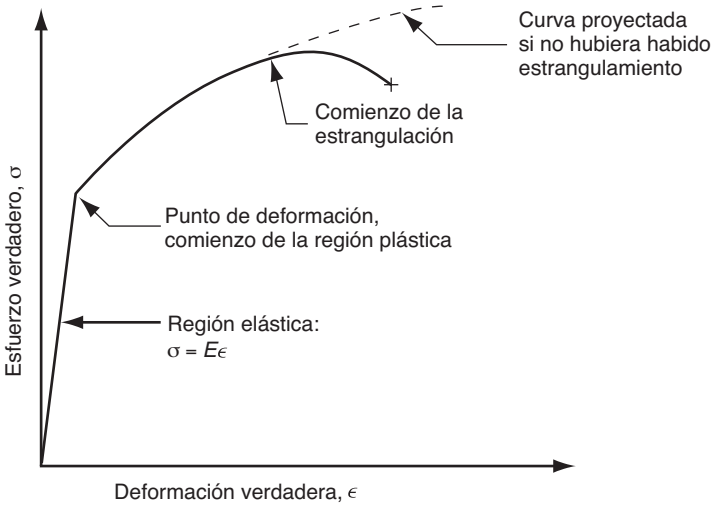


FIGURA 3.4 Curva esfuerzo-deformación verdaderos, para la gráfica anterior de esfuerzo-deformación de ingeniería que se muestra en la figura 3.3.

se utiliza una línea punteada para indicar la continuación proyectada de la gráfica esfuerzo-deformación verdaderos, si no hubiera habido estrangulamiento.

Conforme la deformación se hace significativa en la región plástica, los valores de la deformación verdadera y de ingeniería divergen. La deformación verdadera se relaciona con la correspondiente de ingeniería por medio de

$$\epsilon = \ln(1+e) \tag{3.8}$$

De manera similar, el esfuerzo verdadero y el de ingeniería se relacionan con la expresión

$$\sigma = \sigma_e(1+e) \tag{3.9}$$

En la figura 3.4, debe notarse que en la región plástica el esfuerzo se incrementa en forma continua hasta que comienza el estrangulamiento. Cuando esto pasaba en la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería, su significancia se perdía porque para calcular el esfuerzo se había utilizado un valor de área que se sabía erróneo. Ahora, cuando el esfuerzo verdadero también se incrementa, no se puede ignorar tan a la ligera. Lo que eso significa es que el metal se está haciendo más fuerte conforme la deformación aumenta. Esta propiedad se denomina ***endurecimiento por deformación***, que se mencionó en el capítulo anterior en el análisis de las estructuras cristalinas, y que tienen casi todos los metales en mayor o menor grado.

El endurecimiento por deformación, o ***endurecimiento por trabajo***, como se le denomina con frecuencia, es un factor importante en ciertos procesos de manufactura, en particular en la laminacion del metal. Ahora se examinará el comportamiento de un metal en función de cómo lo afecta esta propiedad. Si la parte de la curva esfuerzo-deformación verdaderos que representa la región plástica se graficara en una escala log-log, el resultado sería una relación lineal, como se aprecia en la figura 3.5. Debido a que con esta transformación de los datos se genera una línea recta, la relación entre el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera en la región plástica se expresa como

$$\sigma = K\epsilon^n \tag{3.10}$$

Esta ecuación se llama ***curva de flujo***, y proporciona una aproximación buena del comportamiento de los metales en la región plástica, inclusive de su capacidad de endurecerse por deformación. La constante K se llama ***coeficiente de resistencia***, MPa (lb/in^2), y es igual al valor del esfuerzo verdadero para un valor igual a 1 de la deformación verdadera. El parámetro n se denomina ***exponente de endurecimiento por deformación***, y es la pendiente de la recta que se observa en la figura 3.5. Su valor está

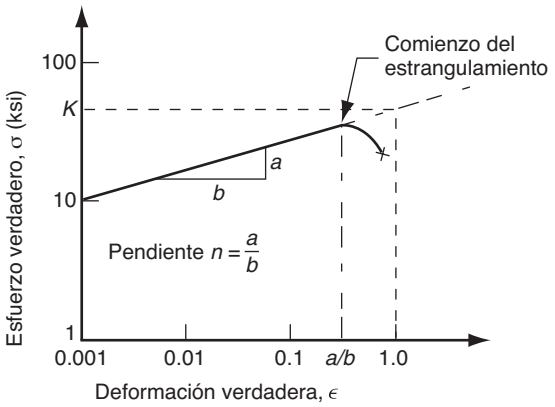


FIGURA 3.5 Curva esfuerzo-deformación verdaderos en escala log-log.

directamente relacionado con la tendencia de un metal para endurecerse con el trabajo. En la tabla 3.4 se dan valores comunes de K y n para metales seleccionados.

El estrangulamiento en una prueba de tensión y en operaciones de laminado de metales que estiran la pieza de trabajo se relaciona estrechamente con el endurecimiento por deformación. Ahora se estudiará esta relación según se observa durante una prueba de tensión. Conforme el espécimen de prueba se estira durante la parte inicial de la prueba (antes de que comience el estrangulamiento), ocurre una deformación uniforme en toda la longitud porque si cualquier elemento de la muestra se deformara más que el metal circundante, su resistencia aumentaría debido al endurecimiento por trabajo, lo que lo haría más resistente ante una deformación adicional y hasta que el metal vecino se hubiera deformado una cantidad igual. Por último, la deformación se hace tan grande que no puede sostenerse en forma uniforme. Se desarrolla un punto débil de la longitud (debido a la formación de dislocaciones en las fronteras de los granos, impurezas del metal, u otros factores), y comienza el estrangulamiento, lo que conduce a la falla. Las evidencias empíricas revelan que el estrangulamiento comienza para un metal en particular cuando la deformación verdadera alcanza un valor igual al exponente de endurecimiento por deformación, n. Por tanto, un valor elevado de n significa que el metal puede deformarse todavía más antes del comienzo del estrangulamiento durante la carga de tensión.

Tipos de relaciones esfuerzo-deformación La curva de esfuerzo-deformación verdaderos proporciona mucha información sobre el comportamiento elástico-plástico. Como se dijo, la ley de Hooke ($\sigma = Ee$) gobierna el comportamiento del metal en la región elástica, y la curva de flujo ($\sigma = K\epsilon^n$) lo determina en la región plástica. Son tres las formas

TABLA 3.4 Valores característicos del coeficiente de resistencia K y del exponente de endurecimiento por deformación, n, para metales seleccionados.

Material	Coeficiente de resistencia, K		Exponente de endurecimiento por deformación, n
	MPa	lb/in^2	
Aluminio puro cocido	175	25 000	0.20
Aleación de aluminio, templada[a]	240	35 000	0.15
Aleación de aluminio, tratada térmicamente	400	60 000	0.10
Cobre, puro, templado	300	45 000	0.50
Cobre, aleación: latón[a]	700	100 000	0.35
Acero, bajo C, templado[a]	500	75 000	0.25
Acero, alto C, templado[a]	850	125 000	0.15
Acero, aleación, templado[a]	700	100 000	0.15
Acero, inoxidable, austenítico, templado	1 200	175 000	0.40

Compilado a partir de las referencias [9], [10], [11] y de otras fuentes.

[a] Los valores de K y n varían de acuerdo con la composición, el tratamiento térmico y el endurecimiento por trabajo.

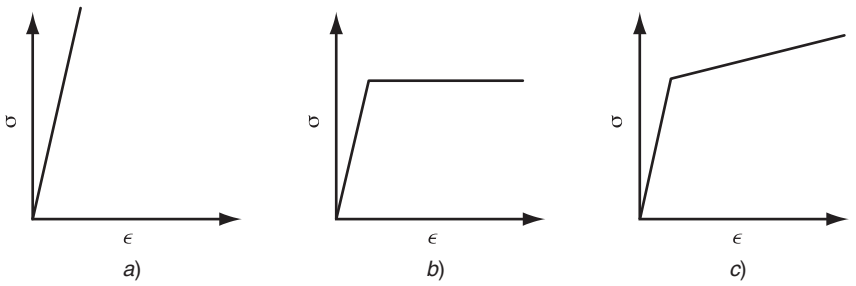


FIGURA 3.6 Tres categorías para la relación esfuerzo-deformación: *a*) perfectamente elástica; *b*) perfectamente plástica y *c*) elástico y endurecido por deformación.

básicas de relación esfuerzo-deformación que describen el comportamiento de casi todos los materiales sólidos, las que se muestran en la figura 3.6:

a) ***Perfectamente elástico***. El comportamiento de este material queda definido por completo por su rigidez, indicada por el módulo de elasticidad E. En lugar de producir un flujo plástico, se fractura. Los materiales frágiles tales como las cerámicas, muchos tipos de hierro colado y polímeros termoestables, poseen curvas de esfuerzo-deformación que pertenecen a esta categoría. Estos materiales no son buenos candidatos para las operaciones de laminado.

b) ***Elástico y perfectamente plástico.*** Este material tiene una rigidez definida por E. Una vez que se alcanza la resistencia de deformación, Y, el material se deforma plásticamente con el mismo nivel de esfuerzo. La curva de flujo está dada por $K = Y$, y $n = 0$. Los metales se comportan de esta manera cuando se calientan a temperaturas suficientemente altas que los recristalizan en lugar de endurecerlos por deformación durante su trabajo. El plomo presenta este comportamiento a temperatura ambiente porque ésta es superior al punto de recristalización del plomo.

c) ***Elástico y endurecimiento por deformación***. Este material obedece a la ley de Hooke en la región elástica. Comienza a fluir a su resistencia de deformacion Y. Una deformación continua requiere un esfuerzo siempre incremental, dada por una curva de flujo cuyo coeficiente de resistencia K es mayor que Y y cuyo exponente de endurecimiento por deformación, n, es mayor que cero. La curva de flujo por lo general se representa como función lineal en una gráfica hecha en papel logarítmico. La mayor parte de metales dúctiles se comportan de este modo cuando se trabajan en frío.

Los procesos de manufactura que deforman los materiales a través de la aplicación de esfuerzos de tensión que incluyen el estirado de alambres y barras (véase la sección 21.4) y el conformado por estiramiento (véase la sección 22.6.1).

3.1.2 Propiedades ante la compresión

Una prueba de compresión aplica una carga que comprime una muestra cilíndrica colocada entre dos placas, como se ilustra en la figura 3.7. Conforme se comprime, su altura se reduce y el área de su sección transversal se incrementa. El esfuerzo de ingeniería se define como

$$\sigma_e = \frac{F}{A_o} \tag{3.11}$$

donde A_o = área original del espécimen. Ésta es la misma definición del esfuerzo de ingeniería que se utilizó en la prueba de tensión. La deformación de ingeniería se define como

$$e = \frac{h - h_o}{h_o} \tag{3.12}$$

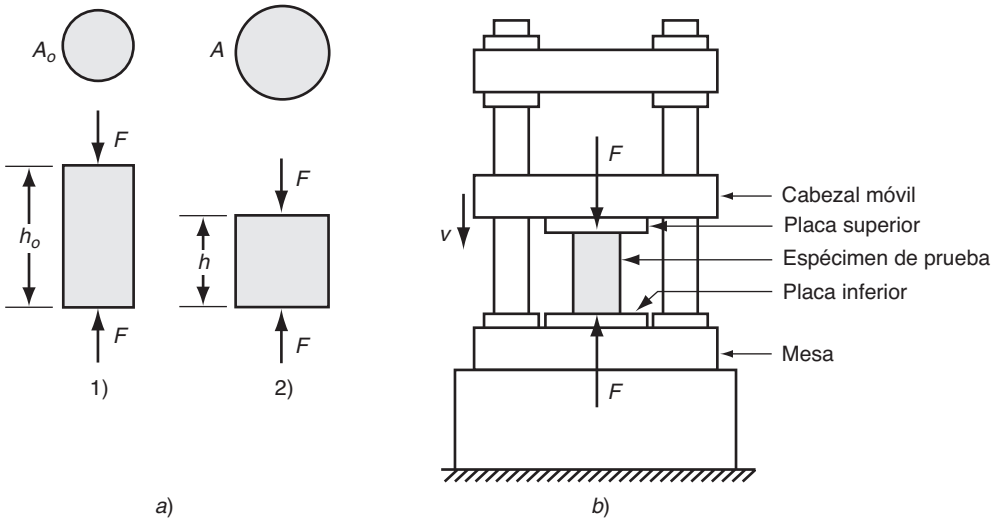


FIGURA 3.7 Prueba de compresión: *a*) fuerza de compresión que se aplica al ejemplar de prueba en 1), y 2) cambio resultante de la altura; y *b*) disposición de la prueba, exagerando el tamaño del espécimen de prueba.

donde h = altura del espécimen en un momento particular de la prueba, mm (in); y h_0 = altura inicial, mm (in). Debido a que durante la compresión la altura disminuye, el valor de e será negativo. El signo negativo por lo general se ignora cuando se expresan los valores de la deformación por compresión.

Si en una prueba de compresión se grafica el esfuerzo de ingeniería contra la deformación de ingeniería, el resultado se asemeja a la figura 3.8. Como antes, la curva se divide en las regiones elástica y plástica, pero la forma de la parte plástica es diferente de aquella correspondiente a la prueba de tensión. Debido a que la compresión ocasiona que la sección transversal se incremente (en vez de disminuir, como en la prueba de tensión), la carga se incrementa con mayor rapidez que antes. Esto da como resultado un valor más alto del esfuerzo de ingeniería calculado.

En la prueba de compresión ocurre algo más que contribuye al aumento del esfuerzo. Conforme el espécimen cilíndrico se comprime, la fricción en sus superficies que están en

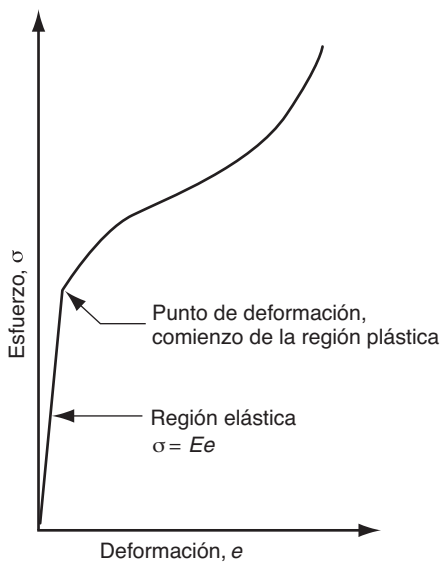


FIGURA 3.8 Curva esfuerzo-deformación común de ingeniería, para una prueba de compresión.

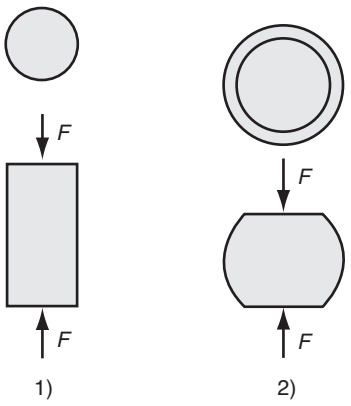


FIGURA 3.9 Efecto de barril en una prueba de compresión: 1) comienzo de la prueba; y 2) después de que ha tenido lugar una compresión considerable.

contacto con las placas tiende a impedir que los extremos del cilindro se expandan. Durante la prueba se consume energía adicional debido a esta fricción, lo que da como resultado una fuerza aplicada más grande. También se muestra un incremento en el esfuerzo de ingeniería calculado. Así, debido al aumento del área de la sección transversal y a la fricción entre el espécimen y las placas, se obtiene la curva esfuerzo-deformación de ingeniería característica de una prueba de este tipo según se aprecia en la figura.

Otra consecuencia de la fricción entre las superficies es que el material cercano de la parte media del espécimen sí puede incrementar su área mucho más que los extremos. Esto resulta en que la muestra adopte una forma característica de ***barril***, como se ilustra en la figura 3.9.

Aunque hay diferencias entre las curvas de esfuerzo-deformación de ingeniería correspondientes a la tensión y a la compresión, cuando se grafican los datos respectivos como esfuerzo-deformación verdaderos, las relaciones son casi idénticas (para casi todos los materiales). Debido a que en la bibliografía abundan más los resultados de la prueba de tensión, es posible obtener valores de los parámetros de la curva de flujo (K y n) a partir de datos de esas pruebas y aplicarlos con igual validez a una operación de compresión. Lo que debe hacerse al usar los resultados de la prueba de tensión para una operación de compresión es ignorar el efecto de la estrangulación, fenómeno que es peculiar para la deformación inducida por esfuerzos de tensión. En la compresión no hay un colapso correspondiente del trabajo. (Podría argumentarse que el abombamiento de secciones largas y delgadas durante la compresión es la contraparte del estrangulamiento. Sin embargo, ese abombamiento es un modo de falla que involucra la flexión del espécimen, por lo que el esfuerzo ya no se limita sólo a la compresión. En la sección siguiente se estudian los esfuerzos del doblado.) En las gráficas anteriores de curvas de tensión de esfuerzo-deformación se extendieron los datos más allá del punto de estrangulamiento por medio de líneas punteadas. Éstas representan mejor el comportamiento del material durante la compresión que los datos de prueba reales de la tensión.

Las operaciones de compresión en la forja de metal son mucho más comunes que las de estiramiento. Los procesos importantes de compresión en la industria incluyen el laminado, forjado y extrusión (véase el capítulo 19).

3.1.3 Doblado y prueba de materiales frágiles

Las operaciones de doblado se emplean para formar placas y hojas metálicas. Como se ve en la figura 3.10, el proceso de doblar una sección transversal rectangular, sujeta al material a esfuerzos de tensión (y deformación) en la mitad externa de la sección que se dobla, y a esfuerzos de compresión (y deformaciones) en la mitad interior. Si el material no se fractura, queda doblado en forma permanente (plásticamente), como se muestra en el inciso 3) de la figura 3.10.

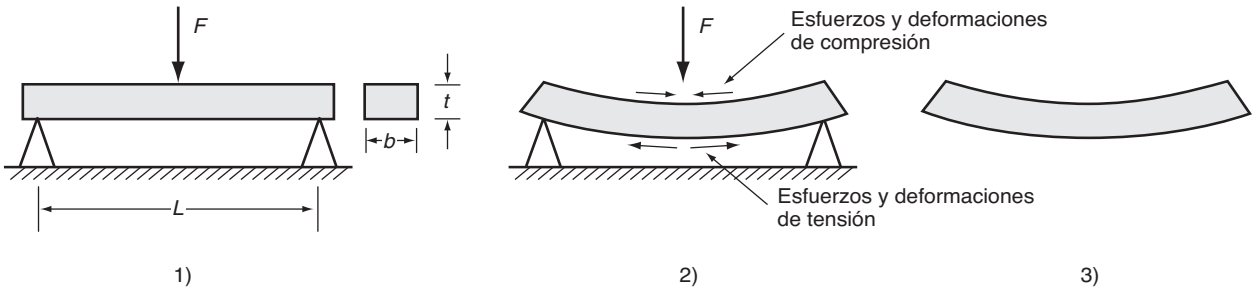


FIGURA 3.10 El doblado de una sección transversal rectangular produce en el material esfuerzos tanto de tensión como de compresión: 1) carga inicial; 2) espécimen con mucho esfuerzo y deformación; y 3) pieza doblada.

Los materiales duros y frágiles (por ejemplo, cerámicas), que tienen elasticidad pero poca o ninguna plasticidad, con frecuencia se prueban con un método que sujeta a la muestra a una carga flexionante. Estos materiales no responden bien a las pruebas de tensión tradicionales debido a los problemas para preparar los especímenes de prueba y la posibilidad de alinear mal las partes de la prensa que los sujeta. La ***prueba de doblado*** (también conocida como ***prueba de flexión***) se utiliza para probar la resistencia de estos materiales, con el uso del arreglo que se ilustra en el primer diagrama de la figura 3.10. En ese procedimiento, se coloca un espécimen de sección transversal rectangular entre dos apoyos, y en su centro se aplica una carga. En esta configuración, la prueba se denomina de doblado de tres puntos. En ocasiones también se utiliza una configuración de cuatro puntos. Los materiales frágiles no se flexionan en el grado exagerado que se muestra en la figura 3.10; en vez de ello, se deforman elásticamente hasta el momento inmediato anterior a la fractura. La falla ocurre por lo general porque se excede la resistencia final de tensión de las fibras exteriores del espécimen. Esto da como resultado un ***agrietamiento*** o ***clivaje***, modo de falla que se asocia con las cerámicas y metales que operan a temperaturas de uso bajas, en el que en vez de separación ocurre deslizamiento a lo largo de los planos cristalográficos. El valor de resistencia obtenido de esta prueba se denomina ***resistencia a la ruptura transversal***, y se calcula con la fórmula siguiente

$$TRS = \frac{1.5\,FL}{bt^2} \tag{3.13}$$

donde TRS = resistencia a la ruptura transversal, MPa (lb/in^2); F = carga aplicada al ocurrir la fractura, N (lb); L = longitud entre los apoyos del espécimen, mm (in); y b y t son las dimensiones de la sección transversal del espécimen, como se muestra en la figura, mm (in).

La prueba de flexión también se utiliza para ciertos materiales que no son frágiles, tales como los polímeros termoplásticos. En este caso, como es probable que el material se deforme en vez de fracturarse, no puede determinarse la TRS con base en la falla del espécimen. En vez de ello, se emplea cualquiera de dos medidas: 1) la carga registrada para un nivel dado de deflexión, o 2) la deflexión observada para una carga dada.

3.1.4 Propiedades ante la cortante

Una cortante comprende la aplicación de esfuerzos en direcciones opuestas sobre ambos lados de un elemento delgado a fin de deformarlo como se muestra en la figura 3.11. El esfuerzo cortante se identifica como

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{3.14}$$

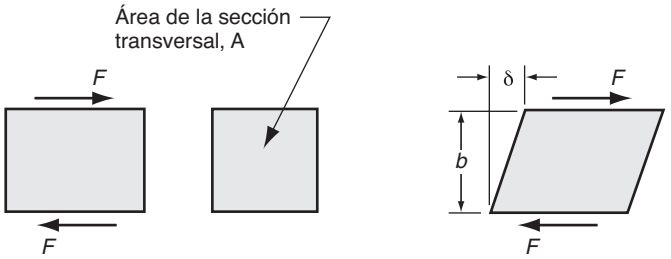


FIGURA 3.11 Cortante *a*) esfuerzo y *b*) deformación.

donde τ = esfuerzo cortante, lb/in^2 (MPa); F = fuerza aplicada, N (lb); y A = área sobre la que se aplica la fuerza, in^2 (mm^2). La deformación cortante se define como

$$\gamma = \frac{\delta}{b} \tag{3.15}$$

donde γ = deformación cortante, mm/mm (in/in); δ = deflexión del elemento, mm (in); y b = distancia ortogonal sobre la que ocurre la deflexión, mm (in).

Es común probar el esfuerzo y deformación cortantes por medio de una ***prueba de torsión***, en la que un espécimen tubular de pared delgada se sujeta a un par, como se ilustra en la figura 3.12. Conforme el par aumenta, el tubo se flexiona por torsión, que para esta geometría es una deformación cortante.

En la prueba, el esfuerzo cortante se determina con la ecuación

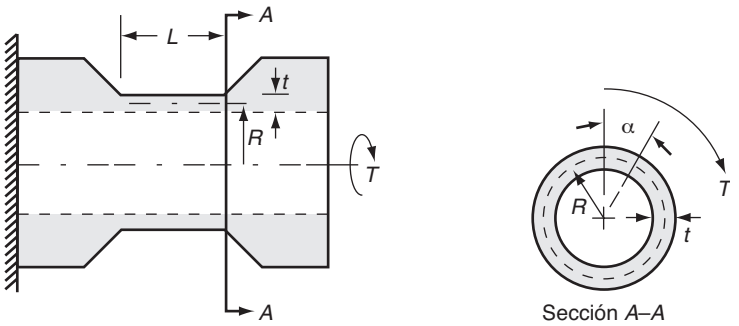
$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 t} \tag{3.16}$$

donde T = par aplicado, N-mm (lb-in); R = radio del tubo medido respecto del eje neutro de la pared, mm (in); y t = espesor de la pared, mm (in). La deformación cortante se determina con la medición de la cantidad de deflexión angular del tubo, la que se convierte a distancia flexionada y se divide entre la longitud de medición, L. Al reducir esto a una expresión sencilla queda

$$\gamma = \frac{R\alpha}{L} \tag{3.17}$$

donde α = la deflexión angular (radianes).

FIGURA 3.12 Arreglo de la prueba de torsión.



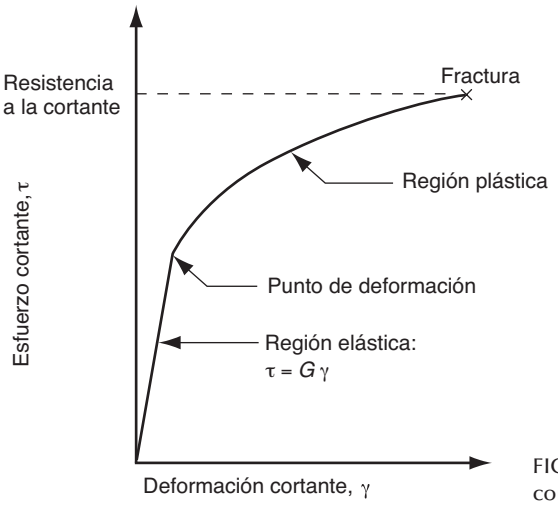


FIGURA 3.13 Curva común esfuerzo-deformación cortante a partir de una prueba de torsión.

En la figura 3.13 se presenta una curva común de esfuerzo-deformación cortante. En la región elástica, la relación está definida por

$$\tau = G\gamma \tag{3.18}$$

donde G = ***módulo de la cortante***, o ***módulo de la cortante de elasticidad***, MPa (lb/in^2). Para la mayoría de los materiales, el módulo de la cortante es aproximadamente de $G = 0.4E$, donde E es el módulo de elasticidad convencional.

En la región plástica de la curva esfuerzo-deformación cortante, el material sujeto a deformación se endurece y ocasiona que el par aplicado aumente hasta que, finalmente, ocurre la fractura. En esta región, la relación es similar a la curva de flujo. Es posible calcular el esfuerzo cortante en la fractura, que se usa como la ***resistencia a la cortante***, S, del material. La resistencia a la cortante se puede estimar a partir de los datos de resistencia a la tensión, por medio de la aproximación: $S = 0.7(TS)$.

Como el área de la sección transversal del espécimen en la prueba de torsión no cambia, como sí lo hace en las pruebas de tensión y compresión, la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería para la cortante obtenida a partir de la prueba de torsión es virtualmente la misma que la curva esfuerzo-deformación verdadera.

En la industria son comunes los procesos cortantes. La acción cortante se utiliza para cortar láminas metálicas en operaciones de cizallado, punzonado y otras (véase la sección 20.1). Al maquinar, el material se retira por medio del mecanismo de deformación cortante (véase la sección 21.2).

3.2 DUREZA

La ***dureza*** de un material se define como su resistencia a la indentación permanente. Por lo general, una dureza buena significa que el material es resistente a las rayaduras y al uso. Ésta es una característica importante para muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo la mayoría del herramental usado en la manufactura. Como se verá más adelante en esta sección, hay una estrecha correlación entre la dureza y la resistencia.

3.2.1 Pruebas de dureza

Es común utilizar pruebas de dureza para evaluar las propiedades del material porque son rápidas y convenientes. Sin embargo, son varios los métodos de prueba apropiados debido a las diferencias de dureza de materiales distintos. Las pruebas de dureza más conocidas son las de Brinell y Rockwell.

Prueba de dureza de Brinell La prueba de dureza de Brinell se usa mucho para medir la dureza de metales y no metales de dureza baja a media. Recibe su nombre en honor del ingeniero sueco que la creó alrededor de 1900. En la prueba, se presiona una esfera de acero endurecido (o carburo cementado) de 10 mm de diámetro, contra la superficie de un espécimen, con una carga de 500, 1 500 o 3 000 kg. Después, se divide la carga entre el área de indentación para obtener el Número de Dureza de Brinell (BHN). En forma de ecuación se tiene

$$HB = \frac{2F}{\pi D_b(D_b - \sqrt{D_b^2 - D_i^2})} \tag{3.19}$$

donde HB = Número de Dureza de Brinell (BHN); F = carga de indentación, kg; D_b = diámetro de la esfera, mm; y D_i = diámetro de la indentación sobre la superficie, mm. Estas dimensiones se indican en la figura 3.14*a*). El BHN resultante tiene unidades de kg/mm^2, pero por lo general las unidades se omiten cuando se expresa el número. Para materiales más duros (por arriba de 500 BHN), se emplea la esfera de carburo cementado porque la de acero experimenta deformación elástica que falsea la exactitud de la lectura. Asimismo, para materiales más duros es común utilizar cargas mayores (1 500 y 3 000 kg). Debido a las diferencias en los resultados según las distintas cargas, al hacer reportes de las lecturas *HB* se considera una práctica buena indicar cuál fue la que se usó en la prueba.

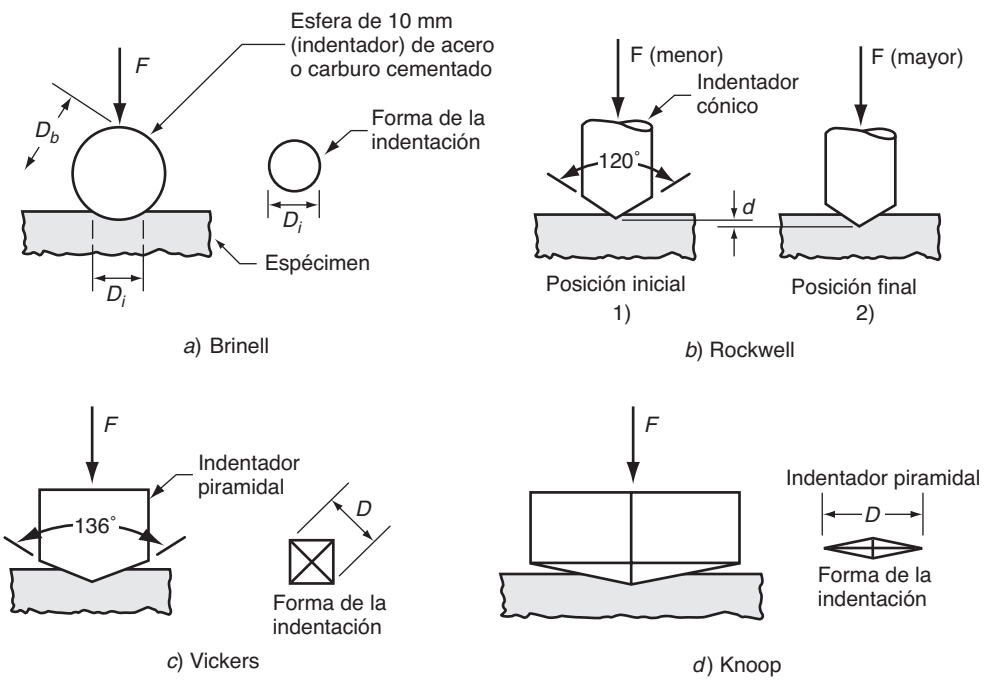


FIGURA 3.14 Métodos de prueba de la dureza: *a*) Brinell, *b*) Rockwell: 1) carga inicial menor y 2) carga grande, *c*) Vickers, y *d*) Knoop.

TABLA 3.5 Escalas de dureza de Rockwell comunes.

Escala de Rockwell	Símbolo de la dureza	Indentador	Carga (kg)	Materiales comunes probados
A	HRA	Cono	60	Carburos, cerámicas
B	HRB	Esfera de 1.6 mm	100	Metales no ferrosos
C	HRC	Cono	150	Metales ferrosos, acero para herramienta

Prueba de dureza de Rockwell Ésta es otra prueba que se usa mucho; recibe su nombre en honor del metalurgista que la creó a principios de la década de 1920. Es conveniente de usar, y varias mejoras que se le hicieron a lo largo de los años la adaptaron a una variedad de materiales.

En la Prueba de Dureza de Rockwell, se presiona un indentador cónico, o esfera de diámetro pequeño, de 1.6 mm o 3.2 mm (1/16 o 1/8 in) contra un espécimen, por medio de una carga pequeña de 10 kg, lo que asienta el indentador en el material. Después se aplica una carga mayor de 150 kg (u otro valor), lo que hace que el indentador penetre en el espécimen cierta profundidad más allá de su posición inicial. La máquina de prueba convierte esta distancia de penetración, d, en una lectura de dureza de Rockwell. En la figura 3.14*b*) se ilustra la secuencia. Las diferencias en la carga y geometría del indentador proporcionan varias escalas de Rockwell para distintos materiales. En la tabla 3.5 se indican las escalas más comunes.

Prueba de dureza de Vickers Esta prueba, también creada a principios de la década de 1920, utiliza un indentador de forma piramidal hecho de diamante. Se basa en el principio de que las impresiones dejadas por él son similares en cuanto a su geometría sin importar la carga que se emplee. De acuerdo con esto, se aplican varias cargas en función de la dureza del material por medir. Después se determina la Dureza de Vickers (HV) por medio de la fórmula

$$HV = \frac{1.854\ F}{D^2} \tag{3.20}$$

donde F = carga aplicada, kg, y D = diagonal de la impresión hecha por el indentador, mm, como se indica en la figura 3.14*c*). La prueba de Vickers se utiliza para todos los metales y tiene una de las escalas más amplias entre las pruebas de dureza.

Prueba de dureza de Knoop La prueba de Knoop, creada en 1939, usa un indentador de diamante de forma piramidal, pero la pirámide tiene una razón longitud-ancho alrededor de 7:1, como se aprecia en la figura 3.14*d*), y las cargas que se aplican por lo general son más ligeras que las de la prueba de Vickers. Es una prueba de microdureza, lo que significa que es apropiada para medir especímenes pequeños y delgados de materiales duros que podrían fracturarse si se aplicara una carga pesada. La forma del indentador facilita la lectura de la impresión con las cargas más ligeras que se emplean en esta prueba. El valor de la dureza de Knoop (HK) se determina con la fórmula

$$HK = 14.2\frac{F}{D^2} \tag{3.21}$$

donde F = carga, kg; y D = diagonal larga del indentador, mm. Debido a que la impresión que se obtiene con esta prueba por lo general es muy pequeña, debe tenerse cuidado al preparar la superficie por medir.

Escleroscopio Las pruebas anteriores basan las mediciones de la dureza en la razón de la carga aplicada dividida entre el área de la impresión resultante (Brinell, Vickers y Knoop) o bien entre la profundidad de ésta (Rockwell). El escleroscopio es un instrumento que

TABLA 3.6 Dureza normal de metales seleccionados.

Metal	Dureza de Brinell, HB	Dureza de Rockwell, HR[a]	Metal	Dureza de Brinell, HB	Dureza de Rockwell, HR[a]
Aluminio recocido	20		Aleaciones de magnesio, endurecidas[b]	70	35B
Aluminio, trabajado en frío	35		Níquel, templado	75	40B
Aleaciones de aluminio, templadas[b]	40		Acero, bajo C, laminado en caliente[b]	100	60B
Aleaciones de aluminio, endurecidas[b]	90	52B	Acero, alto C, prensado en caliente[b]	200	95B, 15C
Aleaciones de aluminio, coladas[b]	80	44B	Acero, aleación, templado[b]	175	90B, 10C
Hierro colado, gris, como fundición[b]	175	10C	Acero, aleación, tratado con calor[b]	300	33C
Cobre, templado	45		Acero, inoxidable, austenítico[b]	150	85B
Aleación de cobre: latón, templado	100	60B	Titanio, casi puro	200	95B
Plomo	4		Zinc	30	

Compilado de las referencias [10], [11], [15], y otras fuentes.

[a] Los valores HR están dados en la escala B o C, como lo indica la letra que los designa. Donde no hay valores significa que la dureza es demasiado baja para las escalas de Rockwell.

[b] Los valores HB dados son comunes. Los valores de dureza variarán de acuerdo con la composición, el tratamiento térmico y grado de endurecimiento por trabajo.

mide la altura del rebote de un "martillo" que se deja caer desde cierta altura sobre la superficie del material que se prueba. El martillo consiste en un peso con un indentador de diamante sujeto a él. Entonces, el escleroscopio mide la energía mecánica absorbida por el material cuando el indentador golpea la superficie. Esta energía absorbida indica la resistencia a la penetración, lo que está de acuerdo con nuestra definición de dureza. Entre más energía se absorba, menor será el rebote, lo que indica un material más suave. Entre menos energía se absorba, el rebote será mayor, el material sería más duro. El uso principal del escleroscopio se da en la medición de la dureza de elementos grandes de acero y otros metales ferrosos.

Durómetro Las pruebas anteriores se basan en la resistencia a la deformación permanente o plástica (indentación). El durómetro es un dispositivo que mide la deformación elástica del caucho y materiales flexibles parecidos, mediante la presión de un indentador sobre la superficie del objeto. La resistencia a la penetración es una indicación de la dureza, según se aplica el término a este tipo de materiales.

3.2.2 Dureza de distintos materiales

En esta sección se comparan los valores de la dureza de algunos materiales comunes de las tres clases que se emplean en la ingeniería: metales, cerámicas y polímeros.

TABLA 3.7 Dureza de cerámicas seleccionadas y otros materiales duros, listados en orden ascendente de dureza.

Material	Dureza de Vickers, HV	Dureza de Knoop, HK	Material	Dureza de Vickers, HV	Dureza de Knoop, HK
Acero[a] endurecido para herramientas	800	850	Nitruro de titanio, TiN	3000	2300
Carburo cementado (WC-Co)[a]	2000	1400	Carburo de titanio, TiC	3200	2500
Alúminia, Al_2O_3	2200	1500	Nitruro cúbico de boro, BN	6000	4000
Carburo de tungsteno, WC	2600	1900	Diamante, policristal sintetizado	7000	5000
Carburo de silicio, SiC	2600	1900	Diamante, natural	10000	8000

Compilado de las referencias [13], [15] y otras fuentes.

[a] El acero endurecido para herramientas y el carburo cementado son los dos materiales que comúnmente se usan en la prueba de dureza de Brinell.

TABLA 3.8 Dureza de polímeros seleccionados.

Polímero	Dureza de Brinell, HB	Polímero	Dureza de Brinell, HB
Nailon	12	Polipropileno	7
Fenol formaldehído	50	Poliestireno	20
Polietileno, de baja densidad	2	Cloruro de polivinilo	10
Polietileno, de alta densidad	4		

Compilado de las referencias [4], [8] y otras fuentes.

Metales Las pruebas de dureza de Brinell y Rockwell se crearon en una época en que los metales eran los materiales principales de la ingeniería. Se ha recabado una cantidad significativa de datos con el empleo de dichas pruebas en los metales. La tabla 13.6 enlista los valores de la dureza de metales seleccionados.

Para la mayoría de metales, la dureza se relaciona de cerca con la resistencia. Debido a que el método de prueba de la dureza por lo general se basa en la resistencia a la indentación, que a su vez es una forma de la compresión, sería de esperar una correlación buena entre las propiedades de dureza y resistencia determinadas con una prueba de compresión. Pero las propiedades de resistencia en una prueba de compresión son casi las mismas que las de una prueba de tensión, con tolerancia para cambios del área de la sección transversal de los especímenes de prueba respectivos; entonces, la correlación con propiedades a la tensión también debe ser buena.

La prueba de dureza de Brinell (HB) presenta una correlación estrecha con la resistencia definitiva a la tensión TS de los aceros, lo cual conduce a la relación [9], [14]:

$$TS = K_h(HB) \tag{3.22}$$

donde K_h es una constante de proporcionalidad. Si TS se expresa en MPa, entonces K_h = 3.45; y si TS está en lb/in^2, entonces K_h = 500.

Cerámicas La prueba de dureza de Brinell no es apropiada para las cerámicas debido a que los materiales de prueba con frecuencia son más duros que la bola indentadora. Para probarlos se utilizan las pruebas de Vickers y Knoop. En la tabla 3.7 se enlistan los valores de dureza de varias cerámicas y materiales duros. Para efectos de comparación, la dureza C de Rockwell del acero endurecido para herramientas es 65 HRC. La escala HRC no se extiende lo suficiente hacia arriba como para usarla para los materiales más duros.

Polímeros De los tres tipos de materiales de ingeniería, los polímeros son los que tienen la dureza más baja. En la tabla 3.8 se enlistan varios de los polímeros en la escala de dureza de Brinell, aunque este método de prueba normalmente no se usa para estos materiales. Sin embargo, permite la comparación con la dureza de los metales.

3.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LAS PROPIEDADES

La temperatura tiene un efecto significativo sobre casi todas las propiedades de un material. Para el diseñador es importante conocer las propiedades del material a las temperaturas de operación del producto cuando está en uso. También es importante saber cómo afecta la temperatura las propiedades mecánicas en la manufactura. A temperaturas elevadas, los materiales resisten menos y aumenta su ductilidad. En la figura 3.15 se presentan las relaciones generales de los metales. Así, la mayoría de los

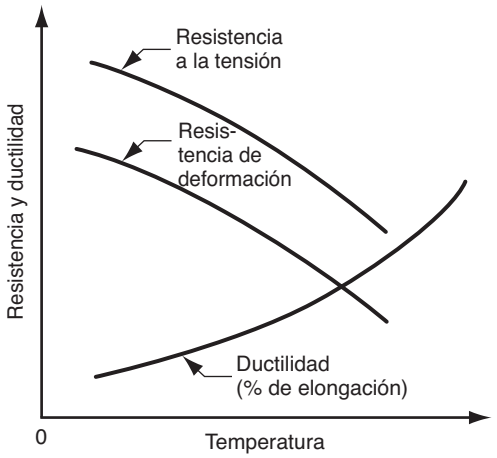


FIGURA 3.15 Efecto general de la temperatura sobre la resistencia y ductilidad.

metales puede trabajarse con más facilidad a temperaturas elevadas que cuando están fríos.

Dureza en caliente Una propiedad que es frecuente utilizar para caracterizar la resistencia y la dureza a temperaturas elevadas es la dureza de calentamiento. La ***dureza en caliente*** es tan sólo la capacidad que tiene un material para mantener su dureza a temperaturas elevadas; por lo general se presenta ya sea como una lista de valores de dureza a temperaturas distintas, o como una gráfica de la dureza *versus* la temperatura, como se ilustra en la figura 3.16. Pueden hacerse aleaciones de acero para lograr mejoras significativas de la dureza en caliente, como se aprecia en la figura 3.16. Las cerámicas muestran propiedades superiores a temperaturas elevadas. Es frecuente que estos materiales se seleccionen para aplicaciones a temperaturas altas, como las piezas de una turbina, herramientas de corte y usos refractarios. La superficie exterior de los transbordadores espaciales está recubierta con bloques de cerámica para que soporte mejor el calor por la fricción de la reentrada a la atmósfera a altas velocidades.

También es deseable que haya buena dureza en caliente en los materiales para las herramientas que se usan en muchas operaciones de manufactura. En la mayor parte de procesos para trabajar metal se generan cantidades significativas de calor, y las herramientas deben ser capaces de soportar las temperaturas elevadas involucradas.

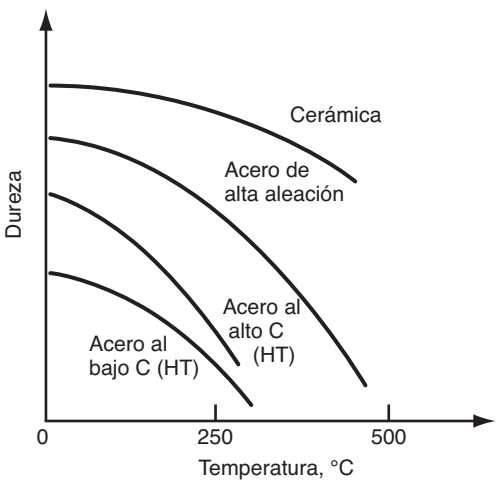


FIGURA 3.16 Dureza en caliente: dureza común como una función de la temperatura para varios materiales.

Temperatura de recristalización A temperatura ambiente, la mayor parte de los metales se comporta de acuerdo con la curva de flujo en la región plástica. Conforme el metal se deforma, incrementa su resistencia debido al endurecimiento por deformación (el exponente deformación-endurecimiento $n > 0$). Pero si el metal se calienta a temperatura suficientemente elevada y se deforma, el endurecimiento por deformación no tiene lugar. En vez de ello, se forman granos nuevos libres de deformación, y el metal se comporta como un material perfectamente plástico, es decir, con un exponente deformación-endurecimiento $n = 0$. La formación de granos nuevos libres de deformación es un proceso denominado ***recristalización***, y la temperatura a la que sucede es de alrededor de la mitad del punto de fusión ($0.5\,T_m$), medida en escala absoluta (grados R o K), y recibe el nombre de ***temperatura de recristalización***. La recristalización requiere de tiempo. Por lo general, para un metal en particular se especifica como la temperatura a la que se completa la formación de granos nuevos y requiere normalmente de una hora, aproximadamente.

La recristalización es una característica de los metales que depende de la temperatura y puede aprovecharse en la manufactura. Al calentar el metal a la temperatura de recristalización antes de la deformación, la cantidad de deformación que el metal puede soportar es sustancialmente mayor, y las fuerzas y la potencia requeridas para llevar a cabo el proceso se reducen mucho. La forja de metales a temperaturas por arriba de la de recristalización se denomina ***trabajo en caliente*** (véase la sección 18.3).

3.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Los fluidos se comportan de manera muy diferente de los sólidos. Un fluido fluye; es decir, adopta la forma del envase que lo contiene. Un sólido no fluye; tiene una forma geométrica que es independiente del medio. Los fluidos incluyen a los líquidos y gases: en esta sección, el interés es para los primeros. Muchos procesos de manufactura se ejecutan en materiales que han pasado del estado sólido al líquido a través de calentamiento. Los metales son líquidos en el estado de fusión; el vidrio se forma en un estado caliente y muy fluido; y a los polímeros casi siempre se les moldea como fluidos espesos.

Viscosidad Aunque el flujo es una característica que define a los fluidos, la tendencia a fluir varía de uno a otro. La viscosidad es la propiedad que determina que un fluido fluya. A grandes rasgos, la ***viscosidad*** se define como la resistencia al flujo que es característica de un fluido. Es una medida de la fricción interna que aparece cuando hay presentes gradientes de velocidad en el fluido, entre más viscoso es el fluido, mayor es la fricción interna y mayor la resistencia al flujo. El inverso de la viscosidad es la ***fluidez***, es decir, la facilidad con que el fluido fluye.

Con más precisión, la viscosidad se define respecto de un arreglo como el que se ilustra en la figura 3.17, en el que dos placas paralelas están separados por una distancia d. Una de ellas es estacionaria, mientras que la otra se mueve a velocidad v, y el espacio entre

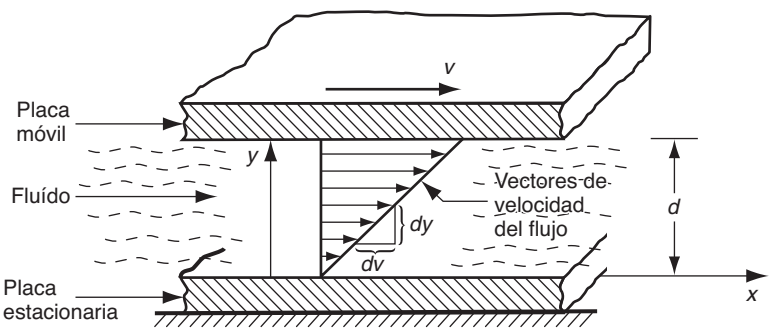


FIGURA 3.17 El fluido fluye entre dos placas paralelas, una permanece estacionaria y la otra se mueve a una velocidad v.

ellas está ocupado por un fluido. Al orientar estos parámetros en relación con un sistema de ejes coordenados, d está en la dirección del eje y y v en dirección del eje x. Al movimiento de la placa superior se opone la fuerza F que resulta de la acción de viscosidad cortante del fluido. Esta fuerza se reduce a un esfuerzo cortante si se divide F entre la superficie de la placa, A:

$$\tau = \frac{F}{A} \tag{3.23}$$

donde τ = esfuerzo cortante, N/m^2 o Pa (lb/in^2). Este esfuerzo cortante se relaciona con la tasa de cortante, que se define como el cambio de la velocidad dv respecto de dy. Es decir,

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \tag{3.24}$$

donde $\dot{\gamma}$ = tasa de cortante, 1/s; dv = cambio incremental de la velocidad, m/s (in/s); y dy = cambio incremental de la distancia y, m (in). La viscosidad cortante es la propiedad del fluido que define la relación entre F/A y dv/dy; es decir,

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{dv}{dy} \qquad \text{o} \qquad \tau = \eta r \tag{3.25}$$

donde η = una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de viscosidad, Pa-s (lb-s/in^2). Si se reacomoda la ecuación (3.25), el coeficiente de viscosidad puede expresarse como sigue:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{3.26}$$

Así, la viscosidad de un fluido se define como la razón del esfuerzo cortante a la tasa del cortante durante el flujo, donde el esfuerzo cortante es la fuerza por fricción que el fluido ejerce por unidad de área, y la tasa del cortante es el gradiente de velocidad perpendicular a la dirección de flujo. Newton fue quien enunció primero las características de viscosidad de los fluidos definidas por la ecuación (3.26). Él observó que la viscosidad era una propiedad constante de un fluido dado, y un fluido de ese tipo se denomina ***fluido newtoniano***.

Las unidades del coeficiente de viscosidad requieren explicación. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), debido a que el esfuerzo cortante se expresa en N/m^2 o Pascales, y la tasa del cortante en 1/s, sigue que η tiene unidades de N-s/m^2 o Pascal-segundo, que se abrevia Pa-s. En el sistema de unidades tradicional de Estados Unidos, las unidades correspondientes son lb/in^2 y 1/s, de modo que las unidades del coeficiente de viscosidad están en lb-s/in^2. Otra unidad que a veces se emplea para la viscosidad es el poise, que es = dina-s/cm^2 (10 poises = 1 Pas y 6 895 Pas = 1 lb-s/in^2). En la tabla 3.9 se dan algunos valores comunes del coeficiente de viscosidad para distintos fluidos. Se observa que la viscosidad de varios materiales de los que se mencionan varía con la temperatura.

La viscosidad en los procesos de manufactura Para muchos metales, la viscosidad en el estado fundido se compara a la del agua a la temperatura ambiente. Ciertos procesos de manufactura, en especial la fundición y soldadura autógena, se llevan a cabo sobre metales en estado fundido, y el éxito de esas operaciones requiere viscosidad baja para que el metal fundido llene la cavidad del molde o suelde la costura antes de solidificarse. En otras operaciones, como la forja y maquinado de metal, se emplean lubricantes y enfriadores durante el proceso, y, de nuevo, el éxito de esos fluidos depende hasta cierto punto de sus viscosidades.

Las cerámicas vidriadas muestran una transición gradual de los estados sólidos a los líquidos conforme la temperatura aumenta; no se funden en forma súbita, como sí lo hacen los metales. En la tabla 3.9 se ilustra ese efecto por medio de los valores de la viscosidad del vidrio a temperaturas diferentes. A temperatura ambiente, el vidrio es sólido y frágil, no presenta tendencia a fluir; para todo propósito práctico, su viscosidad es infinita. Conforme

TABLA 3.9 Valores de la viscosidad de diferentes fluidos.

Material	Coeficiente de viscosidad Pa-s	Coeficiente de viscosidad lb-sec/in^2	Material	Coeficiente de viscosidad Pa-s	Coeficiente de viscosidad lb-sec/in^2
Vidrio[b], 540 C (1 000 F)	10^{12}	10^{8}	Jarabe para hot cakes (temp. amb.)	50	73×10^{-4}
Vidrio[b], 815 C (1 500 F)	10^{5}	14	Polímero[a], 151 C (300 F)	115	167×10^{-4}
Vidrio[b], 1 095 C (2 000 F)	10^{3}	0.14	Polímero[a], 205 C (400 F)	55	80×10^{-4}
Vidrio[b], 1 370 C (2 500 F)	15	22×10^{-4}	Polímero[a], 260 C (500 F)	28	41×10^{-4}
Mercurio, 20 C (70 F)	0.0016	0.23×10^{-6}	Agua, 20 C (70 F)	0.001	0.15×10^{-6}
Aceite para máquinas (temp. amb.)	0.1	0.14×10^{-4}	Agua, 100 C (212 F)	0.0003	0.04×10^{-6}

Compilada de varias fuentes.

[a]El polietileno de baja densidad se utiliza aquí como ejemplo de polímero; la mayor parte de otros polímeros tienen viscosidades ligeramente mayores.

[b]La composición del vidrio es sobre todo SiO_2; las composiciones y viscosidades varían; los valores dados son representativos.

se calienta, el vidrio se suaviza en forma gradual, y se hace cada vez menos viscoso (más y más fluido), hasta que al final puede dársele forma por medio del soplado o moldeo, a alrededor de 1 100 ºC (2 000 ºF).

La mayoría de procesos para dar forma a los polímeros se realizan a temperaturas elevadas, cuando el material está en una condición líquida o muy plástica. Los polímeros termoplásticos representan el caso más claro, y constituyen también la mayoría de polímeros comunes. A temperaturas bajas, los polímeros termoplásticos son sólidos; conforme la temperatura aumenta, lo normal es que primero se transformen en un material suave parecido al caucho, y después en un fluido espeso. Al continuar elevándose la temperatura, la viscosidad disminuye en forma gradual, como se indica en la tabla 3.9 para el polietileno, el polímero termoplástico de uso más extendido. Sin embargo, con los polímeros la relación se complica por otros factores. Por ejemplo, la viscosidad se ve afectada por el gasto. La viscosidad de un polímero termoplástico no es constante. Un polímero fundido no se comporta como un líquido newtoniano. En la figura 3.18 puede verse su relación entre el esfuerzo cortante y la tasa cortante. Un fluido que presente esta viscosidad decreciente con tasa de cortante en aumento se llama ***seudoplástico***. El comportamiento complica el análisis del moldeo del polímero.

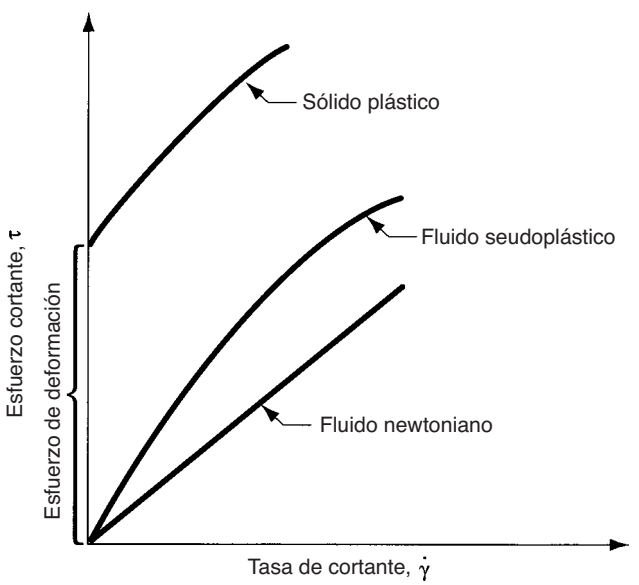


FIGURA 3.18 Comportamientos viscosos de fluidos newtonianos y seudoplásticos. Al fundirse, los polímeros presentan un comportamiento seudoplástico. A manera de comparación, se muestra el comportamiento de un material sólido plástico.

3.5 COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE LOS POLÍMEROS

Otra propiedad característica de los polímeros es la viscoelasticidad. La ***viscoelasticidad*** es aquella propiedad que tiene un material que determina la deformación que experimenta cuando se le sujeta a combinaciones de esfuerzo y temperatura a lo largo del tiempo. Como el nombre lo sugiere, es una combinación de viscosidad y elasticidad. A continuación se explicará la viscoelasticidad respecto de la figura 3.19. Los dos incisos de la figura muestran la respuesta común de dos materiales ante un esfuerzo aplicado por debajo del punto de deformación durante algún periodo de tiempo. En el inciso *a*), el material presenta elasticidad perfecta; cuando el esfuerzo desaparece el material regresa a su forma original. En contraste, en el inciso *b*), el material muestra un comportamiento viscoelástico. La cantidad de deformación se incrementa gradualmente en el tiempo con el esfuerzo aplicado. Al retirar los esfuerzos, el material no regresa de inmediato a su forma original; en vez de ello, la deformación desaparece en forma gradual. Si el esfuerzo se hubiera aplicado y retirado de inmediato, el material habría regresado inmediatamente a su forma inicial. Sin embargo, el tiempo entra en acción y juega un papel al afectar el comportamiento del material.

Un modelo sencillo de viscoelasticidad se presenta con el empleo de elasticidad en un punto inicial. La ley de Hooke, $\sigma = E\epsilon$, expresa de manera concisa la elasticidad, y sólo relaciona el esfuerzo con la deformación a través de una constante de proporcionalidad. En un sólido viscoelástico, la relación entre el esfuerzo y la deformación depende del tiempo; se expresa así

$$\sigma(t) = f(t)\epsilon \tag{3.27}$$

La función del tiempo $f(t)$ se conceptualiza como un módulo de elasticidad que depende del tiempo. Podría escribirse como $E(t)$ y hacer referencia a éste como un módulo de viscoelasticidad. La forma de esta función del tiempo es compleja, a veces incluye a la deformación como factor. Aun sin entrar a sus expresiones matemáticas, es posible explorar el efecto de la dependencia del tiempo. Un efecto común se aprecia en la figura 3.20, que muestra el comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero termoplástico sujeto a tasas de deformación diferentes. Con una tasa baja, el material

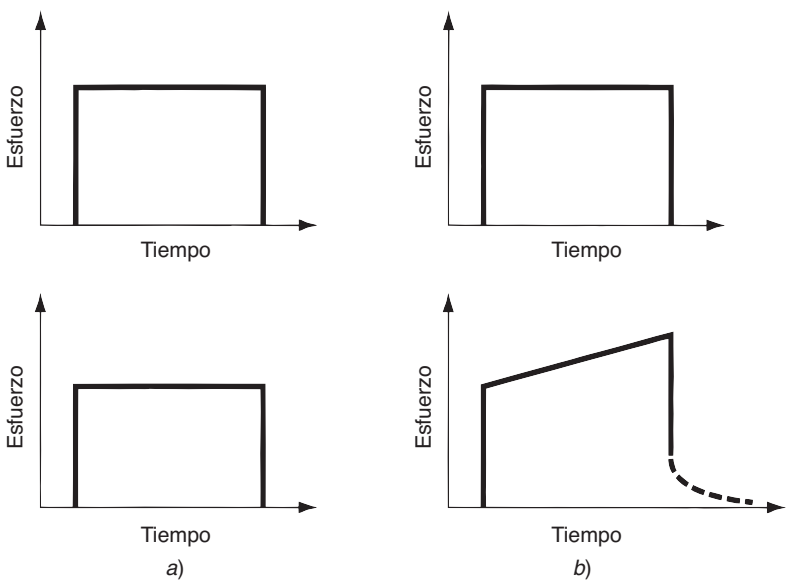


FIGURA 3.19 Comparación de propiedades elásticas y viscoelásticas: *a*) respuesta de un material perfectamente elástico ante un esfuerzo aplicado a lo largo del tiempo, y *b*) respuesta de un material viscoelástico en las mismas condiciones. En el inciso *b*), el material adopta una deformación que es función del tiempo y la temperatura.

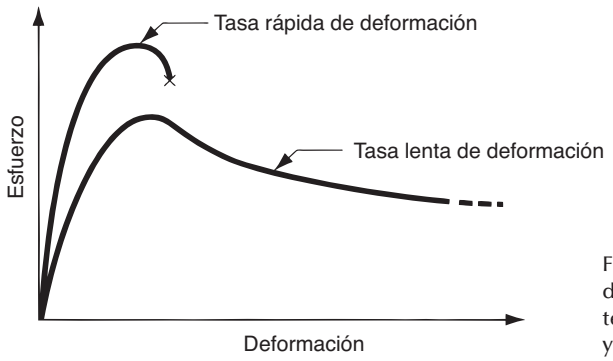


FIGURA 3.20 Curva esfuerzo-deformación de un material viscoelástico (polímero termoplástico) a tasas de deformación alta y baja.

presenta un flujo viscoso significativo. Con una tasa alta, se comporta en una forma mucho más frágil.

La temperatura es un factor de la viscoelasticidad. Conforme la temperatura se incrementa, el comportamiento viscoso se vuelve más y más prominente respecto al comportamiento elástico. El material se vuelve algo parecido a un fluido. La figura 3.21 ilustra esta dependencia de la temperatura para un polímero termoplástico. A temperaturas bajas, el polímero muestra comportamiento elástico. Conforme T aumenta por arriba de la temperatura de transición vítrea, T_g, el polímero se vuelve viscoelástico. Si la temperatura se incrementara más, se vuelve suave y como caucho. A temperaturas aún mayores, adquiere características viscosas. Las temperaturas a las que se observan estos modos de comportamiento varían en función del plástico. Asimismo, las formas del módulo *versus* la curva de temperatura difieren de acuerdo con las proporciones de estructuras cristalinas y amorfas en el termoplástico. Los polímeros termoestables o termofijos y los elastómeros se comportan en forma distinta de la que ilustra la figura; después de la vulcanización, esos polímeros no se suavizan como lo hacen los termoplásticos a temperaturas elevadas. En vez de ello se degradan (se carbonizan).

El comportamiento viscoelástico se manifiesta en la fusión de los polímeros como memoria de su forma. Conforme el polímero espeso se funde, se transforma durante el proceso de una forma a otra; "recuerda" su forma anterior y trata de volver a esa geometría. Por ejemplo, un problema común en la extrusión de polímeros es el aumento de volumen de la matriz, en el que el perfil del material extruido aumenta de tamaño, lo que refleja su tendencia a regresar a la sección transversal más grande que tenía en el boquilla de salida

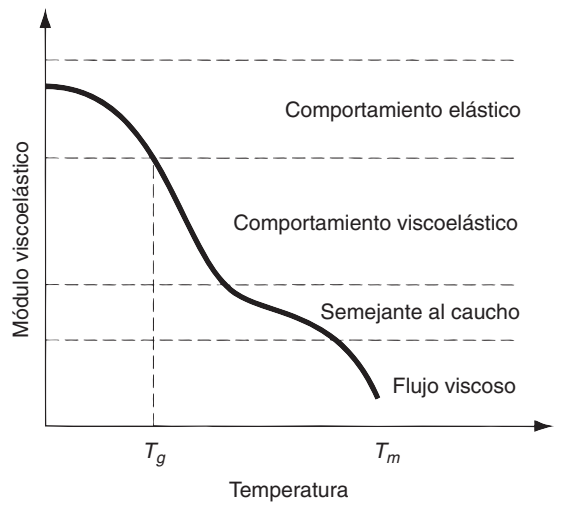


FIGURA 3.21 Módulo viscoelástico como función de la temperatura para un polímero termoplástico.

inmediatamente antes de ser empujado a través de la abertura pequeña del dado. En el estudio del moldeo del plástico se examinan con más detalle las propiedades de viscosidad y viscoelasticidad (véase el capítulo 13).

REFERENCIAS

[1] Avallone, E. A. y Baumeister III, T. (eds). ***Mark's Standard Handbook for Mechanical Engineers***, 10a. ed. McGraw-Hill Book Company, NuevaYork, 1996.

[2] Beer, F. P. y Russell, J. E. ***Vector Mechanics for Engineers***, 6a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[3] Budynas, R. G. ***Advanced Strength and Applied Stress Analysis***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[4] Chandra, M. y Roy, S. K. ***Plastics Technology Handbook***, 3a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

[5] Dieter, G. E. ***Mechanical Metallurgy***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1986.

[6] DeGarmo, E. P., Black, J. T. y Kohser, R. A. ***Mate-rials and Processes in Manufacturing***, 9a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2003.

[7] ***Engineering Plastics***. Engineered Materials Handbook, Vol. 2, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.

[8] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 4a. ed. Houghton Mifflin Company, Boston, 1990.

[9] Kalpakjian, S. y Schmid, S. R. ***Manufacturing Processes for Engineering Materials***, 4a. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2001.

[10] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 1, Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[11] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials, ASM International, Metals Park, Ohio, 1991.

[12] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing***. Chapman and Hall, Londres, 1989.

[13] Schey, J. A. ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 2000.

[14] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1991.

[15] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. 3, Mate-rials, Finishing, and Coating. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

3.1. ¿Cuál es el dilema entre el diseño y la manufactura, en términos de las propiedades mecánicas?

3.2. ¿Cuáles son los tres tipos de esfuerzos estáticos a las que se sujetan los materiales?

3.3. Enuncie la ley de Hooke.

3.4. ¿Cuál es la diferencia entre el esfuerzo de ingeniería y el esfuerzo verdadero, en una prueba de tensión?

3.5. Defina la resistencia a la tensión de un material.

3.6. Defina la resistencia a la deformación de un material.

3.7. ¿Por qué no puede hacerse una conversión directa entre las medidas de la ductilidad de elongación y la reducción del área, con el uso de la suposición de volumen constante?

3.8. ¿Qué es el endurecimiento por trabajo?

3.9. ¿En qué caso el coeficiente de resistencia tiene el mismo valor que la resistencia de deformación?

3.10. ¿En qué difiere el cambio del área de la sección transversal de un espécimen de una prueba de compresión, de su contraparte en una prueba de tensión?

3.11. ¿Cuál es el factor que complica lo que sucede en una prueba de compresión?

3.12. La prueba de tensión no es apropiada para materiales duros y frágiles tales como las cerámicas. ¿Cuál es la prueba que se usa por lo común para determinar las propiedades de resistencia de dichos materiales?

3.13. ¿Cómo se relaciona el módulo de la cortante de elasticidad, G, con el módulo de tensión de elasticidad, E, en promedio?

3.14. ¿Cómo se relaciona la resistencia a la cortante, S, con la resistencia a la tensión, TS, en promedio?

3.15. ¿Qué es dureza, y cómo se prueba, generalmente?

3.16. ¿Por qué se requieren pruebas y escalas diferentes para la dureza?

3.17. Defina la temperatura de recristalización para un metal.

3.18. Defina la viscosidad de un fluido.

3.19. ¿Cuál es la característica definitoria de un fluido newtoniano?

3.20. ¿Qué es viscoelasticidad, como propiedad de un material?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

3.1. ¿Cuáles de los siguientes son los tres tipos básicos de esfuerzos estáticos a las que puede sujetarse un material? (tres respuestas correctas): *a*) compresión, *b*) dureza, *c*) reducción del área, *d*) cortante, *e*) tensión, *f*) esfuerzo verdadero, y *g*) deformación.

3.2. ¿Cuál de las que siguen es la definición correcta de la resistencia definitiva a la tensión, según se obtiene de una prueba de tensión sobre un espécimen de metal?: *a*) el esfuerzo encontrado cuando la curva esfuerzo-deformación pasa del comportamiento elástico al plástico, *b*) la carga máxima dividida entre el área final del espécimen, *c*) la carga máxima dividida entre el área original del espécimen, o *d*) el esfuerzo observado cuando el espécimen falla finalmente.

3.3. Si se midieran los valores de esfuerzo durante una prueba de tensión, ¿cuál de las siguientes sería el valor mayor?: *a*) esfuerzo de ingeniería, *b*) esfuerzo verdadero.

3.4. Si durante una prueba de tensión se midiera la deformación, ¿cuál de las siguientes tendría el valor mayor?: *a*) deformación de ingeniería, *b*) deformación verdadera.

3.5. La región plástica de la curva esfuerzo-deformación para un metal está caracterizada por una relación proporcional entre el esfuerzo y la deformación: *a*) verdadero, o *b*) falso.

3.6. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de los materiales frágiles, tales como las cerámicas y los plásticos termoestables?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y dureza por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.7. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de la mayoría de metales a temperatura ambiente?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y endurecimiento por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.8. ¿Cuál de los tipos siguientes de relación esfuerzo-deformación describe mejor el comportamiento de los metales a temperaturas por arriba de sus puntos de recristalización respectivos?: *a*) elástico y perfectamente plástico, *b*) elástico y endurecimiento por deformación, *c*) perfectamente elástico, o *d*) ninguno de los anteriores.

3.9. ¿Cuál de los materiales siguientes tiene el módulo de elasticidad mayor: *a*) aluminio, *b*) diamante, *c*) acero, *d*) titanio, o *e*) tungsteno?

3.10. ¿Por lo general, la resistencia a la cortante de un metal es *a*) mayor que, o *b*) menor que su resistencia a la tensión?

3.11. La mayor parte de las pruebas de dureza incluyen presionar un objeto duro en la superficie de un espécimen de prueba y medir la indentación (o su efecto) que resulta: *a*) verdadero, o *b*) falso.

3.12. ¿Cuál de los materiales que siguen tiene la dureza mayor?: *a*) cerámica de alúmina, *b*) hierro colado gris, *c*) acero endurecido para herramientas, *d*) acero al alto carbono, o *e*) poliestireno.

3.13. La viscosidad se define como la facilidad con la que un fluido fluye: *a*) verdadero, o *b*) falso.

PROBLEMAS

Resistencia y ductilidad en la tensión

3.1. Una prueba de tensión usa un espécimen de prueba que tiene una longitud de medición de 50 mm, y un área de 200 mm^2. Durante la prueba, el espécimen se vence bajo una carga de 98 000 N. La longitud de medición correspondiente es de 50.23 mm. Esto es el 0.2% del punto de deformación. La carga máxima de 168 000 N se alcanza con una longitud de medición de 64.2 mm. Determine *a*) la resistencia de vencimiento, *b*) el módulo de elasticidad, y *c*) la resistencia a la tensión.

3.2. En el problema 3.1, la fractura ocurre a una longitud de medición de 67.3 mm. *a*) Determine la elongación porcentual, *b*) si el espécimen se estrangula cuando el área es de 92 mm^2, determine la reducción porcentual del área.

3.3. El espécimen en una prueba de tensión tiene una longitud de medición de 2.0 in y un área de 0.5 in^2. Durante la prueba el espécimen se vence bajo una carga de 32 000 lb. La longitud de medición correspondiente es de 2.0083 in. Esto es el 0.2% del punto de deformación. La carga máxima de 60 000 lb se alcanza con una longitud de medición de 2.60 in. Determine *a*) la resistencia de deformación, *b*) el módulo de elasticidad, y *c*) la resistencia a la tensión.

3.4. En el problema 3.3, la fractura ocurre cuando la longitud de medición es de 2.92 in, *a*) determine la elongación porcentual. *b*) Si el espécimen se estrangula para un área de 0.25 in^2, determine la reducción porcentual del área.

3.5. Durante una prueba de tensión en la que la longitud de medición inicial es de 125.0 mm, y el área de la sección transversal es de 62.5 mm, se recaban los datos siguientes de fuerza y longitud de medición: 1) 17 793 N a 125.23 mm, 2) 23 042 N a 131.25 mm, 3) 27 579 N a 140.05 mm,

4) 28 913 N a 147.01 mm, 5) 27 578 N a 153.00 mm, y 6) 20 462 N a 160.10 mm. La carga máxima es de 28 913 N, y el último punto de los datos ocurrió inmediatamente antes de la falla. *a*) Grafique la curva de esfuerzo-deformación de ingeniería. Determine: *b*) la resistencia de deformación, *c*) el módulo de elasticidad, *d*) la resistencia a la tensión.

Curva de flujo

3.6. En el problema 3.5, determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo. Asegúrese de no emplear datos después del punto en que ocurrió el estrangulamiento.

3.7. En una prueba de tensión sobre un espécimen de metal, la deformación verdadera es de 0.08 con un esfuerzo de 265 MPa. Cuando el esfuerzo verdadero es de 325 MPa, la deformación verdadera es de 0.27. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo.

3.8. Durante una prueba de tensión, un metal tiene una deformación verdadera de 0.10 con un esfuerzo verdadero de 37 000 lb/in^2. Después, con un esfuerzo verdadero de 55 000 lb/in^2, la deformación verdadera es de 0.25. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo.

3.9. En una prueba de tensión, un metal comienza a estrangularse cuando la deformación verdadera es de 0.28, con un esfuerzo verdadero correspondiente de 345.0 MPa. Si el lector no supiera nada más sobre la prueba, ¿podría estimar el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación en la ecuación de la curva de flujo?

3.10. Una prueba de tensión para cierto metal proporciona los siguientes parámetros de la curva de flujo: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.3, y el de resistencia es de 600 MPa. Determine *a*) el esfuerzo de flujo para una deformación verdadera de 1.0, y *b*) la deformación verdadera para un esfuerzo de flujo de 600 MPa.

3.11. La curva de flujo para cierto metal tiene los parámetros siguientes: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.22, y el coeficiente de resistencia es de 54 000 lb/in^2. Determine: *a*) el esfuerzo de flujo para una deformación verdadera de 0.45, y *b*) la deformación verdadera para un esfuerzo de flujo de 40 000 lb/in^2.

3.12. Un metal se deforma en una prueba de tensión dentro de la región plástica. El espécimen tenía al principio una longitud de medición de 2.0 in, y un área de 0.50 in^2. En cierto punto de la prueba de tensión, la longitud de medida es de 2.5 in y el esfuerzo de ingeniería correspondiente es de 24 000 lb/in^2; en otro punto de la prueba, anterior al estrangulamiento, la longitud de medida es de 3.2 in, y el esfuerzo de ingeniería correspondiente es de 28 000 lb/in^2. Determine el coeficiente de resistencia y el exponente de endurecimiento por deformación para este metal.

3.13. Un espécimen para una prueba de tensión tiene una longitud inicial de medida de 75.0 mm. Durante la prueba se estira a una longitud de 110.0 mm antes de que ocurriera el estrangulamiento. Determine *a*) la deformación de ingeniería, y *b*) la deformación verdadera. *c*) Calcule y sume las deformaciones de ingeniería conforme el espécimen se estira de: 1) 75.0 a 80.0 mm, 2) 80.0 a 85.0 mm, 3) 85.0 a 90.0 mm, 4) 90.0 a 95.0 mm, 5) 95.0 a 100.0 mm, 6) 100.0 a 105.0 mm, y 7) 105.0 a 110.0 mm. *d*) ¿El resultado está más cerca de la respuesta del inciso *a* o a la del *b*? ¿Ayuda esto a demostrar lo que significa el término deformación verdadera?

3.14. Un espécimen de prueba de tensión se estira al doble de su longitud original. Determine la deformación de ingeniería y la deformación verdadera para la prueba. Si el metal se había deformado durante la compresión, determine la longitud final que se comprimió el espécimen, de modo que *a*) la deformación de ingeniería sea igual al mismo valor que en la tensión (será un valor negativo debido a la compresión), y *b*) la deformación verdadera sea igual al mismo valor que en la tensión (otra vez, será un valor negativo debido a la compresión). Obsérvese que la respuesta al inciso *a*) es un resultado imposible. Por tanto, la deformación verdadera es una medición mejor durante la deformación plástica.

3.15. Obtenga una expresión para la deformación verdadera como función de D y D_o para un espécimen de prueba de tensión de sección transversal circular, donde D = diámetro instantáneo del espécimen, y D_o es su diámetro original.

3.16. Demuestre que la deformación verdadera es igual a $\ln(1 + e)$, donde e = deformación de ingeniería.

3.17. Con base en los resultados de una prueba de tensión, la curva de flujo tiene los parámetros siguientes: el exponente de endurecimiento por deformación es de 0.40, y el de resistencia es de 551.6 MPa. Con base en esta información, calcule la resistencia a la tensión (de ingeniería) del metal.

3.18. Un alambre de cobre de 0.80 mm de diámetro, falla para un esfuerzo de ingeniería de 248.2 MPa. Su ductilidad se mide como el 75% de reducción del área. Determine el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera en la falla.

3.19. Un espécimen de acero de una prueba de tensión, con longitud inicial de medición de 2.0 in, y área de sección transversal de 0.5 in^2, alcanza una carga máxima de 37 000 lb. Su elongación en este punto es de 24%. Determine el esfuerzo verdadero y la deformación verdadera para esta carga máxima.

Compresión

3.20. Una aleación metálica ha sido probada a la tensión, con los resultados siguientes para los parámetros de la curva de flujo: coeficiente de resistencia de 620.5 MPa, y exponente de endurecimiento por deformación de 0.26. Luego, el mismo metal se prueba a la compresión en que la altura inicial del espécimen es de 62.5 mm con diámetro de 25 mm. Suponga que la sección transversal se incrementa de modo uniforme y determine la carga que se requiere para comprimir el espécimen a una altura de *a*) 50 mm, y *b*) 37.5 mm.

3.21. Los parámetros de la curva de flujo para cierto acero inoxidable son los que siguen: coeficiente de resistencia de 1 100 MPa, y exponente de endurecimiento por deformación de 0.35. Un espécimen cilíndrico con área inicial de sección transversal igual a 1 000 mm^2 y altura de 75 mm, se comprime a una altura de 58 mm. Determine la fuerza requerida

para lograr esa compresión, suponiendo que la sección transversal se incrementa de modo uniforme.

3.22. Un espécimen de acero (módulo de elasticidad de 30×10^6 lb/in^2) para una prueba de compresión tiene una altura inicial de 2.0 in y diámetro de 1.5 in. El metal se vence (0.2% de desplazamiento) con una carga de 140 000 lb. Para una carga de 260 000 lb, la altura se ha reducido a 1.6 in. Determine: *a*) la resistencia de deformación, y *b*) los parámetros de la curva de flujo (coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación). Suponga que el área de la sección transversal se incrementa uniformemente durante la prueba.

Doblamiento y cortante

3.23. Se utiliza una prueba de flexión para cierto material duro. Si se sabe que la resistencia a la ruptura transversal del material es de 1 000 MPa, ¿cuál es la carga anticipada a la que es probable que falle el espécimen, dado que sus dimensiones son: 15 mm de ancho de la sección transversal, 10 mm de espesor de la sección transversal, y 60 mm de longitud?

3.24. Un espécimen de cerámica especial se prueba a la flexión. Sus dimensiones son las siguientes: ancho de la sección transversal igual a 0.50 in, y espesor de la sección transversal de 0.25 in. La longitud del espécimen entre los apoyos es de 2.0 in. Determine la resistencia a la ruptura transversal si la falla ocurre con una carga de 1 700 lb.

3.25. Una pieza de metal se deforma a la cortante con un ángulo de 42º, como se aprecia en la figura P3.25. Para esta situación, determine la deformación por cortante.

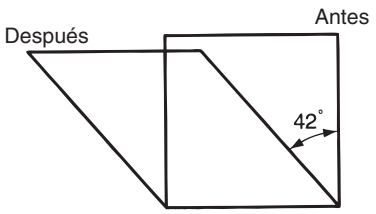


FIGURA P3.25

3.26. Un espécimen de prueba a la torsión tiene un radio de 25 mm, espesor de pared de 3 mm y longitud de medición de 50 mm. Durante la prueba, un par de 900 N-m da como resultado una deflexión angular de 0.3º. Determine *a*) el esfuerzo cortante, *b*) la deformación por cortante, y *c*) el módulo de la cortante, si se supone que el espécimen aún no se ha vencido.

3.27. En el problema 3.26, la falla del espécimen ocurre para un par de 1 200 N-m, y una deflexión angular correspondiente de 10º. ¿Cuál es la resistencia a la cortante del metal?

3.28. En una prueba de torsión, se aplica un par de 5 000 ft-lb que ocasiona una deflexión angular de 1º sobre un espécimen tubular de pared delgada cuyo radio es de 1.5 in, el espesor de la pared es de 0.10 in, y la longitud de medida es de 2.0 in. Determine *a*) el esfuerzo cortante, *b*) la deformación por cortante, y *c*) el módulo de la cortante, si se supone que el espécimen aún no se ha vencido.

3.29. En el problema 3.28, el espécimen falla con un par de 8 000 ft-lb, y una deflexión angular de 23º. Calcule la resistencia a la cortante del metal.

Dureza

3.30. En una prueba de dureza de Brinell, se aplica una carga de 1 500 kg sobre un espécimen, con el empleo de una bola de acero endurecido de 10 mm de diámetro. La indentación resultante tiene un diámetro de 3.2 mm. Determine el número de dureza de Brinell para el metal.

3.31. En el problema 3.30, suponga que el espécimen es de acero. Con base en el número de dureza de Brinell que se determinó en ese problema, estime la resistencia a la tensión del acero.

3.32. Uno de los inspectores del departamento de control de calidad ha usado con frecuencia las pruebas de dureza de Brinell y de Rockwell, para las que la compañía cuenta con el equipo. Él afirma que todas las pruebas de dureza se basan en el mismo principio que en la de Brinell, que consiste en que la dureza siempre se mide como la carga que se aplica dividida entre el área de las impresiones que deja un indentor. *a*) ¿Está en lo correcto? *b*) Si no es así, ¿cuáles son los otros principios involucrados al probar la dureza, y cuáles serían las pruebas asociadas?

3.33. Se acaba de recibir del proveedor un lote de acero templado. Se supone que tiene una resistencia a la tensión en el rango de 60 000 a 70 000 lb/in^2. Una prueba de dureza de Brinell en el departamento de recepción da un valor de HB = 118. *a*) ¿Cumple el acero con la especificación para la resistencia a la tensión? *b*) Estime la resistencia de deformación del material.

Viscosidad de fluidos

3.34. Dos placas planas, separadas por un espacio de 4 mm, se mueven una respecto de la otra a una velocidad de 5 m/s. El espacio entre ellas está ocupado por un fluido de viscosidad desconocida. Al movimiento de las placas se opone un esfuerzo cortante de 10 Pa, debido a la viscosidad del fluido. Si se supone que el gradiente de velocidad del fluido es constante, determine el coeficiente de viscosidad del fluido.

3.35. Dos superficies paralelas, separadas por un espacio de 0.5 in ocupado por un fluido, se mueven una con respecto de la otra a una velocidad de 25 in/s. Un esfuerzo cortante opone una resistencia de 0.3 lb/in^2 al movimiento, debido a la viscosidad del fluido. Si el gradiente de velocidad en el espacio entre las superficies es constante, determine la viscosidad del fluido.

3.36. Una flecha de 125.0 mm de diámetro gira dentro de un cojinete estacionario cuyo diámetro interior es de 125.6 mm, y su longitud es de 50.0 mm. En el claro entre la flecha y el cojinete se localiza un aceite lubricante cuya viscosidad es de 0.14 Pas. La flecha gira con una velocidad de 400 rev/min; esta velocidad y la acción del aceite son suficientes para mantener a la flecha centrada dentro del cojinete. Determine la magnitud del par debido a la viscosidad, que actúa como resistencia a la rotación de la flecha.

4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

4.1 Propiedades volumétricas y de fusión
- 4.1.1 Densidad
- 4.1.2 Expansión térmica
- 4.1.3 Características de fusión

4.2 Propiedades térmicas
- 4.2.1 Calor específico y conductividad térmica
- 4.2.2 Propiedades térmicas en la manufactura

4.3 Difusión de masa

4.4 Propiedades eléctricas
- 4.4.1 Resistividad y conductividad
- 4.4.2 Clases de materiales según sus propiedades eléctricas

4.5 Procesos electroquímicos

Las propiedades físicas, este término es usado comúnmente para definir el comportamiento de los materiales en respuesta a fuerzas físicas distintas de las mecánicas. Incluyen las propiedades volumétricas, térmicas, eléctricas y electroquímicas. Los componentes de un producto deben hacer más que tan sólo soportar los esfuerzos mecánicos. Deben conducir la electricidad (o impedir su conducción), permitir la transferencia de calor (o su escape), transmitir la luz (o bloquear su transmisión), y satisfacer muchas otras funciones.

Las propiedades físicas son importantes en la manufactura porque es frecuente que influyan en el rendimiento del proceso. Por ejemplo, las propiedades térmicas del material de trabajo en el maquinado determinan la temperatura de corte, lo que afecta el tiempo que puede usarse la herramienta antes de que falle. En la microelectrónica, las propiedades eléctricas del silicio y la forma en la que lo alteran distintos productos químicos y procesos físicos, forman la base de la manufactura de los semiconductores.

En este capítulo se estudian las propiedades físicas más importantes para la manufactura —propiedades que se encontrarán en capítulos posteriores del libro—. Se dividen en categorías grandes tales como volumétricas, térmicas, eléctricas, etcétera. También se relaciona estas propiedades con la manufactura, como en el capítulo anterior se hizo con las propiedades mecánicas.

4.1 PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS Y DE FUSIÓN

Estas propiedades se relacionan con el volumen de los sólidos y la manera en que las afecta la temperatura. Incluyen la densidad, expansión térmica y punto de fusión. Se explican a continuación y en la tabla 4.1 se da una lista de valores típicos para materiales seleccionados de la ingeniería.

4.1.1 Densidad

En la ingeniería, la densidad de un material es su peso por unidad de volumen. Su símbolo es ρ, y las unidades comunes son g/cm^3 (lb/in^3). La densidad de un elemento está determinada por su número atómico y otros factores tales como el radio atómico y la manera en la que sus átomos se compactan. El término ***gravedad específica*** expresa la densidad de un material en relación con la densidad del agua y por tanto es una razón adimensional.

La densidad es una consideración importante en la selección de un material para una aplicación dada, pero generalmente no es la única propiedad de interés. La resistencia también es importante, y con frecuencia las dos propiedades se relacionan con una ***razón resistencia a peso***, que es la resistencia a la tensión del material dividida entre su densidad. La razón es útil para comparar materiales para aplicaciones estructurales en los aviones, automóviles y otros productos en los que el peso y la energía importan.

TABLA 4.1 Propiedades volumétricas en unidades tradicionales de Estados Unidos para materiales seleccionados de la ingeniería.

	Densidad, ρ,		Coeficiente de expansión térmica, α		Punto de fusión, T_m	
Material	g/cm^3	lb/in^3	°C^{-1} × 10^{-6}	°F^{-1} × 10^{-6}	°C	°F
Metales						
Aluminio	2.70	0.098	24	13.3	660	1 220
Cobre	8.97	0.324	17	9.4	1 083	1 981
Fierro	7.87	0.284	12.1	6.7	1 539	2 802
Plomo	11.35	0.410	29	16.1	327	621
Magnesio	1.74	0.063	26	14.4	650	1 202
Níquel	8.92	0.322	13.3	7.4	1 455	1 651
Acero	7.87	0.284	12	6.7	[a]	[a]
Estaño	7.31	0.264	23	12.7	232	449
Tungsteno	19.30	0.697	4.0	2.2	3 410	6 170
Zinc	7.15	0.258	40	22.2	420	787
Cerámicos						
Vidrio	2.5	0.090	1.8–9.0	1.0–5.0	[b]	[b]
Alúmina	3.8	0.137	9.0	5.O	ND	ND
Sílice	2.66	0.096	ND	ND	[b]	[b]
Polímeros						
Resinas fenólicas	1.3	0.047	60	33	[c]	[c]
Nailo	1.16	0.042	100	55	[b]	[b]
Teflón	2.2	0.079	100	55	[b]	[b]
Caucho natural	1.2	0.043	80	45	[b]	[b]
Polietileno:						
Baja densidad	0.92	0.033	180	100	[b]	[b]
Alta densidad	0.96	0.035	120	66	[b]	[b]
Poliestireno	1.05	0.038	60	33	[b]	[b]

Compilado de las referencias [2], [4], [5], [6] y otras fuentes.

[a] Las características de fusión del acero dependen de su composición.

[b] Se ablandan a temperaturas elevadas y no tienen un punto de fusión bien definido.

[c] Se degradan químicamente a temperaturas elevadas. ND = no disponible; el valor de la propiedad para este material podría no ser obtenido.

4.1.2 Expansión térmica

La densidad de un material es función de la temperatura. La relación general es que la densidad disminuye con el aumento de temperatura. Dicho de otra forma, el volumen por unidad de peso se incrementa con la temperatura. Expansión térmica es el nombre que se da a este efecto que la temperatura tiene sobre la densidad. Por lo general se expresa como ***coeficiente de expansión térmica***, que mide el cambio de longitud por grado de temperatura, como mm/mm/°C (in/in/°F). Es una razón de longitud en vez de una de volumen, debido a que es más fácil de medir y aplicar. Es consistente con la situación habitual en el diseño en la que los cambios de dimensión tienen más interés que los volumétricos. El cambio de longitud correspondiente a un cambio dado de temperatura lo da la ecuación:

$$L_2 - L_1 = \alpha L_1 (T_2 - T_1) \tag{4.1}$$

donde α es el coeficiente de expansión térmica, °C^{-1} (°F^{-1}); y L_1 y L_2 son longitudes, mm (in), que corresponden, respectivamente, a las temperaturas T_1 y T_2, °C (°F).

Los valores del coeficiente de expansión térmica dados en la tabla 4.1 sugieren que éste tiene una relación lineal con la temperatura. Eso únicamente es una aproximación. No sólo la longitud es afectada por la temperatura, sino que el coeficiente de expansión térmica en sí también se ve afectado. Para ciertos materiales, se incrementa con la temperatura; para otros, disminuye. En general, esos cambios no son lo bastante significativos para prestarles mucha atención, y valores como los de la tabla son muy útiles en los cálculos del diseño para el rango de temperaturas de servicio. Los cambios en el coeficiente son más sustanciales cuando el metal pasa por una fase de transformación, por ejemplo de sólido a líquido, o de una estructura cristalina a otra.

En las operaciones de manufactura, la expansión térmica tiene un buen uso en el ajuste por contracción y en los ensambles de ajuste por expansión (véase la sección 33.3.2), en los que un elemento se calienta para incrementar su tamaño o se enfría para disminuirlo, a fin de permitir su inserción en alguna otra parte. Cuando el elemento regresa a la temperatura ambiente, se obtiene un ensamble con ajuste muy estrecho. La expansión térmica puede ser un problema en el tratamiento térmico (véase el capítulo 27) y en las soldaduras por fusión (véase la sección 31.6.1) debido a las fuerzas térmicas que se presentan en el material durante esos procesos.

4.1.3 Características de fusión

Para un elemento puro, el ***punto de fusión***, T_m, es la temperatura a la que el material pasa del estado sólido al líquido. La transformación inversa, de líquido a sólido, ocurre a la misma temperatura y se denomina ***punto de enfriamiento***. Para elementos cristalinos, como los metales, las temperaturas de fusión y enfriamiento son las mismas. A esa temperatura, con objeto de efectuar la transformación de sólido a líquido se requiere cierta cantidad de energía calorífica, llamada ***calor de fusión***.

La fusión de un elemento metálico a una temperatura específica, como se ha descrito aquí, supone condiciones de equilibrio. En la naturaleza hay excepciones; por ejemplo, cuando se enfría un metal fundido, permanece en estado líquido por debajo de su punto de enfriamiento si la formación de núcleos de cristales no se inicia de inmediato. Cuando esto pasa, se dice que el líquido está ***superfrío***.

Hay otras variaciones en el proceso de fusión, para materiales distintos, hay diferencias en la forma de fusión. Por ejemplo, a diferencia de los metales puros, la mayor parte de aleaciones metálicas no tienen un solo punto de fusión. En vez de ello, la fusión comienza a cierta temperatura, llamada ***solidus***, y continúa conforme la temperatura aumenta hasta que por último se convierten por completo al estado líquido a una temperatura denominada ***liquidus***. Entre las dos temperaturas, la aleación es una mezcla de metales sólidos y fundidos, la

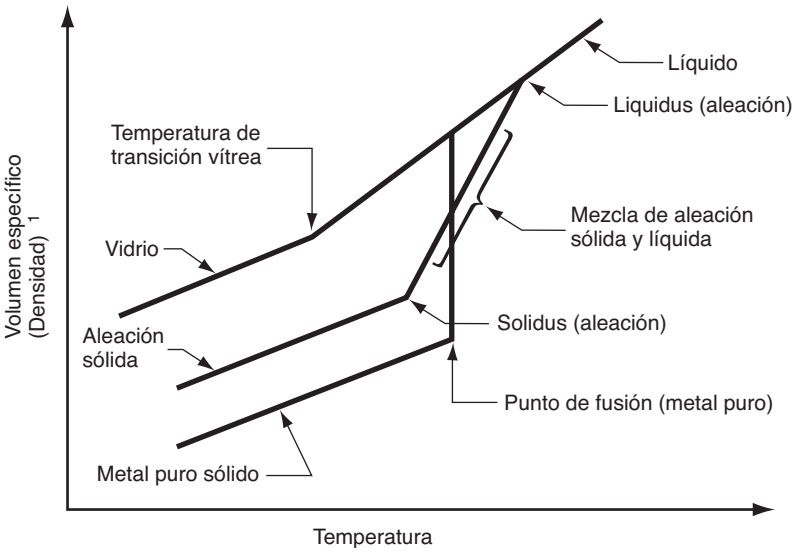


FIGURA 4.1 Cambios de volumen por unidad de peso (1/densidad) como función de la temperatura para un metal puro hipotético, aleación y vidrio; todos muestran características similares de expansión térmica y fusión.

cantidad de cada uno de los cuales es inversamente proporcional a sus distancias relativas a cada uno de los puntos. Aunque la mayoría de aleaciones se comportan de esta manera, las excepciones son las aleaciones eutécticas que se funden (y congelan) a una temperatura única. En el capítulo 6 se estudian estos temas en el análisis de los diagramas de fase.

Otra diferencia en la fusión ocurre en los materiales no cristalinos (vidrios). En ellos hay una transición gradual de los estados sólidos a los líquidos. El material sólido se suaviza en forma gradual conforme la temperatura aumenta, por último se hace líquido en el punto de fusión. Durante el ablandamiento, el material tiene una consistencia de plasticidad creciente (cada vez más como un fluido) según se acerca al punto de fusión.

En la figura 4.1 se ilustran estas diferencias en las características del punto de fusión para los metales puros, aleaciones y vidrio. Las gráficas muestran cambios en la densidad como función de la temperatura para tres materiales hipotéticos: un metal puro, aleación y vidrio. En la figura está graficado el cambio volumétrico, que es el recíproco de la densidad.

Es obvia la importancia que tiene la fusión en la manufactura. En la fundición de metal (véanse los capítulos 10 y 11), el metal se funde y luego se vierte en la cavidad de un molde. Los metales con puntos de fusión bajos por lo general son más fáciles de fundir, pero si la temperatura de fusión es demasiado baja, el metal pierde su aplicabilidad como material de ingeniería. Las características de fusión de los polímeros son importantes en el moldeo de plásticos y otros procesos de dar forma a polímeros (véase el capítulo 13). El sinterizado de metales y cerámicas pulverizados requiere el conocimiento de los puntos de fusión. El sinterizado no funde los materiales, pero las temperaturas que se usan en el proceso deben acercarse al punto de fusión a fin de lograr la unión requerida de los polvos.

4.2 PROPIEDADES TÉRMICAS

Gran parte de la sección anterior tiene que ver con los efectos de la temperatura sobre las propiedades volumétricas de los materiales. Ciertamente, la expansión térmica, fusión y temperatura de fusión son propiedades térmicas porque la temperatura determina el nivel de energía térmica de los átomos, lo que lleva a cambios en los materiales. En esta sección se examinan varias propiedades térmicas adicionales —las que se relacionan con el almacenamiento y flujo del calor dentro de una sustancia. Las propiedades usuales de interés son el calor específico y la conductividad térmica, algunos de cuyos valores se encuentran en la tabla 4.2, para materiales seleccionados.

4.2.1 Calor específico y conductividad térmica

El ***calor específico*** *C* de un material se define como la cantidad de energía calorífica requerida para incrementar la temperatura de una unidad de masa del material en un grado. En la tabla 4.2 se enlistan algunos valores comunes. A fin de determinar la cantidad de energía necesaria para calentar cierto peso de metal en un horno a una temperatura alta dada, se emplea la ecuación siguiente:

$$H = C\,W(T_2 - T_1) \tag{4.2}$$

donde H es la cantidad de energía calorífica, J (Btu); C es el calor específico del material, J/kg °C (Btu/lb °F); W es su peso, kg (lb) y $(T_2 - T_1)$ es el cambio de temperatura, °C (°F).

Es frecuente que sea de interés la capacidad de almacenamiento calorífico volumétrico de un material. Ésa es tan sólo la densidad multiplicada por el calor específico, ρC. Así, el ***calor específico volumétrico*** es la energía calorífica que se requiere para elevar en un grado la temperatura de una unidad de volumen del material, J/mm^3 °C (Btu/in^3 °F).

La conducción es un proceso fundamental de transferencia de calor. Incluye la transferencia de energía térmica dentro de un material de molécula a molécula sólo por medio de movimientos térmicos; no hay transferencia de masa. Por tanto, la conductividad térmica de una sustancia es su capacidad para transferir calor a través de sí misma por este mecanismo físico. Se mide con el ***coeficiente de conductividad térmica***, k, cuyas unidades comunes son J/s mm °C (Btu/in h °F). Generalmente, el coeficiente de conductividad térmica es elevado en los metales y bajo en los cerámicos y los plásticos.

En el análisis de la transferencia de calor es frecuente encontrar la razón de conductividad térmica a calor específico volumétrico. Se denomina ***difusión térmica***, K y se determina con

$$K = \frac{k}{\rho C} \tag{4.3}$$

Se hace uso de ésta para calcular las temperaturas de corte en el maquinado (véase la sección 21.5.1).

TABLA 4.2 Valores de propiedades térmicas comunes para materiales seleccionados. Los valores son para la temperatura ambiente, y cambian para temperaturas diferentes.

Material	Calor específico Cal/g °C[a] o Btu/lbm °F	Conductividad térmica J/s mm °C	Conductividad térmica Btu/hr in °F
Metales			
Aluminio	0.21	0.22	9.75
Hierro colado	0.11	0.06	2.7
Cobre	0.092	0.40	18.7
Hierro	0.11	0.072	2.98
Plomo	0.031	0.033	1.68
Magnesio	0.25	0.16	7.58
Níquel	0.105	0.070	2.88
Acero	0.11	0.046	2.20
Acero inoxidable[b]	0.11	0.014	0.67
Estaño	0.054	0.062	3.0
Zinc	0.091	0.112	5.41
Cerámicas			
Alúmina	0.18	0.029	1.4
Concreto	0.2	0.012	0.6
Polímeros			
Fenólicos	0.4	0.00016	0.0077
Polietileno	0.5	0.00034	0.016
Teflón	0.25	0.00020	0.0096
Caucho natural	0.48	0.00012	0.006
Otros			
Agua (líquida)	1.00	0.0006	0.029
Hielo	0.46	0.0023	0.11

Compilada de las referencias [2], [3], [6] y otras fuentes.

[a] El calor específico tiene el mismo valor numérico en Btu/lbm-F o Cal/g-C. 1.0 caloría = 4.186 Joule.

[b] Acero inoxidable austenítico (18-8).

4.2.2 Propiedades térmicas en la manufactura

Las propiedades térmicas juegan un papel importante en la manufactura debido a que en muchos de sus procesos es común que se genere calor. En ciertas operaciones, el calor es la energía que lleva a cabo el proceso; en otros, el calor se genera como consecuencia del proceso.

El calor específico es de interés por varias razones. En procesos que requieren el calentamiento del material (por ejemplo, fundición, tratamiento térmico y forja de metales calientes), el calor específico determina la cantidad de energía calorífica necesaria para elevar la temperatura al nivel deseado, de acuerdo con la ecuación (4.2).

En muchos procesos que se efectúan a temperatura ambiente, la energía mecánica que ejecuta la operación se convierte en calor, lo que eleva la temperatura del elemento que se trabaja. Esto es común en el maquinado y forjado en frío de los metales. El aumento de temperatura es función del calor específico del metal. Es frecuente que en el maquinado se utilicen refrigerantes para reducir dichas temperaturas, y en este caso es crítica la capacidad calorífica del fluido. Casi siempre se emplea agua como la base de esos fluidos debido a su gran capacidad de absorción de calor.

La conductividad térmica funciona para disipar el calor de los procesos de manufactura, unas veces en forma benéfica y otras no. En los procesos mecánicos tales como la forja y maquinado de metal, gran parte de la potencia requerida para operar el proceso se convierte en calor. En esos procesos es muy deseable que el material de trabajo y las herramientas tengan la capacidad de conducir el calor.

Por otro lado, la conductividad térmica elevada del metal de trabajo no es deseable en los procesos de soldadura por fusión, como la soldadura por arco eléctrico. En estas operaciones, la entrada de calor debe concentrarse en la ubicación de la junta de modo que el metal pueda fundirse. Por ejemplo, en general el cobre es difícil de soldar debido a que su elevada conductividad térmica permite que el calor pase con demasiada rapidez de la fuente de energía al resto del elemento, lo que inhibe su acumulación para fundir la unión.

4.3 DIFUSIÓN DE MASA

Además de la transferencia de calor en un material, también existe la transferencia de masa. La ***difusión de masa*** involucra el movimiento de átomos o moléculas dentro de un material o a través de una frontera entre dos materiales en contacto. Quizá sea más comprensible para la intuición que ese fenómeno ocurra en líquidos y gases, pero también se da en los sólidos. Ocurre en los metales puros, en aleaciones y entre los materiales que comparten una interfase común. Debido a la agitación térmica de los átomos de un material (sólido, líquido o gas), los átomos se mueven en forma continua. En los líquidos y gases, donde el nivel de agitación térmica es alto, es un movimiento aleatorio. En los sólidos (en particular en los metales), el movimiento atómico se facilita por los vacíos y otras imperfecciones de la estructura cristalina.

Para el caso de dos metales que entran en contacto cercano de súbito, la difusión se ilustra por medio de la serie de dibujos de la figura 4.2. Al principio, ambos metales tienen su propia estructura atómica; pero con el tiempo hay un intercambio de átomos, no sólo a través de la frontera sino dentro de las piezas por separado. Con tiempo suficiente, el ensamble de las dos piezas alcanzará al final una composición uniforme en todo el conjunto.

La temperatura es un factor importante en la difusión. A temperaturas altas, la agitación térmica es mayor y los átomos se mueven con más libertad. Otro factor es el gradiente de concentración dc/dx, que indica la concentración de los dos tipos de átomos en una dirección de interés definida por x. En la figura 4.2*b*) está graficado el gradiente de concentración, para corresponder con la distribución instantánea de los átomos del ensamble. La

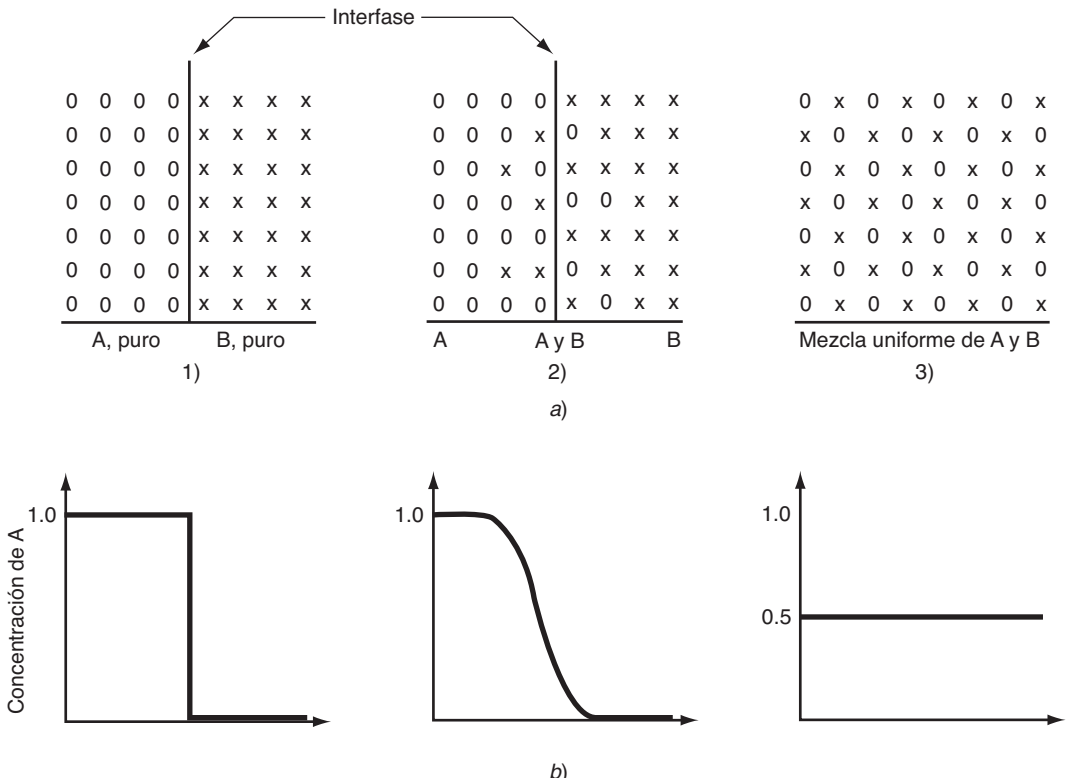


FIGURA 4.2 Difusión de masa: *a*) modelo de átomos en dos bloques sólidos en contacto: 1) al principio, cuando las dos piezas se juntan, cada una tiene su composición individual; 2) después de cierto tiempo ha ocurrido un intercambio de átomos; y 3) finalmente, sucede una condición de concentración uniforme. El gradiente de concentración *dc*/*dx* para el metal A, está graficado en el inciso *b*) de la figura.

relación que se emplea con frecuencia para describir la difusión de masa es la ***primera ley de Fick***:

$$dm = -D\left(\frac{dc}{dt}\right)A\ dt \tag{4.4}$$

donde dm es la pequeña cantidad de material transferido, D es el coeficiente de difusión del metal, que se incrementa con rapidez con la temperatura, dc/dx es el gradiente de concentración, A es el área de la frontera, y dt representa un incremento pequeño de tiempo. Una expresión alternativa de la ecuación (4.4) da la tasa de difusión de masa:

$$\frac{dm}{dt} = -D\left(\frac{dc}{dt}\right)A \tag{4.5}$$

Aunque estas ecuaciones son difíciles de utilizar en los cálculos debido al problema de evaluar D, son de utilidad para comprender la difusión y las variables de las que depende D.

La difusión de masa se utiliza en varios procesos. Cierto número de tratamientos de endurecimiento de la superficie se basan en ella (véase la sección 27.4), incluyendo la carburización y la nitruración. Entre los procesos de soldadura por fusión, la que es por difusión (véase la sección 31.5.2) se emplea para unir dos componentes por medio de comprimirlos y permitir que ocurra la difusión a través de la frontera para crear una unión permanente. La difusión también se utiliza en la manufactura electrónica para alterar la química de la superficie de un chip semiconductor en regiones muy localizadas, a fin de crear detalles del circuito (véase la sección 35.4.3).

4.4 PROPIEDADES ELÉCTRICAS

Los materiales de ingeniería muestran mucha variación en su capacidad de conducir la electricidad. En esta sección se definen las propiedades físicas por medio de las cuales se mide dicha capacidad.

4.4.1 Resistividad y conductividad

El flujo de una corriente eléctrica involucra el movimiento de ***portadores de carga*** —es decir, partículas infinitesimalmente pequeñas que poseen carga eléctrica. En los sólidos, esos portadores de carga son los electrones. En una solución líquida, los portadores de carga son los iones positivos y negativos. El movimiento de los portadores de carga está favorecido por la presencia de voltaje eléctrico, y se le oponen las características inherentes del material, tales como la estructura atómica y los límites entre los átomos y moléculas. La siguiente es la relación familiar definida por la ley de Ohm:

$$I = \frac{E}{R} \tag{4.6}$$

donde I es la corriente, A; E es el voltaje, V; y R es la resistencia eléctrica, Ω. La resistencia en una sección uniforme de material (por ejemplo, un conductor) depende de su longitud L, área de la sección transversal, A, y la resistividad del material, r; así,

$$R = r\frac{L}{A} \qquad \text{o} \qquad r = R\frac{A}{L} \tag{4.7}$$

donde la resistividad tiene las unidades de Ω-m^2/m o Ω-m (Ω-in). La ***resistividad*** es la propiedad básica que define la capacidad que un material tiene para oponerse al flujo de la corriente. La tabla 4.3 enlista los valores de resistividad para materiales seleccionados. La resistividad no es constante; por el contrario, varía, como tantas otras propiedades, con la temperatura. Para los metales, aumenta con la temperatura.

Con frecuencia, es más conveniente considerar a un material como conductor de la energía eléctrica más que como si se opusiera a su flujo. La ***conductividad*** de un material es tan sólo el recíproco de la resistividad:

$$\text{Concavidad eléctrica} = \frac{1}{r} \tag{4.8}$$

donde la conductividad se expresa en las unidades de $(\Omega\text{-m})^{-1}$ $[(\Omega\text{-in})^{-1}]$.

4.4.2 Clases de materiales según sus propiedades eléctricas

Los metales son los mejores ***conductores*** de la electricidad, debido a sus enlaces metálicos. Tienen la resistividad más baja (véase la tabla 4.3). La mayoría de las cerámicas y los polímeros, cuyos electrones tienen enlaces estrechos covalentes o iónicos, son malos conductores. Muchos de esos materiales se emplean como ***aislantes*** porque poseen resistividades elevadas.

En ocasiones, a un aislante se le denomina ***dieléctrico***, porque ese término significa que no es conductor de corriente directa. Es un material que se puede colocar entre dos electrodos sin que conduzca la corriente entre ellos. Sin embargo, si el voltaje es suficientemente alto, la corriente pasará de súbito a través del material, por ejemplo en forma de un arco. La ***resistencia dieléctrica*** de un material aislante es, entonces, el potencial eléctrico que se requiere para romper el aislamiento por unidad de espesor. Las unidades apropiadas son volts/m (volts/in).

Además de los conductores y aislantes (o dieléctricos), también hay superconductores y semiconductores. Un ***superconductor*** es un material que tiene una resistividad igual a

TABLA 4.3 Resistividad de materiales seleccionados.

Material	Resistividad Ω-m	Resistividad Ω-in
Conductores	$10^{-6} - 10^{-8}$	$10^{-4} - 10^{-7}$
Aluminio	2.8×10^{-8}	1.1×10^{-6}
Aleaciones de aluminio	4.0×10^{-8} a	1.6×10^{-6} a
Hierro colado	65.0×10^{-8} a	25.6×10^{-6} a
Cobre	1.7×10^{-8}	0.67×10^{-6}
Oro	2.4×10^{-8}	0.95×10^{-6}
Hierro	9.5×10^{-8}	3.7×10^{-6}
Plomo	20.6×10^{-8}	8.1×10^{-6}
Magnesio	4.5×10^{-8}	1.8×10^{-6}
Níquel	6.8×10^{-8}	2.7×10^{-6}
Plata	1.6×10^{-8}	0.63×10^{-6}
Conductores (continúa)		
Acero, bajo C	17.0×10^{-8}	6.7×10^{-6}
Acero, inoxidable	70.0×10^{-8} a	27.6×10^{-6}
Estaño	11.5×10^{-8}	4.5×10^{-6}
Zinc	6.0×10^{-8}	2.4×10^{-6}
Carbono	5000×10^{-8} b	2000×10^{-6} b
Semiconductores	$10^{1} - 10^{5}$	$10^{2} - 10^{7}$
Silicio	1.0×10^{3}	
Aislantes	$10^{12} - 10^{15}$	$10^{13} - 10^{17}$
Caucho natural	1.0×10^{12} b	0.4×10^{14} b
Polietileno	100×10^{12} b	40×10^{14} b

Compilada a partir de varias fuentes estándar.
[a] El valor varía con la composición de la aleación.
[b] El valor es aproximado.

cero. Es un fenómeno que se ha observado en ciertos materiales a temperaturas bajas que se acercan al cero absoluto. Podría esperarse la existencia de este fenómeno debido al efecto tan significativo que tiene la temperatura sobre la resistividad. La existencia de dichos superconductores tiene gran interés científico. Si pudieran desarrollarse materiales con esa propiedad a temperaturas más normales, habría implicaciones prácticas significativas para la transmisión de la energía, las velocidades de conexión electrónica, y aplicaciones del campo magnético.

Los semiconductores ya han probado su utilidad práctica, pues sus aplicaciones van desde computadoras grandes a aparatos electrodomésticos y controladores de motores automotrices. Como puede suponerse, un ***semiconductor*** es un material cuya resistividad está entre la de los aislantes y la de los conductores. En la tabla 4.3 se presenta el rango normal. El material semiconductor más utilizado hoy día es el silicio (véase la sección 7.5.2), sobre todo debido a su abundancia en la naturaleza, su relativo bajo costo y facilidad de procesamiento. Lo que hace únicos a los semiconductores es su capacidad de alterar de manera significativa las conductividades en sus químicas superficiales, en áreas muy localizadas para fabricar circuitos integrados (véase el capítulo 35).

Las propiedades eléctricas desempeñan un papel muy importante en varios procesos de manufactura. Algunos de los no tradicionales usan energía eléctrica para eliminar material. El maquinado con descarga eléctrica (véase la sección 26.3.1) emplea el calor generado por la energía eléctrica en forma de chispas para eliminar material de los metales. La mayor parte de los procesos importantes de soldadura por fusión (véase el capítulo 31) utilizan energía eléctrica para fundir la unión metálica. Y como ya se mencionó, la capacidad que tienen los materiales semiconductores para alterar las propiedades eléctricas es la base de la manufactura microelectrónica.

4.5 PROCESOS ELECTROQUÍMICOS

La ***electroquímica*** es el campo de la ciencia que tiene que ver con la relación entre la electricidad y los cambios químicos, y con la conversión de las energías eléctrica y química.

En una solución acuosa, las moléculas de un ácido, base o sal, están disociadas en iones con carga positiva y negativa. Estos iones son los portadores de carga en la solución, permiten la conducción de energía eléctrica, desempeñan el mismo papel que los electrones en la conducción metálica. La solución ionizada se denomina ***electrolito***; y la conduc-

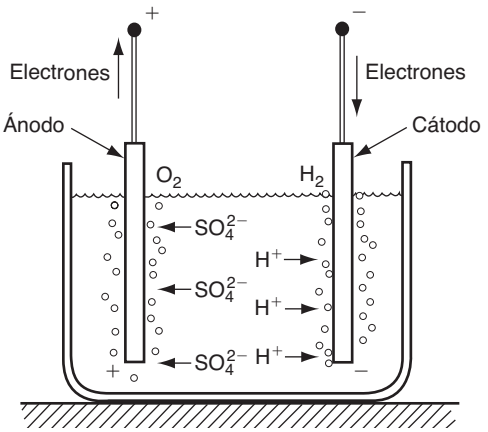


FIGURA 4.3 Ejemplo de electrólisis: la descomposición del agua.

ción electrolítica requiere que la corriente entre y salga de la solución por los ***electrodos***. El electrodo positivo se denomina ***ánodo***, y el negativo ***cátodo***. El conjunto del arreglo se denomina ***celda electrolítica***. En cada electrodo ocurre cierta reacción química, como la deposición o disolución de material, o la descomposición de un gas de la solución. El nombre que reciben los cambios químicos que ocurren en la solución es ***electrólisis***.

Considere el lector un caso específico de la electrólisis: la descomposición del agua, que se ilustra en la figura 4.3. Para acelerar el proceso, se emplea ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4) como electrolito, y como electrodos platino y carbono (ambos son químicamente inertes). El electrolito se disocia en los iones H^+ y $SO_4^=$. Los iones H^+ son atraídos al cátodo con carga negativa; al hacerlo, adquieren un electrón y se combinan en moléculas de gas hidrógeno:

$$2H^+ + 2e \rightarrow H_2(\text{gas}) \tag{4.9a}$$

Los iones $SO_4^=$ son atraídos hacia el ánodo, le transfieren electrones para formar ácido sulfúrico adicional y liberar oxígeno:

$$2SO_4^= \; -4e + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 + O_2 \tag{4.9b}$$

El producto H_2SO_4 se disocia en iones de H^+ y $SO_4^=$ de nuevo, y el proceso continúa.

Además de la producción de gases hidrógeno y oxígeno, como se ilustró en el ejemplo, la electrólisis también se utiliza en varios procesos industriales. Dos ejemplos son 1) la ***galvanoplastia*** (véase la sección 29.1.1), operación que agrega una capa delgada de cierto metal (por ejemplo, cromo) a la superficie de otro (por ejemplo, acero) para propósitos decorativos o de otra índole; y 2) el ***maquinado electroquímico*** (véase la sección 26.2), proceso en el que se retira material de la superficie de una pieza metálica. Ambas operaciones se basan en la electrólisis, ya sea para agregar o quitar material de la superficie de un elemento metálico. En la galvanoplastia, la pieza que se trabaja se coloca en el circuito electrolítico como cátodo, de modo que los iones positivos del metal de recubrimiento se ven atraídos a la pieza con carga negativa. En el maquinado electroquímico, la pieza de trabajo es el ánodo, y una herramienta con la forma adecuada es el cátodo. La acción de la electrólisis en este arreglo es eliminar metal de la superficie del elemento en regiones determinadas por la forma de la herramienta conforme penetra (avanza) con lentitud en el trabajo.

Las dos leyes físicas que determinan la cantidad de material que se deposita o retira de una superficie metálica fueron enunciadas por el científico británico Michael Faraday:

1. La masa de una sustancia liberada en una celda electrolítica es proporcional a la cantidad de electricidad que pasa a través de la celda.

2. Cuando a través de celdas electrolíticas diferentes pasa la misma cantidad de electricidad, las masas de las sustancias que se liberan son proporcionales a sus equivalentes químicos.

En el tratamiento posterior de la galvanoplastia y del maquinado electroquímico, se usarán las leyes de Faraday.

REFERENCIAS

[1] Guy, A. G. y Hren, J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, Mass., 1974.

[2] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[3] Kreith, F. ***Principles of Heat Transfer***, 5a. ed. Wadsworth Publishing Company, Belmont, Calif., 1996.

[4] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 1, Properties and Selection: Iron, Steel, and High Performance Alloys. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[5] ***Metals Handbook***, 10a. ed., Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[6] Van Vlack, L. H. ***Elements of Materials Science and Engineering***, 6a. ed. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

4.1. Defina a la densidad como propiedad de los materiales.

4.2. ¿Cuál es la diferencia en las características de fusión entre un elemento de metal puro y otro de aleación?

4.3. Describa las características de fusión de un material no cristalino, como el vidrio.

4.4. Defina el calor específico como propiedad de los materiales.

4.5. ¿Qué es la conductividad térmica como propiedad de los materiales?

4.6. Defina la difusividad térmica.

4.7. ¿Cuáles son las variables importantes que afectan la difusión de masa?

4.8. Defina la resistividad como propiedad de los materiales.

4.9. ¿Por qué los metales son mejores conductores de la electricidad que las cerámicas y polímeros?

4.10. ¿Qué es la resistencia dieléctrica como propiedad de un material?

4.11. ¿Qué es un electrólito?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 12 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

4.1. ¿Cuál de los metales siguientes tiene la densidad más baja?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) magnesio, o *d*) estaño.

4.2. ¿Las propiedades de expansión térmica de los polímeros por lo general son: *a*) mayores que, *b*) menores que, o *c*) iguales que las de los metales?

4.3. Al calentar la mayor parte de aleaciones metálicas, la fusión comienza a cierta temperatura y concluye a otra temperatura mayor. En esos casos ¿cuál de las temperaturas siguientes marca el comienzo de la fusión?: *a*) liquidus, o *b*) solidus.

4.4 ¿Cuál de los materiales que siguen tiene el calor específico más elevado?: *a*) aluminio, *b*) concreto, *c*) polietileno, o *d*) agua.

4.5. Por lo general, se considera que el cobre es fácil de soldar debido a su elevada conductividad térmica: *a*) verdadero, o *b*) falso.

4.6. ¿La tasa de difusión de masa dm/dt a través de una frontera entre dos metales diferentes es función de cuáles de las variables siguientes? (cuatro respuestas mejores): *a*) gradiente de concentración dc/dx, *b*) área de contacto, *c*) densidad, *d*) punto de fusión, *e*) expansión térmica, *f*) temperatura, y *g*) tiempo.

4.7. ¿Cuál de los metales puros siguientes es el mejor conductor de la electricidad?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, o *d*) plata.

4.8. ¿Un superconductor se caracteriza por…? (una respuesta es la mejor): *a*) resistividad muy baja, *b*) conductividad igual a cero, o *c*) propiedades de resistividad entre las de los conductores y los semiconductores.

4.9. ¿En una celda electrolítica, el ánodo es el electrodo que es: *a*) positivo, o *b*) negativo?

PROBLEMAS

4.1. El diámetro inicial de una flecha es de 25.00 mm. Se va a insertar en el agujero de un ensamble de ajuste por expansión. Para insertarlo con facilidad, debe reducirse el diámetro de la flecha por enfriamiento. Determine la temperatura a que debe reducirse la flecha a partir de la temperatura ambiente (20 ºC) a fin de disminuir su diámetro a 24.98 mm. Consulte la tabla 4.1.

4.2. Se construye un puente de 500 m de largo y 50 m de ancho, con vigas de acero. Para compensar el cambio de la longitud en las vigas de apoyo cuando la temperatura fluctúe, se colocan juntas de expansión. Cada una de éstas puede compensar un máximo de 100 mm de cambio de longitud. De los registros históricos se estima que las temperaturas mínima y máxima de la región serán –35 ºC y 38 ºC, respectivamente. ¿Cuál es el número mínimo de juntas de expansión que se requiere?

4.3. El aluminio tiene una densidad de 2.70 g/cm^3, a temperatura ambiente (20 ºC). Determine su densidad a 650 ºC, usando los datos de la tabla 4.1 como referencia.

4.4. En relación a la tabla 4.1, determine el incremento de la longitud de una barra de acero cuya longitud es de 10.0 in, si se calienta de la temperatura ambiente (70 ºF) a 500 ºF.

4.5. En relación con la tabla 4.2, determine la cantidad de calor requerido para incrementar la temperatura de un bloque de aluminio que mide 10 cm × 10 cm × 10 cm, de la temperatura ambiente (21 ºC) a 300 ºC.

4.6. ¿Cuál es la resistencia R de un trozo de alambre de cobre cuya longitud es de 10 m y diámetro de 0.10 mm? Emplee como referencia la tabla 4.3.

4.7. Un conductor de níquel con medida de 16 (0.0508 in de diámetro) conecta un solenoide a un circuito de control que mide 32.8 ft, *a*) ¿cuál es la resistencia del conductor? Use la tabla 4.3 como referencia. *b*) Si una corriente pasa a través del conductor, lo calentaría. ¿Cómo afecta esto a la resistencia?

4.8. En la década de 1960, en muchos hogares se utilizó cableado de aluminio debido al costo alto del cobre en esa época. El alambre de aluminio era de medida 12 (una medida del área de la sección transversal) y se especificaba para una corriente de 15 A. Si se empleara alambre de cobre de la misma medida para sustituir al de aluminio, ¿qué corriente debería ser capaz de conducir el alambre, si todos los demás factores, excepto la resistividad, se consideraran iguales? Suponga que la resistencia del alambre es el factor principal que determina la corriente que puede conducir, y que el área de la sección transversal y la longitud son las mismas para ambos tipos de alambre.

5 DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y SUPERFICIES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

5.1 Dimensiones, tolerancias y atributos relacionados
- 5.1.1 Dimensiones y tolerancias
- 5.1.2 Otros atributos geométricos

5.2 Superficies
- 5.2.1 Características de las superficies
- 5.2.2 Textura de las superficies
- 5.2.3 Integridad de la superficie

5.3 Efecto de los procesos de manufactura
- 5.3.1 Tolerancias y procesos de manufactura
- 5.3.2 Superficies y procesos de manufactura

Además de las propiedades mecánicas y físicas de los materiales, otros factores que determinan el rendimiento de un producto manufacturado incluyen las dimensiones y superficies de sus componentes. Las ***dimensiones*** son los tamaños lineales o angulares de un componente, especificadas en el plano de la pieza. Las dimensiones son importantes porque determinan lo bien que se ajustan los componentes de un producto durante su ensamble. Al fabricar un componente dado, es casi imposible y muy costoso dar al elemento la dimensión nominal que se establece en el plano. En vez de ello, se permite una variación limitada de la dimensión, y la que es permisible se denomina ***tolerancia***.

Las superficies de un componente también son importantes. Afectan el desempeño del producto, el ajuste del ensamble, y la percepción estética que un consumidor potencial podría tener del producto. Una ***superficie*** es el límite exterior de un objeto con su ambiente, que puede ser otro objeto, un fluido, el espacio, o una combinación de éstos. La superficie encierra el conjunto de propiedades mecánicas y físicas.

En este capítulo se estudian las dimensiones, las tolerancias y las superficies —tres atributos especificados por el diseñador del producto—. Sus logros físicos están determinados en gran parte por los procesos de manufactura que se emplean para fabricar las piezas y los productos. En el capítulo 45, se estudia la manera de medir e inspeccionar estos atributos.

5.1 DIMENSIONES, TOLERANCIAS Y ATRIBUTOS RELACIONADOS

En esta sección se definen los parámetros básicos que usan los ingenieros de diseño para especificar las dimensiones de las características geométricas en el plano de una pieza. Los parámetros incluyen dimensiones y tolerancias, planicidad, redondez y angularidad.

5.1.1 Dimensiones y tolerancias

La ANSI [3] define ***dimensión*** como el "valor numérico expresado en las unidades apropiadas de medida, que se indica en un plano y otros documentos junto con líneas, símbolos y notas para definir el tamaño o característica geométrica, o ambas, de una pieza o característica de una pieza". Las dimensiones de una pieza en un plano o dibujo representan los tamaños nominales o básicos de la pieza y sus características. Éstos son los valores que el diseñador querría que la pieza tuviera, si pudiera fabricarse con un tamaño exacto, sin errores ni variaciones en el proceso de fabricación. Sin embargo, en el proceso de manufactura hay variaciones que se manifiestan como variaciones en el tamaño de la pieza. Las tolerancias se utilizan para definir los límites de la variación permitida. Al citar otra vez el estándar de ANSI [3], ***tolerancia*** es "la cantidad total que está permitido que una dimensión específica varíe. La tolerancia es la diferencia entre los límites máximo y mínimo".

Las tolerancias se especifican de modos diversos, que se ilustran en la figura 5.1. Es probable que la más común sea la ***tolerancia bilateral***, en la que se permite que la variación sea en las direcciones positiva y negativa a partir de la dimensión nominal. Por ejemplo, en la figura 5.1*a*), la dimensión nominal es de 2.500 unidades lineales (por ejemplo, mm, in), con una variación permisible de 0.005 unidades en cualquier dirección. Las piezas que estén fuera de esos límites son inaceptables. Es posible que una tolerancia bilateral esté desbalanceada; por ejemplo, 2.500 + 0.010, –0.005 unidades dimensionales. Una ***tolerancia unilateral*** es aquella en la que la variación a partir de la dimensión especificada sólo se permite en una dirección, positiva o negativa, véase la figura 5.1*b*). Las ***dimensiones límite*** son un método alternativo de especificar la variación permisible en el tamaño de un elemento de una pieza; consisten en las dimensiones máxima y mínima permitidas, como se aprecia en la figura 5.1*c*).

5.1.2 Otros atributos geométricos

Las dimensiones y tolerancias normalmente se expresan como valores lineales (longitud). Hay otros atributos geométricos de las piezas que también son importantes, tales como la planicidad de una superficie, la redondez de una flecha o agujero, el paralelismo entre dos superficies, etcétera. Las definiciones de estos términos se enlistan en la tabla 5.1.

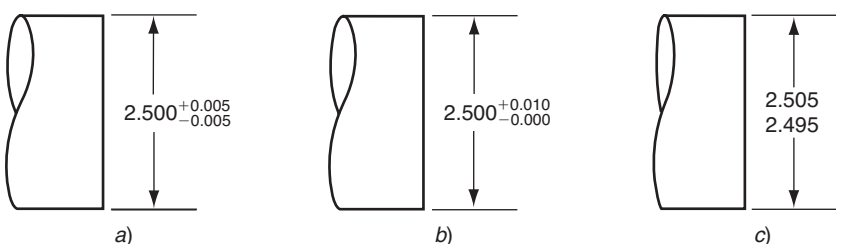


FIGURA 5.1 Tres maneras de especificar los límites de la tolerancia de una dimensión nominal de 2.500: *a*) bilateral; *b*) unilateral, y *c*) dimensiones límite.

TABLA 5.1 Definiciones de atributos geométricos de las piezas.

Angularidad – Grado en que un rasgo de una pieza, como una superficie o un eje, se encuentra con un ángulo especificado respecto de una superficie de referencia. Si el ángulo es de 90º, entonces el atributo se llama perpendicularidad o cuadratura.

Circularidad – Para una superficie de revolución como un cilindro, agujero o cono, la circularidad es el grado en que todos los puntos sobre la intersección de la superficie y un plano perpendicular al eje de revolución, se encuentran equidistantes al eje. Para una esfera, la circularidad es el grado en que todos los puntos sobre la intersección de la superficie y un plano que pasa por el centro están equidistantes de éste.

Concentricidad – Grado en que dos (o más) rasgos de una pieza, como una superficie cilíndrica y un agujero circular, tienen un eje común.

Cilindricidad – Grado en que todos los puntos sobre una superficie de revolución, como un cilindro, están equidistantes del eje de revolución.

Planicidad – Grado en que todos los puntos de una superficie se encuentran en un plano único.

Paralelismo – Grado en que todos los puntos de un rasgo de una pieza, como una superficie, una línea o un eje, están equidistantes de un plano, línea o eje de referencia.

Perpendicularidad – Grado en que todos los puntos de un rasgo de una pieza, como una superficie, una línea o un eje, están a 90° de un plano o línea o eje de referencia.

Redondez – Igual que circularidad.

Cuadratura – Igual que perpendicularidad.

Rectitud – Grado en que un rango de una pieza, como una línea o un eje, es una línea recta.

5.2 SUPERFICIES

Una superficie es aquello que tiene contacto como un barreno que al sujetarse con un objeto tal como una pieza manufacturada. El diseñador especifica las dimensiones de la pieza, relacionando las distintas superficies una con la otra. Estas ***superficies nominales*** representan el contorno relacionado con la superficie de la pieza, y están definidas por las líneas en el plano de ingeniería. Las superficies nominales aparecen como líneas absolutamente rectas, círculos ideales, agujeros redondos, y otras aristas y superficies que son perfectas en su geometría. Las superficies reales de una pieza manufacturada están determinadas por el proceso utilizado para fabricarla. La variedad de procesos disponibles en la manufactura da como resultado variaciones amplias de las características de la superficie, y es importante para los ingenieros entender la tecnología de las superficies.

Las superficies tienen importancia tecnológica y comercial por varias razones, diferentes para distintas aplicaciones de los productos: 1) razones estéticas, las superficies que son tersas y sin marcas y manchas es más probable que causen una impresión favorable en el consumidor. 2) Las superficies afectan la seguridad. 3) La fricción y el uso dependen de las características de las superficies. 4) Las superficies afectan las propiedades mecánicas y físicas; por ejemplo, los defectos de las superficies pueden ser puntos de concentración de esfuerzos. 5) El ensamblaje de las piezas se ve afectado por sus superficies; por ejemplo, la resistencia de las juntas unidas con adhesivos (véase la sección 32.3) se incrementa si las superficies tienen poca rugosidad. 6) Las superficies suaves constituyen contactos eléctricos mejores.

La ***tecnología de superficies*** tiene que ver con 1) la definición de las características de una superficie, 2) la textura de la superficie, 3) la integridad de la superficie, y 4) la relación entre los procesos de manufactura y las características de la superficie resultante. Los tres primeros temas se cubren en esta sección; el tema final se presenta en la sección 5.3.

5.2.1 Características de las superficies

Una vista microscópica de la superficie de una pieza revela sus irregularidades e imperfecciones. Los rasgos de una superficie común se ilustran en la sección transversal magnificada

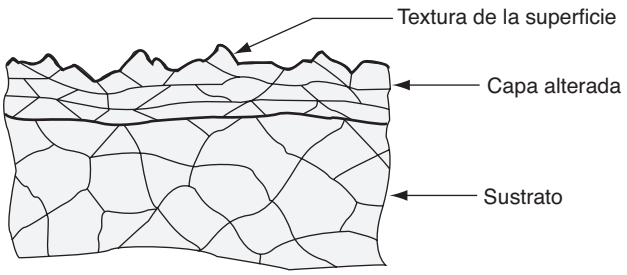


FIGURA 5.2 Sección transversal magnificada de una superficie metálica común.

de la superficie de una pieza metálica, que se presenta en la figura 5.2. Aunque aquí el análisis se concentra en las superficies metálicas, los comentarios vertidos aquí se aplican a las cerámicas y polímeros, con modificaciones debidas a las diferencias en la estructura de estos materiales. El cuerpo de la pieza, conocida como ***sustrato***, tiene una estructura granular que depende del procesamiento previo del metal; por ejemplo, la estructura del sustrato del metal se ve afectada por su composición química, el proceso de fundición que se usó originalmente para el metal, y cualesquiera operaciones de deformación y tratamientos térmicos llevados a cabo sobre el material de fundición.

El exterior de la pieza es una superficie cuya topografía es todo menos recta y tersa. En la sección transversal magnificada, la superficie tiene rugosidad, ondulaciones y defectos. Aunque aquí no se observan, también tiene un patrón o dirección que resulta del proceso mecánico que la produjo. Todos estos rasgos geométricos quedan incluidos en el término ***textura de la superficie***.

Justo por debajo de la superficie se encuentra una capa de metal cuya estructura difiere de la del sustrato. Se denomina ***capa alterada***, y es una manifestación de las acciones que se mencionaron al hablar de la superficie, durante la creación de ésta y etapas posteriores. Los procesos de manufactura involucran energía, por lo general en cantidades importantes, que opera sobre la pieza, contra su superficie. La capa alterada puede resultar del endurecimiento por trabajo (energía mecánica), calor (energía térmica), tratamiento químico, o incluso energía eléctrica. El metal de esta capa resulta afectado por la aplicación de energía, y su microestructura se altera en consecuencia. Esta capa alterada cae dentro del alcance de la ***integridad de la superficie***, que tiene que ver con la definición, la especificación y el control de las capas de la superficie de un material (metales, los más comunes), en la manufactura y el desempeño posterior en el uso. El alcance de la integridad de la superficie por lo general se interpreta para incluir la textura de la superficie, así como la capa alterada ubicada bajo ella.

Además, la mayoría de las superficies metálicas están cubiertas por una ***capa de óxido***, si se da el tiempo suficiente para que se forme después del procesamiento. El aluminio forma en su superficie una capa delgada, densa y dura de Al_2O_3 (que sirve para proteger al sustrato de la corrosión), y el fierro forma óxidos de varias composiciones químicas sobre su superficie (el óxido, que virtualmente no da ninguna protección). También es probable que en la superficie de la pieza haya humedad, mugre, aceite, gases adsorbidos, y otros contaminantes.

5.2.2 Textura de las superficies

La ***textura de la superficie*** consiste en las desviaciones repetitivas o aleatorias de la superficie nominal de un objeto; la definen cuatro características: rugosidad, ondulación, orientación y defectos o fallas, como se observa en la figura 5.3. La ***rugosidad*** se refiere a las desviaciones pequeñas, espaciadas finamente, de la superficie nominal y que están determinadas por las características del material y el proceso que formó la superficie. La ***ondulación*** se define como las desviaciones de espaciamiento mucho mayor; ocurren

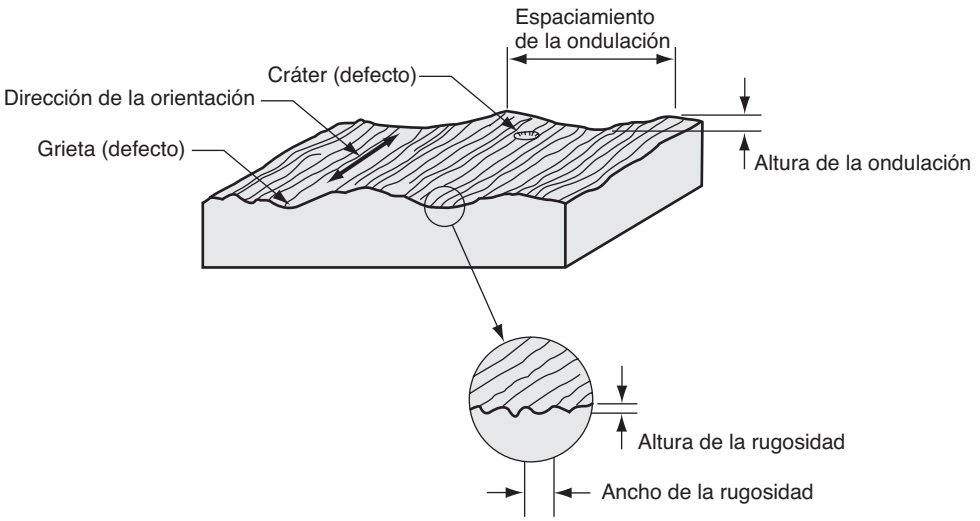
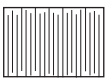
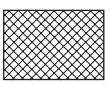
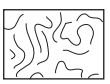
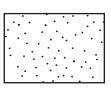


FIGURA 5.3 Rasgos de la textura de una superficie.

debido a la deflexión del trabajo, vibraciones, tratamiento térmicas, y factores similares. La rugosidad está sobreimpuesta a la ondulación. La ***orientación*** es la dirección predominante o patrón de la textura de la superficie. Está determinada por el método de manufactura utilizado para crear a la superficie, por lo general a partir de la acción de una herramienta de corte. En la figura 5.4 se ilustran la mayoría de las orientaciones posibles que puede haber en una superficie, junto con el símbolo que utiliza el diseñador para especificarlas. Por último, los ***defectos*** son irregularidades que ocurren en forma ocasional en la superficie; incluyen grietas, rayaduras, inclusiones y otros defectos similares. Aunque algunos de los defectos se relacionan con la textura de la superficie también afectan su integridad (véase la sección 5.2.3).

FIGURA 5.4 Orientaciones posibles de una superficie (Fuente: [1]).

Símbolo de la orientación	Patrón de la superficie	Descripción
=		La orientación es paralela a las líneas que representan a la superficie a que se aplica el símbolo.
⊥		La orientación es perpendicular a la línea que representa la superficie a que el símbolo se aplica.
X		La orientación es angular en ambas direcciones a la línea que representa la superficie a que se aplica el símbolo.
M		La orientación es multidireccional.
C		La orientación es circular en relación con el centro de la superficie para la que se utiliza el símbolo.
R		La orientación es aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie para la que se emplea el símbolo.
P		La orientación es particular, no direccional o protuberante.

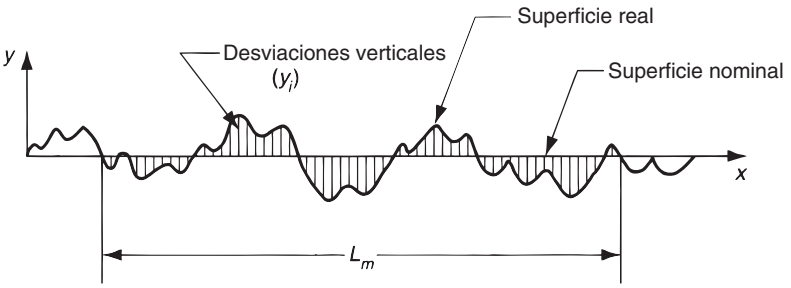


FIGURA 5.5 Las desviaciones de la superficie nominal que se usan en las dos definiciones de rugosidad de una superficie.

Rugosidad de la superficie y acabado de la superficie La rugosidad de una superficie es una característica mensurable, con base en las desviaciones de la rugosidad según se definió antes. El ***acabado de la superficie*** es un término más subjetivo que denota la suavidad y calidad general de una superficie. En el habla popular, es frecuente utilizar el acabado superficial o de la superficie como sinónimo de su rugosidad.

La medida que se emplea más comúnmente para la textura de una superficie, es su rugosidad. Respecto a la figura 5.5, la ***rugosidad de la superficie*** se define como el promedio de las desviaciones verticales a partir de la superficie nominal, en una longitud especificada de la superficie. Por lo general se utiliza un promedio aritmético (AA), con base en los valores absolutos de las desviaciones, y este valor de la rugosidad se conoce con el nombre de ***rugosidad promedio***. En forma de ecuación es

$$R_a = \int_0^{L_m} \frac{|y|}{L_m} dx \tag{5.1}$$

donde R_a = media aritmética de la rugosidad, m (in); y es la desviación vertical a partir de la superficie nominal (convertida a valor absoluto), m (in); y L_m es la distancia especificada en la que se miden las desviaciones de la superficie. Quizá sea más fácil de entender una aproximación de la ecuación (5.1), dada por

$$R_a = \sum_{i=1}^{n} \frac{|y_i|}{n} \tag{5.2}$$

donde R_a tiene el mismo significado que antes; y_i son las desviaciones verticales convertidas a valor absoluto e identificadas por el subíndice i, m (in) y n es el número de desviaciones incluidas en L_m. Se ha dicho que las unidades en estas ecuaciones son m (in). En realidad, la escala de las desviaciones es muy pequeña, por lo que las unidades más apropiadas son μm (μm = m $\times 10^{-6}$ = mm $\times 10^{-3}$) o μ-in (μ-in = in $\times 10^{-6}$). Éstas son las unidades de uso más común para expresar la rugosidad de una superficie.

Hoy día, el AA es el método de promedios que se emplea más para expresar la rugosidad de una superficie. Una alternativa, que en ocasiones se utiliza en Estados Unidos, es el promedio según la ***raíz media cuadrática*** (RMS), que es la raíz cuadrada de la media de las desviaciones elevadas al cuadrado sobre la longitud de medición. Los valores RMS de la rugosidad de la superficie casi siempre serán mayores que los AA, debido a que las desviaciones grandes pesan más en los cálculos del valor RMS.

La rugosidad de la superficie tiene la misma clase de deficiencias que cualquier medida que se use para evaluar un atributo físico complejo. Por ejemplo, falla para tomar en cuenta las orientaciones del patrón superficial; así, la rugosidad de la superficie varía en forma significativa, en función de la dirección en que se mida.

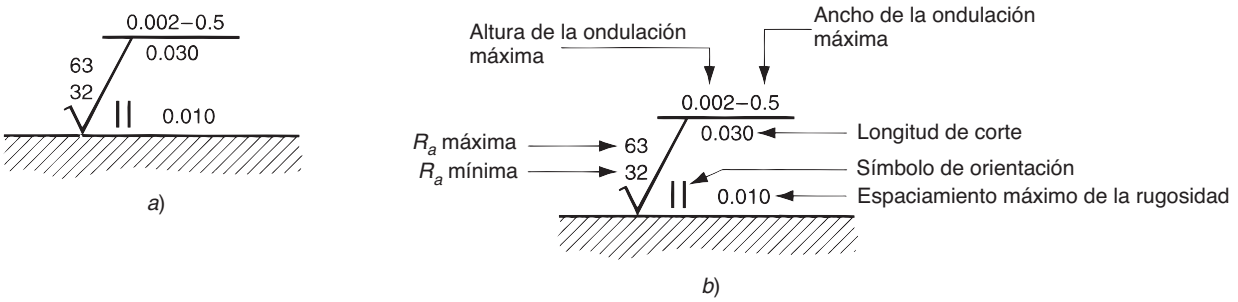


FIGURA 5.6 Símbolos para la textura de la superficie en los planos de ingeniería: *a*) el símbolo, y *b*) símbolo con leyendas de identificación. Los valores de R_a están dados en micropulgadas; las unidades para otras mediciones se dan en pulgadas. Los diseñadores no siempre especifican todos los parámetros en los planos de ingeniería.

Otra deficiencia es que la ondulación queda incluida en el cálculo de R_a. Para evitar este problema se emplea un parámetro denominado ***longitud de corte***, que se usa como un filtro que separa la ondulación de una superficie medida de las desviaciones de la rugosidad. En realidad, la longitud de corte es una distancia muestral a lo largo de la superficie. Una distancia muestral más corta que el ancho de la ondulación eliminará las desviaciones verticales asociadas con ésta y sólo incluirá aquellas que se relacionan con la rugosidad. En la práctica, la longitud de corte más común es 0.8 mm (0.030 in). La longitud de medición L_m se establece normalmente como de cinco veces la longitud de corte.

Las limitaciones de la rugosidad de la superficie han motivado la creación de medidas adicionales que describan en forma más completa la topografía de una superficie dada. Estas mediciones incluyen salidas gráficas tridimensionales de la superficie, como se describe en la referencia [12].

Símbolos para la textura de la superficie Los diseñadores especifican la textura de la superficie en un plano de ingeniería, por medio de símbolos como los que se ven en la figura 5.6. El símbolo que designa los parámetros de la textura de una superficie es una marca de revisión (se parece al símbolo de la raíz cuadrada), con acotaciones para la rugosidad promedio, ondulación, corte, orientaciones y espaciamiento máximo de la rugosidad. Los símbolos para las orientaciones están tomados de la figura 5.4.

5.2.3 Integridad de la superficie

La textura de la superficie por sí sola no describe por completo una superficie. En el material puede haber cambios metalúrgicos o de otra clase inmediatamente debajo de la superficie, que pueden tener un efecto significativo sobre las propiedades mecánicas. La ***integridad de la superficie*** es el estudio y control de esta capa subsuperficial y cualesquiera cambios debido al procesamiento que influyan en el desempeño de la pieza o producto terminado. Ya antes se hizo referencia a esta capa subsuperficial como la capa alterada cuando su estructura difiere de la del sustrato, como se ilustra en la figura 5.2.

En la tabla 5.2 se enlistan las alteraciones y daños posibles que puede recibir la capa subsuperficial durante la manufactura. Los cambios superficiales son ocasionados por la aplicación de distintas formas de energía durante el procesamiento: mecánica, térmica, química y eléctrica. La energía mecánica es la más común que se utiliza en la manufactura; se aplica contra el material de trabajo en operaciones tales como la de dar forma a un metal (por ejemplo, forjado, extrusión), prensado y maquinado. Aunque la función primaria en esos procesos consiste en cambiar la geometría de la pieza que se trabaja, la energía mecánica también ocasiona esfuerzos residuales, endurecimiento por trabajo y grietas en las capas de la superficie. En la tabla 5.3 se indican los tipos

TABLA 5.2 Alteraciones superficiales y subsuperficiales que definen la integridad de una superficie.[a]

Absorción Impurezas absorbidas y retenidas por las capas de la superficie de la base del material, que es posible que generen fragilidad u otros cambios de propiedades.
Agotamiento de la aleación Ocurre cuando elementos críticos de la aleación se pierden de las capas superficiales, con la posible pérdida de propiedades del metal.
Grietas Rupturas o separaciones estrechas en la superficie o debajo de ésta, que alteran la continuidad del material. Las grietas se caracterizan por tener aristas afiladas y razones de longitud a ancho de 4:1 o más. Se clasifican en macroscópicas (son observables con una ampliación de 10X o menos) y microscópicas (requieren magnificación de más de 10X).
Cráteres Depresiones rugosas de la superficie ocasionadas por descargas de cortocircuitos asociadas con métodos eléctricos de procesamiento, tales como el maquinado por descargas eléctricas y electroquímicos (véase el capítulo 26).
Cambios en la dureza Se refieren a diferencias de dureza en la superficie o cerca de ella.
Zona afectada por el calor Regiones del metal afectadas por la aplicación de energía térmica; las regiones no se funden pero se calientan lo suficiente como para que se induzcan cambios metalúrgicos que afectan sus propiedades. Abreviado como HAZ, el efecto es más destacado en operaciones de soldadura por fusión (capítulo 31).
Inclusiones Partículas pequeñas de material incorporadas a las capas de la superficie durante el procesamiento; forman una discontinuidad en el material base. Su composición difiere en general de aquella del material base.
Ataque intergranular Varias formas de reacción química en la superficie, incluyendo la corrosión y oxidación intergranular.
Traslapes, pliegues y costuras Irregularidades y defectos en la superficie ocasionados por el comportamiento plástico de superficies que se traslapan.
Picaduras Depresiones poco profundas con aristas redondeadas formadas por varios mecanismos, incluyendo grabados selectivos o corrosión; remoción de inclusiones superficiales; abolladuras formadas mecánicamente, o acción electroquímica.
Deformación plástica Cambios microestructurales a partir de deformaciones en la superficie de los metales; es resultado del endurecimiento por deformación.
Recristalización Formación de granos nuevos en metales endurecidos por deformación; se asocia con el calentamiento de las piezas metálicas que se hayan deformado.
Metal redepositado Metal removido de la superficie en estado líquido y vuelto a depositar antes de solidificarse.
Metal resolidificado Porción de la superficie que se funde durante el procesamiento y después vuelve a solidificar sin abandonar la superficie. También se utiliza el término metal vuelto a fundir para él. El término metal de refundición incluye tanto al redepositado como al resolidificado.
Esfuerzos residuales Esfuerzos que permanecen en el material después de su procesamiento.
Grabado selectivo Forma de ataque químico que se concentra en ciertos componentes del material base.

[a] Compilado de la referencia [2]

TABLA 5.3 Formas de energía que se aplican en la manufactura y alteraciones posibles que pueden ocurrir en la superficie y bajo ella.[a]

Forma de energía	Mecánica	Térmica	Química	Eléctrica
Daño	Esfuerzos residuales en la capa subsuperficial Grietas – microscópicas y macroscópicas Deformación plástica Traslapes, pliegues o costuras Huecos o inclusiones Variaciones en la dureza (por ejemplo, endurecimiento por trabajo)	Cambios metalúrgicos (recristalización, cambios en el tamaño de los granos, cambios de fase en la superficie) Material redepositado o resolidificado Zona afectada por el calor Cambios de dureza	Ataque intergranular Contaminación química Absorción de elementos tales como H y Cl Corrosión, picaduras y grabados Disolución de constituyentes microscópicos Abatimiento de la aleación	Cambios en la conductividad o el magnetismo Cráteres que resultan de cortocircuitos durante la aplicación de ciertas técnicas eléctricas de procesamiento

[a] Basado en la referencia [2].

distintos de alteraciones superficiales y subsuperficiales atribuibles a las formas diferentes de energía que se aplican durante la manufactura. La mayor parte de alteraciones descritas en la tabla se refieren a los metales, para los que se ha estudiado mucho la integridad de su superficie.

5.3 EFECTO DE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

La capacidad de lograr cierta tolerancia o superficie es una función del proceso de manufactura. En esta sección se describen las capacidades generales de distintos procesos en términos de la tolerancia, la rugosidad e integridad de la superficie.

5.3.1 Tolerancias y procesos de manufactura

Ciertos procesos de manufactura son inherentemente más exactos que otros. La mayoría de procesos de maquinado son muy exactos, capaces de alcanzar tolerancias de ±0.05 mm (±0.002 in) o mejores. Por el contrario, las fundiciones con arena por lo general son inexactas y deben especificarse tolerancias de 10 a 20 veces las que se utilizan para piezas maquinadas. En la tabla 5.4 se enlista una variedad de procesos de manufactura y se indican las tolerancias comunes para cada proceso. Las tolerancias se basan en la capacidad de los procesos para la operación particular de manufactura, como se define en la sección 44.2. La tolerancia que debe especificarse es función del tamaño de la pieza; entre más grandes sean las piezas, requieren tolerancias más generosas. En la tabla se enlistan tolerancias para piezas de tamaño moderado en cada categoría de procesamiento.

5.3.2 Superficies y procesos de manufactura

El proceso de manufactura determina el acabado de la superficie y la integridad de ésta. Algunos procesos son inherentemente más capaces que otros de producir superficies mejores. En general, el costo del procesamiento se incrementa con la mejora del acabado de la superficie. Esto se debe a que para obtener superficies cada vez mejores por lo general se requieren operaciones adicionales y más tiempo. Los procesos específicos para proveer

TABLA 5.4 Límites comunes de la tolerancia, con base en la capacidad de varios de estos procesos de manufactura (véase la sección 44.2).

	Límites comunes de la tolerancia			Límites comunes de la tolerancia	
Proceso	mm	pulgadas	Proceso	mm	pulgadas
Fundición con arena			Procesos abrasivos:		
Hierro colado	±1.3	±0.050	Esmerilado	±0.008	±0.0003
Acero	±1.5	±0.060	Rectificado	±0.005	±0.0002
Aluminio	±0.5	±0.020	Bruñido	±0.005	±0.0002
Fundición con molde	±0.12	±0.005	Procesos no tradicionales:		
Moldeo de plásticos			Maquinado químico	±0.08	±0.003
Polietileno	±0.3	±0.010	Descarga eléctrica	±0.025	±0.001
Poliestireno	±0.15	±0.006	Rectificado electroquímico	±0.025	±0.001
Maquinado:			Maquinado electroquímico	±0.05	±0.002
Barrenado, diámetro:			Corte con haz de electrones	±0.08	±0.003
6 mm (0.250 in)	+0.08, –0.03	+0.003, –0.001	Corte con haz de láser	±0.08	±0.003
25 mm (1.000 in)	+0.13, –0.05	+0.006, –0.002	Corte con arco de plasma	±1.3	±0.050
Fresado	±0.08	±0.003			
Torneado	±0.05	±0.002			

Compilado de las fuentes [4], [5] y otras.

TABLA 5.5 Valores de rugosidad superficial producidos por distintos procesos de manufactura.[a]

Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad[b]	Proceso	Acabado de superficie común	Rango de rugosidad[b]
Fundición:			Abrasivos:		
Fundición con molde	Bueno	1–2 (30–65)	Esmerilado	Muy bueno	0.1–2 (5–75)
Fundición con revestimiento	Bueno	1.5–3 (50–100)	Rectificado	Muy bueno	0.1–1 (4–30)
Fundición con arena	Malo	12–25 (500–1000)	Bruñido	Excelente	0.05–0.5 (2–15)
Formado de metales:			Pulido	Excelente	0.1–0.5 (5–15)
Laminado en frío	Bueno	1–3 (25–125)	Superacabado	Excelente	0.02–0.3 (1–10)
Corte de lámina metálica	Bueno	1–3 (25–125)	No tradicionales:		
Extrusión en frío	Bueno	1–4 (30–150)	Fresado químico	Medio	1.5–5 (50–200)
Laminado en caliente	Malo	12–25 (500–1000)	Electroquímico	Bueno	0.2–2 (10–100)
Maquinado:			Descarga eléctrica	Medio	1.5–15 (50–500)
Perforado	Bueno	0.5–6 (15–250)	Haz de electrones	Medio	1.5–15 (50–500)
Barrenar	Medio	1.5–6 (60–250)	Haz de láser	Medio	1.5–15 (50–500)
Fresar	Bueno	1–6 (30–250)	Térmico:		
Planeado	Medio	1.5–12 (60–500)	Soldadura por arco	Malo	5–25 (250–1000)
Escariar	Bueno	1–3 (30–125)	Corte con llama	Malo	12–25 (500–1000)
Perfilar	Medio	1.5–12 (60–500)	Corte con arco de plasma	Malo	12–25 (500–1000)
Aserrar	Malo	3–25 (100–1000)			
Tornear	Bueno	0.5–6 (15–250)			

[a] Compilada a partir de las referencias [1] y [2] y otras.

[b] Descripción subjetiva, y el rango común de los valores de rugosidad superficial están dados en μm (μ-in). La rugosidad varía de manera significativa para un proceso dado en función de los parámetros del proceso.

acabados superiores incluyen el bruñido, el rectificado, el pulido y el superacabado (véase el capítulo 26). En la tabla 5.5 se indica la rugosidad superficial usual que se espera de varios procesos de manufactura.

REFERENCIAS

[1] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Texture***, ANSI B46.1-1978. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1978.

[2] American National Standards Institute, Inc. ***Surface Integrity***, ANSI B211.1-1986. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1986.

[3] American National Standards Institute, Inc. ***Dimensioning and Tolerancing***, ANSI Y14.5M-1982. American Society of Mechanical Engineers, Nueva York, 1982.

[4] Bakerjian, R. y Mitchell, P. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. VI, ***Design for Manufacturability***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1992.

[5] Drozda, T. J. y Wick, C. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. I, ***Machining***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1983.

[6] ***Machining Data Handbook***, 3a. ed., Vol. II. Machinability Data Center, Cincinnati, Ohio, 1980, Ch. 18.

[7] Mummery, L. ***Surface Texture Analysis—The Handbook***. Hommelwerke Gmbh, Germany, 1990.

[8] Oberg, E., Jones, F. D., Horton, H. L. y Ryffel, H., ***Machinery's Handbook***, 26a. ed. Industrial Press Inc., Nueva York, 2000.

[9] Schaffer, G. H. "The Many Faces of Surface Texture." Special Report 801, ***American Machinist and Automated Manufacturing***, junio de 1988, pp. 61-68.

[10] Sheffield Measurement, a Cross & Trecker Company, ***Surface Texture and Roundness Measurement Handbook***, Dayton, Ohio, 1991.

[11] Wick, C. y Veilleux, R. F. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., Vol. IV, ***Quality Control and Assembly***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1987, sección 1.

[12] Zecchino, M. "Why Average Roughness Is Not Enough", ***Advanced Materials & Process***, marzo de 2003, pp. 25-28.

PREGUNTAS DE REPASO

5.1. ¿Qué es tolerancia?
5.2. ¿Cuáles son algunas de las razones por las que son importantes las superficies?
5.3. Defina superficie nominal.
5.4. Defina la textura de una superficie.
5.5. ¿En qué se diferencia la textura de una superficie de la integridad de ésta?
5.6. En el ámbito de la textura de la superficie, ¿cómo se distingue la rugosidad de la ondulación?
5.7. La rugosidad de una superficie es un aspecto mensurable de su textura; ¿qué significa ***rugosidad de la superficie***?
5.8. ¿Cuál es la diferencia entre las mediciones AA y RMS, de la rugosidad de una superficie?
5.9. Indique algunas de las limitaciones del empleo de la rugosidad de la superficie como medida de la textura de ésta.
5.10. Identifique algunos cambios y daños que ocurren en la superficie de un metal o inmediatamente debajo de ella.
5.11. ¿Qué es lo que ocasiona los distintos tipos de cambio que ocurren en una capa alterada, justo debajo de la superficie?
5.12. Mencione algunos procesos de la manufactura que produzcan acabados de la superficie muy deficientes.
5.13. Cite algunos procesos de manufactura que produzcan acabados de la superficie muy buenos o excelentes.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 13 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

5.1. ¿Cuál de las siguientes es una tolerancia?: *a*) claro entre una flecha y la cavidad que lo aloja, *b*) error de medición, *c*) variación total permisible de una dimensión específica, o *d*) variación en la manufactura.
5.2. ¿Cuáles de los siguientes son los dos términos geométricos que tienen el mismo significado?: *a*) circularidad, *b*) concentricidad, *c*) cilindricidad, y *d*) redondez.
5.3. ¿La textura de una superficie incluye a cuáles de las siguientes características? (tres respuestas correctas): *a*) desviaciones de la superficie nominal, *b*) marcas de avance de la herramienta que produjo la superficie, *c*) variaciones en la dureza, *d*) películas de aceite, y *e*) grietas superficiales.
5.4. ¿Cuál método basado en promediar produce por lo general el valor más elevado de la rugosidad de una superficie?: *a*) AA, o *b*) RMS.
5.5. ¿La textura de una superficie está incluida en el ámbito de la integridad de ella: *a*) verdadero, o *b*) falso?
5.6. ¿La energía térmica normalmente se asocia con cuáles de los siguientes cambios en la capa alterada? (tres respuestas correctas): *a*) grietas, *b*) variaciones en la dureza, *c*) zona afectada por el calor, *d*) deformación plástica, *e*) recristalización, y *f*) huecos.
5.7. ¿Cuáles de los siguientes procesos de manufactura es probable que produzcan el mejor acabado de la superficie?: *a*) soldadura autógena con arco, *b*) esmerilar, *c*) maquinado, *d*) fundición con arena, o *e*) aserrar.
5.8. ¿Cuáles de los procesos de manufactura siguientes es probable que den como resultado el peor acabado de la superficie?: *a*) rolado en frío, *b*) esmerilar, *c*) maquinado, *d*) fundición con arena, o *e*) aserrar.

Parte II
Materiales de la ingeniería

6 METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

6.1 Aleaciones y diagramas de fase
- 6.1.1 Aleaciones
- 6.1.2 Diagramas de fase

6.2 Metales ferrosos
- 6.2.1 El diagrama de fase hierro-carbono
- 6.2.2 Producción de hierro y acero
- 6.2.3 Aceros
- 6.2.4 Hierros colados

6.3 Metales no ferrosos
- 6.3.1 El aluminio y sus aleaciones
- 6.3.2 El magnesio y sus aleaciones
- 6.3.3 El cobre y sus aleaciones
- 6.3.4 El níquel y sus aleaciones
- 6.3.5 El titanio y sus aleaciones
- 6.3.6 El zinc y sus aleaciones
- 6.3.7 El plomo y el estaño
- 6.3.8 Metales refractarios
- 6.3.9 Metales preciosos

6.4 Superaleaciones

6.5 Guía para el procesamiento de metales

En la parte II se estudian los cuatro tipos de materiales de la ingeniería: 1) metales, 2) cerámicos, 3) polímeros, y 4) compuestos. Los metales son los materiales más importantes de la ingeniería y el tema de este capítulo. Un metal es una categoría de materiales que se caracterizan generalmente por tener propiedades de ductilidad, maleabilidad, lustre y conductividad eléctrica y térmica elevadas. La categoría incluye tanto a elementos metálicos como a sus aleaciones. Los metales tienen propiedades que satisfacen una variedad amplia de requerimientos de diseño. Los procesos de manufactura con los que se les transforma en productos, han sido creados y mejorados a lo largo de muchos años; en realidad, algunos de los procesos datan de tiempos ancestrales (véase la nota histórica 1.2). La importancia tecnológica y comercial de los metales se debe a las propiedades generales siguientes, que poseen virtualmente todos los metales comunes:

- ***Rigidez y resistencia elevadas***. Los metales pueden alearse para darles rigidez, resistencia y dureza elevadas; se les utiliza para que proporcionen el marco estructural para la mayor parte de productos de la ingeniería.
- ***Tenacidad***. Los metales tienen la capacidad de absorber energía mejor que otras clases de materiales.
- ***Conductividad eléctrica buena***. Los metales son conductores debido a su enlace metálico, que permite el movimiento libre de los electrones como transportadores de carga.
- ***Conductividad térmica buena***. Los enlaces metálicos también explican el porqué los metales generalmente conducen el calor mejor que los cerámicos y los polímeros.

Además, ciertos metales tienen propiedades específicas que los hace atractivos para aplicaciones especializadas. Muchos metales comunes se hallan disponibles a un costo relativamente bajo por peso unitario, y sólo por esta razón con frecuencia son el material seleccionado.

Los metales se convierten en piezas y productos que conllevan una variedad de procesos de manufactura. La forma inicial de los metales difiere, lo que depende del proceso. Las categorías principales son: 1) ***metal fundido***, en la que la forma inicial es una pieza fundida; 2) ***metal forjado***, en la que el metal ha sido trabajado o puede serlo (por ejemplo, rolado u otro modo de darle forma) después de la fundición; en general, en comparación con los fundidos, a los metales forjados se les asocian propiedades mecánicas mejores; y 3) ***metal pulverizado***, en la que el metal es adquirido en forma de polvos muy finos para convertirlo en piezas por medio de técnicas metalúrgicas especiales para ello. La mayor parte de los metales se encuentra disponible en las tres formas. En este capítulo, el estudio se centrará en las categorías 1) y 2), que son las de mayor interés comercial y para la ingeniería. En el capítulo 16 se examinan las técnicas metalúrgicas para polvos.

Los metales se clasifican en dos grupos principales: 1) ***ferrosos***, los que se basan en el hierro, y 2) ***no ferrosos***, todos los demás. El grupo de los ferrosos puede subdividirse en aceros y tipos de hierro colado. La mayor parte de este capítulo estará organizado alrededor de esta clasificación, pero primero se verá el tema general de las aleaciones y los diagramas de fase.

6.1 ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE FASE

Aunque ciertos metales son importantes como metales puros (por ejemplo, oro, plata, cobre), la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería requiere de las propiedades mejoradas que se obtienen con la aleación. Con ésta es posible mejorar la resistencia, dureza y otras propiedades, en comparación con las de los metales puros. En esta sección, se definen y clasifican las aleaciones; después se estudian los diagramas de fase, que indican las fases de un sistema de aleación como función de la composición y la temperatura.

6.1.1 Aleaciones

Una ***aleación*** es un metal compuesto de dos o más elementos, al menos uno de los cuales es metálico. Las dos categorías principales de aleaciones son 1) soluciones sólidas, y 2) fases intermedias.

Soluciones sólidas Una ***solución sólida*** es una aleación en la que un elemento se disuelve en otro para formar una estructura de fase única. El término ***fase*** describe una masa homogénea de material, como la de un metal en el que todos los granos tienen la misma estructura reticular cristalina. En una solución sólida, el solvente o elemento base es metálico, y el elemento disuelto puede ser metálico o no metálico. Las soluciones sólidas

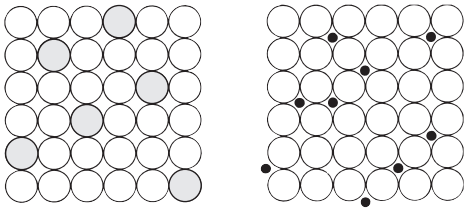


FIGURA 6.1 Dos formas de soluciones sólidas: *a*) solución sólida sustitucional, y *b*) solución sólida intersticial.

vienen en dos formas, que se ilustran en la figura 6.1. La primera es una ***solución sólida sustitucional***, en la que los átomos del elemento solvente son remplazados en su celda unitaria por el elemento disuelto. El latón es un ejemplo de esto, en el que el zinc está disuelto en cobre. Para hacer la sustitución deben satisfacerse muchas reglas ([2], [5], [6]): 1) el radio atómico de los dos elementos debe ser similar, por lo general dentro de un 15%; 2) sus tipos de retículas deben ser las mismas; 3) si los elementos tienen valencias diferentes, es más probable que el metal de valencia menor sea el solvente; y 4) si los elementos tienen afinidad química elevada uno por el otro, es menos probable que formen una solución sólida y más que constituyan un compuesto.

El segundo tipo de solución sólida es la ***solución sólida intersticial***, en la que los átomos del elemento solvente se acomodan en los espacios vacíos entre los átomos del metal base, en la estructura reticular. Se desprende que los átomos que quedan en esos intersticios deben ser pequeños en comparación con los del metal solvente. El ejemplo más importante de este segundo tipo de aleación es el carbono disuelto en hierro para formar acero.

En ambas formas de la solución sólida, por lo general la estructura aleada es más fuerte y dura que cualesquiera de los elementos que la componen.

Fases intermedias Por lo general hay límites a la solubilidad de un elemento en otro. Cuando la cantidad del elemento solvente en la aleación excede el límite de solubilidad sólida del metal base, en la aleación se forma una segunda fase. Para describirla se emplea el término ***fase intermedia*** debido a que su composición química es intermedia entre los dos elementos puros. Su estructura cristalina también es diferente de aquella de los metales puros. En función de la composición, y con el reconocimiento de que muchas aleaciones consisten en más de dos elementos, dichas fases intermedias pueden ser de varios tipos, incluyendo 1) compuestos metálicos que consisten en un metal y un no metal, como el Fe_3C; y 2) compuestos intermetálicos, dos metales que forman un compuesto, como el Mg_2Pb. Es frecuente que la composición de la aleación sea tal que la fase intermedia se mezcle con la solución sólida primaria para formar una estructura de dos fases, una dispersa en la segunda. Estas aleaciones de dos fases son importantes porque pueden formularse y ser tratadas térmicamente para darles una resistencia significativamente más elevada que la de las soluciones sólidas.

6.1.2 Diagramas de fase

Como se utiliza en este texto, el término ***diagrama de fase*** es un medio gráfico de representar las fases de un sistema de aleación metálica como una función de la composición y la temperatura. El análisis del diagrama se limitará a sistemas de aleaciones que consisten en dos elementos a presiones atmosféricas. Este tipo de diagrama se denomina ***diagrama de fase binaria***. En otros textos sobre la ciencia de los materiales se estudian otras formas de los diagramas de fase, por ejemplo en la referencia [5].

El sistema de aleación cobre-níquel El modo mejor de presentar el diagrama de fase es con un ejemplo. En la figura 6.2 se ilustra uno de los casos más sencillos, el sistema de la aleación Cu-Ni. En el eje horizontal se grafica la composición, y en el vertical la

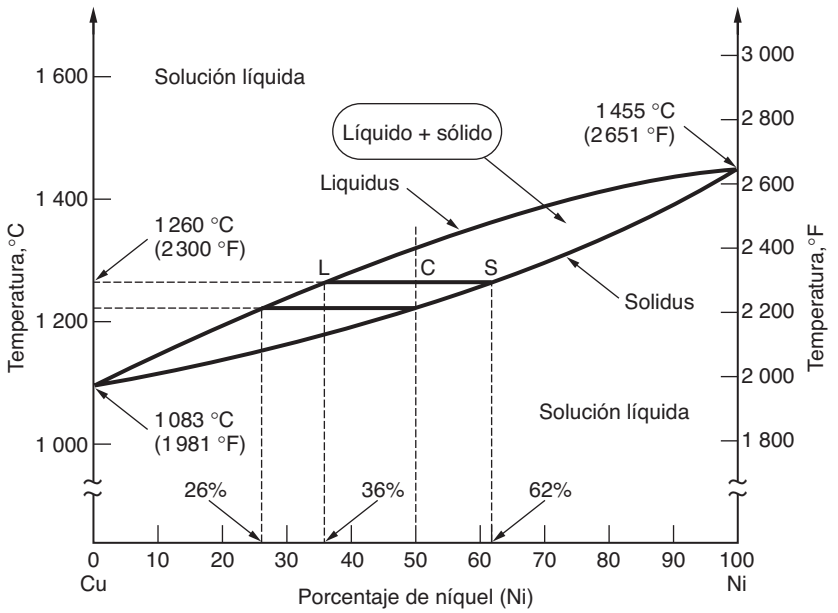


FIGURA 6.2 Diagrama de fase para el sistema de la aleación cobre-níquel.

temperatura. Así, cualquier punto del diagrama indica la composición conjunta y la fase o fases presentes a la temperatura dada. El cobre puro se funde a 1 083 ºC (1 981 ºF), y el níquel puro a 1 455 ºC (2 651 ºF). Las composiciones de la aleación entre estos extremos muestran fusión gradual que comienza en el solidus y en el liquidus conforme la temperatura se incrementa.

El sistema cobre-níquel es una aleación de solución sólida a través de todo el rango de composiciones. En cualquier punto de la región por debajo de la línea de solidus, la aleación es una solución sólida; en este sistema no hay fases sólidas intermedias. Sin embargo, hay una mezcla de fases en la región delimitada por las líneas de solidus y de liquidus. Recuerde el lector que en el capítulo 4 se dijo que el solidus es la temperatura a la que el metal sólido comienza a fundirse conforme la temperatura aumenta, y el liquidus es la temperatura en que termina la fusión. Ahora se ve en el diagrama de fase que esas temperaturas varían con la composición. Entre el solidus y el liquidus, el metal es una mezcla sólida-líquida.

Determinación de las composiciones químicas de las fases Aunque la composición conjunta de la aleación está dada por su posición en el eje *x*, las composiciones de las fases líquida y sólida no son las mismas. Es posible determinar dichas composiciones por medio del diagrama de fase si se dibuja una línea horizontal a partir de la temperatura de interés. Los puntos de la intersección de la línea horizontal con las de solidus y de liquidus indican las composiciones de las fases sólida y líquida presentes, respectivamente. Tan sólo se hacen las proyecciones verticales desde esos puntos de intersección hacia el eje *x* y se leen las composiciones correspondientes.

Ejemplo 6.1 Determinación de composiciones a partir del diagrama de fase

Para ilustrar el procedimiento, suponga que se desea analizar las composiciones de las fases líquida y sólida presentes en el sistema cobre-níquel, para una composición agregada de 50% de níquel y a una temperatura de 1 260 ºC (2 300 ºF).

Solución: Se dibuja una línea horizontal a la temperatura dada, como se muestra en la figura 6.2. La línea interseca la de solidus en una composición de 62% de níquel, lo que indica la composición de la fase sólida. La intersección con la línea de liquidus ocurre en una composición de 36% de Ni, que corresponde al análisis de la fase líquida.

Conforme se reduce la temperatura de la aleación 50-50 de Cu-Ni, se alcanza la línea de solidus alrededor de 1 221 °C (2 230 °F). Si se aplica el mismo procedimiento que se utilizó en el ejemplo, se encuentra que la composición del metal sólido es de 50% de níquel, y la composición del último remanente líquido que queda por solidificarse tiene alrededor de 26% de níquel. ¿Cómo puede ser, se preguntará el lector, que la última onza de metal fundido tenga una composición tan diferente de la del metal sólido al que se integra? La respuesta es que el diagrama de fase supone que se permite que prevalezcan condiciones de equilibrio. En realidad, al diagrama de fase binaria a veces se le llama diagrama de equilibrio, debido a dicha suposición. Lo que significa es que se da el tiempo suficiente para que el metal sólido cambie en forma gradual su composición por difusión, para alcanzar la composición indicada por el punto de intersección a lo largo de la línea de liquidus. En la práctica, cuando una aleación se solidifica (por ejemplo, en una fundición), en la masa sólida ocurre una ***segregación*** debido a condiciones de no equilibrio. El primer líquido que se solidifica tiene una composición rica en el elemento metálico con el punto de fusión más alto. Después, conforme más metal se solidifica, su composición es diferente de la del primero que se solidificó. A medida que en una masa sólida aumentan los puntos de formación de núcleos, las composiciones se distribuyen dentro de la masa, en función de la temperatura y el tiempo del proceso en que ocurrió la solidificación. La composición conjunta es el promedio de la distribución.

Determinación de las cantidades de cada fase A partir del diagrama de fase, también se puede determinar las cantidades de cada fase presentes a una temperatura dada. Esto se hace por medio de la ***regla de la palanca inversa***: 1) sobre la misma línea horizontal de antes, que indica la composición conjunta a una temperatura dada, se mide la distancia entre la composición agregada y los puntos de intersección con las líneas de liquidus y de solidus, y se identifican las distancias como CL y CS, respectivamente (véase de nuevo la figura 6.2), 2) la proporción de fase líquida presente está dada por

$$L \text{ Proporción por fase} = \frac{CS}{(CS + CL)} \tag{6.1}$$

3) la proporción de fase sólida presente está dada por

$$S \text{ Proporción por fase} = \frac{CL}{(CS + CL)} \tag{6.2}$$

Ejemplo 6.2 Determinación de las proporciones de cada fase

Determine las proporciones de fases líquida y sólida para la composición de 50% de níquel del sistema cobre-níquel a la temperatura de 1 260 °C (2 300 °F).

Solución: Con la misma línea horizontal de la figura 6.2 para el ejemplo anterior, se miden las distancias CS y CL y resultan ser de 10 mm y 12 mm, respectivamente. Así, la proporción de la fase líquida es de 10/22 = 0.45 (45%) y la proporción de la fase sólida es de 12/22 = 0.55 (55%).

Las proporciones dadas por las ecuaciones (6.1) y (6.2) están dadas en peso, igual que los porcentajes del diagrama de fase. Observe que las proporciones se basan en la distancia al lado opuesto de la fase de interés; de ahí el nombre de regla de la palanca inversa. Puede verse la lógica de esto si se toma el caso extremo cuando, por ejemplo, CS = 0; en ese punto, la proporción de la fase líquida es cero porque se ha alcanzado la línea de solidus y por ello la aleación está por completo solidificada.

Los métodos para determinar las composiciones químicas de las fases y las cantidades en cada una de éstas se aplican tanto a la región sólida del diagrama de fase como a la región liquidus-solidus. Estos métodos pueden emplearse donde sea que haya regiones en el diagrama de fase en que haya dos de ellas presentes. Cuando sólo está presente una

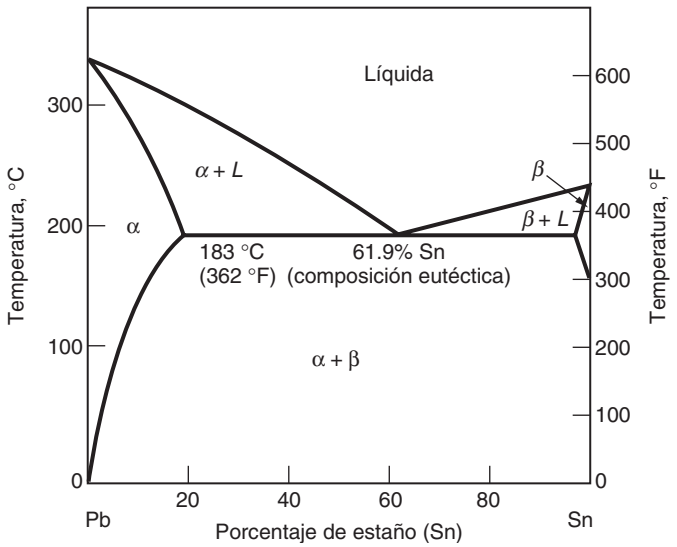


FIGURA 6.3 Diagrama de fase para el sistema de aleación estaño-plomo.

fase (véase la figura 6.2, se trata de toda la región sólida) la composición de la fase es su composición agregada en condiciones de equilibrio; y la regla de la palanca inversa no se aplica puesto que sólo hay una fase.

El sistema de la aleación estaño-plomo Un diagrama de fase más complicado es el del sistema Sn-Pb, que se muestra en la figura 6.3. Las aleaciones estaño-plomo se utilizan mucho como material de soldadura (véase la sección 32.2) de conexiones eléctricas. El diagrama de fase presenta varias características que no aparecen en el de Cu-Ni ya visto. Una característica es la presencia de dos fases sólidas, alfa (α) y beta (β). La fase α es una solución sólida de estaño en plomo en el lado izquierdo del diagrama, y la fase β es una solución sólida de plomo en estaño, que ocurre sólo a temperaturas elevadas alrededor de 200 ºC (375 ºF) en el lado derecho del diagrama. Entre esas soluciones sólidas queda una mezcla de las dos fases sólidas, $\alpha + \beta$.

Otra característica de interés en el sistema estaño-plomo es la manera en que difiere la fusión para composiciones diferentes. El estaño puro se funde a 232 ºC (449 ºF), y el plomo puro a 327 ºC (621 ºF). Las aleaciones de estos elementos se funden a temperaturas más bajas. El diagrama muestra dos líneas de liquidus que comienzan en los puntos de fusión de los metales puros hasta alcanzar una composición de 61.9% de estaño. Ésta es la composición eutéctica para el sistema estaño-plomo. En general, una ***aleación eutéctica*** es una composición particular en un sistema de aleación para la que el solidus y liquidus están a la misma temperatura. La ***temperatura eutéctica*** correspondiente, el punto de fusión de la composición eutéctica, es de 183 ºC (362 ºF), en este caso. La temperatura eutéctica siempre es el punto de fusión más bajo para un sistema de aleación (el término ***eutéctico*** se deriva de la palabra griega eutektos, que significa que se funde con facilidad).

Los métodos para determinar el análisis químico de las fases y las proporciones de éstas presentes, se aplican con facilidad al sistema Sn-Pb igual que se hizo en el de Cu-Ni. En realidad, esos métodos son aplicables en cualquier región que contenga dos fases, inclusive sólidas. La mayoría de los sistemas de aleación se caracteriza por la existencia de fases sólidas y composiciones eutécticas múltiples, por lo que es frecuente que los diagramas de fase de ellos sean similares al del estaño-plomo. Por supuesto, muchos sistemas de aleación son considerablemente más complejos. Uno de ellos se estudiará más adelante, cuando se vea las aleaciones de hierro y carbono.

6.2 METALES FERROSOS

Los metales ferrosos se basan en el hierro, uno de los metales más antiguamente conocidos por el hombre (véase la nota histórica 6.1). Las propiedades y otros datos relacionados con el hierro se presentan en la tabla 6.1*a*). Los metales ferrosos de importancia en la ingeniería son aleaciones de hierro y carbono. Se dividen en dos grupos principales: acero y hierro fundido. Juntos constituyen aproximadamente el 85% de las toneladas de metal en Estados Unidos [5]. Se comenzará el estudio de los metales ferrosos con el examen del diagrama de fase hierro-carbono.

Nota histórica 6.1 *Hierro y acero*

El hierro se descubrió en algún momento durante la Edad de Bronce. Es probable que se haya encontrado entre las cenizas de las fogatas hechas cerca de depósitos de mineral de hierro. El uso del metal creció hasta que finalmente sobrepasó al bronce en importancia. Por lo general se afirma que la Edad de Hierro data de alrededor de 1200 a.C., aunque se han encontrado artefactos hechos de hierro en la gran pirámide de Gizeh, en Egipto, que data de 2900 a.C. En Israel se han encontrado calderas para fundir hierro que se remontan a 1300 a.C. En la antigua Asiria (norte de Irak) se fabricaban carros, espadas y herramientas de hierro alrededor del año 1000 a.C. Los romanos heredaron el trabajo del hierro de sus provincias, sobre todo de Grecia, y perfeccionaron la tecnología para que alcanzara niveles nuevos, difundiéndola por Europa. Las civilizaciones antiguas aprendieron que el hierro era más duro que el bronce y adoptaba un filo más agudo y fuerte.

Durante la Edad Media, en Europa, la invención del cañón creó la primera demanda real de hierro; sólo entonces superó por fin en uso al cobre y bronce. Asimismo, la estufa de hierro fundido, aparato de los siglos XVII y XVIII, incrementó de manera significativa la demanda de hierro (véase la nota histórica 11.3).

En el siglo XIX, industrias tales como la ferroviaria, naviera, construcción, maquinaria y militar, generaron un crecimiento impresionante de la demanda de hierro y acero en Europa y el Continente Americano. Aunque podían producirse cantidades grandes de ***arrabio*** (crudo) por medio de ***altos hornos***, el proceso subsecuente para producir hierro forjado y acero era lento. La necesidad de mejorar la productividad de estos metales vitales fue la "madre de la invención". En Inglaterra, Henry Bessemer inventó el proceso de soplar aire a través del hierro fundido, lo que condujo al ***convertidor* Bessemer** (patentado en 1856). En Francia, Pierre y Emile Martin construyeron el primer ***horno de hogar abierto***, en 1864. Estos métodos permitieron producir hasta 15 toneladas en un solo lote (colada), incremento sustancial respecto de los métodos anteriores.

En Estados Unidos, la expansión de los ferrocarriles después de la Guerra Civil generó una demanda enorme de acero. En las décadas de 1880 y 1890, se usaron por vez primera cantidades significativas de vigas de acero para la construcción. Los rascacielos se basaron en ellas.

Cuando se dispuso de electricidad en abundancia, hacia finales del siglo XIX, esta fuente de energía se usó para fabricar acero. El primer ***horno eléctrico*** comercial para producir acero funcionó en Francia en 1899. Hacia 1920, se había convertido en el proceso principal para hacer aceros aleados.

Justo antes de iniciar la Segunda Guerra Mundial comenzó el uso de oxígeno puro para fabricar acero en varios países europeos y en Estados Unidos. Después de la guerra, trabajos realizados en Austria culminaron en la creación del ***horno de oxígeno básico*** (BOF). Ésta se volvió la tecnología moderna para producir acero, y alrededor de 1970 sobrepasó al método de hogar abierto. El convertidor Bessemer había sido superado por el método de corazón abierto hacia 1920 y a partir de 1971 dejó de ser un proceso comercial para fabricar acero.

TABLA 6.1 Datos básicos de los elementos metálicos: a) hierro.

Símbolo:	Fe	Mineral principal:	***Hematita*** (Fe_2O_3)
Número atómico:	26	Elementos de aleación:	Carbono; también cromo, manganeso, níquel, molibdeno, vanadio y silicio.
Gravedad específica:	7.87		
Estructura cristalina:	BCC	Aplicaciones comunes:	construcción, maquinaria, automotriz, vías y equipo ferroviario.
Temperatura de fusión:	1 539 °C (2 802 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30×10^6 lb/in^2)		

Recopilada a partir de las referencias [5], [9], [10] y de otras fuentes.

6.2.1 El diagrama de fase hierro-carbono

En la figura 6.4 se presenta el diagrama de fase del hierro-carbono. El hierro puro se funde a 1 539 ºC (2 802 ºF). Durante la elevación de la temperatura a partir de la del ambiente, pasa por varias transformaciones de fase sólida, como se aprecia en el diagrama. Al comenzar a temperatura ambiente la fase es alfa (α), también llamada ***ferrita***. A 912 ºC (1 674 ºF), la ferrita se transforma en gama (γ), denominada ***austenita***. Ésta, a su vez, se convierte en delta (δ) a 1 394 ºC (2 541 °F), en la que permanece hasta que se funde. Las tres fases son distintas; la alfa y delta tienen estructuras reticulares BCC (véase la sección 2.3), y entre ellas está la gama con FCC. El video clip sobre tratamiento térmico describe el diagrama de fase hierro-carbono y cómo se utiliza para dar resistencia al acero.

El hierro, como producto comercial, se encuentra disponible con varios niveles de pureza. El ***hierro electrolítico*** es el más puro, con cerca de 99.99%, se usa en investigación y otros propósitos en los que se requiere al metal puro. El ***hierro de lingote*** contiene alrededor de 0.1% de impurezas (inclusive cerca de 0.01% de carbono), y se usa en aplicaciones en las que se necesitan ductilidad o resistencia a la corrosión elevadas. El ***hierro forjado*** contiene un 3% de escoria pero muy poco carbono, y se le da forma con facilidad en operaciones de formado en caliente, como la forja.

Los límites de solubilidad del carbono en el hierro son bajos en la fase de ferrita, sólo cerca de 0.022% a 723 ºC (1 333 ºF). En la de austenita puede disolverse cerca de 2.1% de carbono a una temperatura de 1 130 ºC (2 066 ºF). Esta diferencia de solubilidades entre la alfa y la gama origina oportunidades para dar resistencia por medio de tratamiento térmico, pero eso se deja para más adelante. Aun sin tratamiento térmico, la resistencia del hierro se incrementa en forma notable conforme el contenido de carbono aumenta, y se ingresa a la región en la que el metal toma el nombre de acero. Con más precisión, el ***acero*** se define como una aleación de hierro-carbono que contiene entre 0.02% y 2.1% de carbono; por supuesto, los aceros también pueden contener otros elementos de aleación.

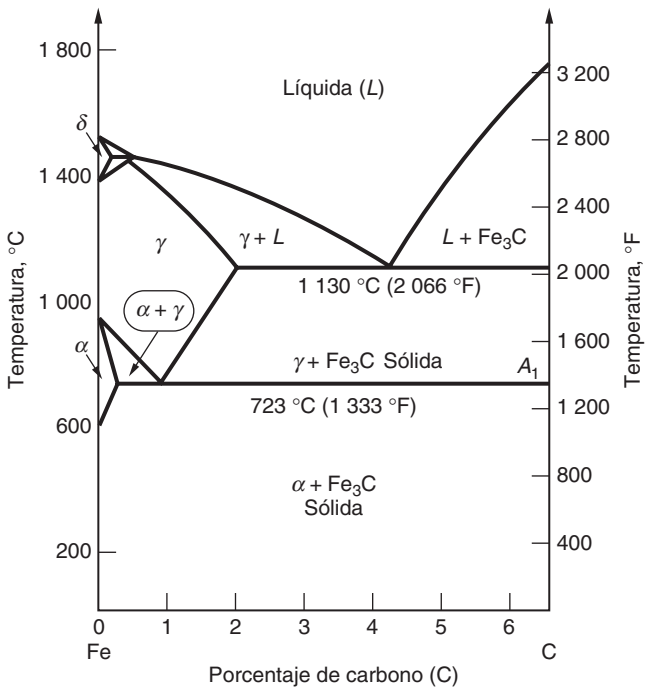


FIGURA 6.4 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono, hasta 6% de carbono.

Con 4.3% de carbono, en el diagrama se observa una composición eutéctica. Existe una característica similar en la región sólida del diagrama con 0.77% de carbón y 723 ºC (1 333 ºF). Ésta se denomina ***composición eutectoide***. Los aceros por debajo de este nivel de carbono se conocen como ***aceros hipoeutectoides***, y por arriba de ese nivel, de 0.77% a 2.1%, se les llama ***aceros hipereutectoides***.

Además de las fases mencionadas, otra fase es notable en el sistema de la aleación hierro-carbono. Ésta es la del Fe_3C, también llamada de ***cementita***, que es una fase intermedia: un compuesto metálico de hierro y carbono que es duro y frágil. A temperatura ambiente y en condiciones de equilibrio, las aleaciones de hierro-carbono forman un sistema de dos fases con niveles de carbono apenas por arriba de cero. El contenido de carbono de los aceros varía entre esos niveles bajos y cerca de 2.1%. Por arriba de 2.1% de C y hasta 4% o 5%, la aleación se define como ***hierro colado***.

6.2.2 Producción de hierro y acero

Este estudio de la producción de hierro y acero comienza con los yacimientos de mineral de hierro y otras materias primas que se requieren. Después se estudia la producción de hierro, en la que éste se reduce de los minerales, y la fabricación de acero, en la que se refina para obtener la pureza y composición (aleación) que se desean. Luego se consideran los procesos de fundición que se efectúan en la acería.

Yacimientos* de hierro y otras materias primas El mineral principal que se usa para producir hierro y acero es la hematita (Fe_2O_3). Otros minerales de hierro son la ***magnetita*** (Fe_3O_4), ***siderita*** ($FeCO_3$) y la ***limonita*** (Fe_2O_3-xH_2O) donde el valor de x es de alrededor de 1.5). Los yacimientos de hierro contienen de 50% a alrededor de 70% de hierro, en función de su ley** (la hematita contiene casi 70% de hierro). Además, hoy día se utilizan mucho los desechos de hierro y acero para producir hierro y acero.

Otras materias primas necesarias para reducir hierro de las menas son el coque y la roca caliza. El ***coque*** es un combustible de carbono alto que se produce por medio de calentar durante varias horas carbón bituminoso en una atmósfera escasa en oxígeno, para luego rociarle agua en torres de enfriamiento especiales. El coque desempeña dos funciones en el proceso de reducción: 1) es un combustible que suministra el calor para las reacciones químicas, y 2) produce monóxido de carbono (CO) para reducir el mineral de hierro. La ***caliza*** es una roca que contiene proporciones grandes de carbonato de calcio ($CaCO_3$). La caliza se utiliza en el proceso como fundente con el cual reaccionar y retirar las impurezas tales como escoria del hierro fundido.

Fabricación de hierro Para producir hierro, se coloca una carga de mineral, coque y caliza en la parte superior de un alto horno. Un ***alto horno*** es una cámara refractaria recta con diámetro de 9 a 11 m (30 a 35 ft) en su parte más ancha, y altura de 40 m (125 ft), en el que se fuerzan gases calientes dentro de la parte baja de la cámara a tasas elevadas para llevar a cabo la combustión y reducción del hierro. En las figuras 6.5 y 6.6 se ilustra un alto horno común y algunos de sus detalles técnicos. La carga desciende con lentitud desde la parte superior del horno hacia su base y se calienta a temperaturas de alrededor de 1 650 ºC (3 000 ºF). La combustión del coque se lleva a cabo con gases calientes (CO, H_2, CO_2, H_2O, N_2, O_2 y combustibles) que pasan hacia arriba a través de las capas de la carga de material. El gas CO tiene un efecto reductor en el mineral de hierro; la reacción (simplificada) se escribe como sigue (se usa hematita como el mineral de inicio):

$$Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2FeO + CO_2 \qquad (6.3a)$$

---

* La palabra inglesa *ore* se traduce en el ambiente de la geología como mena, que es el material que se extrae de un yacimiento y que contiene el mineral de interés. En otras profesiones, *ore* se traduce como yacimiento, pero esto no es exacto porque de un yacimiento se extrae la mena. (N. del t.)

** Ley es el contenido de mineral en una mena. (N. del t.)

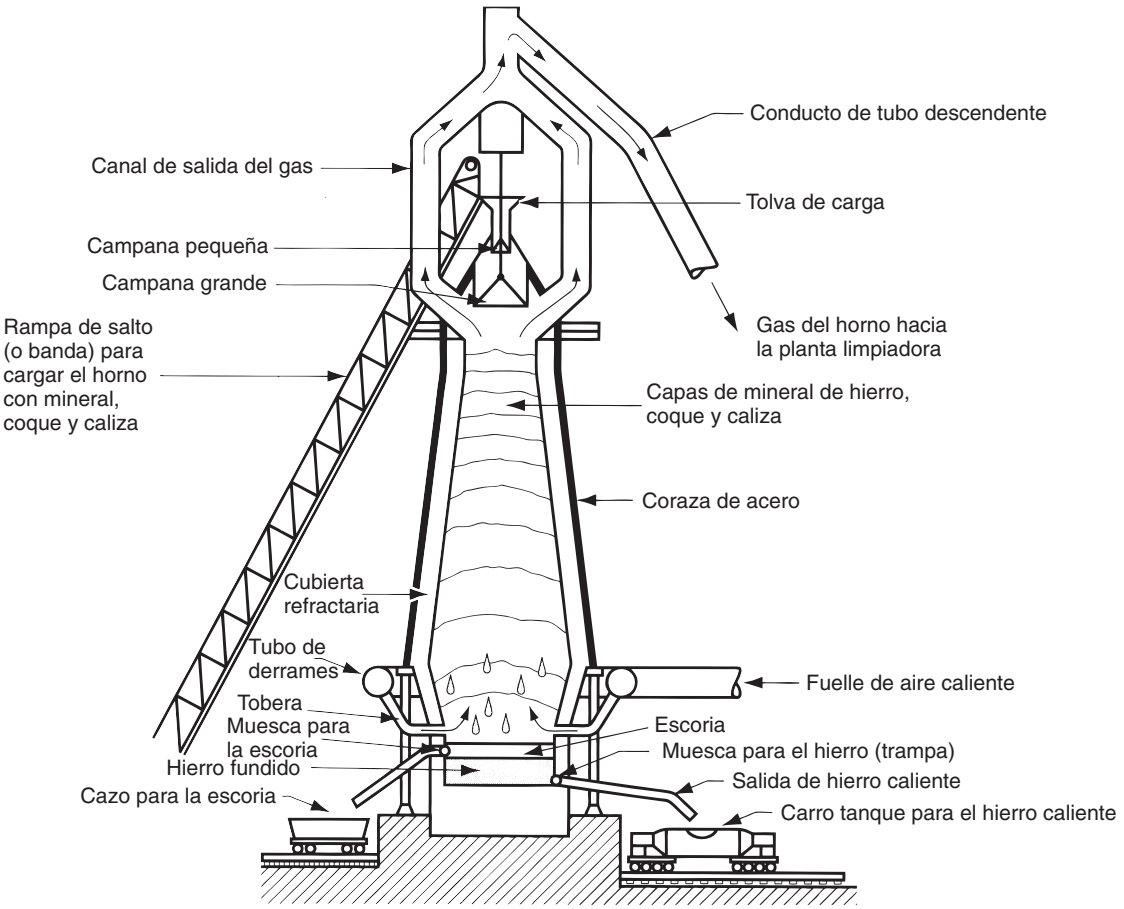
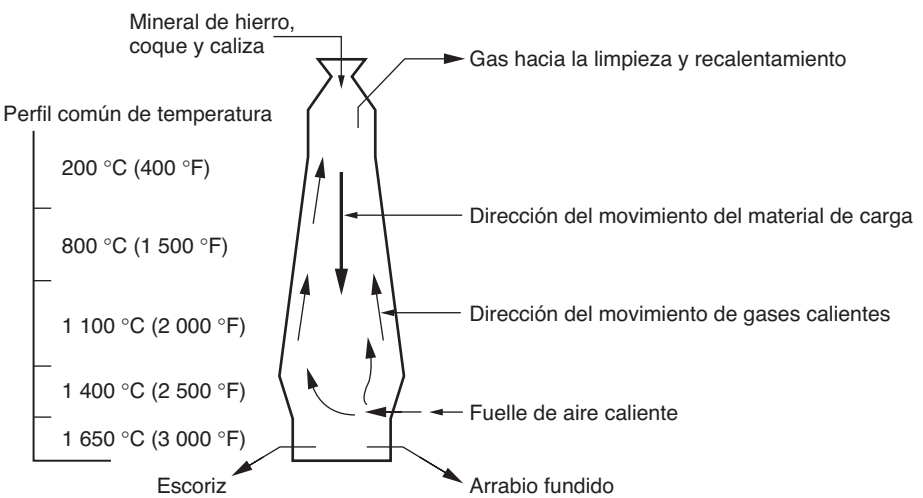


FIGURA 6.5 Sección transversal de un alto horno para fabricar hierro en la que se muestran los componentes principales.

FIGURA 6.6 Diagrama esquemático que indica detalles de la operación de un alto horno.



El dióxido de carbono reacciona con el coque para formar monóxido de carbono:

$$CO_2 + C(\text{coque}) \rightarrow 2CO \tag{6.3b}$$

que entonces realiza la reducción final del FeO a hierro:

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2 \tag{6.3c}$$

El hierro fundido gotea y se colecta en la base del alto horno. Éste se lleva periódicamente a carros tanque para hierro fundido a fin de transferirlo a las operaciones siguientes de fabricación de acero.

El papel que juega la caliza se resume como sigue. En primer lugar, la caliza se reduce a cal (CaO) por calentamiento, así:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \tag{6.4}$$

La cal se combina con impurezas tales como sílice (SiO_2), azufre, (S) y alúmina (Al_2O_3) en reacciones que producen una escoria fundida que flota sobre el hierro.

Es instructivo notar que se requieren aproximadamente siete toneladas de materias primas para producir una tonelada de hierro. Las proporciones de los ingredientes son las siguientes: 2.0 ton de mineral de hierro, 1.0 ton de coque, 0.5 ton de caliza, y (aquí la estadística es sorprendente) 3.5 ton de gases. Una proporción significativa de los subproductos se recicla.

El hierro colectado en la base del alto horno llamado ***hierro de primera fundición*** (arrabio) contiene más del 4% de C, más otras impurezas: 0.3%–1.3% de Si, 0.5–2.0% de Mn, 0.1–1.0% de P, y 0.02–0.08% de S [9]. Se requiere más refinación del metal para obtener tanto hierro fundido como acero. Para convertir el arrabio en hierro fundido gris es común emplear un horno llamado cubilote (véase la sección 11.4.1). Para el acero, las composiciones deben controlarse estrechamente y las impurezas llevarse a niveles mucho más bajos.

Fabricación de acero Desde la mitad del siglo XIX, se han inventado cierto número de procesos para refinar hierro de primera fundición y obtener acero. Hoy día, los dos más importantes son el horno de oxígeno básico (BOF) y el eléctrico. Ambos se emplean para producir aceros al carbono y aleados.

El ***horno de oxígeno básico*** produce alrededor del 70% del acero de Estados Unidos. El BOF es una adaptación del convertidor Bessemer. Mientras que el proceso Bessemer utiliza aire que pasa a través del arrabio fundido para quemar las impurezas, el proceso de oxígeno básico utiliza oxígeno puro. En la figura 6.7 se presenta un diagrama del BOF convencional durante la mitad de una colada. El recipiente común del BOF mide cerca de 5 m (16 ft) de diámetro interno y procesa de 150 a 200 toneladas en una sola colada.

En la figura 6.8 se muestra la secuencia para fabricar acero en un BOF. En las plantas siderúrgicas integradas se transfiere el arrabio desde el alto horno al BOF en carros de ferrocarril llamados carros cuchara de hierro caliente. En la práctica moderna, al hierro fundido se agrega chatarra de acero por cerca del 30% de una carga normal del BOF. También se agrega cal (CaO). Después de la carga, se inserta la lanceta en el recipiente de modo que su punta se encuentre a 1.5 m (5 ft) por arriba de la superficie del hierro fundido. Se sopla O_2 a alta velocidad desde la lanceta, lo que provoca combustión y calentamiento en la superficie del recipiente del metal fundido. El carbono disuelto en el hierro y otras impurezas tales como silicio, manganeso y fósforo se oxidan. Las reacciones son

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO \text{ (también se produce } CO_2) \tag{6.5a}$$

$$Si + O_2 \rightarrow SiO_2 \tag{6.5b}$$

$$2Mn + O_2 \rightarrow 2MnO \tag{6.5c}$$

$$4P + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5 \tag{6.5d}$$

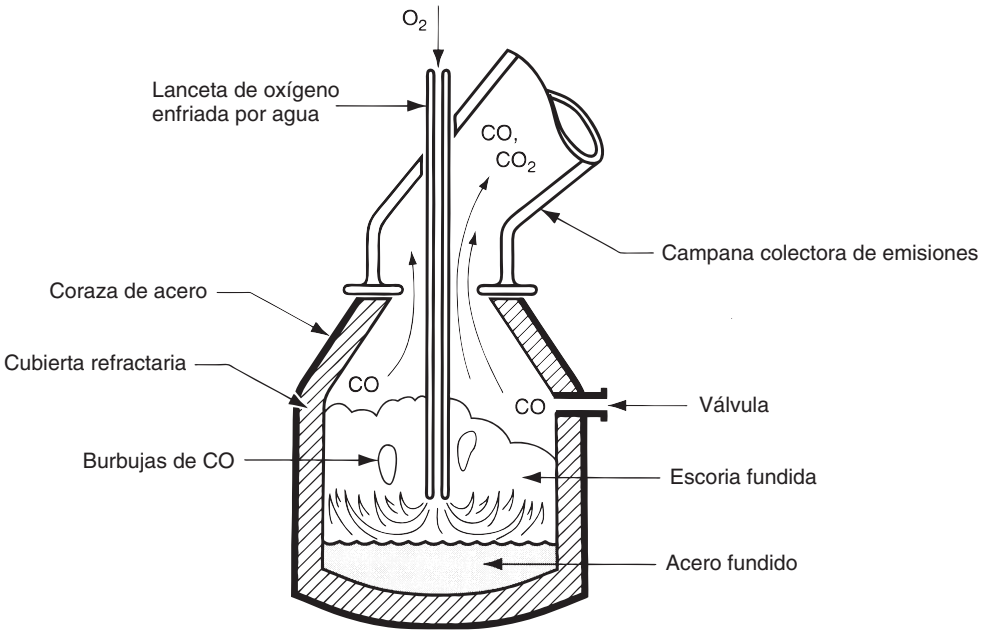
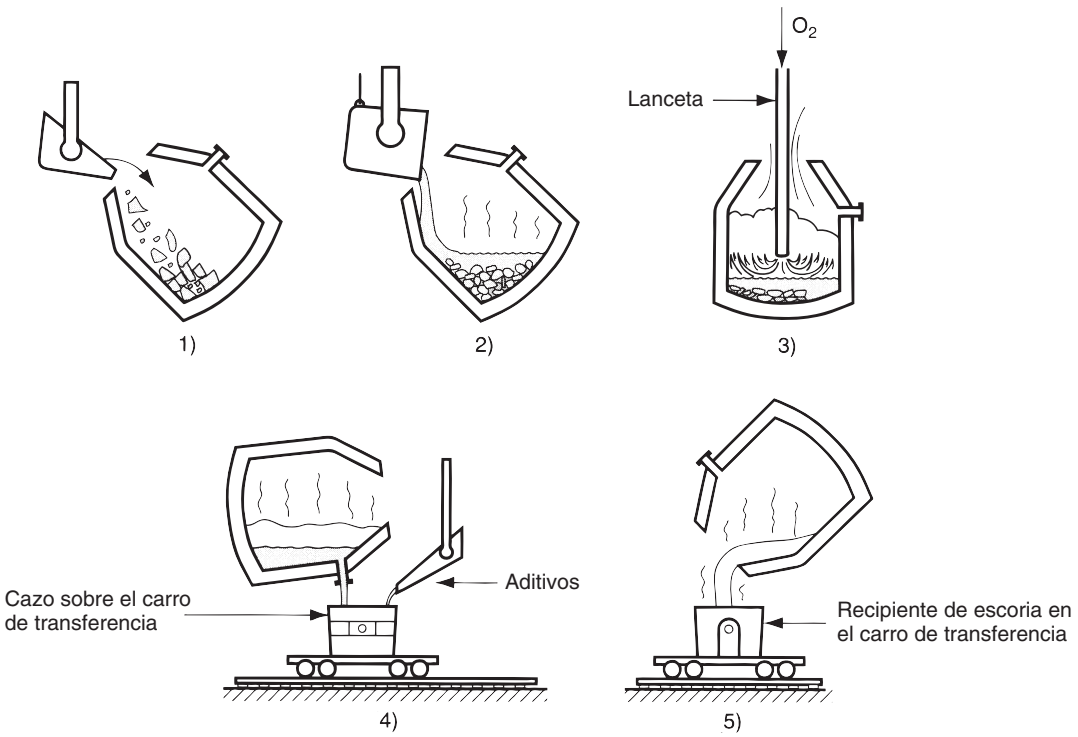


FIGURA 6.7 Horno de oxígeno básico que muestra el recipiente BOF durante el procesamiento de una colada.

FIGURA 6.8 Secuencia BOF durante un ciclo de procesamiento: 1) carga de chatarra y 2) arrabio; 3) soplado (véase la figura 6.7); 4) extracción del acero fundido; y 5) vaciado de la escoria.



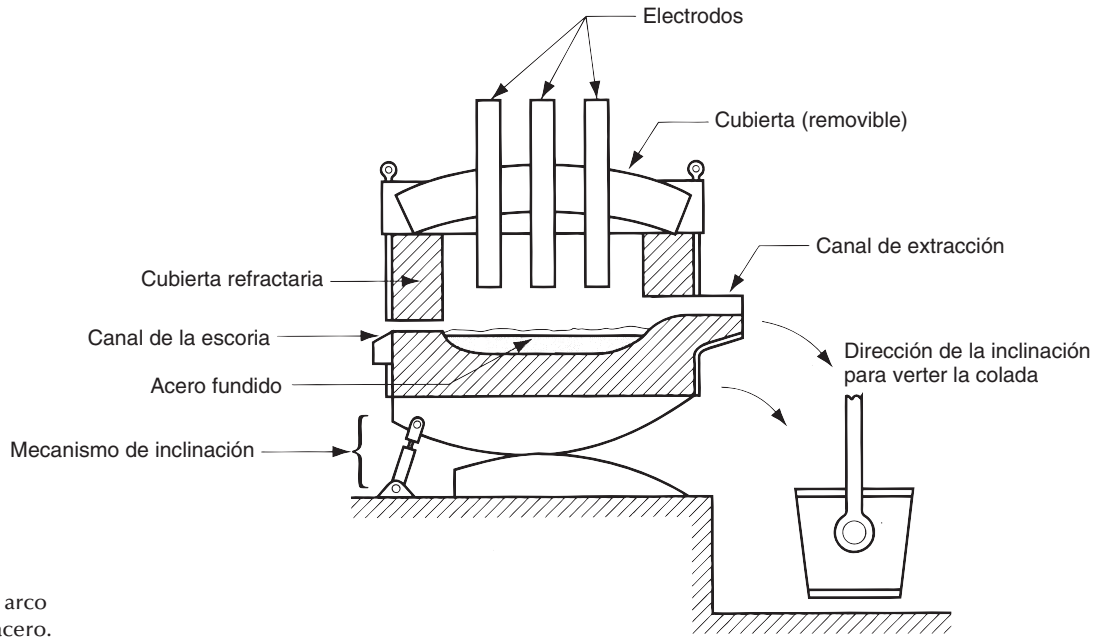


FIGURA 6.9 Horno de arco eléctrico para fabricar acero.

Los gases de CO y CO_2 que se producen en la primera reacción, escapan a través de la boca del recipiente del BOF y se captan en la campana de emisiones; los productos de las otras tres reacciones se retiran como escoria, con el uso de cal como elemento fundente. Durante el proceso, el contenido de C en el hierro disminuye en forma casi lineal con el tiempo, lo que permite un control muy predecible de los niveles de carbono en el acero. Después de refinarlo al nivel que se desea, el acero fundido se extrae; a la colada se vierten ingredientes de aleación y otros aditivos; después se extrae la escoria. En 20 min es posible procesar una colada de 200 ton de acero, aunque el ciclo completo (tiempo desde la introducción hasta la extracción) toma 45 min, aproximadamente.

Los avances recientes de la tecnología del proceso de oxígeno básico incluyen el uso de boquillas en fondo del recipiente, a través de las cuales se inyecta oxígeno en el hierro fundido. Con esto se logra una mejor mezcla que con la lanceta BOF convencional, lo que da como resultado tiempos más cortos de procesamiento (una reducción de cerca de 3 min), menor contenido de carbono y producciones más grandes.

El ***horno de arco eléctrico*** produce alrededor del 30% del acero de Estados Unidos. Aunque originalmente se usaba arrabio como la carga para este tipo de horno, hoy día las materias primas principales son chatarra de hierro y de acero. Los hornos de arco eléctrico se encuentran disponibles en varios diseños; el tipo de arco directo que se muestra en la figura 6.9 es el más económico actualmente. Estos hornos tienen cubiertas removibles para cargarlos desde arriba; la extracción se lleva a cabo por medio de la inclinación del horno completo. En el horno se carga chatarra de hierro y de acero seleccionadas por sus composiciones, junto con ingredientes de aleación y caliza (fundente), y se calientan por medio de un arco eléctrico que va de grandes electrodos a la carga de metal. La fundición total requiere cerca de 2 horas; el tiempo de introducción a extracción es de 4 horas. Es común que las capacidades de los hornos eléctricos varíen entre 25 y 100 toneladas por colada. Los hornos de arco eléctrico destacan por la mejor calidad del acero pero su costo por tonelada producida es mayor, en comparación con el del BOF. Por lo general, el horno de arco eléctrico se asocia con la producción de aceros de aleación, aceros para herramientas y aceros inoxidables.

Fundición de lingotes Los aceros producidos por hornos BOF o eléctricos se solidifican para procesarlos posteriormente, ya sea como lingotes fundidos o por fundición continua. Los ***lingotes*** de acero son fundiciones discretas y grandes que pesan menos desde 1 ton hasta 300 ton (el peso de la colada total). Los moldes de los lingotes están hechos de hierro

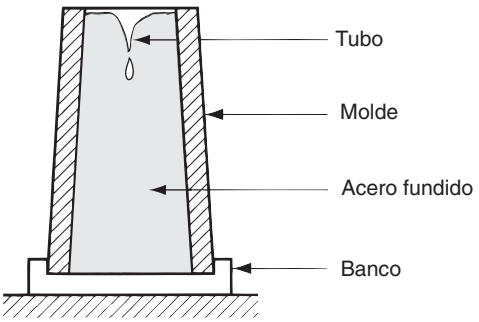


FIGURA 6.10 Molde de lingote común de fondo amplio, del tipo que se utiliza para fabricar acero.

al alto carbono y están abiertos arriba o abajo para retirar la colada solidificada. En la figura 6.10 se ilustra un ***molde de fondo amplio***. La sección transversal puede ser cuadrada, rectangular o redonda, y su perímetro por lo general es corrugado para incrementar el área superficial a fin de que se enfríe más rápido. El molde se coloca en una plataforma denominada ***banc*** o ***escabel***; después de solidificarse, el molde se eleva, y deja la fundición sobre el banco.

En el capítulo sobre los principios de la fundición (capítulo 10) se describe el proceso de solidificación de los lingotes, así como de otros tipos de fundidos. Debido a que los lingotes son fundidos grandes, el tiempo que se requiere para la solidificación, así como para la contracción asociada, es significativo. La porosidad ocasionada por la reacción del carbono y el oxígeno para formar CO durante el enfriamiento y la solidificación es un problema que debe enfrentarse en la fundición del lingote. Esos gases se liberan del acero fundido debido a su solubilidad reducida con la disminución de la temperatura. Es frecuente que los aceros fundidos sean tratados para limitar o impedir la evolución de CO gaseoso durante la solidificación. El tratamiento involucra agregar elementos tales como el Si y Al que reaccionan con el oxígeno disuelto en el acero fundido, de modo que éste no se encuentre disponible para la reacción del CO. Así, la estructura del acero sólido está libre de poros y otros defectos causados por la formación de gas.

Fundición o colada continua La fundición o colada continua se aplica mucho en la producción de aluminio y cobre, pero es mucho más destacada en la de acero. El proceso consiste en remplazar los lingotes fundidos porque la productividad se incrementa en forma notable. La fundición de lingotes es un proceso discreto. Como los moldes son relativamente grandes, el tiempo de solidificación es significativo. El tiempo para que se solidifique un lingote grande de acero puede ser de 10 a 12 horas. El uso de un fundido continuo reduce el tiempo de solidificación en un orden de magnitud.

El proceso de fundición continua, también llamado ***fundición de filamento***, se ilustra en la figura 6.11. El acero fundido se vierte desde un recipiente hacia un contenedor temporal llamado ***cacerola***, que dosifica el metal hacia uno o más moldes de fundición continua. El acero comienza a solidificarse en las regiones exteriores conforme viaja hacia abajo a través del molde enfriado por agua. Un rocío de agua acelera el proceso de enfriamiento. Mientras está caliente y es plástico, el metal se cambia de orientación vertical a horizontal. Entonces se corta en secciones o se alimenta en forma continua a un laminador (véase la sección 21.1) en el que se le da forma de lámina o bloque de acero u otras secciones transversales.

6.2.3 Aceros

El ***acero*** es una aleación de hierro que tiene un contenido de carbono que varía entre 0.02% y 2.11%. Es frecuente que también incluya otros ingredientes de aleación: manganeso, cromo, níquel y molibdeno; pero es el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Existen cientos de composiciones de acero disponibles en el comercio. Aquí, para propósitos de organización se agrupan en las categorías siguientes: 1) aceros al carbón simples, 2) aceros bajos de aleación, 3) aceros inoxidables y 4) aceros para herramientas.

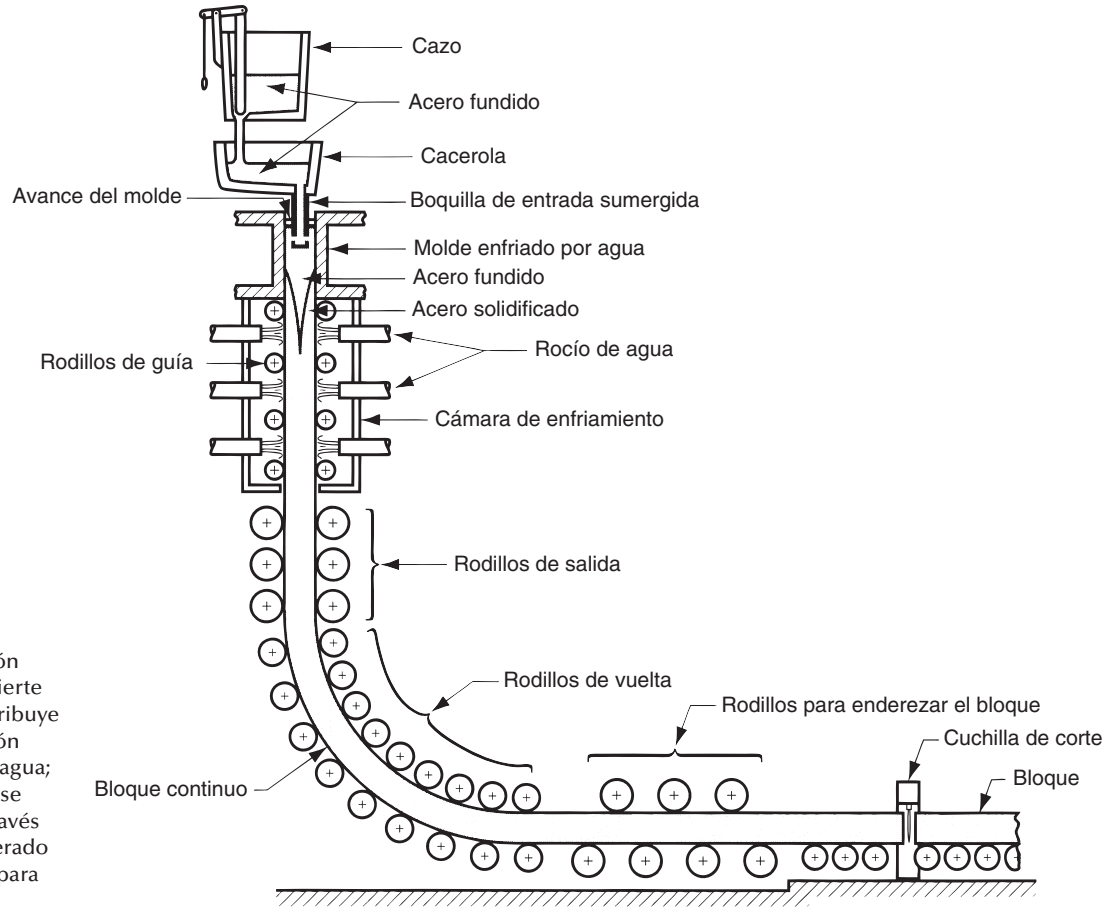


FIGURA 6.11 Fundición continua; el acero se vierte en la cacerola y se distribuye a un molde de fundición continua enfriado por agua; se solidifica conforme se mueve hacia abajo a través del molde. Se ha exagerado el espesor del bloque para mayor claridad.

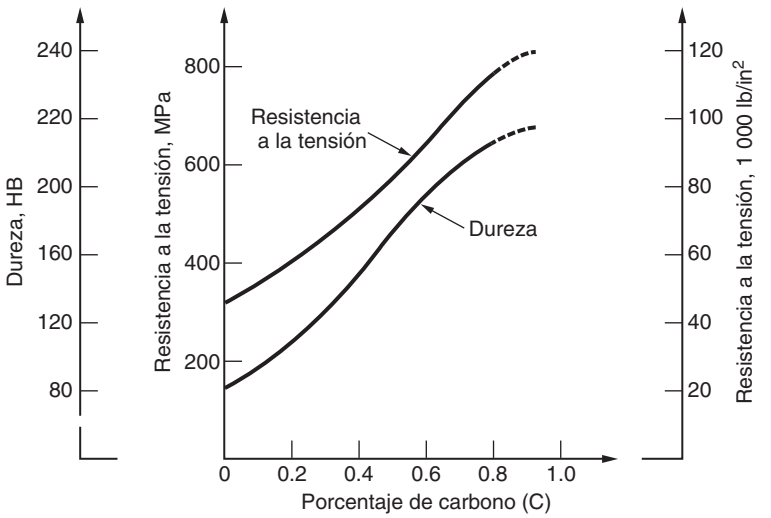


FIGURA 6.12 Resistencia a la tensión y dureza, como función del contenido de carbono en un acero al carbono simple (rolado en caliente).

Aceros al carbono Estos aceros contienen carbono como elemento principal de la aleación, y sólo pequeñas cantidades de otros elementos (lo normal es alrededor de 0.5% de manganeso). La resistencia de los aceros simples al carbono se incrementa con el contenido de éste; en la figura 6.12 se presenta una gráfica común de esa relación.

De acuerdo con un esquema de nomenclatura creado por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), los aceros simples al carbono se especifican por medio de un sistema numérico de cuatro dígitos: 10XX, donde el 10 indica que el acero es al carbono simple, y XX señala el porcentaje de carbono en centésimas de puntos porcentuales. Por ejemplo, un acero 1020 contiene 0.20% de C. Es común que los aceros simples al carbono se clasifiquen en tres grupos, de acuerdo con su contenido de carbono:

1. ***Aceros al bajo carbono.*** Contienen menos del 0.20% de C y son por mucho los más utilizados. Las aplicaciones normales son en las piezas automotrices de lámina, placa de acero para la fabricación y vías férreas. Es relativamente fácil dar forma a estos aceros, lo cual los hace de uso muy difundido en aplicaciones que no requieren una resistencia elevada. Por lo general, también los aceros fundidos caen en este rango de carbono.
2. ***Aceros al medio carbono.*** Su contenido de carbono varía entre 0.20% y 0.50%, y se especifican para aplicaciones que requieren una resistencia mayor que las de los aceros al bajo carbono. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria y piezas de motores tales como cigüeñales y rodillos de transmisión.
3. ***Aceros al alto carbono.*** Contienen carbono en cantidades superiores a 0.50% y se especifican para aplicaciones que necesitan resistencias aún mayores y también rigidez y dureza. Algunos ejemplos son resortes, herramientas y hojas de corte y piezas resistentes al desgaste.

El contenido creciente de carbono da resistencia y dureza al acero, pero reduce su ductilidad. Asimismo, los aceros al alto carbono pueden ser tratados para formar martensita, lo que los hace muy duros y fuertes (véase la sección 27.2).

Aceros de baja aleación Son aleaciones de hierro–carbono que contienen elementos adicionales en cantidades que totalizan menos de 5% del peso. Debido a estas adiciones, los aceros de baja aleación tienen propiedades mecánicas superiores a las de los simples al carbono para aplicaciones dadas. Las propiedades superiores por lo general significan más resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad y combinaciones más deseables de éstas. Es frecuente que se requiera tratamiento térmico para lograr propiedades mejoradas.

Los elementos comunes de aleación que se agregan al acero son cromo, manganeso, molibdeno, níquel y vanadio, a veces en forma individual pero por lo general en combinaciones. Es frecuente que estos elementos formen soluciones sólidas con hierro y compuestos metálicos con carbono (carburos), lo que supone que hay suficiente carbono presente para efectuar la reacción. Los efectos de los ingredientes principales de la aleación se resumen como sigue:

- El ***cromo*** (Cr) mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente. Es uno de los ingredientes de aleación más eficaces para incrementar la templabilidad (véase la sección 27.2.3). En proporciones significativas, el Cr mejora la resistencia a la corrosión.
- El ***manganeso*** (Mn) mejora la resistencia y dureza del acero. Cuando éste se encuentra caliente, la templabilidad mejora con el aumento de manganeso. Debido a estos beneficios, el manganeso es un ingrediente que se usa mucho en las aleaciones de acero.
- El ***molibdeno*** (Mo) incrementa la tenacidad y dureza en caliente. También mejora la templabilidad y forma carburos que dan resistencia al desgaste.
- El ***níquel*** (Ni) mejora la resistencia y la tenacidad. Incrementa la dureza pero no tanto como los otros elementos de las aleaciones del acero. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión y es el otro ingrediente principal (además del cromo) de ciertos tipos de acero inoxidable.

TABLA 6.2 Designaciones AISI-SAE de los aceros.

		Análisis químico nominal, %							
Código	Nombre del acero	Cr	Mn	Mo	Ni	V	P	S	Si
10XX	Al carbono		0.4				0.04	0.05	
11XX	Resulfurado		0.9				0.01	0.12	0.01
12XX	Resulfurado, refosforado		0.9				0.10	0.22	0.01
13XX	Manganeso		1.7				0.04	0.04	0.3
20XX	Aceros al níquel		0.5		0.6		0.04	0.04	0.2
31XX	Níquel-cromo	0.6			1.2		0.04	0.04	0.3
40XX	Molibdeno		0.8	0.25			0.04	0.04	0.2
41XX	Cromo-molibdeno	1.0	0.8	0.2			0.04	0.04	0.3
43XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.7	0.25	1.8		0.04	0.04	0.2
46XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	1.8		0.04	0.04	0.3
47XX	Ni–Cr–Mo	0.4	0.6	0.2	1.0		0.04	0.04	0.3
48XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	3.5		0.04	0.04	0.3
50XX	Cromo	0.5	0.4				0.04	0.04	0.3
52XX	Cromo	1.4	0.4				0.02	0.02	0.3
61XX	Cr-vanadio	0.8	0.8			0.1	0.04	0.04	0.3
81XX	Ni–Cr–Mo	0.4	0.8	0.1	0.3		0.04	0.04	0.3
86XX	Ni–Cr–Mo	0.5	0.8	0.2	0.5		0.04	0.04	0.3
88XX	Ni–Cr–Mo	0.5	0.8	0.35	0.5		0.04	0.04	0.3
92XX	Silicio-manganeso		0.8				0.04	0.04	2.0
93XX	Ni–Cr–Mo	1.2	0.6	0.1	3.2		0.02	0.02	0.3
98XX	Ni–Cr–Mo	0.8	0.8	0.25	1.0		0.04	0.04	0.3

Fuente: [9].

➢ El ***vanadio*** (V) inhibe el crecimiento de granos durante el procesamiento a temperaturas elevadas, lo cual mejora la resistencia y tenacidad del acero. También forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

En la tabla 6.2 se presentan las designaciones AISI-SAE de muchos aceros de baja aleación, las que indican el análisis químico nominal. Como antes, el contenido del carbono está especificado por el término XX expresado en 1/100% de carbono. Para que esté completa, se incluyen aceros al carbono (10XX). Para dar una idea de las propiedades que tienen algunos de estos aceros, se compiló la tabla 6.3, que enlista el tratamiento a que se sujeta el acero para darle fortalecimiento a su resistencia y ductilidad.

Los aceros de baja aleación no sueldan con facilidad, en especial con niveles de carbono medios y altos. Desde la década de 1960 la investigación ha estado dirigida al desarrollo de aceros al bajo carbono y baja aleación, que tengan razones mejores de resistencia/peso que los aceros al carbono simples, pero que suelden mejor que los de baja aleación. Los productos creados a partir de esos trabajos son los ***aceros de alta resistencia y baja aleación*** (HSLA). Por lo general tienen un contenido bajo de carbono (en el rango de 0.10 a 0.30% de C) más cantidades relativamente pequeñas de ingredientes de aleación (generalmente alrededor del 3% del total, de elementos tales como Mn, Cu, Ni y Cr). Los aceros HSLA están rolados en caliente en condiciones controladas diseñadas para proporcionar mejor resistencia en comparación con los aceros simples al carbono, pero sin sacrificar la facilidad de darles forma o soldarlos. La resistencia se les da por medio de una aleación de solución sólida: el tratamiento térmico no es factible debido a su bajo contenido de carbono. En la tabla 6.3 se enlista un acero HSLA, junto con sus propiedades (la química es: 0.12 C, 0.60 Mn, 1.1 Ni, 1.1 Cr, 0.35 Mo y 0.4 Si).

Aceros inoxidables Los ***aceros inoxidables*** constituyen un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión. El elemento principal de la aleación del acero inoxidable es el cromo, por lo general arriba del 15%. El cromo de la aleación forma una película de óxido impermeable, delgada, que en una atmósfera oxidante protege a la superficie de la corrosión. El níquel es otro ingrediente de aleación que se emplea

TABLA 6.3 Tratamientos y propiedades mecánicas de aceros seleccionados.

Código	Tratamiento[a]	Resistencia a la tensión		Elongación, %
		MPa	lb/in^2	
1010	HR	304	44 000	47
1010	CD	366	53 000	12
1020	HR	380	55 000	28
1020	CD	421	61 000	15
1040	HR	517	75 000	20
1040	CD	587	85 000	10
1055	HT	897	130 000	16
1315	Ninguno	545	79 000	34
2030	Ninguno	566	82 000	32
3130	HT	697	101 000	28
4130	HT	890	129 000	17
4140	HT	918	133 000	16
4340	HT	1 279	185 000	12
4815	HT	635	92 000	27
9260	HT	994	144 000	18
HSLA	Ninguno	586	85 000	20

Recopilada a partir de las referencias [5], [9] y otras fuentes.

[a] HR = rolado en caliente; CD = estirado en frío; HT = tratamiento térmico que involucra calentamiento y enfriamiento por inmersión, seguidos de templado para producir martensita templada (véase la sección 27.2).

en ciertos aceros inoxidables para incrementar la protección contra la corrosión. El carbono se utiliza para dar resistencia y endurecer el metal; sin embargo, el contenido creciente de carbono tiene el efecto de reducir la protección contra la corrosión debido a que el carburo de cromo se forma para reducir la cantidad de Cr disponible en la aleación.

Además de la resistencia a la corrosión, los aceros inoxidables se destacan por su combinación de resistencia y ductilidad. Aunque estas propiedades son deseables en muchas aplicaciones, por lo general hacen a dichas aleaciones difíciles de trabajar en la manufactura. Asimismo, los aceros inoxidables son significativamente más caros que los aceros al carbono o los de baja aleación.

Los aceros inoxidables se dividen por tradición en tres grupos que reciben su nombre por la fase predominante presente en la aleación a temperatura ambiente:

1. ***Inoxidables austeníticos.*** Su composición normal es de alrededor de 18% de Cr y 8% de Ni, y son los más resistentes a la corrosión de los tres grupos. Debido a esa composición, a veces se les identifica como inoxidables 18-8. No son magnéticos y son muy dúctiles, pero muestran un endurecimiento por trabajo significativo. El níquel tiene el efecto de agrandar la región austenítica en el diagrama de fase de hierro-carbono, lo que los hace estables a temperatura ambiente. Los aceros inoxidables austeníticos se emplean para fabricar equipo de procesamiento químico y de alimentos, así como piezas de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión.
2. ***Inoxidables ferríticos.*** Contienen de 15% a 20% de cromo, poco carbono y nada de níquel. Esto produce una fase de ferrita a temperatura ambiente. Los aceros inoxidables ferríticos son magnéticos y menos dúctiles y resistentes a la corrosión que los austeníticos. Las piezas fabricadas con ellos van desde utensilios de cocina hasta componentes de motores a reacción.
3. ***Inoxidables martensíticos.*** Tienen un contenido de carbono más elevado que los ferríticos, lo que permite que se les dé resistencia por medio de tratamiento térmico (véase la sección 27.2). Tienen hasta 18% de Cr pero nada de Ni. Son fuertes, duros y resistentes a la fatiga, pero por lo general no tan resistentes a la corrosión como los de los otros dos grupos. Los productos más comunes incluyen instrumentos de corte y quirúrgicos.

   La mayor parte de aceros inoxidables reciben su nombre con un esquema de numeración de la AISI, de tres dígitos. El primero indica el tipo general y los últimos dos dan el grado específico dentro del tipo. La tabla 6.4 enlista los aceros inoxidables más comunes con sus composiciones normales y propiedades mecánicas.

TABLA 6.4 Composiciones y propiedades mecánicas de aceros inoxidables seleccionados.

	Análisis químico, %						Resistencia a la tensión		
Tipo	Fe	Cr	Ni	C	Mn	Otro[a]	MPa	lb/in^2	Elongación, %
Austenítico									
301	73	17	7	0.15	2		620	90 000	40
302	71	18	8	0.15	2		515	75 000	40
304	69	19	9	0.08	2		515	75 000	40
309	61	23	13	0.20	2		515	75 000	40
316	65	17	12	0.08	2	2.5 Mo	515	75 000	40
Ferrítico									
405	85	13	—	0.08	1		415	60 000	20
430	81	17	—	0.12	1		415	60 000	20
Martensítico									
403	86	12	—	0.15	1		485	70 000	20
403[b]	86	12	—	0.15	1		825	120 000	12
416	85	13	—	0.15	1		485	70 000	20
416[b]	85	13	—	0.15	1		965	140 000	10
440	81	17	—	0.65	1		725	105 000	20
440[b]	81	17	—	0.65	1		1 790	260 000	5

Recopilado a partir de la referencia [9].

[a] Todos los grados de la tabla contienen cerca de 1% (o menos) de silicio más cantidades pequeñas (muy por debajo del 1%) de fósforo y azufre y otros elementos tales como aluminio.

[b] Tratado térmicamente.

Los aceros inoxidables tradicionales se crearon a principios del siglo xx. Desde entonces, se han creado varias aleaciones de acero que tienen buena resistencia a la corrosión y otras propiedades deseables. Éstas también se clasifican como aceros inoxidables; la lista continúa así:

4. ***Aceros inoxidables de precipitación***. Tienen una composición química típica de 17% de Cr y 7% de Ni, con cantidades pequeñas adicionales de elementos de aleación tales como aluminio, cobre, titanio y molibdeno. La característica que los distingue del resto de los inoxidables es que pueden fortalecerse por medio de endurecimiento por precipitación (véase la sección 27.3). A temperaturas elevadas mantienen su fuerza y resistencia a la corrosión, lo que hace que estas aleaciones sean apropiadas para aplicaciones aeroespaciales.
5. ***Inoxidables dúplex***. Poseen una estructura que es una mezcla de austenita y ferrita en cantidades aproximadamente iguales. Su resistencia a la corrosión es similar a los grados austeníticos y muestran resistencia mejorada al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, bombas y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Aceros para herramientas Los aceros para herramientas son una clase (por lo general) altamente aleada diseñada para su uso en herramientas de corte industriales, troqueles y moldes. Para desempeñarse en esas aplicaciones deben poseer resistencia elevada, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste y tenacidad a los impactos. Para obtener estas propiedades los aceros para herramienta se tratan térmicamente. Las razones principales para los niveles altos de elementos de aleación son: 1) dureza mejorada, 2) distorsión reducida durante el tratamiento con calor, 3) dureza en caliente, 4) formación de carburos metálicos duros para que sean resistentes a la abrasión, y 5) tenacidad mejorada.

Los aceros para herramientas se dividen en tipos de acuerdo con la aplicación y composición. La AISI utiliza un esquema de clasificación que incluye un prefijo de una letra para identificar el acero para herramienta. En la lista de la tabla 6.5 que sigue, se mencionan esos tipos de acero, se identifica el prefijo y se presentan algunas composiciones comunes.

TABLA 6.5 Aceros para herramienta con el prefijo de identificación de AISI, con ejemplos de composición y valores comunes de dureza.

AISI	Ejemplo	Análisis químico, %[a]							Dureza, HRC
		C	Cr	Mn	Mo	Ni	V	W	
T	T1	0.7	4.0				1.0	18.0	65
M	M2	0.8	4.0		5.0		2.0	6.0	65
H	H11	0.4	5.0		1.5		0.4		55
D	D1	1.0	12.0		1.0				60
A	A2	1.0	5.0		1.0				60
O	O1	0.9	0.5	1.0				0.5	61
W	W1	1.0							63
S	S1	0.5	1.5					2.5	50
P	P20	0.4	1.7		0.4				40[b]
L	L6	0.7	0.8		0.2	1.5			45[b]

[a] Composición porcentual redondeada a la décima más cercana.
[b] Dureza estimada.

T, M ***Aceros para herramientas de alta velocidad.*** Se usan como herramientas de corte en procesos de maquinado (véase la sección 23.22). Se formulan para que tengan gran resistencia al desgaste y dureza en caliente. Los aceros de alta velocidad originales (HSS) se crearon alrededor de 1900. Permitieron incrementos muy grandes en la velocidad de corte en comparación con herramientas que se usaban con anterioridad; de ahí su nombre. Las dos designaciones AISI indican el elemento principal de la aleación: T por el tungsteno y M por el molibdeno.

H ***Aceros de herramientas para trabajos en caliente.*** Están pensados para usarse con troqueles de trabajos en caliente para forjado, extrusión y moldes para fundición.

D ***Aceros de herramientas para trabajos en frío.*** Son aceros para troqueles que se emplean en operaciones de trabajo en frío, tales como moldear láminas metálicas, extrusión en frío y ciertas operaciones de forja. La designación D es por dado (*die*). Se relacionan de cerca con las designaciones de AISI A y O, que son para endurecimiento con aire (*air*) y aceite (*oil*). Proporcionan buena resistencia al desgaste y una distorsión baja.

W ***Aceros para herramienta de endurecimiento por agua.*** Tienen contenido elevado de carbono con poco o nada de otros elementos de aleación. Sólo pueden endurecerse por enfriamiento por inmersión rápido en agua. Se emplean mucho debido a su bajo costo, pero se limitan a aplicaciones de temperatura baja. Una aplicación común son los troqueles de cabezales en frío.

S ***Aceros de herramientas resistentes a los golpes.*** Están hechos para usarse en aplicaciones en las que se requiere mucha tenacidad, como en muchos cortes de lámina metálica, punzonado y operaciones de doblado.

P ***Aceros para moldes.*** Se utilizan para fabricar moldes para plásticos y caucho.

L ***Aceros para herramientas de baja aleación.*** Por lo general se reservan para aplicaciones especiales.

Los aceros para herramientas no son los únicos materiales para ellas. Los aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables se emplean para muchas aplicaciones de herramientas y troqueles. Los hierros colados y ciertas aleaciones no ferrosas también son apropiados para algunas aplicaciones de herramientas. Además, varios materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3) se usan como inserciones cortantes de alta velocidad, abrasivos y otro tipo de herramientas.

6.2.4 Hierros colados

El ***hierro colado*** es una aleación de hierro que contiene de 2.1% a 4% de carbono, y de 1% a 3% de silicio. Su composición lo hace muy apropiado como metal de fundición. En

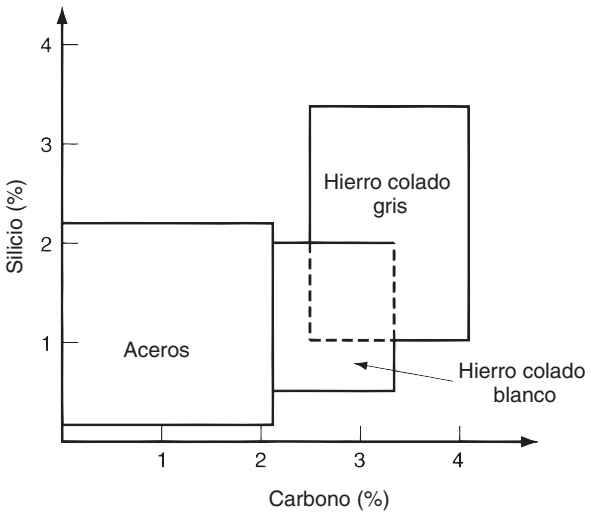


FIGURA 6.13 Composiciones de carbono y silicio para hierros colados, en comparación con los aceros (la mayor parte de éstos tienen un contenido relativamente bajo; los aceros de fundición tienen el contenido de Si más alto). El hierro dúctil se forma por medio de un tratamiento especial de fusión y vaciado de hierro fundido gris, y el maleable se elabora con tratamiento térmico del hierro colado blanco.

realidad, el peso en toneladas de los artículos de hierro colado es varias veces el de todas las demás piezas de metales fundidos combinados (con excepción de los lingotes que se fabrican durante la producción de acero y que posteriormente son rolados en forma de barras, láminas y otras formas similares). El peso total en toneladas del hierro colado ocupa el segundo lugar, pero sólo con respecto al acero entre todos los metales.

Entre los diversos tipos de hierro colado, el más importante es el gris. Otros tipos incluyen el hierro dúctil, el hierro colado blanco, el hierro maleable y varios hierros colados de aleaciones. Las composiciones comunes de los hierros colados gris y blanco se muestran en la figura 6.13, donde se indica su relación con el acero fundido. Los hierros dúctiles y los maleables poseen químicas similares a las de los hierros gris y blanco, respectivamente, pero resultan de tratamientos especiales que se describirán más adelante. En la tabla 6.6 se presenta una lista de las composiciones químicas de los tipos principales, así como de sus propiedades mecánicas.

Hierro colado gris Éste tiene el tonelaje mayor entre los hierros colados. Tiene una composición que va de 2.5% a 4% de carbono y de 1% a 3% de silicio. Esta química da como resultado la formación de escamas de grafito (carbono) distribuidas en todo el cuerpo fundido hasta que se solidifica. La estructura ocasiona que la superficie del metal adquiera un color

TABLA 6.6 Composiciones y propiedades químicas de hierros colados seleccionados.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Tipo	Fe	C	Si	Mn	Otro[a]	MPa	lb/in^2	Elongación, %
Hierros colados grises								
ASTM Clase 20	93.0	3.5	2.5	0.65		138	20 000	0.6
ASTM Clase 30	93.6	3.2	2.1	0.75		207	30 000	0.6
ASTM Clase 40	93.8	3.1	1.9	0.85		276	40 000	0.6
ASTM Clase 50	93.5	3.0	1.6	1.0	0.67 Mo	345	50 000	0.6
Hierros dúctiles								
ASTM A395	94.4	3.0	2.5			414	60 000	18
ASTM A476	93.8	3.0	3.0			552	80 000	3
Hierro colado blanco								
Bajo C	92.5	2.5	1.3	0.4	1.5Ni, 1Cr, 0.5Mo	276	40 000	0
Hierros maleables								
Ferrítico	95.3	2.6	1.4	0.4		345	50 000	10
Perlítico	95.1	2.4	1.4	0.8		414	60 000	10

Recopilado a partir de la referencia [9]. Los hierros colados se identifican con varios sistemas. Se ha intentado indicar el grado del hierro colado en particular con el empleo de la identificación más común para cada tipo.

[a] Los hierros colados también contienen fósforo y azufre, por lo general menos de 0.3%.

gris cuando se fractura, de donde adquiere su nombre. La dispersión de las escamas de grafito es responsable de dos propiedades atractivas: 1) buen amortiguamiento a la vibración, que es deseable en los motores y otra clase de maquinaria, y 2) cualidades de lubricación interna, lo que hace maquinable al metal fundido.

La resistencia del hierro colado gris abarca un rango significativo. La American Society for Testing of Materials (ASTM) usa un método de clasificación para el hierro colado gris hecho para proporcionar una especificación para la resistencia a la tensión (TS) mínima de varias clases: el hierro colado gris de Clase 20 tiene una TS de 20 000 lb/in^2, la Clase 30 tiene una TS de 30 000 lb/in^2, y así sucesivamente, hasta llegar a 70 000 lb/in^2 (véase la tabla 6.6 para la TS equivalente en unidades métricas). La resistencia a la compresión del hierro colado gris es significativamente mayor que a la tensión. Las propiedades de la pieza fundida se pueden controlar hasta cierto grado por medio del tratamiento térmico. La ductilidad del hierro colado gris es muy baja; es un material relativamente frágil. Los productos hechos de hierro colado gris incluyen bloques y cárteres de motores automotrices, carcasas de motor y bases para máquinas herramientas.

Hierro dúctil Este es un hierro con la composición del gris en el que el metal fundido recibe tratamiento químico antes de vaciarlo para ocasionar la formación de esferoides de grafito en lugar de escamas. Esto da como resultado un hierro más dúctil y fuerte, de ahí su nombre. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria que requieren resistencia elevada y buena resistencia al desgaste.

Hierro colado blanco Este hierro colado tiene menos carbono y silicio que el gris. Se forma por un enfriamiento más rápido del metal fundido después del vertido, lo que hace que el carbono permanezca en combinación química con el hierro en forma de cementita (Fe_3C), en vez de precipitarse de la solución en forma de escamas. Cuando se fractura, la superficie adquiere una apariencia cristalina blanca que le da su nombre al hierro. Debido a la cementita, el hierro fundido blanco es duro y frágil, y su resistencia al desgaste es excelente. La resistencia es buena, con un valor común de TS de 276 MPa (40 000 lb/in^2). Estas propiedades hacen que el hierro colado blanco sea apropiado para aplicaciones en las que se requiere resistencia al desgaste. Un buen ejemplo son las zapatas de los frenos de un ferrocarril.

Hierro maleable Cuando las piezas fundidas de hierro colado blanco se tratan térmicamente para separar el carbono de la solución y formar agregados de grafito, el metal que resulta se llama hierro maleable. La microestructura nueva posee ductilidad sustancial (hasta 20% de elongación), una diferencia significativa con el metal a partir del cual se transformó. Los productos comunes hechos de hierro colado maleable, incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario.

Hierros de aleaciones fundidas Los hierros colados pueden estar aleados para buscar propiedades y aplicaciones especiales. Estas aleaciones de hierro colado se clasifican como sigue: 1) tipos tratables térmicamente que pueden endurecerse por medio de la formación de martensita; 2) tipos resistentes a la corrosión, cuyos elementos de aleación incluyen níquel y cromo, y 3) tipos resistentes al calor que contienen proporciones elevadas de níquel para tener dureza en caliente y resistencia a la oxidación por alta temperatura.

6.3 METALES NO FERROSOS

Los metales no ferrosos incluyen elementos y aleaciones metálicas que no se basan en el hierro. Los metales más importantes de la ingeniería en el grupo de los no ferrosos son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio y el zinc, así como sus aleaciones.

Aunque los metales no ferrosos como grupo no igualan la resistencia de los aceros, ciertas aleaciones no ferrosas tienen resistencia a la corrosión o relaciones resistencia/peso que las hacen competitivas ante los aceros para aplicaciones con esfuerzos moderados a

TABLA 6.1 (*continuación*); *b*) Aluminio.

Símbolo:	Al	Mineral principal:	Bauxita (mezcla impura de Al_2O_3 y $Al(OH)_3$).
Número atómico:	13	Elementos de aleación:	Cobre, manganeso, silicio y zinc.
Gravedad específica:	2.7	Aplicaciones comunes:	Contenedores (latas de aluminio), láminas para envolturas, conductores eléctricos, vasijas y cacerolas, piezas para construcción, aeroespaciales automotrices y otros usos en los que el poco peso es importante.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	660 °C (1 220 °F)		
Módulo de elasticidad:	69 000 MPa (10×10^6 lb/in^2)		

altos. Además, muchos de los metales no ferrosos tienen propiedades adicionales a las mecánicas que los hacen ideales para aplicaciones en las que el acero sería inapropiado. Por ejemplo, el cobre tiene una de las resistividades más bajas entre los metales, y se usa ampliamente para fabricar conductores eléctricos. El aluminio es un conductor térmico excelente, y sus aplicaciones incluyen intercambiadores de calor y trastos de cocina. También es uno de los metales a los que se le da forma con mayor facilidad y por esa razón se le valora mucho. El zinc tiene un punto de fusión relativamente bajo, por lo que se le utiliza de manera amplia en las operaciones de fundición a troquel. Los metales no ferrosos comunes tienen su propia combinación de propiedades que los hacen atractivos para una variedad de aplicaciones. En las siguientes nueve secciones se estudian aquellos que son los más importantes en lo comercial y tecnológico.

6.3.1 El aluminio y sus aleaciones

El aluminio y el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se les especifique en aplicaciones de ingeniería. Ambos elementos abundan en nuestro planeta, el aluminio en la tierra y el magnesio en el mar, aunque ninguno se extrae con facilidad de su estado natural.

En la tabla 6.1*b*) se enlistan las propiedades y otros datos del aluminio. Entre los metales principales es un recién llegado relativamente hablando, pues data apenas de fines del siglo XIX (véase la nota histórica 6.2). El estudio en esta sección incluye lo siguiente: 1) una descripción breve de la forma en que se produce el aluminio, y 2) un análisis de las propiedades y sistema de nomenclatura para el metal y sus aleaciones.

Nota histórica 6.2 *Aluminio*

En 1807, el químico inglés Humphrey Davy, en la creencia de que el mineral ***alúmina*** (Al_2O_3) tenía una base metálica, trató de extraer el metal. No tuvo éxito, pero, de cualquier modo, estaba convencido lo suficiente como para dar al metal el nombre de ***alumium***, el que después cambió por ***aluminio***. En 1825, el físicoquímico danés Hans Orsted finalmente tuvo éxito en separar el metal. Observó que "parecía estaño". En 1845, el físico alemán Friedrich Wohler fue el primero en determinar la gravedad específica, ductilidad y varias otras propiedades del aluminio.

El proceso electrolítico moderno para producir aluminio se basa en el trabajo concurrente pero independiente de Charles Hall, en Estados Unidos, y de Paul Heroult, en Francia, alrededor de 1886. En 1888, Hall y un grupo de empresarios iniciaron la empresa Pittsburgh Reduction Co. Ese mismo año se produjo el primer lingote de aluminio con el proceso de fusión electrolítica. La demanda de aluminio creció. La necesidad de cantidades grandes de electricidad en el proceso de producción llevó a la compañía a reubicarse en las cataratas del Niágara, en 1895, donde se disponía de energía hidroeléctrica a costo muy bajo. En 1907, la compañía cambió su nombre por el de Aluminum Company of America (Alcoa). Fue el único productor de aluminio en Estados Unidos hasta la Segunda Guerra Mundial.

Producción de aluminio El mineral principal de aluminio es la ***bauxita***, que consiste por mucho en óxido de aluminio hidratado (Al_2O_3-H_2O) y otros óxidos. La extracción del aluminio a partir de la bauxita se resume en tres pasos: 1) lavado y trituración del mineral

TABLA 6.7*a*) Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99.0% o mayor	1XXX	1XX.X
Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es)		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

para obtener polvos finos; 2) proceso Bayer, en el que la bauxita se convierte en alúmina pura (Al_2O_3); y 3) electrólisis, en el que la alúmina se separa en aluminio y oxígeno gaseoso (O_2). El ***proceso Bayer***, llamado así en honor del químico alemán que lo creó, involucra una solución de polvo de bauxita en sosa cáustica acuosa (NaOH) a presión, seguida de precipitación de Al_2O_3 puro de la solución. La alúmina es importante en el comercio por sí misma, como material cerámico de uso en la ingeniería (véase el capítulo 7).

La ***electrólisis*** para separar el Al_2O_3 en sus elementos constitutivos requiere de disolver el precipitado en un baño de fundición de criolita (Na_3AlF_6) y sujetar la solución a una corriente directa entre las placas de un horno electrolítico. El electrólito se disocia para formar aluminio en el cátodo y oxígeno gaseoso en el ánodo.

Propiedades y esquema de nomenclatura El aluminio tiene mucha conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un metal muy dúctil y es notable la capacidad que tiene para adquirir la forma deseada. El aluminio puro tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alear y tratar térmicamente para competir con ciertos aceros, en especial cuando el peso es una consideración importante.

El sistema de nomenclatura para el aluminio es un código numérico de cuatro dígitos. El sistema tiene dos partes, una para el aluminio forjado y otra para los aluminios fundidos. La diferencia es que para estos últimos se emplea un punto decimal después del tercer dígito. En la tabla 6.7*a*) se presentan las designaciones.

Debido a que en las propiedades de las aleaciones de aluminio influyen mucho el endurecimiento por trabajo y el tratamiento térmico, además del código de composición, debe designarse el templado (tratamiento para dar resistencia, si lo hubiera). En la tabla 6.7*b*) se presentan las designaciones principales de templado. Esta designación se agrega al número precedente de cuatro dígitos, separado por un símbolo como superíndice, para indicar el tratamiento o la ausencia de él; por ejemplo, 1 060 °F. Por supuesto, los tratamientos de templado que especifican endurecimiento por deformación no se aplican a las aleaciones fundidas. En la tabla 6.8 se dan algunos ejemplos de las diferencias notables en las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio que resultan de los distintos tratamientos.

6.3.2 El magnesio y sus aleaciones

El magnesio (Mg) es el más ligero de los metales estructurales. Su gravedad específica y otros datos básicos se presentan en la tabla 6.1*c*). El magnesio y sus aleaciones se encuentran disponibles tanto en forma forjada como fundida. Es relativamente fácil de maquinar. Sin embargo, en todo procesamiento del magnesio, las partículas pequeñas del metal (tales como astillas metálicas pequeñas procedentes del corte) se oxidan con rapidez, por lo que debe tenerse cuidado para evitar el peligro de incendio.

TABLA 6.7*b*) Nomenclatura del templado para aleaciones de aluminio.

Templado	Descripción
F	Como se fabrica, sin tratamiento especial.
H	Endurecido por deformación (aluminios forjados). La H va seguida de dos dígitos, el primero de los cuales indica un tratamiento térmico, si lo hubiera; y el segundo, el grado de endurecimiento por trabajo restante; por ejemplo: H1X No hubo tratamiento térmico después del endurecimiento por deformación, y X = 1 a 9, que indica el grado de endurecimiento por trabajo. H2X Recocido parcialmente, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente en el producto. H3X Estabilizado, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente. ***Estabilizado*** significa calentar ligeramente por arriba de la temperatura de uso que se prevé.
O	Recocido para liberar el endurecimiento por deformación y mejorar la ductilidad; reduce la resistencia a su nivel mínimo.
T	Tratamiento térmico para producir templados estables diferentes de F, H u O. Va seguido de un dígito para indicar un tratamiento específico; por ejemplo: T1 = enfriado a partir de una temperatura elevada, envejecido en forma natural. T2 = enfriado desde una temperatura elevada, trabajado en frío, envejecido en forma natural. T3 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo natural. T4 = solución tratada térmicamente y envejecida naturalmente. T5 = enfriado desde una temperatura alta, envejecido en forma artificial. T6 = solución tratada térmicamente y envejecida en forma artificial. T7 = solución tratada térmicamente y sobrenvejecida o estabilizada. T8 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo artificial. T9 = solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío. T10 = enfriada desde una temperatura elevada, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
W	Solución con tratamiento térmico, aplicada a aleaciones que se endurecen por el envejecimiento en su uso; es un templado inestable.

TABLA 6.8 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio seleccionadas.

	Composición normal, %[a]							Resistencia a la tensión		
Código	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Templado	MPa	lb/in^2	Elongación
1050	99.5		0.4			0.3	O	76	11 000	39
							H18	159	23 000	7
1100	99.0		0.6			0.3	O	90	13 000	40
							H18	165	24 000	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	27 000	20
							T3	485	70 000	18
3004	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	26 000	22
							H36	260	38 000	7
4043	93.5	0.3	0.8			5.2	O	130	19 000	25
							H18	285	41 000	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18 000	18
							H38	200	29 000	3
6063	98.5		0.3	0.7		0.4	O	90	13 000	25
							T4	172	25 000	20

Recopilado a partir de la referencia [10].

[a] Además de los elementos que se enlistan, la aleación puede contener indicios de otros elementos tales como el cobre, magnesio, manganeso, vanadio y zinc.

TABLA 6.1 (*continuación*) *c*) Magnesio.

Símbolo:	Mg	Se extrae de:	$MgCl_2$ del agua marina, por electrólisis.
Número atómico:	12	Elementos de aleación:	Véase la tabla 6.9.
Gravedad específica:	1.74	Aplicaciones comunes:	Aeroespacial, misiles, bicicletas, sierras de cadena domésticas, equipajes y otras aplicaciones en las que el peso ligero es un requerimiento principal.
Estructura cristalina:	HCP		
Temperatura de fusión:	650 °C (1 202 °F)		
Módulo de elasticidad:	48 000 MPa (7×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.9 Letras del código para identificar los elementos en las aleaciones de magnesio.

A	aluminio (Al)	H	torio (Th)	M	manganeso (Mn)	Q	plata (Ag)	T	estaño (Sn)
E	metales de las tierras raras	K	zirconio (Tr)	P	plomo (Pb)	S	silicio (Si)	Z	zinc (Zn)

Producción del magnesio El agua de mar contiene alrededor de 0.13% de $MgCl_2$ y es la fuente de la mayor parte del magnesio que se produce en forma comercial. Para extraerlo, se mezcla una cantidad de agua marina con una lechada de cal, es decir, hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$). La reacción resultante precipita el hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) que se asienta y se retira como pasta aguada. Después, se filtra esta pasta aguada a fin de incrementar el contenido de $Mg(OH)_2$ para luego mezclarlo con ácido clorhídrico (HCl), que reacciona con el hidróxido para formar un concentrado de $MgCl_2$, mucho más concentrado que el del agua marina original. Se utiliza electrólisis para descomponer la sal en magnesio (Mg) y cloro gaseoso (Cl_2). Después se funde el magnesio en lingotes para su procesamiento posterior. El cloro se recicla para formar más $MgCl_2$.

Propiedades y esquema de nomenclatura Como metal puro, el magnesio es relativamente suave y carece de la resistencia suficiente para la mayor parte de las aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, se puede alear y tratar térmicamente para que alcance resistencias comparables a las de las aleaciones del aluminio. En particular, su relación resistencia-peso es una ventaja en los aviones y componentes de misiles.

El esquema de nomenclatura del magnesio usa un código alfanumérico de tres a cinco caracteres. Los primeros dos son letras que identifican los elementos principales de la aleación (pueden especificarse hasta dos elementos en el código, en orden decreciente de porcentaje, o en forma alfabética si los porcentajes son iguales). En la tabla 6.9 se enlistan dichas letras del código. Las letras van seguidas de un número de dos dígitos que indican, respectivamente, las cantidades de dos ingredientes de aleación al porcentaje más cercano. Finalmente, el último símbolo es una letra que indica cierta variación en la composición, o tan sólo el orden cronológico en el que se estandarizó para su disponibilidad comercial. Las aleaciones de magnesio también requieren la especificación del templado, y para ellas se emplea el mismo esquema básico que para el aluminio que se presentó en la tabla 6.7*b*).

En la tabla 6.10 se dan algunos ejemplos de aleaciones de magnesio, que ilustran el esquema de nomenclatura e indican su resistencia a la tensión y ductilidad.

6.3.3 El cobre y sus aleaciones

El cobre (Cu) es uno de los metales más antiguos que se conocen (véase la nota histórica 6.3). Los datos básicos del elemento cobre se presentan en la tabla 6.1*d*).

TABLA 6.10 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de magnesio seleccionadas.

	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
Código	Mg	Al	Mn	Si	Zn	Otro	Proceso	MPa	lb/in^2	Elongación
AZ10A	98.0	1.3	0.2	0.1	0.4		Trabajado	240	35 000	10
AZ80A	91.0	8.5			0.5		Forjado	330	48 000	11
HM31A	95.8		1.2			3.0 Th	Trabajado	283	41 000	10
ZK21A	97.1				2.3	6 Zr	Trabajado	260	38 000	4
AM60	92.8	6.0	0.1	0.5	0.2	0.3 Cu	Fundido	220	32 000	6
AZ63A	91.0	6.0			3.0		Fundido	200	29 000	6

Recopilado a partir de la referencia [10].

Nota histórica 6.3 *Cobre*

El cobre fue uno de los primeros metales que usaron las culturas humanas (el oro fue el otro). Es probable que el descubrimiento del metal ocurriera alrededor de 6000 a.C. En esa época, el cobre se encontró en estado metálico libre. Los antiguos pueblos fabricaron implementos y armas por medio del golpeo del metal (forja en frío). Al ser golpeado, el cobre se hacía más fuerte (endurecimiento por deformación); esto y su color rojo atractivo lo hacían valioso para las primeras civilizaciones.

Alrededor de 4000 a.C, se descubrió que el cobre podría fundirse para que adoptara formas útiles. Después se vio que mezclado con estaño podía fundirse y trabajarse con más facilidad que como metal puro. Esto llevó a que se extendiera el uso del bronce y posteriormente se diera el nombre de Edad de Bronce, a la época que transcurrió aproximadamente desde 2000 a.C. al periodo de Cristo.

Para los romanos antiguos, la isla de Chipre era casi la única fuente de cobre. Llamaban al metal ***aes cyprium*** (mineral de Chipre). Este nombre se abrevió a ***Cyprium*** y después a ***Cuprium***. De ahí deriva el símbolo químico Cu.

Producción de cobre En los tiempos antiguos, el cobre existía en la naturaleza como elemento libre. Hoy día, esos depósitos naturales son más difíciles de encontrar y el metal se extrae de minerales que en su mayoría son sulfuros, como la ***calcopirita*** ($CuFeS_2$). El mineral se tritura (véase la sección 17.1.1), se concentra por flotación y después se ***aparta*** (se derrite o funde, con frecuencia con una reacción química para separar el metal del mineral). El cobre resultante se denomina ***cobre ampollado***, que tiene una pureza de 98% y 99%. Se emplea electrólisis para obtener niveles de pureza más elevados apropiados para el uso comercial.

Propiedades y esquema de nomenclatura El cobre puro tiene un color rojizo o rosa distintivo, pero su propiedad de ingeniería más notable es su resistividad eléctrica baja, uno de los elementos con la más baja. Debido a esta propiedad, y a su abundancia relativa en la naturaleza, el cobre puro comercial se usa mucho como conductor eléctrico (aquí se debe decir que la conductividad del cobre disminuye de manera significativa si se agregan elementos de aleación). El Cu también es un conductor térmico excelente. El cobre es uno de los metales nobles (el oro y la plata también lo son), por lo que es resistente a la corrosión. Todas esas propiedades se combinan para que el cobre sea uno de los metales más importantes.

En contraparte, la resistencia y dureza del cobre son relativamente bajas, en especial si se toma en cuenta el peso. En consecuencia, para mejorar la resistencia (así como por otras razones), es frecuente que el cobre se alee. El ***bronce*** es una aleación de cobre y estaño (es común el 90% de Cu y 10% de Sn), que hoy se usa todavía a pesar de su antigüedad. Se han desarrollado aleaciones de bronce adicionales, con base en otros elementos distintos del estaño; entre éstos se hallan bronces de aluminio, y bronces de silicio. El ***latón*** es otra aleación de cobre que resulta familiar, compuesta de cobre y zinc (es común que contenga 65% de cobre y 35% de zinc). La aleación de cobre con mayor resistencia es la del berilio-cobre (con sólo el 2% de berilio). Puede tratarse térmicamente para obtener resistencias a la tensión de 1 035 MPa (150 000 lb/in^2). Las aleaciones de Be-Cu se usan para hacer resortes.

La nomenclatura de las aleaciones de cobre se basa en el Unified Numbering System for Metals and Alloys (UNS), que emplea un número de cinco dígitos precedido de la letra

TABLA 6.1 (*continuación*); *d*) Cobre.

Símbolo:	Cu	Mineral del que se extrae:	Varios: por ejemplo, calcopirita ($CuFeS_2$).
Número atómico:	29	Elementos de aleación:	Estaño (bronce), zinc (latón), aluminio, silicio, níquel y berilio.
Gravedad específica:	8.96	Aplicaciones comunes:	Conductores y componentes eléctricos, municiones (latón), vasijas y cacerolas, joyería, plomería, aplicaciones marinas, intercambiadores de calor, resortes (Be-Cu).
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 083 °C (1 981 °F)		
Módulo de elasticidad:	110 000 MPa (16×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.11 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de cobre seleccionadas.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Código	Cu	Be	Ni	Sn	Zn	MPa	lb/in^2	Elongación, %
C10100	99.99					235	34 000	45
C11000	99.95					220	32 000	45
C17000	98.0	1.7	[a]			500	70 000	45
C24000	80.0				20.0	290	42 000	52
C26000	70.0				30.0	300	44 000	68
C52100	92.0			8.0		380	55 000	70
C71500	70.0		30.0			380	55 000	45
C71500[b]	70.0		30.0			580	84 000	3

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Cantidades pequeñas de Ni y Fe + 0.3 Co.

[b] Tratado térmicamente para dar más resistencia.

C (de cobre). Las aleaciones se procesan en formas fraguadas y fundidas, y el sistema de nomenclatura incluye ambas. En la tabla 6.11 se presentan algunas aleaciones de cobre con sus composiciones y propiedades mecánicas.

6.3.4 El níquel y sus aleaciones

En muchos aspectos, el níquel (Ni) es similar al hierro. Es magnético y su módulo de elasticidad es virtualmente el mismo que el del hierro y el acero. Sin embargo, es mucho más resistente a la corrosión y las propiedades de alta temperatura de sus aleaciones por lo general son superiores. Debido a sus características de resistencia a la corrosión, se usa mucho como elemento de aleación en el acero, como en los aceros inoxidables, y como metal de recubrimiento de otros metales, como el acero al carbono.

Producción de níquel El mineral de níquel más importante es la ***pentlandita*** ($(Ni,Fe)_9S_8$). Para extraer el níquel, primero se tritura el mineral mezclado con agua. A fin de separar los sulfuros de los demás minerales de la mena se utilizan técnicas de flotación. Después, se calienta el sulfuro de níquel para quemar algo del azufre, y luego se funde con el fin de eliminar hierro y silicio. Se refina más en un convertidor del tipo Bessemer para obtener sulfuro de níquel (NiS) de alta concentración. Después se aplica electrólisis para recuperar níquel de alta pureza a partir del compuesto. En ocasiones, los minerales de níquel se mezclan con otros de cobre, en cuyo caso la técnica de recuperación que se acaba de describir también produce cobre.

Aleaciones de níquel Las aleaciones de níquel tienen importancia comercial por sí mismas, y son notables por su resistencia a la corrosión y desempeño a altas temperaturas. En la tabla 6.12 se dan la composición, resistencia a la tensión y ductilidad de algunas aleaciones de níquel. Además, cierto número de superaleaciones se basan en el níquel (véase la sección 6.4).

TABLA 6.1 (*continuación*); *e*) Níquel.

Símbolo:	Ni	Mineral del que se extrae:	Pentlandita ($(Fe, Ni)_9S_8$).
Número atómico:	28	Elementos de aleación:	Cobre, cromo, hierro, aluminio.
Gravedad específica:	8.90	Aplicaciones comunes:	Ingrediente de las aleaciones del acero inoxidable, metal para recubrir acero, aplicaciones que requieren resistencia a las temperaturas elevadas y a la corrosión.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 453 °C (2 647 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.12 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de níquel.

	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
Código	Ni	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Otro	MPa	lb/in^2	Elongación, %
270	99.9		[a]	[a]				345	50 000	50
200	99.0		0.2	0.3	0.2	0.2	C, S	462	67 000	47
400	66.8		30.0	2.5	0.2	0.5	C	550	80 000	40
600	74.0	16.0	0.5	8.0	1.0	0.5		655	95 000	40
230	52.8	22.0		3.0	0.4	0.4	[b]	860	125 000	47

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Indicios.

[b] Otros ingredientes de aleación en grado 230: 5% Co, 2% Mo, 14% W, 0.3% Al, 0.1% C.

6.3.5 El titanio y sus aleaciones

El titanio (Ti) es abundante en la naturaleza, constituye cerca del 1% de la corteza terrestre (el 8% corresponde al aluminio, el que abunda más). La densidad del titanio está entre la del aluminio y la del hierro; éste y otros datos se presentan en la tabla 6.1*f*). En las últimas décadas su importancia ha crecido debido a sus aplicaciones aeroespaciales, en las que se aprovechan su peso ligero y razón resistencia-peso buena.

Producción de titanio Los minerales principales del titanio son el ***rutilo***, que está formado por 98% a 99% de TiO_2, y la ***ilmenita***, que es una combinación de FeO y TiO_2. El rutilo es preferible como mena debido a su mayor contenido de Ti. En la recuperación del metal a partir de sus minerales, el TiO_2 se convierte en tetracloruro de titanio ($TiCl_4$) por medio de hacer reaccionar al compuesto con cloro gaseoso. A esto sigue una secuencia de etapas de destilación para eliminar las impurezas. Luego se reduce el $TiCl_4$ muy concentrado a titanio metálico, con una reacción con magnesio; esto se conoce como ***proceso Kroll***. Como agente reductor también puede usarse sodio. En cualquier caso, debe mantenerse una atmósfera inerte para impedir que el O_2, N_2 o H_2 contaminen al Ti por su gran afinidad con esos gases. El metal resultante se emplea para fundir lingotes del metal y sus aleaciones.

Propiedades del titanio El coeficiente de expansión térmica del titanio es relativamente bajo entre los metales. Es más rígido y fuerte que el aluminio, y a altas temperaturas conserva buena resistencia. El titanio puro es reactivo, lo que da problemas durante el procesamiento, en especial en estado fundido. Sin embargo, a temperatura ambiente forma una película delgada de óxido (TiO_2) adhesivo que recubre y proporciona una resistencia excelente contra la corrosión.

Estas propiedades han dado lugar a dos áreas principales de aplicación del titanio: 1) en estado puro comercial, el Ti se emplea para hacer componentes resistentes a la corrosión, tales como elementos marinos e implantes ortopédicos; y 2) las aleaciones de titanio se emplean como componentes de resistencia elevada en temperaturas que van de la del ambiente a 550 ºC (1 000 ºF), en especial en las que se aprovecha su excelente razón resis-

TABLA 6.1 (*continuación*); *f*) Titanio.

Símbolo:	Ti	Minerales principales de los que se extrae:	Rutilo (TiO_2) e ilmenita ($FeTiO_3$)
Número atómico:	22	Elementos de aleación:	Aluminio, estaño, vanadio, cobre y magnesio.
Gravedad específica:	4.51	Aplicaciones comunes:	Componentes de motores a reacción, otras aplicaciones aeroespaciales, implantes ortopédicos.
Estructura cristalina:	HCP		
Temperatura de fusión:	1 668 °C (3 034 °F)		
Módulo de elasticidad:	117 000 MPa (17×10^6 lb/in^2)		

TABLA 6.13 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de titanio seleccionadas.

	Composición normal, %						Resistencia a la tensión		
Código[a]	Ti	Al	Cu	Fe	V	Otro	MPa	lb/in^2	Elongación, %
R50250	99.8			0.2			240	35 000	24
R56400	89.6	6.0		0.3	4.0	[b]	1 000	145 000	12
R54810	90.0	8.0			1.0	1 Mo,[b]	985	143 000	15
R56620	84.3	6.0	0.8	0.8	6.0	2 Sn,[b]	1 030	150 000	14

Recopilada a partir de las referencias [1] y [10].

[a] United Numbering System (UNS).

[b] Indicios de C, H, O.

tencia-peso. Estas aplicaciones recientes incluyen componentes de aeronaves y mísiles. Algunos de los elementos de aleación que se utilizan con el titanio incluyen aluminio, manganeso, estaño y vanadio. En la tabla 6.13 se presentan algunas composiciones y propiedades mecánicas de varias de sus aleaciones.

6.3.6 El zinc y sus aleaciones

En la tabla 6.1*g*) se enlistan los datos básicos del zinc. Su punto de fusión bajo lo hace atractivo como metal de fundición. También da protección contra la corrosión cuando se le usa como recubrimiento del acero o hierro; el ***acero galvanizado*** es acero recubierto con zinc.

Producción de zinc La blenda de zinc o ***esfalerita*** es el mineral principal del zinc; contiene sulfuro de zinc (ZnS). Otras menas importantes de zinc incluyen la ***smithsonita***, que es carbonato de zinc ($ZnCO_3$), y ***hemimorfato***, que es silicato hidroso de zinc ($Zn_4Si_2O_7OH$-H_2O).

La esfalerita debe concentrarse (o ***beneficiarse***, en el argot metalúrgico) debido a la cantidad tan pequeña de sulfuro de zinc que contiene. Esto se lleva a cabo por medio de triturar, en primer lugar, al mineral, luego se muele con agua en un molino de balines (véase la sección 17.1.1) para crear una pasta aguada. En presencia de un agente espumante, la pasta aguada se agita de modo que las partículas de mineral flotan en la superficie y se pueden retirar (se separan de los minerales pesados de la parte inferior). Después, el sulfuro de zinc más concentrado se calienta a 1 260 ºC (2 300 ºF), de modo que con la reacción se forma óxido de zinc (ZnO).

Hay varios procesos termoquímicos para recuperar el zinc de ese óxido, todos los cuales lo reducen por medio de carbono. El carbono se combina con el oxígeno del ZnO para formar CO y CO_2, lo que libera Zn en forma de vapor que se condensa para producir el metal deseado.

También se usa mucho un proceso electrolítico, responsable de alrededor de la mitad de la producción mundial de zinc. Dicho proceso también comienza con la preparación de ZnO, que se mezcla con ácido sulfúrico diluido (H_2SO_4), seguido de electrólisis para separar la solución de sulfato de zinc ($ZnSO_4$) resultante y producir el metal puro.

TABLA 6.1 (*continuación*); *g*) Zinc.

Símbolo:	Zn	Módulo de elasticidad:	90 000 MPa (13×10^6 lb/in^2)[a].
Número atómico:	30	Mineral principal:	Esfalerita (ZnS).
Gravedad específica:	7.13	Elementos de aleación:	Aluminio, magnesio y cobre.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Acero y hierro galvanizados, fundición a troquel, elemento de aleación del latón.
Temperatura de fusión:	419 °C (786 °F)		

[a] El zinc se agrieta, por lo cual es difícil de medir su módulo de elasticidad; por esta razón, algunas tablas de propiedades omiten el valor de *E* para el zinc.

TABLA 6.14 Composición, resistencia a la tensión y aplicaciones de aleaciones de zinc seleccionadas.

	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
Código[a]	Zn	Al	Cu	Mg	Fe	MPa	lb/in^2	Aplicación
Z33520	95.6	4.0	0.25	0.04	0.1	283	41 000	Fundición a troquel
Z35540	93.4	4.0	2.5	0.04	0.1	359	52 000	Fundición a troquel
Z35635	91.0	8.0	1.0	0.02	0.06	374	54 000	Aleación de fundición
Z35840	70.9	27.0	2.0	0.02	0.07	425	62 000	Aleación de fundición
Z45330	98.9		1.0	0.01		227	33 000	Aleación rolada

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] UNS – United Numbering System para metales.

Aleaciones y aplicaciones del zinc Las aleaciones del zinc se utilizan mucho en fundición a troquel para producir componentes en masa para las industrias automotriz y de aparatos. Otra aplicación mayor del zinc se tiene en el acero galvanizado. Como el nombre lo sugiere, se crea una celda galvánica en el acero galvanizado (el Zn es el ánodo y el acero el cátodo) que lo protege del ataque de la corrosión. Por último, el tercer uso importante del zinc es para producir latón. Como ya se dijo, esa aleación consiste en cobre y zinc, en la razón de 2/3 de Cu y 1/3 de Zn, aproximadamente. El latón se estudió en el análisis del cobre. En la tabla 6.14 se enlistan varias aleaciones de zinc, con datos sobre su composición, resistencia a la tensión y aplicaciones.

6.3.7 El plomo y el estaño

Es frecuente que el plomo (Pb) y el estaño (Sn) se estudien juntos debido a sus temperaturas de fusión bajas, y porque forman aleaciones para soldar que se emplean para hacer conexiones eléctricas. En la figura 6.3 se presenta el diagrama de fase del sistema estaño-plomo. Los datos básicos para ambos metales se enlistan en la tabla 6.1*h*).

El plomo es un metal denso con punto de fusión bajo; otras de sus propiedades son resistencia baja, poca dureza (la palabra "suave" es apropiada para describirlo), ductilidad alta y buena resistencia a la corrosión. Además de su empleo como soldadura, las aplicaciones del plomo y sus aleaciones incluyen las siguientes: tubos para plomería, rodamientos, municiones, metales tipográficos, protección contra rayos X, baterías de almacenamiento y amortiguamiento de vibraciones. También se utiliza mucho en productos químicos y pinturas. Los elementos de aleación principales para el plomo son estaño y antimonio.

El estaño tiene un punto de fusión aún más bajo que el del plomo; otras propiedades incluyen resistencia baja, poca dureza y ductilidad buena. El uso más temprano del estaño fue para hacer bronce, aleación que consistía en cobre y estaño creada alrededor de 3000 a.C. en Mesopotamia y Egipto. El bronce aún es una aleación de importancia comercial (aunque su importancia relativa ha declinado a lo largo de 5 000 años). Otros usos del estaño son para recubrir contenedores de lámina de acero ("latas de estaño") para almacenar comida y, por supuesto, como metal de soldadura.

TABLA 6.1 (*continuación*); *h*) Plomo y estaño.

	Plomo	Tin = Estaño
Símbolo:	Pb	Sn
Número atómico:	82	50
Gravedad específica:	11.35	7.30
Estructura cristalina:	FCC	HCP
Temperatura de fusión:	327 °C (621 °F)	232 °C (449 °F)
Módulo de elasticidad:	21 000 MPa (3×10^6 lb/in^2)	42 000 MPa (6×10^6 lb/in^2).
Mineral del que se extrae:	Galena (PbS)	Casiterita (SnO_2).
Elementos comunes de aleación:	Estaño, antimonio	Plomo, cobre
Aplicaciones comunes:	Véase el texto	Bronce, soldadura, latas de estaño.

TABLA 6.1 (*continuación*); *i*) metales refractarios.

	Molibdeno	Tungsteno
Símbolo:	Mo	W
Número atómico:	42	74
Gravedad específica:	10.2	19.3
Estructura cristalina:	BCC	BCC
Temperatura de fusión:	2 619 °C (4 730 °F)	3 400 °C (6 150 °F)
Módulo de elasticidad:	324 000 MPa (47×10^6 lb/in^2)	407 000 MPa (59×10^6 lb/in^2).
Minerales principales:	Molibdenita (MoS_2)	Scheelita ($CaWO_4$), wolframita ($(Fe,Mn)WO_4$).
Elementos de aleación:	Véase el texto	[a]
Aplicaciones:	Véase el texto	Filamentos luminosos, piezas para motores a reacción, equipos para WC.

[a] El tungsteno se emplea como metal puro e ingrediente de aleaciones, pero pocas de éstas se basan en el W.

6.3.8 Metales refractarios

Los ***metales refractarios*** son aquellos capaces de soportar temperaturas elevadas. Los más importantes de este grupo son el molibdeno y el tungsteno; véase la tabla 6.1*i*). Otros metales refractarios son el columbio (Cb) y el tantalio (Ta). En general, estos metales y sus aleaciones pueden conservar una resistencia y dureza elevadas a temperaturas altas.

El molibdeno tiene un punto de fusión alto y es relativamente denso, rígido y fuerte. Se usa como metal puro (99.9% + % Mo) y como aleación. La aleación principal es TZM, que contiene cantidades pequeñas de titanio y zirconio (menos de 1% del total). El Mo y sus aleaciones poseen buena resistencia a alta temperatura, y a esto se deben sus tantas aplicaciones, que incluyen escudos contra el calor, elementos de calefacción, electrodos para soldadura por resistencia, troqueles para trabajos a altas temperaturas (por ejemplo, moldes para fundición a troquel) y piezas para motores de cohete y a reacción. Además de estas aplicaciones, el molibdeno también se emplea mucho como ingrediente de aleación de otros metales, como aceros y superaleaciones.

El tungsteno (W) tiene el punto de fusión más alto de todos los metales puros y es uno de los más densos. Es también el más rígido y duro de todos los metales puros. Su aplicación más conocida es el filamento de los focos incandescentes. Es común que las aplicaciones del tungsteno se caractericen por temperaturas de operación elevadas, tales como elementos para cohetes y motores a reacción, y electrodos de soldadura con arco. También se utiliza mucho como elemento de aleaciones de aceros para herramientas, resistentes al calor, y para el carburo de tungsteno (véase la sección 7.3.2).

Una desventaja grande tanto del Mo como del W es su propensión a oxidarse a temperaturas elevadas, por arriba de los 600 ºC (1 000 ºF), con lo que se perjudican sus propiedades de alta temperatura. Con el fin de superar esta deficiencia, deben emplearse recubrimientos protectores para estos metales en las aplicaciones de alta temperatura, o bien operar las piezas metálicas en un vacío. Por ejemplo, el filamento de tungsteno debe energizarse en el vacío interior de los focos.

6.3.9 Metales preciosos

Los metales preciosos, también llamados ***metales nobles*** debido a que son inactivos en cuanto a la química, incluyen el oro, platino y plata. Son metales atractivos, disponibles en cantidades limitadas, y a través de la historia de las civilizaciones se han empleado para acuñar monedas y respaldar el papel moneda. También se les usa mucho en joyería y aplicaciones similares que aprovechan su alto valor. Como grupo, los metales preciosos poseen densidad elevada, ductilidad buena, conductividad eléctrica alta, resistencia a la corrosión y temperaturas de fusión moderadas; véase la tabla 6.1*j*.

TABLA 6.1 (*continuación*); *j*) los metales preciosos.

	Oro	Platino	Plata
Símbolo:	Au	Pt	Ag
Número atómico:	79	78	47
Gravedad específica:	19.3	21.5	10.5
Estructura cristalina:	FCC	FCC	FCC
Temperatura de fusión:	1 063 °C (1 945 °F)	1 769 °C (3 216 °F)	961 °C (1 762 °F)
Minerales principales:	[a]	[a]	[a]
Elementos de aleación:	[b]	[b]	[b]
Aplicaciones:	Véase el texto	Véase el texto	Véase el texto

[a] Todos los metales preciosos se obtienen de depósitos en los que el metal puro está mezclado con otros minerales y metales. La plata también se extrae del mineral ***argentita*** (Ag_2S).

[b] Los metales preciosos por lo general no se alean.

El ***oro*** (Au) es uno de los metales más pesados; es suave y se le da forma con facilidad, y posee un color amarillo distintivo que le agrega valor. Además de la moneda y joyería, sus aplicaciones incluyen contactos eléctricos (debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión), trabajos dentales y recubrimiento de metales comunes para fines decorativos.

El ***platino*** (Pt) es el único metal (entre los comunes) cuya densidad es mayor que la del oro. Aunque no se usa tanto como éste, sus aplicaciones son diversas e incluyen la joyería, termopares, contactos eléctricos y equipo catalítico para el control de la contaminación de los automóviles.

La ***plata*** (Ag) es menos cara por unidad de peso que el oro o el platino. No obstante, su atractivo lustre "plateado" la hace un metal muy valioso para monedas, joyería y vajillas (que incluso adoptan el nombre del metal: "platería"). También se emplea como relleno en trabajos dentales. La plata tiene la conductividad eléctrica más elevada que cualquier metal, lo que la hace útil para contactos en aplicaciones electrónicas. Por último, debe mencionarse que el cloruro de plata y otros haluros del metal sensibles a la luz son la base de la fotografía.

6.4 SUPERALEACIONES

Las superaleaciones constituyen una categoría que encuadra a los metales ferrosos y no ferrosos. Algunas de ellas están basadas en el hierro, mientras otras lo están en el níquel y el cobalto. En realidad, muchas de las superaleaciones contienen cantidades sustanciales de tres o más metales, en lugar de un solo metal base más elementos de aleación. No obstante que el tonelaje de estos metales no es significativo en comparación con la mayoría de los demás metales que se han estudiado en este capítulo, tienen importancia comercial porque son muy caros; y también la tienen en cuanto a tecnología por lo que hacen.

Las ***superaleaciones*** son un grupo de aleaciones de alto rendimiento diseñadas para satisfacer requerimientos muy exigentes de fortaleza y resistencia a la degradación de su superficie (corrosión y oxidación) a varias temperaturas de uso. Para estos metales, la resistencia a la temperatura ambiente convencional no es un criterio importante, y la mayoría de ellos tiene propiedades al respecto que son buenas pero no extraordinarias. Lo que los distingue es su desempeño ante temperaturas elevadas; las propiedades mecánicas de interés son su resistencia a la tensión, dureza en caliente, resistencia al agrietamiento, y a la corrosión a temperaturas muy elevadas. Es frecuente que las temperaturas de operación estén en la cercanía de los 1 100 ºC (2 000 ºF). Estos metales se emplean mucho en sistemas de turbinas de gas, motores a reacción y de cohetes, turbinas de vapor, y plantas de energía nuclear, en los que la eficiencia de operación se incrementa con las temperaturas elevadas.

TABLA 6.15 Algunas composiciones comunes de las superaleaciones.

	Análisis químico, %[a]								
Superaleación	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W	Nb	Ti	Otros[b]
Basada en el hierro									
Incoloy 802	46	32		21				< 1	< 1
Haynes 556	29	20	20	22	3				6
Basada en el níquel									
Incoloy 807	25	40	8	21		5			1
Inconel 718	18	53		19	3		5		1
Rene 41		55	11	19	1			3	2
Hastelloy S	1	67		16	15				1
Nimonic 75	3	76		20				< 1	< 1
Basada en el cobalto									
Stellite 6B	3	3	53	30	2	5			4
Haynes 188	3	22	39	22		14			
L-605		10	53	20		15			2

Recopilada a partir de la referencia [10].

[a] Composición dada al porcentaje más cercano; los porcentajes menores que 1 se indican como <1.

[b] Otros elementos incluyen: carbono, tungsteno, manganeso y silicio.

Por lo general, las superaleaciones se dividen en tres grupos, de acuerdo con su constituyente principal: hierro, níquel o cobalto.

- ***Aleaciones basadas en el hierro***. Como ingrediente principal tienen hierro, aunque en ciertos casos éste es menor de 50% de la composición total.
- ***Aleaciones basadas en el níquel***. Por lo general tienen mejor resistencia a las temperaturas altas que los aceros aleados. El níquel es el metal base. Los elementos principales de la aleación son el cromo y el cobalto; otros menores son el aluminio, titanio, molibdeno, niobio (Nb) y hierro. Algunos nombres familiares en este grupo son los de Inconel, Hastelloy y Rene 41.
- ***Aleaciones basadas en el cobalto***. Tienen al cobalto (alrededor del 40%) y cromo (quizá el 20%) como sus componentes principales. Otros elementos de la aleación incluyen al níquel, molibdeno y tungsteno.

En prácticamente todas las superaleaciones, inclusive las basadas en hierro, el darle resistencia se lleva a cabo mediante endurecimiento por precipitación. Las superaleaciones con base en el hierro no usan la formación de martensita para obtener su resistencia. En la tabla 6.15 se presentan las composiciones comunes para algunas de las aleaciones, en tanto que las propiedades de resistencia de ellas a temperaturas ambiente y elevada se muestran en la tabla 6.16.

6.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE METALES

Se dispone de una variedad amplia de procesos de manufactura para dar forma a los metales, mejorar sus propiedades, ensamblarlos y darles un acabado estético y protector.

Dar forma, ensamblar y procesos de acabado Los metales reciben su forma por medio de todos los procesos básicos, inclusive fundición, metalurgia de polvos, procesos de deformación y remoción de material. Además, las piezas metálicas se unen para formar ensambles por procesos tales como soldadura autógena, soldadura dura y soldadura suave, y sujeción mecánica. El tratamiento térmico se lleva a cabo para mejorar las propiedades. Y es común que los procesos de acabado se utilicen para mejorar la apariencia de las piezas metálicas o para dar protección contra la corrosión. Estas operaciones de acabado incluyen

TABLA 6.16 Propiedades de resistencia de las superaleaciones a temperatura ambiente y a 870 °C (1 600 °F).

	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente		Resistencia a la tensión a 870 °C (1 600 °F)	
Superaleación	MPa	lb/in^2	MPa	lb/in^2
Basada en el hierro				
Incoloy 802	690	100 000	195	28 000
Haynes 556	815	118 000	330	48 000
Basada en el níquel				
Incoloy 807	655	95 000	220	32 000
Inconel 718	1 435	208 000	340	49 000
Rene 41	1 420	206 000	620	90 000
Hastelloy S	845	130 000	340	50 000
Nimonic 75	745	108 000	150	22 000
Basada en el cobalto				
Stellite 6B	1 010	146 000	385	56 000
Haynes 188	960	139 000	420	61 000
L-605	1 005	146 000	325	47 000

Recopilada a partir de la referencia [9].

la galvanoplastia y la pintura. En la tabla 6.17 se da un resumen de las muchas tecnologías de procesamiento que se describen en este libro.

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los metales Las propiedades mecánicas de los metales se alteran por medio de cierto número de técnicas. En el estudio de los distintos metales se ha hecho referencia a algunas de éstas. Los métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales se agrupan en tres categorías: 1) aleación, 2) trabajo en frío, y 3) tratamiento térmico. La ***aleación*** se ha estudiado en todo el capítulo presente y es una técnica importante para dar resistencia a los metales. Al ***trabajo en frío*** se había hecho referencia como endurecimiento por deformación; su efecto es incrementar la resistencia y reducir la ductilidad. El grado en que estas propiedades mecánicas se ven afectadas depende de la cantidad de deformación y del exponente de endurecimiento por deformación en la curva de flujo, descrita por la ecuación (3.10). El trabajo en frío se utiliza tanto en metales puros como en aleaciones. Se realiza durante la deformación del elemento de trabajo a través de uno de los procesos para dar forma, por ejemplo rolado, forjado o extrusión. Entonces, el dar resistencia a los metales ocurre como subproducto de la operación de darles forma.

El ***tratamiento térmico*** se refiere a varios tipos de ciclos de calentamiento y enfriamiento que se ejecutan sobre un metal para cambiar en forma benéfica sus propiedades. Operan con la alteración de la microestructura básica del metal, que a su vez determina las propiedades mecánicas. Algunas de las operaciones de tratamiento térmico sólo son apli-

TABLA 6.17 Procesos de la manufactura de metales.

Proceso	Capítulo	Proceso	Capítulo
Fundición	10 y 11	Tratamiento térmico	27
Metalurgia de polvos	16	Limpieza y tratamientos superficiales	28
Procesos de formado:	18	Procesos de recubrimiento	29
Forjado	19	Procesos de ensamblado	
Laminado	20	Soldadura autógena	30 y 31
Procesos de remoción de material:		Soldadura dura y soldadura suave	32
Maquinado convencional	21 y 22	Ensamblado mecánico	33
Procesos abrasivos	25		
Procesos no tradicionales	26		

cables a cierto tipo de metales; por ejemplo, el tratamiento térmico del acero para formar martensita es algo especializado, toda vez que la martensita es exclusiva del acero. En el capítulo 27 se describen los tratamientos térmicos.

REFERENCIAS

[1] Bauccio, M. (ed.). ***ASM Metals Reference Book***, 3a. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.

[2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B. ***Structure and Properties of Engineering Materials***, 4a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.

[3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tool Steel Selection", ***Advanced Materials & Processes***, junio de 2004, pp. 37-40.

[4] ***Encyclopaedia Britannica***, vol. **21,** ***Macropaedia***. Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1990, en la sección: Industries, Extraction and Processing.

[5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[6] Guy, A. G. y Hren, J. J. ***Elements of Physical Metallurgy***, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1974.

[7] Hume-Rothery, W., Smallman, R. E. y Haworth, C. W. ***The Structure of Metals and Alloys***. Institute of Materials, Londres, Inglaterra, 1988.

[8] Lankford, W. T., Jr., Samways, N. L., Craven, R. F. y McGannon, H. E. ***The Making, Shaping, and Treating of Steel***, 10a. ed. United States Steel Co., Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.

[9] ***Metals Handbook***, 10a. ed., vol. **1,** ***Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys***. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[10] ***Metals Handbook***, 10a. ed., vol. **2,** ***Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials,*** ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.

[11] Moore, C. y Marshall, R. I. ***Steelmaking***. The Institute for Metals, The Bourne Press, Ltd., Bournemouth, U. K., 1991.

[12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook***, 4a. ed., vol. **3,** ***Materials, Finishing, and Coating***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

6.1. ¿Cuáles son algunas de las propiedades generales que distinguen a los metales de los materiales cerámicos y polímeros?

6.2. ¿Cuáles son los dos grupos principales de metales? Defínalos.

6.3. ¿Qué es una aleación?

6.4. ¿Qué es una solución sólida en el contexto de las aleaciones?

6.5. Diga la diferencia entre una solución sólida sustitucional y otra intersticial.

6.6. ¿Qué es una fase intermedia en el contexto de las aleaciones?

6.7. El sistema cobre-níquel es un sistema de aleación sencillo, como lo indica su diagrama de fase. ¿Por qué es tan sencillo?

6.8. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como acero a una aleación de hierro-carbono?

6.9. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como hierro colado a una aleación de hierro-carbono?

6.10. Identifique algunos de los elementos comunes de aleación, además del carbono, en los aceros de baja aleación.

6.11. ¿Cuáles son algunos de los mecanismos por medio de los que los elementos de aleación diferentes del carbono dan resistencia al acero?

6.12. ¿Cuál es el mecanismo por el que el carbono da resistencia al acero en ausencia de tratamiento térmico?

6.13. ¿Cuál es el elemento de aleación predominante en todos los aceros inoxidables?

6.14. ¿Por qué se llama así el acero inoxidable austenítico?

6.15. Además del alto contenido de carbono, ¿qué otros elementos de aleación son característicos del hierro colado?

6.16. Identifique algunas de las propiedades por las que es notable el aluminio.

6.17. ¿Cuáles son algunas de las propiedades más destacadas del magnesio?

6.18. ¿Cuál es la propiedad del cobre más importante para la ingeniería y que determina la mayor parte de sus aplicaciones?

6.19. ¿Cuáles elementos se alean por tradición con el cobre para formar *a*) bronce, y *b*) latón?

6.20. ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes del níquel?

6.21. ¿Cuáles son las propiedades más notables del titanio?

6.22. Mencione algunas de las aplicaciones importantes del zinc.

6.23. ¿Cuál es la aleación importante que se forma con plomo y estaño?

6.24. *a*) Mencione los metales refractarios importantes. *b*) ¿Qué significa el término refractario?

6.25. *a*) Diga los cuatro metales nobles principales. *b*) ¿Por qué se les llama metales nobles?

6.26. Las superaleaciones se dividen en tres grupos básicos, de acuerdo con el metal base que se utiliza en la aleación. Mencione los grupos.

6.27. ¿Qué es lo que tienen de especial las superaleaciones? ¿Qué las distingue de las demás?

6.28. ¿Cuáles son los tres métodos básicos por medio de los cuales puede darse resistencia a los metales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

6.1. ¿Cuáles de las propiedades o características siguientes son inconsistentes con los metales? (dos respuestas correctas): *a*) buena conductividad térmica, *b*) resistencia elevada, *c*) resistividad eléctrica alta, *d*) mucha rigidez, o *e*) enlace iónico.

6.2. ¿Cuál de los elementos metálicos es el más abundante en la Tierra?: *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) hierro, *d*) magnesio, *e*) silicio.

6.3. ¿Cuál de las siguientes es la fase predominante en el sistema de la aleación hierro-carbono para una composición con el 99% de Fe a temperatura ambiente?: *a*) austenita, *b*) cementita, *c*) delta, *d*) ferrita, o *e*) gama.

6.4. ¿Un acero con el 1.0% de carbono se conoce como cuál de los siguientes?: *a*) eutectoide, *b*) hipoeutectoide, *c*) hipereutectoide, o *d*) hierro forjado.

6.5. ¿Al incrementarse su contenido de carbono, la resistencia y dureza del acero, *a*) aumenta o *b*) disminuye?

6.6. ¿En el sistema del código AISI cómo se especifican los aceros simples al carbono?: *a*) 01XX, *b*) 10XX, *c*) 11XX, *d*) 12XX, o *e*) 30XX.

6.7. ¿Cuál de los elementos siguientes es el ingrediente de aleación más importante en el acero?: *a*) carbono, *b*) cromo, *c*) níquel, *d*) molibdeno, o *e*) vanadio.

6.8. ¿Cuál de los siguientes no es un ingrediente de aleación común del acero?: *a*) cromo, *b*) manganeso, *c*) níquel, *d*) vanadio, *e*) zinc.

6.9. Las aleaciones de solución sólida son el mecanismo principal para dar resistencia a los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA): ¿*a*) verdadero, o *b*) falso?

6.10. ¿Cuáles de los elementos de aleación siguientes se asocian más comúnmente con el acero inoxidable? (dos respuestas mejores): *a*) cromo, *b*) manganeso, *c*) molibdeno, *d*) níquel, y *e*) tungsteno.

6.11. ¿Cuál de los siguientes es el hierro colado de mayor importancia comercial?: *a*) hierro colado dúctil, *b*) hierro colado gris, *c*) hierro maleable, *d*) hierro colado blanco.

6.12. ¿Cuál de los metales que siguen tiene la densidad más baja?: *a*) aluminio, *b*) magnesio, *c*) estaño, o *d*) titanio.

6.13. ¿Cuál de los metales siguientes tiene la densidad más alta?: *a*) oro, *b*) plomo, *c*) platino, *d*) plata, o *e*) tungsteno.

6.14. ¿De cuál de los siguientes minerales se deriva el aluminio? *a*) alúmina, *b*) bauxita, *c*) cementita, *d*) hematita, o *e*) scheelita.

6.15. ¿Cuál de los metales que siguen es notable por su buena conductividad eléctrica? (hay una respuesta que es la mejor): *a*) cobre, *b*) oro, *c*) hierro, *d*) níquel, o *e*) tungsteno.

6.16. El latón tradicional es una aleación de cuál de los elementos metálicos siguientes (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) oro, *d*) estaño, *e*) zinc.

6.17. ¿Cuál de los metales que siguen tiene el punto de fusión más bajo?: *a*) aluminio, *b*) plomo, *c*) magnesio, *d*) estaño, o *e*) zinc.

PROBLEMAS

6.1. Para el diagrama de fase cobre-níquel de la figura 6.2, encuentre las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 70% de Ni y 30% de Cu, a 1 371 °C (2 500 °F).

6.2. Para el problema anterior, utilice la regla de la palanca inversa para determinar las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.3. Con el diagrama de fase plomo-estaño de la figura 6.3, determine las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 40% de Sn y 60% de Pb, a 204 ºC (400 ºF).

6.4. Para el problema anterior, utilice la regla de la palanca inversa para calcular las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.5. Con el diagrama de fase plomo-estaño de la figura 6.3, determine las composiciones de las fases líquida y sólida para una composición nominal de 90% de Sn y 10% de Pb a 204 ºC (400 ºF).

6.6. Para el problema anterior, use la regla de la palanca inversa para encontrar las proporciones de las fases líquida y sólida presentes en la aleación.

6.7. En el diagrama de fase hierro-carburo de hierro de la figura 6.4, identifique la fase o fases presentes en las temperaturas siguientes y las composiciones nominales: *a*) 650 ºC (1 200 ºF) y 2% de Fe_3C, *b*) 760 ºC (1 400 ºF) y 2% de Fe_3C, y *c*) 1 095 °C (2 000 ºF) y 1% de Fe_3C.

7 CERÁMICOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

7.1 Estructura y propiedades de los materiales cerámicos
- 7.1.1 Propiedades mecánicas
- 7.1.2 Propiedades físicas

7.2 Cerámicos tradicionales
- 7.2.1 Materias primas
- 7.2.2 Productos cerámicos tradicionales

7.3 Nuevos materiales cerámicos
- 7.3.1 Óxidos cerámicos
- 7.3.2 Carburos
- 7.3.3 Nitruros

7.4 Vidrio
- 7.4.1 Química y propiedades del vidrio
- 7.4.2 Productos de vidrio
- 7.4.3 Vidrios-cerámicos

7.5 Algunos elementos importantes relacionados con los cerámicos
- 7.5.1 Carbono
- 7.5.2 Silicio
- 7.5.3 Boro

7.6 Guía para el procesamiento de los materiales cerámicos

Por lo general se considera que los metales son la clase más importante de materiales de la ingeniería. Sin embargo, es de interés observar que en realidad los materiales cerámicos son más abundantes y se utilizan más. En esta categoría se encuentran incluidos los productos de arcilla (por ejemplo, ladrillos y vajillas), vidrio, cemento y materiales cerámicos más modernos tales como el carburo de tungsteno y el nitruro cúbico de boro. Ésta es la clase de materiales que se estudia en este capítulo. También se incluye el análisis de varios elementos relacionados con los materiales cerámicos porque en ocasiones se les usa en aplicaciones similares. Estos elementos son el carbono, silicio y boro.

La importancia de los cerámicos como materiales de la ingeniería se deriva de su abundancia en la naturaleza y sus propiedades mecánicas y físicas, que son muy diferentes de las de los metales. Un material ***cerámico*** es un compuesto inorgánico que consiste en un metal (o semimetal) y uno o más no metales. La palabra ***cerámica*** proviene del griego ***keramos***, que significa arcilla de vasijas o trastos hechos de barro* cocido. Los ejemplos importantes de

* El término en inglés es ***clay***, arcilla. Los materiales arcillosos forman barro si se mojan, término que se emplea en el habla coloquial; en el mundo profesional se habla de arcillas; en el mundo de los artesanos se dice que el barro se cuece y la cerámica más artística o la porcelana se hornea. N. del T.

TABLA 7.1 Elementos más comunes de la corteza terrestre, con sus porcentajes aproximados.

Oxígeno	Silicio	Aluminio	Hierro	Calcio	Sodio	Potasio	Magnesio
50%	26%	7.6%	4.7%	3.5%	2.7%	2.6%	2.0%

Recopilada a partir de la referencia [5].

materiales importantes son el ***sílice***, o dióxido de silicio (SiO_2), ingrediente principal de la mayoría de los productos de vidrio, la ***alúmina***, u óxido de aluminio (Al_2O_3), que se utilizan en aplicaciones que van de abrasivos a huesos artificiales; y compuestos más complejos tales como el silicato de aluminio hidratado ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), conocido como ***caolinita***, ingrediente principal de la mayoría de los productos de arcilla. Los elementos de estos compuestos son los más comunes en la corteza terrestre, véase la tabla 7.1. El grupo incluye muchos compuestos adicionales, algunos de los cuales ocurren de manera natural, en tanto que otros son manufacturados.

Las propiedades generales que hacen a los materiales cerámicos útiles para los productos de ingeniería son la alta dureza, características buenas de aislamiento térmico y eléctrico, estabilidad química y temperaturas de fusión elevadas. Algunos cerámicos son traslúcidos; el ejemplo más claro es el vidrio para ventanas. También son frágiles y virtualmente no poseen ductilidad, lo que causa problemas tanto en su procesamiento como en su desempeño.

La importancia tecnológica y comercial de los materiales cerámicos queda demostrada por la variedad de productos y aplicaciones que se basan en esa clase de materiales. La lista incluye los siguientes:

- ***Productos de arcilla para la construcción,*** tales como ladrillos, tubos de arcilla y mosaicos para la construcción.
- ***Cerámicos refractarios,*** capaces de utilizarse en aplicaciones de alta temperatura tales como muros de hornos, crisoles y moldes.
- ***Cemento para concreto,*** se emplea para la construcción y carreteras (el concreto es un material compuesto, pero sus componentes son materiales cerámicos).
- ***Productos de línea blanca,*** incluyen vajillas, cerámica de gres, porcelana china, fina y otros artículos de mesa, con base en mezclas de arcilla y otros minerales.
- ***Vidrio,*** se utiliza en botellas, anteojos, lentes, cubiertas para ventanas y focos.
- ***Fibras de vidrio,*** para lana aislante térmica, plásticos reforzados (fibra de vidrio) y líneas de comunicación de fibras ópticas.
- ***Abrasivos,*** tales como óxido de aluminio y carburo de silicio.
- ***Herramientas para cortar materiales,*** que incluyen carburo de tungsteno, óxido de aluminio y nitruro de boro cúbico.
- ***Aislantes cerámicos,*** que se emplean en aplicaciones tales como componentes de transmisión eléctrica, encendedores y sustratos de chips para la microelectrónica.
- ***Cerámicos magnéticos,*** por ejemplo, en memorias de computadora.
- ***Combustibles nucleares,*** con base en óxido de uranio (UO_2).
- ***Biocerámicas,*** incluyen materiales que se usan para hacer dientes y huesos artificiales.

Para fines de organización, los materiales cerámicos se clasifican en tres tipos básicos: 1) ***cerámicos tradicionales***, silicatos que se emplean en productos de arcilla tales como vasijas y ladrillos, abrasivos comunes y cemento; 2) ***nuevos cerámicos***, creados recientemente con base en materiales que no son silicatos, tales como óxidos y carburos, y que por lo general poseen propiedades mecánicas o físicas que los hacen superiores o únicos si se les compara con los cerámicos tradicionales; y 3) ***vidrios***, con base sobre todo en sílice y que se distinguen de otros cerámicos por su estructura no cristalina. Además de los tres tipos básicos, se tienen ***vidrio-cerámicos***, vidrios que han sido transformados en una estructura cristalina grande por medio del tratamiento térmico.

7.1 ESTRUCTURA Y PROPIEDADES DE LOS CERÁMICOS

Los compuestos cerámicos se caracterizan por tener enlaces covalentes e iónicos. Éstos son más fuertes que los enlaces metálicos de los metales, lo que ayuda a la dureza y rigidez altas pero ductilidad baja de los materiales cerámicos. Así como la presencia de electrones libres en el enlace metálico explica el porqué los metales son buenos conductores del calor y la electricidad, la presencia de electrones estrechamente empacados en las moléculas de las cerámicas explica el que estos materiales sean malos conductores. El enlace fuerte también da a estos materiales temperaturas de fusión altas, aunque en este caso algunas cerámicas se descomponen, en lugar de fundirse.

La mayoría de los materiales cerámicos adoptan estructura cristalina. Por lo general, sus estructuras son más complejas que las de la mayoría de los metales. Hay varias razones para ello. En primer lugar, las moléculas de los cerámicos consisten en general en átomos que son de tamaño significativamente distinto. En segundo, es frecuente que las cargas de los iones sean muy diferentes, como en muchas de los cerámicos comunes tales como el SiO_2 y el Al_2O_3. Estos dos factores tienden a forzar un arreglo físico más complicado de los átomos de la molécula y en la estructura cristalina resultante. Además, muchos materiales cerámicos consisten en más de dos elementos, tales como el $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$, lo que también lleva a una complejidad mayor de la estructura molecular. Las cerámicas cristalinas son cristales aislados o sustancias policristalinas. En la segunda forma, más común, las propiedades físicas y mecánicas se ven afectadas por el tamaño del grano; los materiales de grano fino alcanzan resistencia y rigidez mayores.

Algunos materiales cerámicos tienden a adoptar una estructura amorfa o fase ***vítrea***, en vez de la forma cristalina. El ejemplo más familiar es, por supuesto, el vidrio. En cuanto a su química, la mayor parte de vidrios consisten en sílice fundido. Si se agregan otros materiales cerámicos vítreos tales como óxidos de aluminio, boro, calcio y magnesio, se obtienen variaciones de sus propiedades y colores. Además de estos vidrios puros, muchos cerámicos que tienen una estructura cristalina aprovechan la fase vítrea como aglutinante para su fase cristalina.

7.1.1 Propiedades mecánicas

En el capítulo 3 se presentaron las propiedades mecánicas básicas de los cerámicos. Los materiales cerámicos son rígidos y frágiles, muestran un comportamiento esfuerzo-deformación caracterizado como perfectamente elástico [véase la figura 3.6*a*)]. Como se ve en la tabla 7.2, los módulos de dureza y elasticidad de muchos materiales cerámicos nuevos son mayores que los de los metales (véanse las tablas 3.1, 3.6 y 3.7). La rigidez y dureza de los cerámicos y vidrios tradicionales son significativamente menores que las de los nuevos.

En teoría, la resistencia de los materiales cerámicos debiera ser más alta que la de los metales debido a su enlace atómico. Los tipos de enlace covalente e iónico son más fuertes que el metálico. Sin embargo, el enlace metálico tiene la ventaja de que permite el deslizamiento, mecanismo básico por el que los metales se deforman plásticamente cuando se les sujeta a esfuerzos elevados. Los enlaces en los materiales cerámicos son más rígidos y no permiten el deslizamiento ante esfuerzos. Su incapacidad para deslizarse hace mucho más difícil que los cerámicos absorban esfuerzos. Pero los materiales cerámicos contienen las mismas imperfecciones en su estructura cristalina que los metales: vacíos, intersticios, átomos desplazados y grietas microscópicas. Estos defectos internos tienden a concentrar los esfuerzos, en especial cuando se involucra una carga por tensión, flexión o impacto. Como resultado de estos factores, los cerámicos fallan con mucha mayor facilidad que los metales por fractura quebradiza si se les aplica una fuerza. Su resistencia a la tensión y tenacidad es relativamente baja. Asimismo, su desempeño es mucho menos predecible debido a la naturaleza aleatoria de las imperfecciones y la influencia de las variaciones en su procesamiento, en especial en los productos elaborados con cerámicos tradicionales.

Las debilidades que limitan la resistencia a la tensión de los materiales cerámicos casi no se presentan cuando se aplican esfuerzos compresivos. Los materiales cerámicos son

TABLA 7.2 Propiedades físicas y mecánicas seleccionadas de materiales cerámicos.

Material	Dureza (Vickers)	Módulo de elasticidad, *E*		Gravedad específica	Temperatura de fusión	
		Gpa	(lb/in^2)		°C	°F
Cerámicos tradicionales						
Ladrillos-barro cocido	N.A.	95	14×10^6	2.3	N.A.	N.A.
Cemento, Pórtland	N.A.	50	7×10^6	2.4	N.A.	N.A.
Carburo de silicio (SiC)	2 600 HV	460	68×10^6	3.2	2 700 [a]	4 892 [a]
Cerámicos nuevos						
Alúmina (Al_2O_3)	2 200 HV	345	50×10^6	3.8	2 054	3 729
Nitruro de boro cúbico (cBN)	6 000 HV	N.A.	N.A.	2.3	3 000 [a]	5 430 [a]
Carburo de titanio (TiC)	3 200 HV	300	45×10^6	4.9	3 250	5 880
Carburo de tungsteno (WC)	2 600 HV	700	100×10^6	15.6	2 870	5 198
Vidrio						
Vidrio de sílice (SiO_2)	500 HV	69	10×10^6	2.2	[b]	[b]

Recopilado a partir de las referencias [2], [3], [4], [5], [8], [9], y otras fuentes. Leyenda: N.A. = No disponible o no aplicable.

[a] Los materiales cerámicos se disocian químicamente o, en el caso del diamante y el grafito, se subliman (vaporizan), en lugar de fundirse.

[b] El vidrio, al no ser cristalino, no se funde al alcanzar un punto de fusión específico. En vez de ello, ante el aumento de temperatura desarrolla en forma gradual propiedades de fluido. Se vuelve líquido alrededor de 1 400 ºC (2 500 ºF).

sustancialmente más fuertes ante la compresión que ante la tensión. Para aplicaciones de ingeniería y estructurales, los diseñadores han aprendido a usar componentes cerámicos de modo que reciban por compresión en lugar de por tensión o flexión.

Se han creado varios métodos para dar resistencia a los materiales cerámicos, casi todos ellos tienen el enfoque fundamental de minimizar la superficie, los defectos internos y sus efectos. Estos métodos incluyen [6]: 1) hacer que los materiales de inicio sean más uniformes; 2) disminuir el tamaño del grano en los productos cerámicos policristalina; 3) minimizar la porosidad; 4) introducir esfuerzos superficiales a la compresión; por ejemplo, a través de aplicar el glaseado (vidriado) con expansiones térmicas bajas, de modo que el cuerpo del producto se contraiga después de arder más que el glaseado, lo que haría que éste actuara a la compresión; 5) utilizar fibras de refuerzo; y 6) tratamientos térmicos, tales como el templado de la alúmina a temperaturas que casi están en la región plástica, para darles resistencia.

7.1.2 Propiedades físicas

En la tabla 7.2 se presentan varias propiedades físicas de los cerámicos. La mayor parte de esos materiales son más ligeros que los metales y más pesados que los polímeros (véase la tabla 4.1). Las temperaturas de fusión son mayores que las de la mayoría de los metales, y algunos materiales cerámicos se descomponen en lugar de fundirse.

Las conductividades térmica y eléctrica de la mayoría de los cerámicos son menores que las de los metales; pero el rango de valores es mayor, lo que permite que ciertos cerámicos se utilicen como aislantes, en tanto que otras son conductores eléctricos. Sus coeficientes de expansión térmica son algo menores que los de los metales, pero los efectos son más dañinos en los cerámicos debido a su fragilidad. Los materiales cerámicos con conductividades térmicas bajas y expansiones térmicas relativamente altas, son susceptibles en especial a fallas de ese tipo, lo que resulta de gradientes de temperatura y cambios volumétricos significativos en regiones diferentes de la misma pieza. Los términos ***choque térmico*** y ***agrietamiento térmico*** se emplean en relación con esas fallas. Ciertos vidrios (por ejemplo los que contienen proporciones elevadas de SiO_2) y cerámicos vítreos son notables debido a su expansión térmica baja y son resistentes en particular a las fallas térmicas (un ejemplo familiar es el vidrio ***Pirex***).

7.2 CERÁMICOS TRADICIONALES

Estos materiales se basan en silicatos minerales, sílice y óxidos minerales. Los productos principales son el barro cocido (vasijas, vajillas, ladrillos y mosaicos), cemento y abrasivos naturales tales como la alúmina. Estos productos, y los procesos que se utilizan para fabricarlos, se remontan a miles de años (véase la nota histórica 7.1). El vidrio también es un material cerámico y con frecuencia se le incluye en el grupo de los materiales cerámicos tradicionales [3], [5]. En una sección posterior se estudia al vidrio debido a que su estructura vítrea o amorfa lo diferencia de los materiales cristalinos mencionados (el término ***vítreo*** significa vidrioso, o que posee características del vidrio).

Nota histórica 7.1 *Cerámicas antiguas*

Desde los tiempos de las primeras civilizaciones, la fabricación de cerámica ha sido un arte. Los arqueólogos examinan las vasijas antiguas y artefactos similares para estudiar las culturas del mundo antiguo. Las vasijas de cerámica no se corroen o desintegran con la edad, como sí lo hacen los artefactos de madera, metal o tela.

De algún modo, las primeras tribus descubrieron que la arcilla se transformaba en un material sólido y duro cuando se le colocaba cerca del fuego. En el Oriente Medio se han hallado artículos de barro cocido que datan de hace casi 10 000 años. En Egipto, alrededor de 4000 a.C., las vasijas de barro y productos similares formaban un comercio establecido.

Los avances mayores en la fabricación de vasijas tuvieron lugar en China, donde en una época tan temprana como 1400 a.C. se elaboraron por primera vez artículos de cerámica blanca. Hacia el siglo noveno, los chinos fabricaban objetos de porcelana, que se cocía a temperaturas más elevadas que el barro o la piedra, a fin de dar un vitrificado parcial a la mezcla más compleja de materias primas y hacer que el producto final tuviera una capa superficial translúcida. En Europa eran muy valoradas las vajillas de porcelana china; las denominaban "China". Contribuyeron mucho al comercio entre China y Europa e influyeron en el desarrollo de la cultura europea.

7.2.1 Materias primas

Los silicatos minerales, tales como las arcillas de distintas composiciones, y el sílice, como el cuarzo, se encuentran entre las sustancias más abundantes en la naturaleza, y constituyen las materias primas principales de los materiales cerámicos tradicionales. Estos compuestos sólidos cristalinos se formaron y mezclaron en la corteza terrestre a lo largo de millones de años, por medio de procesos geológicos complejos.

Las arcillas son las materias primas que se emplean más en los cerámicos. Consisten en partículas finas de silicatos de aluminio hidratados que se transforman en una sustancia plástica deformable y moldeable si se les mezcla con agua. Las arcillas más comunes se basan en el mineral ***caolinita*** ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$). La composición de otros minerales de arcilla varía tanto en proporciones como en ingredientes básicos y contenido de otros elementos tales como magnesio, sodio y potasio.

Además de la plasticidad que adquiere cuando se mezcla con agua, una segunda característica de la arcilla que la hace muy útil, es que se convierte en un material fuerte y denso cuando se calienta a una temperatura suficientemente elevada. El tratamiento con calor se conoce como ***cocimiento***. Las temperaturas que son adecuadas para el cocimiento dependen de la composición de la arcilla. Así, puede darse forma a la arcilla cuando está húmeda y suave, y luego se cuece para obtener el producto final de cerámica dura.

El ***sílice*** (SiO_2) es otra materia prima importante para los cerámicos tradicionales. Es el componente principal del vidrio e ingrediente principal de otros productos de cerámica que incluyen vajillas, refractarios y abrasivos. El sílice existe en la naturaleza en varias formas, la más importante de ellas es el ***cuarzo***. La fuente principal del cuarzo es la ***arenisca***. La abundancia de arenisca y la facilidad relativa de su procesamiento significan

que el costo del sílice es bajo; también es duro y de química estable. A estas características se debe su uso tan extenso en los productos cerámicos. Por lo general se mezcla en proporciones distintas con arcilla y otros minerales a fin de obtener características apropiadas en el producto final. El ***feldespato*** es otro de los minerales que se emplea con frecuencia. El feldespato es cualquiera de varios minerales cristalinos que consisten en silicato de aluminio combinado con cualquiera de los elementos potasio, sodio, calcio o bario. Por ejemplo mezclado con potasio tiene la composición $KAlSi_3O_8$. Las mezclas de arcilla, sílice y feldespato se utilizan para fabricar vasijas, porcelana y otros artículos de comedor.

Otra materia prima importante para los cerámicos tradicionales es la ***alúmina***. La mayor parte de ésta se procesa a partir del mineral ***bauxita***, que es una mezcla impura de óxido de aluminio hidratado e hidróxido de aluminio más componentes similares de hierro y manganeso. La bauxita también es la mena principal para producir aluminio metálico. Una forma más pura pero menos común del Al_2O_3 es el mineral ***corundo***, que contiene alúmina en cantidades masivas. Las gemas llamadas zafiro y rubí son formas ligeramente impuras de cristales de corundo. La cerámica de alúmina se emplea como abrasivo en esmeriles y como ladrillos refractarios para hornos.

El ***carburo de silicio***, otra cerámica que se emplea mucho como abrasivo, no ocurre en forma de mineral. En vez de ello se produce con el calentamiento de mezclas de arena (fuente de silicio) y coque (carbón) a una temperatura de alrededor de 2 200 ºC (3 900 ºF), por lo que la reacción química resultante forma SiC y monóxido de carbono.

7.2.2 Productos cerámicos tradicionales

Los minerales estudiados antes son los ingredientes de una variedad de productos cerámicos. El estudio en este texto está organizado por categorías principales de los productos cerámicos tradicionales. En la tabla 7.3 se presenta un resumen de ellos y los materiales cerámicos de que están elaborados. El análisis se limita a los materiales que se usan en forma común con productos manufacturados, con lo que se omiten ciertos cerámicos de importancia comercial, como el cemento.

Vasijas y vajillas Esta categoría es una de las más antiguas, tiene miles de años de antigüedad; aún es una de las más importantes. Incluye productos de vajillas que toda la gente usa: vasijas de barro, cerámica de gres y porcelana. La materia prima de estos productos es la arcilla, por lo general combinada con otros minerales tales como sílice y feldespato. A la mezcla húmeda se le da forma y después se cuece para producir la pieza terminada.

La de ***barro*** es la menos refinada del grupo; incluye vasijas y productos similares hechos en tiempos antiguos. La de barro es relativamente porosa y con frecuencia glaseado. El ***glaseado*** involucra la aplicación de un recubrimiento superficial, por lo general una mezcla de óxidos tales como sílice y alúmina, para hacer que el producto sea menos permeable a la humedad y más atractivo a la vista. La ***cerámica de gres*** tiene menor porosidad que el barro, lo que resulta de un control más estrecho de los ingredientes y temperaturas

TABLA 7.3 Resumen de productos de cerámica tradicional.

Producto	Compuesto químico principal	Minerales y materias primas
Vasijas, vajillas	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2, $KAlSi_3O_8$	Arcilla + sílice + feldespato
Porcelana	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2, $KAlSi_3O_8$	Arcilla + sílice + feldespato
Ladrillos, mosaicos	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$, SiO_2 más piedras finas	Arcilla + sílice + otros
Refractarios	Al_2O_3, SiO_2. Otros: MgO, CaO	Alúmina y sílice
Abrasivos: carburo de silicio	SiC	Sílice + coque
Abrasivos: óxido de aluminio	Al_2O_3	Bauxita o alúmina

de cocción más elevadas. La ***porcelana*** se hornea a temperaturas aún mayores, lo que da a las piezas terminadas una superficie translúcida característica de su alta calidad. La razón de esto es que gran parte del material cerámico ha sido convertido a la fase vítrea (se ha vitrificado), lo que lo hace transparente en comparación con la forma policristalina. La porcelana moderna casi es la misma que la de China, y se produce por medio de hornear los componentes, sobre todo arcilla, sílice y feldespato, a temperaturas aún más elevadas para obtener un material vítreo, denso y muy duro. La porcelana se utiliza en una variedad de productos que van del aislamiento eléctrico a los recubrimientos de bañeras.

Ladrillos y azulejos Los ladrillos para la construcción, tubería de arcilla, tejas no glaseadas para techos y mosaicos para drenajes, están hechos de distintas arcillas de bajo costo que contienen sílice y materiales arenosos que existen en depósitos naturales distribuidos con amplitud. Estos productos reciben su forma por presión (moldeo) y se cuecen a temperaturas relativamente bajas.

Refractarios Los refractarios cerámicos con frecuencia tienen la forma de ladrillos, son críticos en muchos procesos industriales que requieren de hornos y crisoles para calentar o fundir materiales. Las propiedades útiles de los materiales refractarios son su resistencia a las temperaturas elevadas, aislamiento térmico y resistencia a la reacción química con los materiales que se hornean (por lo general metales fundidos). Como se dijo, no es raro que la alúmina se utilice como cerámica refractaria, junto con el sílice. Otros materiales refractarios incluyen los óxidos de magnesio (MgO) y de calcio (CaO). Es frecuente que la superficie refractaria tenga dos capas, y que la exterior sea más porosa porque eso incrementa las propiedades de aislamiento.

Abrasivos Los cerámicos tradicionales que se emplean para hacer productos abrasivos tales como ruedas de esmeril y papel de lija son la ***alúmina*** y el ***carburo de silicio***. Aunque el SiC es más duro que aquélla (la dureza del SiC es 2 600 HV *versus* 2 200 HV de la alúmina), la mayoría de esmeriles se basan en Al_2O_3 debido a que da mejores resultados cuando se rebaja acero, que es el metal más usado. Las partículas abrasivas (granos de cerámica) se distribuyen en la rueda por medio de algún material aglutinante como laca, resinas de polímeros o caucho. El uso de abrasivos en la industria involucra la remoción de material, y la tecnología de los esmeriles y otros métodos de abrasión para retirar material se presenta en el capítulo 25.

7.3 NUEVOS MATERIALES CERÁMICOS

El término ***nuevos cerámicos*** se refiere a materiales cerámicos creados en forma sintética durante las décadas recientes, y por medio de mejoras en las técnicas de procesamiento que dan un control mayor sobre las estructuras y propiedades de los cerámicos. En general, los nuevos cerámicos se basan en compuestos distintos de silicato de aluminio en cantidades variables (el que constituye el grueso de los materiales cerámicos tradicionales). Los nuevos cerámicos son por lo general más sencillos en cuanto a su química que los tradicionales; por ejemplo, óxidos, carburos, nitruros y boruros. La línea divisoria entre los cerámicos tradicionales y los nuevos algunas veces no es muy clara, debido a que los primeros incluyen al óxido de aluminio y al carburo de silicio. En esos casos, la diferencia se basa más en los métodos de procesamiento que en la composición química.

Los nuevos cerámicos se organizan en categorías según su composición química: óxidos, carburos y nitruros, que se estudian en las secciones siguientes. En las referencias [2], [4] y [7] se hace un análisis más completo de los nuevos cerámicos.

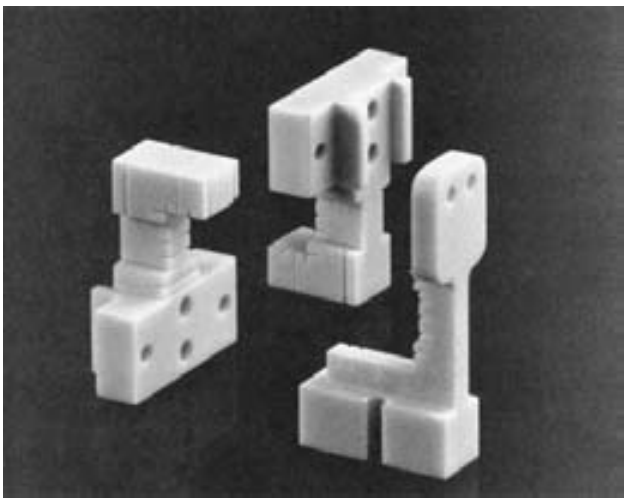


FIGURA 7.1 Componentes cerámicos de alúmina. (Fotografía por cortesía de Insaco Inc.)

7.3.1 Óxidos cerámicos

El óxido más importante de los nuevos cerámicos es la ***alúmina***. Aunque también se le estudia en el contexto de los cerámicos tradicionales, hoy día la alúmina se produce en forma sintética a partir de la bauxita, con un método de horno eléctrico. Por medio del control del tamaño de las partículas e impurezas, mejoras en los métodos de refinación y la mezcla de cantidades pequeñas de otros ingredientes cerámicos, se mejora en forma sustancial la resistencia e inflexibilidad de la alúmina, en comparación con su contraparte natural. La alúmina también tiene buena dureza en caliente, baja conductividad térmica y alta resistencia a la corrosión. Ésta es una combinación de propiedades que estimulan una variedad de aplicaciones, inclusive [12]: abrasivos (esmeriles de arena), biocerámicos (huesos y dientes artificiales), aislantes eléctricos, componentes electrónicos, ingredientes de aleación del vidrio, ladrillos refractarios, insertos para herramientas de corte (véase la sección 23.2.5), aislante de bujía y componentes de ingeniería (véase la figura 7.1).

7.3.2 Carburos

Los carburos cerámicos incluyen los carburos de silicio (SiC), tungsteno (WC), titanio (TiC), tantalio (TaC) y cromo (Cr_3C_2). El carburo de silicio ya se estudió. Aunque es un cerámico hecho por el hombre, los métodos para su producción se desarrollaron hace un siglo, y por ello generalmente se le incluye en el grupo de los cerámicos tradicionales. Además de su empleo como abrasivo, otras aplicaciones del SiC incluyen elementos de resistencia al calentamiento y aditivos para la fabricación de acero.

Se valora al WC, TiC y TaC, por su dureza y resistencia al desgaste en herramientas de corte y otras aplicaciones que requieren de esas propiedades. El ***carburo de tungsteno*** fue el primero que se creó (véase la nota histórica 7.2) y es el material más importante y de mayor uso de su grupo. El WC se produce en forma común por medio de carburar polvos de tungsteno que han sido reducidos a partir de minerales de tungsteno, tales como la ***wolframita*** ($FeMnWO_4$) y la scheelita ($CaWO_4$). El ***carburo de titanio*** se produce con la carburación de los minerales ***rutilo*** (TiO_2) o ***ilmenita*** ($FeTiO_3$). Y el ***carburo de tantalio*** se hace carburando ya sea polvos de tantalio o pentóxido de tantalio (Ta_2O_5) [10]. El ***carburo de cromo*** es más apropiado para aplicaciones en las que son importantes la estabilidad química y la resistencia a la oxidación. El Cr_3C_2 se prepara con la carburación del óxido de cromo (Cr_2O_3) como componente inicial. En todas estas reacciones la fuente usual de carbono es el negro de humo.

Nota histórica 7.2 *Carburo de tungsteno.*

El compuesto WC no se presenta en la naturaleza. Lo fabricó por primera vez el francés Henri Moissan a finales de la década de 1890. Sin embargo, la importancia tecnológica y comercial del suceso no se reconoció durante dos décadas.

A principios del siglo xx, el tungsteno se convirtió en un metal importante para los filamentos de las lámparas incandescentes. Se requería el estirado de alambres para producir los filamentos. Los troqueles de estirado de acero para herramientas de esa época eran insatisfactorios para obtener alambre de tungsteno debido al desgaste excesivo. Había necesidad de un material mucho más duro. Se sabía que el compuesto WC poseía dicha dureza. En 1914, en Alemania, H. Voigtlander y H. Lohmann crearon un proceso de fabricación para troqueles de estirado de carburo duro, con partes sinterizadas y prensadas a partir de polvos de carburo de tungsteno o carburo de molibdeno. Se da el crédito a Lohmann por ser quien hizo la primera producción comercial de carburos sinterizados.

El salto que condujo a la tecnología moderna de los carburos cementados se vincula con el trabajo de K. Schroter, en Alemania, en la primera mitad de la década de 1920. Utilizó polvos de WC mezclados con aproximadamente el 10% de un metal del grupo del hierro, y al final los colocaba sobre cobalto como el mejor aglutinante, y la mezcla se sinterizaba a una temperatura cercana al punto de fusión del metal. En 1926 se comercializó el material duro por primera vez en Alemania, como "Widia". Las patentes de Schroter se asignaron a General Electric Company con la marca de "Carboloy", que se produjo por vez primera en 1928 en Estados Unidos.

Widia y Carboloy se empleaban como materiales para herramientas de corte, con un contenido de cobalto de entre 4% y 13%. Eran eficaces para maquinar hierro fundido y muchos metales no ferrosos, pero no en el corte de acero. Cuando se maquinaba acero, las herramientas se desgastaban con rapidez por la formación de cráteres. Al comenzar la década de 1930, se crearon herramientas para cortar acero, a base de carburo con WC y TiC. En 1931, la compañía alemana Krupp comenzó la producción de Widia X, que tenía una composición de 84% de WC, 10% de TiC, y 6% de Co. Y en 1932 se introdujo a Estados Unidos el Carboloy Grado 831, que contenía 69% de WC, 21% de TiC y 10% de Co.

Excepto para el SiC, cada carburo de los que se estudian aquí debe combinarse con un aglutinante metálico como el cobalto o níquel, a fin de fabricar un producto sólido útil. En efecto, los polvos de carburo adheridos en una matriz metálica crean lo que se conoce como ***carburo cementado***, que es un material compuesto, se trata en específico de ***cermet*** (abreviación de ***cer***ámica y ***met***al). En la sección 9.2.1 se estudian los carburos cementados y otros cermets. Los carburos tienen poco valor para la ingeniería, excepto como constitutivos de un sistema compuesto.

7.3.3 Nitruros

Las nitruros importantes para los cerámicos son el de silicio (Si_3N_4), el de boro (BN) y el de titanio (TiN). Como grupo, las cerámicas de nitruros son duras y frágiles, y se funden a temperaturas altas (pero por lo general no tanto como las de los carburos). Lo normal es que sean aislantes eléctricos el TiN es una excepción.

El ***nitruro de silicio*** promete en aplicaciones estructurales de alta temperatura. El Si_3N_4 se oxida a alrededor de 1 200 ºC (2 125 ºF) y se descompone en cuanto a su química a los 1 900 ºC (3 400 ºF). Tiene baja expansión térmica, buena resistencia al choque y al agrietamiento térmicos, y resiste la corrosión de los metales no ferrosos fundidos. Estas propiedades hacen a este cerámico apto para aplicaciones en turbinas de gas, motores de cohete y crisoles para fundir.

El ***nitruro de boro*** existe en varias estructuras, en forma parecida al carbono. Las formas importantes del BN son 1) hexagonal, similar al grafito, y 2) cúbica, como el diamante; en realidad, su dureza es comparable a la del diamante. Esta última estructura se conoce con los nombres de ***nitruro de boro cúbico*** y ***borazon***, que se simboliza como cBN, y se produce por medio de calentar BN hexagonal en condiciones de presión muy elevada. Debido a su dureza extrema, las aplicaciones principales del cBN son en herramientas de corte (véase la sección 23.2.6) y los esmeriles (véase la sección 25.1.1). Es interesante que no compita con las herramientas de corte y esmeriles hechos de diamante. Éste es apropiado para maquinar y esmerilar lo que no sea acero, en tanto que el cBN es adecuado para trabajar el acero.

El ***nitruro de titanio*** tiene propiedades similares a las de los demás nitruros del grupo, excepto por su conductividad eléctrica, pues es conductor. El TiN tiene dureza elevada, buena resistencia al desgaste y bajo coeficiente de fricción con los metales ferrosos. Esta

combinación de propiedades hace que el TiN sea un material ideal como recubrimiento de superficies de herramientas de corte. El recubrimiento es de sólo alrededor de 0.006 mm (0.0003 in) de espesor, de modo que las cantidades de material que se utilizan para esta aplicación son bajas.

Un material cerámico nuevo relacionado con el grupo del nitruro, y también con los óxidos, es el cerámico de oxinitruro llamado ***sialon***. Consiste en los elementos silicio, aluminio, oxígeno y nitrógeno; y su nombre se deriva de ellos: Si-Al-O-N. Su composición química es variable, una común es $Si_4Al_2O_2N_6$. Las propiedades del sialon son similares a las del nitruro de silicio, pero resiste mejor que el Si_3N_4 la oxidación a temperaturas elevadas. Su aplicación principal es para herramientas de corte, pero sus propiedades lo hacen apropiado para otras aplicaciones de alta temperatura que se desarrollen en el futuro.

7.4 VIDRIO

El término ***vidrio*** es algo confuso porque describe tanto un estado de la materia como un tipo de cerámico. Como estado de la materia, se refiere a una estructura amorfa, no cristalina, de un material sólido. El estado vítreo ocurre en un material al que no se da tiempo suficiente para que al enfriarse a partir de la condición de fundido se forme la estructura cristalina. Se concluye que las tres categorías de los materiales de ingeniería (metales, cerámicos y polímeros) pueden adoptar el estado vítreo, aunque las circunstancias de los metales para ello son muy raras.

Como un tipo de cerámico, el ***vidrio*** es un compuesto inorgánico, no metálico (o mezcla de compuestos) que se enfría hasta adquirir una condición rígida sin cristalizar; es un cerámico que como material sólido está en estado vítreo. Éste es el material que se estudiará en esta sección, uno que se remonta a 4 500 años de antigüedad (véase la nota histórica 7.3).

Nota histórica 7.3 *Historia del vidrio*

Los especímenes más antiguos de vidrio datan de alrededor de 2500 a.C., son abalorios y otras formas sencillas encontradas en Mesopotamia y el antiguo Egipto. Se hicieron por medio de esculpir en forma meticulosa sólidos de vidrio, en lugar de moldear o dar forma a vidrio fundido. Fue hasta hace mil años que las culturas antiguas aprovecharon las propiedades fluidas del vidrio caliente, por medio de verterlo en capas sucesivas en un núcleo de arena hasta que el producto, un recipiente en forma de vaso, hubiera alcanzado espesor y rigidez suficientes. Esta técnica de vertido se empleaba alrededor del 200 a.C., cuando se inventó una herramienta simple que revolucionó el trabajo del vidrio: el soplete.

Es probable que el ***soplado del vidrio*** se realizara por vez primera en Babilonia y que después lo hicieran los romanos. Se hacía con el uso de un tubo de hierro de varios pies de largo, con una boquilla en un extremo y un aditamento para acomodar el vidrio fundido en el otro. Al final del tubo de hierro se colocaba una cantidad de vidrio caliente con la forma inicial y viscosidad que se requería, y luego un artesano soplaba para darle forma, ya fuera al aire o en una cavidad moldeadora. Se utilizaban otras herramientas sencillas que se agregaban al tubo o para darle una base al objeto.

Los romanos antiguos tenían gran habilidad en el uso de varios óxidos metálicos para dar color al vidrio. Su tecnología es evidente en los vitrales de catedrales e iglesias de la edad media en Italia y el resto de Europa. El arte de soplar vidrio aún se practica hoy día para ciertos artículos de consumo, y se emplean versiones automatizadas de soplado para la producción en masa de algunos productos tales como botellas y focos (véase el capítulo 12).

7.4.1 Química y propiedades del vidrio

El ingrediente principal en virtualmente todos los vidrios es el ***sílice*** (SiO_2), que se encuentra en forma común como cuarzo mineral en las areniscas y arenas sílicas. El cuarzo está presente en forma natural como sustancia cristalina, pero cuando se funde y luego se enfría,

TABLA 7.4 Composiciones comunes de productos de vidrio seleccionados.

Producto	Composición química (en peso, al % más cercano)								
	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	PbO	B_2O_3	Otros
Vidrio de cal y sosa	71	14	13	2					
Vidrio para ventanas	72	15	8	1	4				
Vidrio para envases	72	13	10	2[a]	2	1			
Vidrio para focos	73	17	5	1	4				
Vidrio de laboratorio:									
Vycor	96			1				3	
Pyrex	81	4		2				13	
Vidrio E (fibras)	54	1	17	15	4			9	
Vidrio S (fibras)	64			26	10				
Vidrios ópticos:									
Vidrio al Boro	67	8				12		12	ZnO
Vidrio al Plomo	46	3				6	45		

Recopilado a partir de las referencias [3], [4], [9] y de otras fuentes.
[a] Incluyen Fe_2O_3 con Al_2O_3

forma sílice vítreo. El vidrio de sílice tiene un coeficiente de expansión térmica muy bajo, y por ello es muy resistente al choque térmico. Estas propiedades son ideales para aplicaciones de temperaturas elevadas; en consecuencia, el vidrio Pirex y otros para uso químico que están diseñados para calentarlos, se fabrican con proporciones elevadas de vidrio de sílice.

A fin de reducir el punto de fusión del vidrio para hacer más fácil su procesamiento y controlar sus propiedades, la composición de la mayoría de vidrios comerciales incluye otros óxidos además de sílice. Éste permanece como el componente principal en esa clase de productos, por lo general entre el 50% y el 75% de los productos químicos totales. La razón de que en esos compuestos se utilice tanto el SiO_2 es porque es el mejor ***formador de vidrio***. Se transforma de manera natural en estado vítreo cuando se enfría desde el líquido, en tanto que la mayoría de los materiales cerámicos se cristalizan al solidificarse. En la tabla 7.4 se enlistan las composiciones químicas frecuentes de ciertos vidrios comunes. Los ingredientes adicionales están contenidos en una solución sólida con SiO_2, y cada uno tiene una función: 1) actuar como fundente (facilita la fundición) durante el calentamiento; 2) incrementar la fluidez del vidrio fundido para su procesamiento; 3) retardar la ***desvitrificación***, es decir, la tendencia a cristalizar desde el estado vítreo; 4) reducir la expansión térmica del producto final; 5) mejorar la resistencia química contra el ataque de ácidos, sustancias básicas o agua; 6) agregar color al vidrio, y 7) alterar el índice de refracción para aplicaciones ópticas (por ejemplo, lentes).

7.4.2 Productos de vidrio

A continuación se da una lista de las categorías principales de productos de vidrio. Al estudiarlos, se analiza el papel que juegan los distintos ingredientes mencionados en la tabla 7.4.

Vidrio para ventanas En la tabla 7.4, este vidrio está representado por dos composiciones químicas: 1) vidrio de cal y sosa cáustica y 2) vidrio para ventanas. La fórmula de cal y sosa cáustica se remonta a la industria del soplado de vidrio del siglo XIX, y aun antes. Se fabricaba (incluso hoy) mezclando sosa (Na_2O) y cal (CaO) con sílice (SiO_2) como el ingrediente principal. La combinación de ingredientes que se agregan ha tenido una evolución empírica hasta lograr un balance entre evitar la cristalización durante el enfriamiento y lograr la estabilidad química del producto final. Durante esta evolución, el vidrio moderno para ventanas y las técnicas para fabricarlo han requerido pocos ajustes en cuanto a su composición y control más estrecho. Se agrega magnesio (MgO) para que ayude a reducir la desvitrificación.

Envases En tiempos pasados, se usaba la misma composición de cal y sosa cáustica para el vidrio soplado en forma manual a fin de fabricar botellas y otros envases. Los procesos modernos para dar forma a los envases de vidrio, enfrían éste con más rapidez que los métodos antiguos. Asimismo, hoy día se entiende mejor la importancia de la estabilidad química de los envases de vidrio. Los cambios resultantes en la composición tratan de optimizar las proporciones de cal (CaO) y sosa (Na_2O_3). La cal facilita la fluidez. También incrementa la desvitrificación, pero como el enfriamiento es más rápido, este efecto no es tan importante como lo era para las técnicas de procesamiento anteriores, con tasas de enfriamiento más lentas. La reducción de la sosa disminuye la inestabilidad química y la solubilidad del vidrio del envase.

Vidrio para focos El vidrio que se usa para hacer focos y otros artículos de vidrio delgado (por ejemplo, copas, adornos navideños) tiene contenido alto de sosa y bajo de cal; también contiene cantidades pequeñas de magnesio y alúmina. La química está dictada en mucho por la economía de los volúmenes grandes que implica la manufactura de focos. Las materias primas no son caras en lo absoluto y sí apropiadas para los hornos de fundición continua que se utilizan en el presente.

Vidrio de laboratorio Estos productos incluyen contenedores para productos químicos (por ejemplo, matraces, vasos de precipitados, tubería de vidrio). Este vidrio debe ser resistente al ataque químico y el choque térmico. Es apropiado el vidrio con alto contenido de sílice debido a su baja expansión térmica. Para esta clase de vidrio se utiliza el nombre comercial de "Vycor". Este producto es muy insoluble en agua y ácidos. Al agregarle óxido bórico también produce un vidrio con coeficiente de expansión térmica bajo, por lo que algunos vidrios para laboratorio contienen alrededor de 13% de B_2O_3. Para el vidrio de borosilicato creado por Corning Glass Works, se emplea el nombre comercial "Pyrex". Tanto Vycor como Pyrex están incluidos en la lista de ejemplos de esta categoría de productos.

Fibras de vidrio Éstas se manufacturan para numerosas aplicaciones importantes, inclusive plásticos de fibra de vidrio reforzada, lana aislante y fibra óptica. Las composiciones varían de acuerdo con la función. Las fibras de vidrio que se usan más para reforzar plásticos son las de vidrio E. Tiene un contenido alto de CaO y Al_2O_3, es económico y en forma de fibra posee buena resistencia a la tensión. Otro material de fibra de vidrio es el vidrio S, que tiene resistencia mayor pero no es tan económico como el vidrio E. En la tabla 7.4 se indican las composiciones.

La lana aislante de fibra de vidrio se manufactura a partir de vidrios regulares de sosa-cal-sílice. El producto de vidrio para fibra óptica consiste en un núcleo largo y continuo de vidrio con índice de refracción elevado rodeado por una envoltura de vidrio de refracción baja. El vidrio interno debe tener una transmitancia muy alta para la luz a fin de realizar comunicaciones a larga distancia.

Vidrios ópticos Las aplicaciones para estos vidrios incluyen lentes para anteojos e instrumentos ópticos tales como cámaras, microscopios y telescopios. Para llevar a cabo su función, los vidrios deben tener índices de refracción distintos, pero cada uno de ellos debe ser de composición homogénea. Los vidrios ópticos por lo general se dividen en vidrios al boro y al plomo. El ***vidrio al boro*** tiene un índice de refracción bajo, en tanto que el ***vidrio al plomo*** contiene óxido de plomo (PbO) que le da un índice de refracción alto.

7.4.3 Vidrios-cerámicos

Los ***vidrios-cerámicos*** son una clase de material cerámico que se produce por la conversión de vidrio en una estructura policristalina por medio de tratamiento de calor. La proporción de la fase cristalina en el producto final por lo común varía entre 90% y 98%, y el resto es material vítreo sin convertir. Por lo general, el tamaño del grano está entre 0.1 y 1.0 μm (4 y 40 μ-in), lo que es significativamente menor que el tamaño del grano de las cerámicas convencionales. Esta microestructura fina hace que los vidrios-cerámicos sean

TABLA 7.5 Varios sistemas de vidrio-cerámico.

	Composición frecuente (al % más cercano)						
Sistema de vidrio-cerámico	Li_2O	MgO	Na_2O	BaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2
Li_2O-Al_2O_3-SiO_2	3				18	70	5
MgO-Al_2O_3-SiO_2		13			30	47	10
Na_2O-BaO-Al_2O_3-SiO_2			13	9	29	41	7

Recopilado a partir de las referencias [4], [5] y [9].

mucho más fuertes que los vidrios de los que se derivan. Asimismo, debido a su estructura cristalina, los vidrios-cerámicos son opacos (por lo general grises o blancos), y no claros.

La secuencia de procesamiento de los vidrios-cerámicos es la siguiente: 1) El primer paso incluye operaciones de calentamiento y formado que se emplean en el trabajo del vidrio (véase la sección 12.2) para crear la forma que se desea para el producto. Los métodos para dar forma al vidrio por lo general son más económicos que el prensado y el sinterizado para dar forma a los cerámicos tradicionales y nuevos a partir de polvos. 2) El producto se enfría. 3) Se vuelve a calentar el vidrio a una temperatura suficiente para ocasionar que se forme en todo el material una red densa de núcleos de cristales. Es esta densidad alta de los sitios de nucleación lo que inhibe el crecimiento de granos de cristales individuales, lo que en última instancia conduce al tamaño fino del grano del material del vidrio-cerámico. La clave para que ocurra la propensión a formar núcleos es la presencia de cantidades pequeñas de agentes nucleadores en la composición del vidrio. Los más comunes de éstos son el TiO_2, P_2O_5 y ZrO_2. 4) Una vez iniciada la nucleación, continúa el tratamiento térmico a una temperatura mayor para producir el crecimiento de las fases cristalinas.

En la tabla 7.5 se listan varios ejemplos de sistemas de vidrios-cerámicos y sus composiciones típicas. El de mayor importancia comercial es el sistema Li_2O-Al_2O_3-SiO_2; incluye el Corning Ware (Pyroceram), producto de Corning Glass Works que resulta familiar.

Las ventajas notables de los vidrio-cerámicos incluyen 1) la eficiencia de procesamiento en el estado vítreo, 2) control dimensional estrecho de la forma del producto final, y 3) buenas propiedades físicas y mecánicas. Éstas incluyen alta resistencia (mayor que la del vidrio), ausencia de porosidad, bajo coeficiente de expansión térmica y elevada resistencia al choque térmico. Estas propiedades dan como resultado aplicaciones para utensilios de cocina, intercambiadores de calor y misiles. Ciertos sistemas (por ejemplo, el de MgO-Al_2O_3-SiO_2) también se caracterizan por su resistencia eléctrica elevada, apropiada para aplicaciones eléctricas y electrónicas.

7.5 ALGUNOS ELEMENTOS IMPORTANTES RELACIONADOS CON LOS CERÁMICOS

En esta sección, se estudian varios elementos importantes para la ingeniería: carbono, silicio y boro. Estos materiales aparecerán algunas veces en capítulos posteriores. Aunque de acuerdo con la definición planteada aquí, no son materiales cerámicos, en ocasiones compiten en las aplicaciones con los materiales cerámicos. Y por sí mismos tienen aplicaciones importantes. En la tabla 7.6 aparecen los datos básicos de estos elementos.

7.5.1 Carbono

El carbono ocurre en dos formas alternativas de importancia en el comercio y la ingeniería: grafito y diamante. Compiten con los materiales cerámicos en varias aplicaciones: el grafito, en situaciones en las que son importantes las propiedades refractarias, y el diamante en aplicaciones industriales en las que la dureza es un factor crítico (como en las herramientas para cortar y esmerilar).

TABLA 7.6 Algunos datos y propiedades básicos del carbono, silicio y boro.

	Carbono	Silicio	Boro
Símbolo	C	Si	B
Número atómico	6	14	5
Gravedad específica	2.25	2.42	2.34
Temperatura de fusión	3 727 °C [a] (6 740 °F)	1 410 °C (2 570 °F)	2 030° C (3 686 °F)
Módulo de elasticidad, GPa (lb/in^2)	240[b] (35×10^6)[b] 1 035 [c] (150×10^6)[c]	N.A.	393 (57×10^6)
Dureza (escala de Mohs)	1[b],10[c]	7	9.3

[a] El carbono se sublima (vaporiza) en lugar de fundirse.
[b] Carbono en forma de grafito (se da el valor común).
[c] El carbono en forma de diamante.
N.A. = no disponible o no aplicable.

Grafito El grafito tiene un contenido alto de carbono cristalino en forma de capas. En enlace de los átomos de las capas es covalente y por tanto fuerte, pero las capas paralelas se enlazan una con otra por medio de fuerzas débiles de Van der Waals. Esta estructura hace que el grafito sea anisotrópico; su resistencia y otras propiedades varían de manera significativa con la dirección. Esto explica el porqué se emplea grafito tanto como lubricante y como fibra en los materiales compuestos avanzados. En forma de polvo, el grafito posee características de poca fricción debido a la facilidad con que se separa en capas; en esa forma, el grafito es valioso como lubricante. En forma de fibra, está orientado en la dirección del plano hexagonal y produce un material filamentoso con resistencia y módulo de elasticidad muy grandes. Estas fibras de grafito se emplean en compuestos estructurales que van de raquetas de tenis a componentes de aviones de combate.

A altas temperaturas, el grafito presenta ciertas propiedades que son tanto útiles como inusuales. Es resistente al choque térmico, y su resistencia en realidad se incrementa con la temperatura. Su resistencia a la tensión a temperatura ambiente es cerca de 100 MPa (15 000 lb/in^2), pero a 2 500 ºC (4 530 ºF) se incrementa al doble [4]. La densidad teórica del carbono es de 2.22 gm/cm^3, pero la densidad aparente del grafito en bloque es menor debido a la porosidad (alrededor de 1.7 gm/cm^3). Ésta aumenta con la compactación y el calor. Tiene conductividad eléctrica, pero no tan alta como la de la mayoría de metales. Una desventaja del grafito es que se oxida en el aire por arriba de los 500 ºC (900 ºF). En una atmósfera reductora eso puede llegar a ocurrir a 3 000 ºC (5 400 ºF), no demasiado debajo de su punto de sublimación, que está a 3 727 ºC (6 740 ºF).

La forma tradicional del grafito es la policristalina con cierta cantidad de carbono amorfo mezclado. Es frecuente que los cristales de grafito se orienten (hasta cierto grado) a procesos de producción comercial que aprovechan sus propiedades en la dirección preferente para la aplicación. Asimismo, la resistencia se mejora por medio de reducir el tamaño del grano (en forma similar a la cerámica). En esta forma, el grafito se emplea para crisoles y otras aplicaciones refractarias, electrodos, elementos de calentamiento por resistencia, materiales antifricción, y fibras de materiales compuestos. Así, el grafito es un material muy versátil. Como polvo es lubricante. En su forma sólida tradicional es refractario. Y cuando se le da forma de fibras, es un material estructural de resistencia elevada.

Diamante El diamante es carbono que posee estructura cristalina cúbica con enlace covalente entre sus átomos, como se ilustra en la figura 2.5*b*). Esta estructura es tridimensional, en lugar de tener capas como el carbono en forma de grafito, y esto se relaciona con la dureza muy alta del diamante. Los diamantes naturales de un solo cristal (provenientes de minas en Sudáfrica) tienen una dureza de 10 000 HV, mientras que la de los diamantes industriales (estructura policristalina) es de alrededor de 7 000 HV. La gran dureza se aprovecha en la mayoría de las aplicaciones de los diamantes industriales.

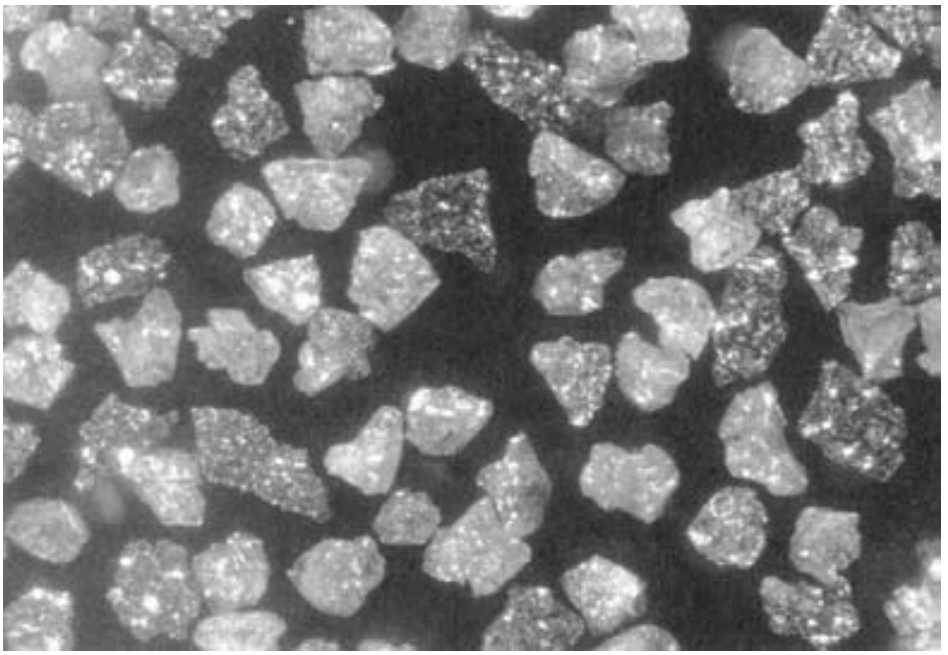


FIGURA 7.2 Polvos de diamante producidos en forma sintética. (Fotografía por cortesía de GE Superabrasives, General Electric Company.)

Se utiliza en herramientas de corte y esmeriles para maquinar materiales duros y frágiles, u otros muy abrasivos. Por ejemplo, se emplean herramientas y ruedas de diamante para cortar cerámicos, fibra de vidrio y metales endurecidos que no sean acero. El diamante también se emplea en la elaboración de herramientas para afilar esmeriles que consisten en otros abrasivos tales como alúmina y carburo de silicio. Igual que el grafito, el diamante tiene propensión a oxidarse (descomponerse) en el aire a temperaturas por arriba de 650 ºC (1 200 ºF).

Los diamantes industriales o sintéticos datan de la década de 1950, y se fabrican calentando grafito alrededor de 3 000 ºC (5 400 ºF) a presiones muy altas (véase la figura 7.2). Este proceso se parece a las condiciones geológicas en que se formaron los diamantes naturales hace millones de años.

7.5.2 Silicio

El silicio es un elemento semimetálico del mismo grupo del carbono en la tabla periódica (véase la figura 2.1). El silicio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, de la que comprende aproximadamente el 26% de su peso (véase la tabla 7.1). Se presenta en forma natural sólo como compuesto químico en rocas, arena, arcilla y suelos, ya sea como dióxido de silicio o compuestos más complejos de silicato. Como elemento tiene la misma estructura cristalina que el diamante, pero su dureza es menor. Es duro pero frágil, ligero, de química inactiva a temperatura ambiente y se clasifica como semiconductor.

Las cantidades mayores de silicio para la manufactura ocurren en compuestos de cerámica (SiO_2 en vidrios y silicatos de arcillas) y elementos de aleaciones de acero, aluminio y cobre. También se emplea como agente reductor en ciertos procesos metalúrgicos. El silicio puro tiene importancia tecnológica como material base para la manufactura de semiconductores para la electrónica. La gran mayoría de circuitos integrados que se producen hoy día están elaborados de silicio (véase el capítulo 35).

TABLA 7.7 Guía para el procesamiento de materiales cerámicos y los elementos carbono, silicio y boro.

Material	Capítulo o sección	Material	Capítulo o sección
Vidrio	Capítulo 12	Diamantes sintéticos	Sección 23.2.6
Fibras de vidrio	Sección 12.2.3	Silicio	Sección 35.2
Cerámicos en forma de partículas	Capítulo 17	Fibras de carbono	Sección 15.1.2
Cermets	Sección 17.3	Fibras de boro	Sección 15.1.2

7.5.3 Boro

El boro es un elemento semimetálico del mismo grupo de la tabla periódica en el que se encuentra el aluminio. Por peso, sólo constituye el 0.001% de la corteza terrestre, y ocurre por lo común como los minerales bórax ($Na_2B_4O_7$–$10H_2O$) y ***kernita*** ($Na_2B_4O_7$–H_2O). El boro es ligero y muy rígido (módulo de elasticidad alto) en forma de fibra. En términos de sus propiedades eléctricas, se clasifica como semiconductor (su conductividad varía con la temperatura; a temperaturas bajas es aislante, pero a elevadas es conductor).

Como material de importancia industrial, el boro se encuentra por lo general en forma de compuesto. Como tal, se emplea como solución en operaciones de galvanoplastia de níquel, como ingrediente (B_2O_3) en ciertos compuestos de vidrio, catalizador en reacciones de química orgánica y como nitruro (nitruro de boro cúbico) para herramientas de corte. En forma casi pura se utiliza como fibra en materiales compuestos (véanse las secciones 9.4.1 y 15.1.2).

7.6 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS

El procesamiento de los materiales cerámicos se divide en dos categorías básicas: fundidas y de partículas. La categoría principal de los cerámicos fundidos es el trabajo del vidrio (véase el capítulo 12). Los materiales cerámicos en forma de partículas incluyen los tradicionales y los nuevos; cuyos métodos de procesamiento constituyen el resto de la tecnología de formado de cerámicas (véase el capítulo 17). Los cermets, tales como los carburos cementados, son un caso especial porque son matrices metálicas compuestas (véase la sección 17.3). En la tabla 7.7 se da una guía para el procesamiento de materiales cerámicos y los elementos carbono, silicio y boro.

REFERENCIAS

[1] Chiang, Y. M., Birnie III, D. P. y Kingery, W. D. ***Physical Ceramics***, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1997.

[2] ***Engineered Materials Handbook***, vol. **4,** ***Ceramics and Glasses.*** ASM International**,** 1991.

[3] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications***, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[4] Hlavac, J. ***The Technology of Glass and Ceramics***. Elsevier Scientific Publishing Company, Nueva York, 1983.

[5] Kingery, W. D., Bowen, H. K. y Uhlmann, D. R. ***Introduction to Ceramics***, 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[6] Kirchner, H. P. ***Strengthening of Ceramics***. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1979.

[7] Richerson, D.W. ***Ceramics–Applications in Manufacturing***. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich., 1989.

[8] Richerson, D. W. ***Modern Ceramic Engineering***, 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992.

[9] Scholes, S. R. y Greene, C. H. ***Modern Glass Practice***, 7a. ed. CBI Publishing Company, Boston, Mass., 1993.

[10] Schwarzkopf, P. y Kieffer, R. ***Cemented Carbides***. The MacMillan Company, Nueva York, 1960.

[11] Singer, F. y Singer, S. S. ***Industrial Ceramics***. Chemical Publishing Company, Nueva York, 1963.

[12] Somiya, S. (ed.). ***Advanced Technical Ceramics***. Academic Press, Inc., San Diego, Calif., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

7.1. ¿Qué es un cerámico?
7.2. ¿Cuáles son los cuatro elementos más comunes en la corteza terrestre?
7.3. ¿Cuál es la diferencia entre los cerámicos tradicionales y los nuevos?
7.4. ¿Cuál es la característica que diferencia al vidrio de los cerámicos tradicionales y los nuevos?
7.5. ¿Por qué el grafito y el diamante no se clasifican como cerámicos?
7.6. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas generales de los materiales cerámicos?
7.7. ¿Cuáles son las propiedades físicas generales de los materiales cerámicos?
7.8. ¿Qué tipo de enlace atómico caracteriza a los cerámicos?
7.9. ¿Qué tienen en común la bauxita y el corundo?
7.10. ¿Qué es la arcilla, que se emplea para fabricar productos cerámicos?
7.11. ¿Qué es el glaseado, según se aplica a productos cerámicos?
7.12. ¿Cuál es el significado del término refractario?
7.13. ¿Cuáles son algunas de las aplicaciones principales de los carburos cementados, tales como el WC–Co?
7.14. ¿Cuál es una de las aplicaciones importantes del nitruro de titanio, según se dice en el texto?
7.15. ¿Cuáles son los elementos del material cerámico Sialon?
7.16. Defina vidrio.
7.17. ¿Cuál es el mineral primario de los productos de vidrio?
7.18. ¿Cuáles son algunas de las funciones de los ingredientes que se añaden al vidrio, además del sílice? Mencione al menos tres.
7.19. ¿Qué significa el término desvitrificación?
7.20. ¿Qué es el grafito?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

7.1. ¿Cuál de los siguientes es el elemento más común de la corteza terrestre?: *a*) aluminio, *b*) calcio, *c*) hierro, *d*) oxígeno, o *e*) silicio.
7.2. ¿Los productos de vidrio se basan sobre todo en cuál de los minerales siguientes?: *a*) alúmina, *b*) corundo, *c*) feldespato, *d*) caolinita, o *e*) sílice.
7.3. ¿Cuál de los siguientes contienen cantidades significativas de óxido de aluminio? (hay tres respuestas correctas): *a*) alúmina, *b*) bauxita, *c*) corundo, *d*) feldespato, *e*) caolinita, *f*) cuarzo, *g*) arenisca, y *h*) sílice.
7.4. ¿Cuáles de las cerámicas que siguen se usan en forma común como abrasivos en esmeriles? (dos respuestas correctas): *a*) óxido de aluminio, *b*) óxido de calcio, *c*) monóxido de carbono, *d*) carburo de silicio, o *e*) dióxido de silicio.
7.5. ¿Cuál de los siguientes por lo general es el material más poroso de las vasijas de cerámica?: *a*) porcelana china, *b*) barro, *c*) porcelana, o *e*) porcelana de gres.
7.6. ¿Cuál de los siguientes se hornea a las temperaturas más elevadas?: *a*) porcelana china, *b*) barro, *c*) porcelana, o *d*) porcelana de gres.
7.7. ¿Cuál de las siguientes se aproxima más a la composición química de la arcilla?: *a*) Al_2O_3, *b*) $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, *c*) $3Al_2O_3–2SiO_2$, *d*) MgO, o *e*) SiO_2.
7.8. Los vidrios-cerámicos son estructuras cerámicas policristalinas que han sido transformadas al estado vítreo: *a*) verdadero, o *b*) falso.
7.9. ¿Cuál de los materiales que siguen se acerca más al diamante, en cuanto a dureza?: *a*) óxido de aluminio, *b*) dióxido de carbono, *c*) nitruro de boro cúbico, *d*) dióxido de silicio, o *e*) carburo de tungsteno.
7.10. ¿Cuál de las siguientes caracteriza mejor la estructura de los vidrios-cerámicos?: *a*) 95% policristalina, *b*) 95% vítrea, o *c*) 50% policristalina.
7.11. Las propiedades y características de los vidrios-cerámicos incluyen a cuáles de las siguientes (dos respuestas son las mejores): *a*) eficiencia en el procesamiento, *b*) conductividad eléctrica, *c*) expansión térmica elevada, o *d*) resistencia, respecto de otros cerámicos.
7.12. ¿El diamante es el material más duro que se conoce?: *a*) verdadero, o *b*) falso.
7.13. Los diamantes sintéticos datan de: *a*) tiempos antiguos, *b*) el siglo XIX, *c*) la década de 1950, o *d*) la década de 1980.

8 POLÍMEROS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

8.1 Fundamentos de la ciencia y tecnología de los polímeros
- 8.1.1 Polimerización
- 8.1.2 Estructuras de los polímeros y copolímeros
- 8.1.3 Cristalinidad
- 8.1.4 Comportamiento térmico de los polímeros
- 8.1.5 Aditivos

8.2 Polímeros termoplásticos
- 8.2.1 Propiedades de los polímeros termoplásticos
- 8.2.2 Importancia comercial de los termoplásticos

8.3 Polímeros termofijos
- 8.3.1 Propiedades y características generales
- 8.3.2 Polímeros termofijos importantes

8.4 Elastómeros
- 8.4.1 Características de los elastómeros
- 8.4.2 Caucho natural
- 8.4.3 Cauchos sintéticos

8.5 Guía para el procesamiento de polímeros

De los tres tipos básicos de materiales, los polímeros son al mismo tiempo los más nuevos y los más viejos conocidos por el ser humano. Los polímeros forman a los organismos vivos y a todos los procesos vitales sobre la Tierra. Para el hombre antiguo, los polímeros biológicos eran fuente de comida, abrigo y de muchos de sus implementos. Sin embargo, en este capítulo el interés se dirige a una clase de polímeros distintos de los biológicos. Con excepción del caucho natural, casi todos los materiales poliméricos que se emplean en la ingeniería hoy día son sintéticos. Los materiales en sí mismos se elaboran por medio de procesamiento químico, y los productos se fabrican con procesos de solidificación.

Un ***polímero*** es un compuesto que consiste en moléculas de cadena larga, cada una de las cuales está hecha de unidades que se repiten y conectan entre sí. En una sola molécula de polímero puede haber miles, incluso millones, de unidades. La palabra se deriva de los vocablos griegos ***poly***, que significa *muchos*, y meros (que se contrae a ***mero***), que es *parte*. La mayoría de los polímeros se basan en el carbono, y por ello se les considera productos químicos orgánicos.

Los polímeros se dividen en ***plásticos*** y ***cauchos (hules)***. Como materiales de ingeniería, son relativamente nuevos en comparación con los metales y los cerámicos, pues sólo datan de alrededor de la mitad del siglo XIX (véase la nota histórica 8.1). Para estudiar los polímeros como materia técnica, es apropiado dividirlos en las siguientes tres categorías, donde 1) y 2) son plásticos y 3) es el caucho:

Nota histórica 8.1 *Historia de los polímeros*

Está claro que uno de los hitos de la historia de los polímeros fue el descubrimiento hecho por Charles Goodyear de la vulcanización del caucho, en 1839 (véase la nota histórica 8.2). En 1851, su hermano Nelson patentó el caucho duro, denominado ***ebonita***, que en realidad es un polímero termofijo. Se utilizó durante muchos años para peines, carcasas de baterías y prótesis dentales.

En 1862, en la International Exhibition de Londres, el químico inglés Alexander Parkes demostró las posibilidades de los primeros termoplásticos, una forma del ***nitrato de celulosa*** (la celulosa es un polímero natural de la madera y el algodón). Lo denominó ***parkesina*** y lo describió como un sustituto del marfil y del caparazón de las tortugas. El material adquirió importancia comercial debido a los esfuerzos del estadounidense John Hyatt, quien combinó nitrato de celulosa y alcanfor (que actúa como un plastificador) junto con calor y presión para formar el producto llamado ***celuloide***. Su patente se emitió en 1870. El plástico celuloide era transparente, y las aplicaciones que se inventaron en forma posterior incluían la película fotográfica y la cinematográfica, así como parabrisas para carruajes y para los primeros automóviles.

Hacia finales del siglo se crearon varios productos con base en la celulosa. Alrededor de 1890 se produjeron por vez primera las fibras de celulosa, llamadas ***rayón***. La película para envolver, el ***celofán***, se comercializó alrededor de 1910. El ***acetato de celulosa*** se adoptó como la base de la película fotográfica por la misma época. Durante las décadas que siguieron, este material llegó a ser un termoplástico importante para el moldeo por inyección.

A principios de 1900, el químico estadounidense, nacido en Bélgica, L. H. Baekeland, inventó el primer plástico sintético. Involucraba la reacción y polimerización del fenol y el formaldehído para formar lo que su inventor denominó ***bakelita***. Esta resina termofija es de importancia comercial aún hoy día. Le siguieron otros polímeros similares: en 1918 la urea-formaldehído, y en 1939 la melamina-formaldehído.

El fin de la década de 1920 y la de 1930 vieron el desarrollo de cierto número de termoplásticos que hoy son de gran importancia. En 1912, I. Ostromislensky patentó el ***cloruro de polivinilo***, pero no se comercializó hasta 1927 como recubrimiento de paredes. Por la misma época, en Alemania se produjo el ***poliestireno***. En Inglaterra, en 1932 se comenzó a hacer la investigación básica que condujo a la síntesis del ***polietileno***; la primera planta de producción empezó a operar justo antes del estallido de la Segunda Guerra Mundial y era para hacer polietileno de baja densidad. Por último, en 1928 se inició un programa importante de investigación, bajo la dirección de W. Carothers, de DuPont de los Estados Unidos, el cual llevó a la síntesis de la poliamida ***nylon***; se comercializó a finales de la década de 1930. Su uso inicial era en la corsetería para damas; sus aplicaciones posteriores durante la guerra incluían cojinetes de baja fricción y aislamiento de alambres. Esfuerzos parecidos llevados a cabo en 1939 en Alemania dieron una forma alternativa de nylon.

En la década de 1940 se crearon varios polímeros importantes de propósito especial: en 1943, los ***fluorocarburos (teflón),*** las ***siliconas*** y los ***poliuretanos***; las resinas ***epóxicas*** se obtuvieron en 1947, y en 1948 el copolímero ***acrilonitrilo-butadieno-estireno*** (ABS). En 1950 llegaron las fibras de ***poliéster***, y en 1957 el ***polipropileno***, el ***policarbonato*** y el ***polietileno de ata densidad***. En la década de 1960 se crearon los ***elastómeros termoplásticos***. Los años posteriores vieron un crecimiento muy grande del uso de los plásticos.

1. Los ***polímeros termoplásticos***, también llamados ***termoplásticos*** (TP), son materiales sólidos a temperatura ambiente, pero si se les calienta a temperaturas de apenas unos cuantos cientos de grados, se vuelven líquidos viscosos. Esta característica permite que adopten formas de productos de modo fácil y económico. Se pueden sujetar repetidas veces al ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade en forma significativa.
2. A diferencia de los termoplásticos, los ***polímeros termofijos***, o ***termofijos (termoestables) (TS)***, no toleran ciclos repetidos de calentamiento. Cuando se calientan de inicio, se suavizan y fluyen de modo que se pueden moldear, pero las temperaturas elevadas también producen una reacción química que endurece el material y lo convierte en un sólido que no se puede fundir. Si se le vuelve a calentar, los polímeros termofijos o termoestables se degradan y carbonizan, en vez de suavizarse.

3. Los ***elastómeros*** (E) son los cauchos. Se trata de polímeros que presentan alargamiento elástico extremo si se les sujeta a un esfuerzo mecánico relativamente débil. Algunos elastómeros son capaces de estirarse en un factor de 10 y aun así recuperar su forma original por completo. Aunque sus propiedades son muy distintas de las de los termofijos, tienen una estructura molecular similar a la de éstos, pero diferente de la de los termoplásticos.

De los tres tipos, los de mayor importancia comercial son los termoplásticos, pues constituyen alrededor de 70% del peso total de todos los polímeros sintéticos que se producen. Los termofijos y elastómeros contribuyen con 30% a partes casi iguales, con una pequeña ventaja del primero. Los polímeros TP comunes incluyen al polietileno, cloruro de polivinilo, polipropileno, poliestireno y nylon. Ejemplos de los polímeros TS son los fenoles, epóxicos y ciertos poliésteres. El ejemplo más común de los elastómeros es el caucho natural (vulcanizado); sin embargo, los cauchos sintéticos exceden el peso que se produce del natural.

Aunque la clasificación de los polímeros en las categorías TP, TS y E cumple con los propósitos de organizar el tema en este capítulo, debe notarse que en ocasiones los tres tipos se traslapan. Ciertos polímeros que normalmente son termoplásticos podrían hacerse termofijos. Algunos polímeros pueden ser tanto termofijos como elastómeros (debe observarse que sus estructuras moleculares son similares). Y ciertos elastómeros son termoplásticos. Sin embargo, sólo son excepciones al esquema de clasificación general.

El crecimiento de las aplicaciones de los polímeros sintéticos es en verdad impresionante. Sobre una base volumétrica, el uso anual actual de los polímeros supera al de los metales. Las siguientes son algunas razones de la importancia comercial y tecnológica de los polímeros.

- Es posible dar formas a los plásticos al moldearlos en formas intrincadas, por lo general sin que se requiera mayor procesamiento. Son muy compatibles con el procesamiento de ***forma neta***.
- Los plásticos poseen una lista de propiedades atractivas para muchas aplicaciones de ingeniería en las que la resistencia no es importante: 1) densidad baja respecto de los metales y cerámicos; 2) buenas relaciones de resistencia a peso de ciertos polímeros (pero no todos); 3) resistencia elevada a la corrosión; y 4) baja conductividad eléctrica y térmica.
- Sobre una base volumétrica, los polímeros compiten en costo con los metales.
- Los polímeros por lo general requieren menos energía que los metales para producirse, sobre una base de volumen. Esto se cumple debido a que es común que las temperaturas para trabajarlos sean mucho más bajas que las que requieren los metales.
- Ciertos plásticos son traslúcidos o transparentes, así que para ciertas aplicaciones compiten con el vidrio.
- Los polímeros se emplean mucho en materiales compuestos (véase el capítulo 9).

Por el lado negativo, los polímeros tienen en general las limitaciones siguientes: 1) su resistencia es baja en comparación con la de los metales y cerámicos; 2) en el caso de los elastómeros, su módulo de elasticidad o rigidez también es bajo; ésta podría ser, por supuesto, una característica deseable; 3) las temperaturas de uso se limitan a sólo unos cientos de grados debido a la suavización de los polímeros termoplásticos o a la degradación de los termofijos y elastómeros; 4) ciertos polímeros se degradan si se les expone a la luz solar y a otras formas de radiación; y 5) los plásticos muestran propiedades viscoelásticas (véase la sección 3.5), lo que puede ser una limitación notable en aplicaciones de cojinetes para carga.

En este capítulo se estudia la tecnología de materiales poliméricos. La primera sección se dedica a un análisis introductorio de la ciencia y tecnología de los polímeros. En las posteriores, se estudian las tres categorías básicas de los polímeros: termoplásticos, termofijos y elastómeros.

8.1 FUNDAMENTOS DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS POLÍMEROS

Los polímeros se sintetizan por medio de la unión de muchas moléculas pequeñas en otras más grandes, llamadas ***macromoléculas***, que poseen una estructura parecida a una cadena. Las unidades pequeñas, llamadas ***monómeros***, por lo general son moléculas orgánicas insaturadas sencillas, tales como el etileno C_2H_4. Los átomos de estas moléculas están unidos con enlaces covalentes; y cuando se unen para formar un polímero, el mismo enlace covalente mantiene a la cadena. Así, cada molécula larga se caracteriza por enlaces primarios fuertes. En la figura 8.1 se ilustra la síntesis de la molécula de polietileno. Según se describe su estructura aquí, el polietileno es un polímero lineal; sus meros forman una cadena larga.

Una masa de material polimérico consiste en muchas macromoléculas; para visualizar la relación de las moléculas individuales con el conjunto del material, a veces se emplea la analogía de un tazón de espagueti recién cocinado (sin salsa). La imbricación de los filamentos largos ayuda a que la masa se mantenga unida, pero es más significativo el enlace atómico. Los enlaces entre las macromoléculas de la masa son del tipo Van der Waals y otros secundarios. Así, el material polimérico agregado se mantiene unido por fuerzas que son mucho más débiles que los enlaces primarios que mantienen a las moléculas juntas. Esto explica por qué los plásticos en general no son tan rígidos ni fuertes como los metales o los cerámicos.

Cuando un polímero termoplástico se calienta, se suaviza. La energía calorífica ocasiona que las macromoléculas se agiten térmicamente, lo que las impulsa para que se muevan una respecto a otra dentro de la masa del polímero (aquí es cuando la analogía del espagueti húmedo pierde su encanto). El material comienza a comportarse como un líquido viscoso, con la viscosidad en disminución (la fluidez aumenta) conforme la temperatura se eleva.

A continuación se ampliará el estudio de estos comentarios de apertura, con el análisis de la forma en que se sintetizan los polímeros y las características de los materiales que resultan de dicha síntesis.

8.1.1 Polimerización

Como proceso químico, la síntesis de los polímeros ocurre por cualquiera de dos métodos: 1) polimerización por adición y 2) polimerización por etapas. La producción de un polímero dado se asocia por lo general con uno u otro método.

Polimerización por adición En este proceso, que ejemplifica el polietileno, se induce a los enlaces dobles existentes entre los átomos de carbono de los monómeros de etileno para que se abran de modo que se unan con otras moléculas de monómero. Las conexiones ocurren en ambos extremos de la macromolécula que se expande, con lo cual se usaron cadenas largas de meros repetitivos. Debido a la manera en que se forman las moléculas, también se conoce al proceso como ***polimerización en cadena***. Comienza con el empleo de un catalizador químico (llamado ***iniciador***) para abrir el doble enlace del carbono en algunos de los monómeros. Éstos, que ahora son muy reactivos debido a sus electrones impares, capturan a otros monómeros para comenzar a formar cadenas reactivas. Las cadenas se propagan con la captura de aún más monómeros, uno a la vez, hasta que se han producido

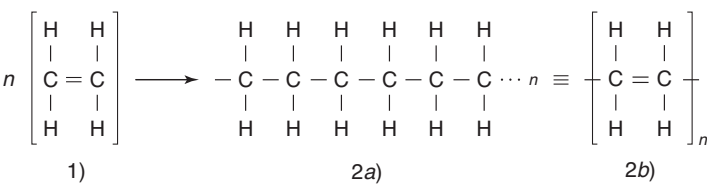


FIGURA 8.1 Síntesis del polietileno a partir de monómeros de etileno: 1) *n* monómeros de etileno producen 2*a*) cadena de polietileno de longitud *n*; 2*b*) notación concisa para ilustrar la estructura del polímero de cadena de longitud *n*.

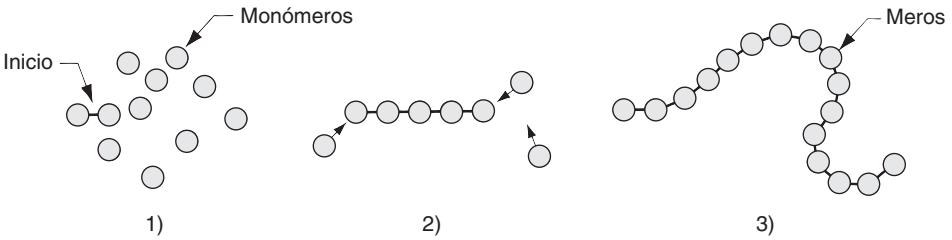
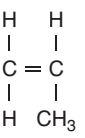
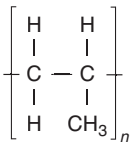
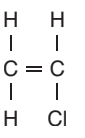
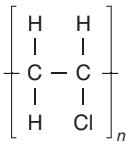
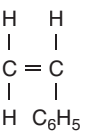
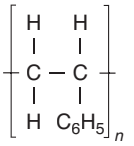
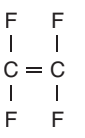
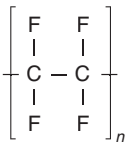
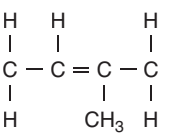
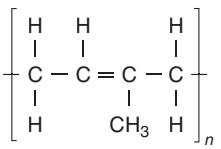


FIGURA 8.2 Modelo de polimerización por adición (cadena): 1) inicio, 2) adición rápida de monómeros, y 3) molécula resultante de polímero de cadena larga con *n* meros al terminar la reacción.

moléculas largas y la reacción termina. El proceso ocurre como se ilustra en la figura 8.2. La reacción completa de polimerización sólo toma algunos segundos para cualquier macromolécula dada. Sin embargo, en el proceso industrial, terminar la polimerización de un lote dado lleva minutos o incluso horas, ya que en la mezcla no todas las reacciones de las cadenas ocurren en forma simultánea.

En la figura 8.3 se enlistan otros polímeros que es común que se formen mediante polimerización por adición, así como el monómero de inicio y el mero de repetición. Observe que la fórmula química del monómero es la misma que la del mero en el polímero. Ésta es una característica del método de polimerización. También observe que muchos de los polímeros comunes involucran la sustitución de algunos átomos o moléculas alternativos en lugar de uno de los átomos de H en el polietileno. Ejemplos de esta sustitución son el polipropileno, cloruro de polivinilo y poliestireno. En el politetrafluoretileno se remplazan todos los átomos de H en la estructura, con átomos de flúor (F). La mayor parte de los polímeros por adición son termoplásticos. En la figura 8.3, la excepción es el poliisopreno, el polímero del caucho natural. Aunque se forma con polimerización por adición, se trata de un elastómero.

FIGURA 8.3 Algunos polímeros comunes que se forman mediante polimerización por adición (cadena).

Polímero	Monómero	Mero de repetición	Fórmula química
Polipropileno			$(C_3H_6)_n$
Cloruro de polivinilo			$(C_2H_3Cl)_n$
Poliestireno			$(C_8H_8)_n$
Politetrafluoretileno (teflón)			$(C_2F_4)_n$
Poliisopreno (caucho natural)			$(C_5H_8)_n$

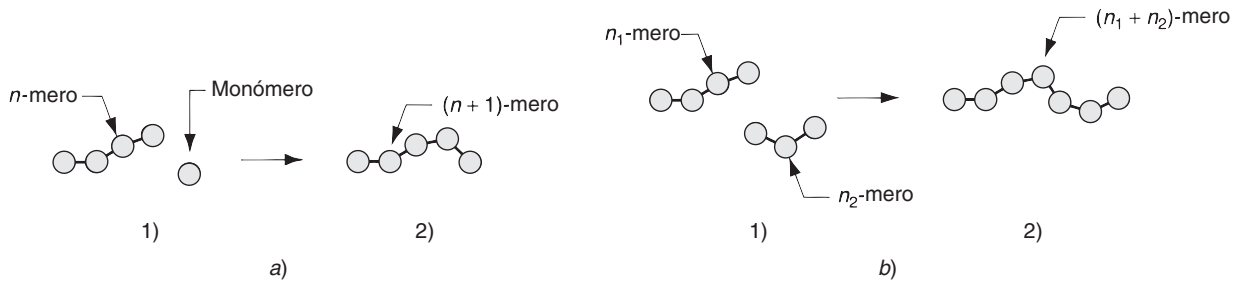


FIGURA 8.4 Modelo de polimerización por etapas que muestra los dos tipos de reacción que ocurren: *a*) *n*-mero que captura un monómero individual para formar un $(n + 1)$-mero; y *b*) n_1-mero que se combina con un n_2-mero para formar un $(n_1 + n_2)$-mero. La secuencia se ilustra en 1) y 2)

Polimerización por etapas En esta forma de polimerización, se hace reaccionar a dos monómeros para formar una molécula nueva del compuesto que se desea obtener. En la mayor parte (pero no en todos) de los procesos de polimerización por etapas también se produce un subproducto de la reacción. Es común que éste sea agua que se condensa; es por ello que se utiliza con frecuencia el término ***polimerización por condensación*** para los procesos en que ésta ocurre. Conforme la reacción tiene lugar, se combinan más moléculas de los reactivos con las moléculas que se sintetizaron primero para formar polímeros de longitud $n = 2$, después polímeros de longitud $n = 3$, y así sucesivamente. Polímeros de n creciente se forman de modo lento y por etapas. Además de esta elongación gradual de las moléculas, también se combinan polímeros intermedios de longitud n_1 y n_2 para formar moléculas de longitud $n = n_1 + n_2$, por lo que una vez que el proceso está en marcha ocurren de manera simultánea dos tipos de reacción, como se ilustra en a figura 8.4. En consecuencia, en cualquier momento del proceso la mezcla contiene polímeros de longitudes distintas. Las moléculas de la longitud adecuada se forman sólo después de que ha pasado tiempo suficiente.

Debe notarse que el subproducto de la reacción no siempre es agua; por ejemplo, el amoniaco (NH_3) es otro compuesto simple que se produce en ciertas reacciones. No obstante, todavía se emplea el término polimerización por condensación. También debe notarse que aunque la mayoría de procesos de polimerización involucran la condensación de un subproducto, hay algunos que no. En la figura 8.5 se dan ejemplos de polímeros comerciales que se producen mediante polimerización por etapas (condensación). Los polímeros tanto termoplásticos como termofijos se sintetizan con este método; el nylon-6,6 y el policarbonato son polímeros TP, mientras que el fenol formaldehído y la urea formaldehído son polímeros TS.

Grado de polimerización y peso molecular Una macromolécula producida por polimerización consiste en n meros repetitivos. Como todas las moléculas en una masa dada de material polimerizado varían en longitud, la n de la masa es un promedio; sigue la distribución estadística normal. El valor medio de n se denomina ***grado de polimerización*** (DP, por siglas en inglés) de la masa. El grado de polimerización afecta las propiedades del polímero: un DP elevado incrementa la resistencia mecánica pero también la viscosidad del estado fluido, lo que hace que el procesamiento sea más difícil.

El ***peso molecular*** (MW, por sus siglas en inglés) de un polímero es la suma de los pesos moleculares de los meros de la molécula; es n veces el peso molecular de cada unidad de repetición. Como la n varía para las distintas moléculas en la masa, el peso molecular debe interpretarse como un promedio. En la tabla 8.1 se presentan valores comunes de DP y MW para polímeros seleccionados.

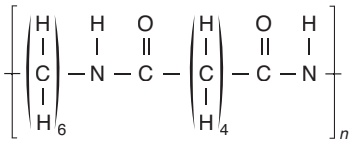
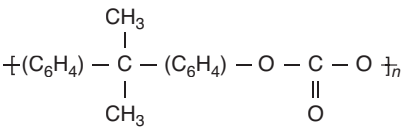
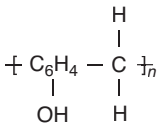
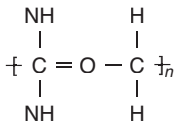
Polímero	Unidad repetitiva	Fórmula química	Condensado
Nylon-6,6		$[(CH_2)_6\,(CONH)_2\,(CH_2)_4]_n$	H_2O
Policarbonato		$(C_3H_6\,(C_6H_4)_2CO_3)_n$	HCl
Fenol formaldehído		$[(C_6H_4)CH_2OH]_n$	H_2O
Urea formaldehído		$(CO(NH)_2\,CH_2)_n$	H_2O

FIGURA 8.5 Algunos polímeros comunes formados mediante polimerización por etapas (condensación); (expresión simplificada de la estructura y fórmula; no se presentan los extremos de la cadena del polímero).

8.1.2 Estructuras de los polímeros y copolímeros

Existen diferencias estructurales entre las moléculas de los polímeros, incluso entre las del mismo polímero. En esta sección se estudian tres aspectos de la estructura molecular: 1) estereorregularidad, 2) ramificación y cruzamientos y 3) copolímeros.

Estereorregularidad La ***estereorregularidad*** tiene que ver con el arreglo espacial de los átomos y sus grupos en las unidades repetitivas de la molécula del polímero. Un aspecto importante de la estereorregularidad es la forma en que los grupos de átomos se localizan a lo largo de la cadena para un polímero que tiene uno de los átomos de H en sus meros remplazado por algún otro átomo o grupo de átomos. Un ejemplo de esto es el polipropileno; es similar al polietileno, excepto que el CH_3 es sustituido por uno de los cuatro átomos de H en el mero. Son posibles tres arreglos tácticos, como se ilustra en la figura 8.6: *a*) ***isotáctico***, en el que los grupos impares de átomos se encuentran todos en el mismo lado; *b*) ***sindiotáctico***, en el que los grupos de átomos alternan en los lados opuestos; y *c*) ***atáctico***, en el que los grupos se encuentran en cualquier lado, aleatoriamente.

TABLA 8.1 Valores normales del grado de polimerización y peso molecular para polímeros termoplásticos seleccionados.

Polímero	Grado de polimerización (n)	Peso molecular
Polietileno	10 000	300 000
Poliestireno	3 000	300 000
Cloruro de polivinilo	1 500	100 000
Nylon	120	15 000
Policarbonato	200	40 000

Recopilado de la referencia [7]

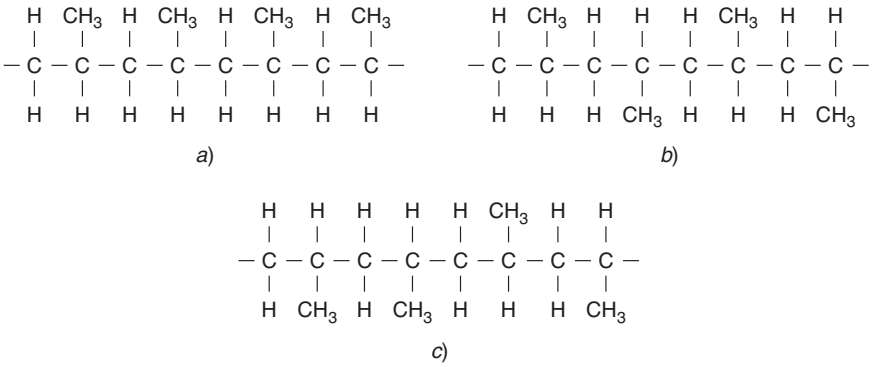
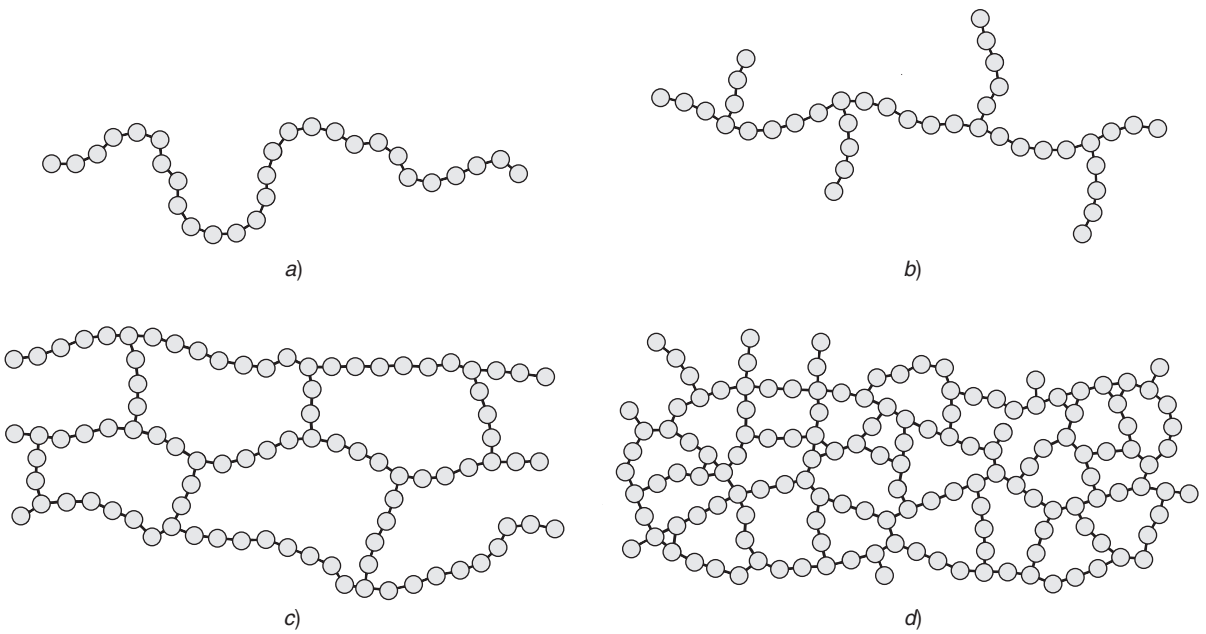


FIGURA 8.6 Arreglos posibles de los grupos de átomos en el polipropileno: *a*) isotáctico, *b*) sindiotáctico, y *c*) atáctico.

La estructura táctica es importante para determinar las propiedades del polímero. También influye en la tendencia de un polímero para cristalizar (véase la sección 8.1.3). Si se continúa con el ejemplo del polipropileno, este polímero se sintetiza en cualquiera de las tres estructuras tácticas. En su forma isotáctica es fuerte y se funde a 175 ºC (347 ºF); la estructura sindiotáctica también es fuerte, si bien se funde a 131 ºC (268 ºF); pero el polipropileno atáctico es suave y se funde alrededor de 75 ºC (165 ºF), y tiene poco uso comercial [6], [9].

Polímeros lineales, ramificados y entrecruzados Se describió el proceso de polimerización como la generación de macromoléculas de una estructura semejante a una cadena, denominada ***polímero lineal***. Ésta es la estructura característica de un polímero termoplástico. También son posibles otras estructuras, como se ilustra en la figura 8.7. Una posibilidad es que ramas laterales se formen a lo largo de la cadena, lo que da como resultado un ***polímero ramificado***, que se presenta en la figura 8.7*b*). En el polietileno, esto ocurre porque los

FIGURA 8.7 Varias estructuras de moléculas de polímeros: *a*) lineal, característica de los termoplásticos; *b*) ramificada; *c*) entrecruzada holgada, como en los elastómeros; y *d*) entrecruzada estrecha, como en un termofijo.



átomos de hidrógeno son remplazados por átomos de carbono en puntos al azar a lo largo de la cadena, con lo que se inicia el crecimiento de una cadena en rama en cada ubicación. Para ciertos polímeros ocurren enlaces primarios entre las ramas y otras moléculas en ciertos puntos de conexión, para formar ***polímeros entrecruzados***, como se ilustra en la figura 8.7*c*) y *d*). El entrecruzamiento sucede porque cierta proporción de los monómeros que se usan para formar el polímero son capaces de enlazarse con otros adyacentes en más de los dos lados, lo que permite que se agreguen las ramas de otras moléculas. Las estructuras entrecruzadas flojas son características de los elastómeros. Cuando el polímero está muy entrecruzado se dice que tiene ***estructura de red***, como en el inciso *d*) de la figura; en realidad, la masa entera es una macromolécula gigante. Los plásticos termofijos adoptan esta estructura después de la curación.

La presencia de la ramificación y el entrecruzamiento en los polímeros tiene un efecto significativo sobre sus propiedades. Es la base de la diferencia entre las tres categorías de polímeros: TP, TS y E. Los polímeros termoplásticos siempre poseen estructuras lineales o ramificadas, o una mezcla de las dos. La ramificación incrementa la imbricación de las moléculas, lo que generalmente hace que el polímero sea más fuerte en estado sólido y más viscoso a una temperatura dada en estado líquido o plástico.

Los plásticos termofijos y los elastómeros son polímeros entrecruzados. El entrecruzamiento ocasiona que el polímero sea químicamente estable; la reacción no puede revertirse. Su efecto es cambiar de manera permanente la estructura del polímero; si se calienta, se degrada o quema, en lugar de fundirse. Los termofijos poseen un grado alto de entrecruzamiento, mientras que los elastómeros poseen un grado bajo. Los termofijos son duros y frágiles, en tanto que los elastómeros son elásticos y resilientes.

Copolímeros El polietileno es un ***homopolímero***, igual que el polipropileno, poliestireno y muchos otros plásticos comunes; sus moléculas consisten en meros repetidos que son todos del mismo tipo. Los ***copolímeros*** son polímeros cuyas moléculas están hechas de unidades repetidas de dos tipos diferentes. Un ejemplo es el copolímero sintetizado a partir del etileno y propileno, y que resulta con propiedades elastoméricas. El copolímero etileno-propileno se representa como sigue:

$$—(C_2H_4)_n(C_3H_6)_m—$$

donde el rango de *n* y ***m*** varía entre 10 y 20, y las proporciones de los dos constituyentes son de alrededor de 50% cada una. En la sección 8.4.3 se verá que la combinación de polietileno con polipropileno y cantidades pequeñas de dienos es un caucho sintético importante.

Los copolímeros poseen arreglos diferentes de sus meros constitutivos. En la figura 8.8 se ilustran las posibilidades: *a*) ***copolímero alternante***, en el que los meros se repiten en lugares alternados; *b*) ***aleatorio***, en el que los meros se hallan al azar, y la frecuencia depende de las

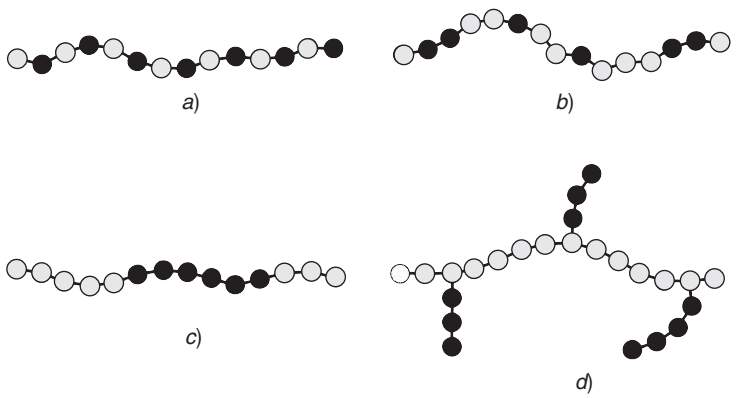


FIGURA 8.8 Distintas estructuras de copolímeros: *a*) alternante, *b*) aleatorio, *c*) bloque y *d*) inserción.

proporciones relativas de los monómeros de inicio; *c*) ***bloque***, en el que meros del mismo tipo tienden a agruparse por sí mismos en segmentos largos en la longitud de la cadena; y d) ***inserción***, en el que los meros de un tipo se unen como ramas a un tronco principal de meros del otro tipo. El caucho dieno de etileno-propileno, que ya se mencionó, es del tipo bloque.

La síntesis de los copolímeros es análoga a alear metales para formar soluciones sólidas. Igual que en dichas aleaciones, las diferencias en los ingredientes y estructura de los copolímeros tienen un efecto sustancial en las propiedades. Ejemplo de esto es la mezcla que se ha mencionado de polietileno-polipropileno. Por sí solo, cada uno de estos polímeros es muy rígido; pero una mezcla al 50-50 forma un copolímero de estructura aleatoria parecida al caucho.

También es posible sintetizar ***polímeros ternarios*** o ***terpolímeros***, que consisten en meros de tres tipos diferentes. Ejemplo de esto es el plástico ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno, por lo cual no sorprende que lo llamen ABS).

8.1.3 Cristalinidad

En los polímeros es posible estructuras tanto amorfas como cristalinas, aunque su tendencia a cristalizar es mucho menor que la de los metales o cerámicos no vítreos. No todos los polímeros pueden formar cristales. Para aquellos que sí, el ***grado de cristalinidad*** (proporción de la masa que consiste en material cristalizado) siempre es menor que 100%. Conforme en un polímero se incrementa la cristalinidad, también lo hacen 1) la densidad, 2) rigidez, resistencia y tenacidad, y 3) resistencia al calor. Además, 4) si el polímero es transparente en estado amorfo, se vuelve opaco cuando se cristaliza en forma parcial. Muchos polímeros son transparentes, pero sólo en estado amorfo (vítreo). Algunos de esos efectos quedan ilustrados por las diferencias entre el polietileno de baja densidad y el de alta densidad, que se presentan en la tabla 8.2. La razón subyacente para las diferencias en las propiedades de estos materiales es el grado de cristalinidad.

Los polímeros lineales consisten en moléculas largas con miles de meros repetidos. La cristalización en estos polímeros involucra el plegamiento hacia delante y atrás de las cadenas largas sobre sí mismas para adquirir un arreglo muy regular de los meros, según se ilustra en la figura 8.9*a*). Las regiones cristalizadas se denominan ***cristalitas***. Debido a la longitud tan grande de una molécula sola (a escala atómica), puede participar en más de una cristalita. Asimismo, en una región cristalina única puede combinarse más de una molécula. Las cristalitas adoptan la forma laminar, como se ilustra en la figura 8.9b, mezcladas al azar con material amorfo. Así, un polímero que cristaliza es un sistema con dos fases, cristalitas dispersas en una matriz amorfa.

Cierto número de factores determinan la capacidad o tendencia de un polímero para formar regiones cristalinas dentro del material. Los factores se resumen como sigue: 1) como regla general, sólo los polímeros lineales forman cristales; 2) tiene importancia crítica la estereorregularidad de la molécula [13]; los polímeros isotácticos siempre forman cristales, los sindiotácticos a veces y los atácticos nunca; 3) los copolímeros, debido a su irregularidad molecular, rara vez forman cristales; 4) el enfriamiento lento favorece

TABLA 8.2 Comparación del polietileno de baja densidad con el de alta.

Tipo de polietileno	Densidad baja	Densidad alta
Grado de cristalinidad	55%	92%
Gravedad específica	0.92	0.96
Módulo de elasticidad	140 MPa (2,000 lb-in^2)	700 MPa (100,000 lb-in^2)
Temperatura de fusión	115° C (239°F)	135°C(275°F)

Recopilado de la referencia [6]. Los valores que se dan son los frecuentes.

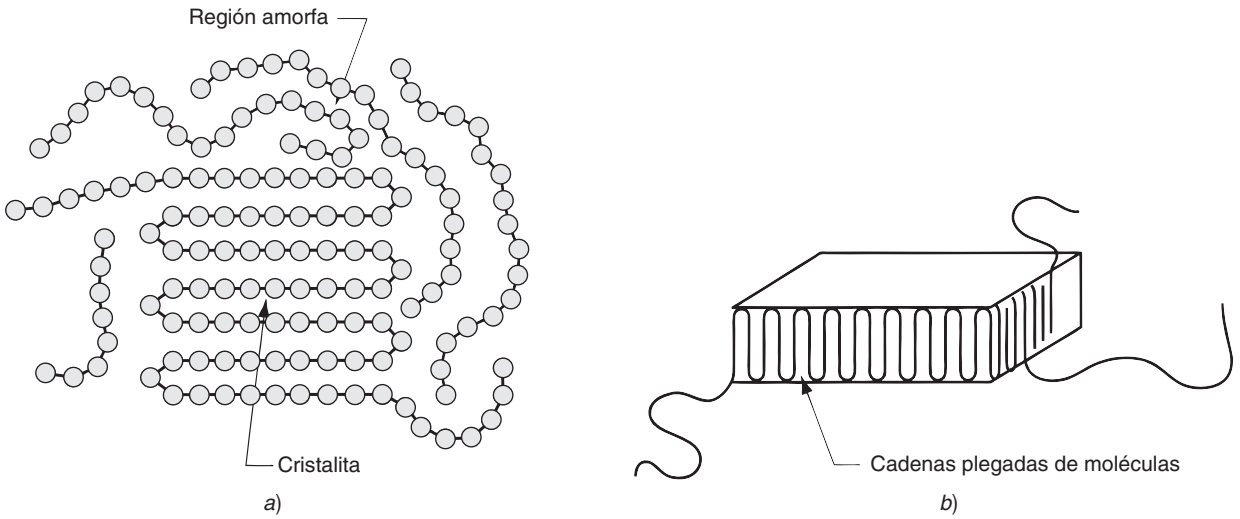


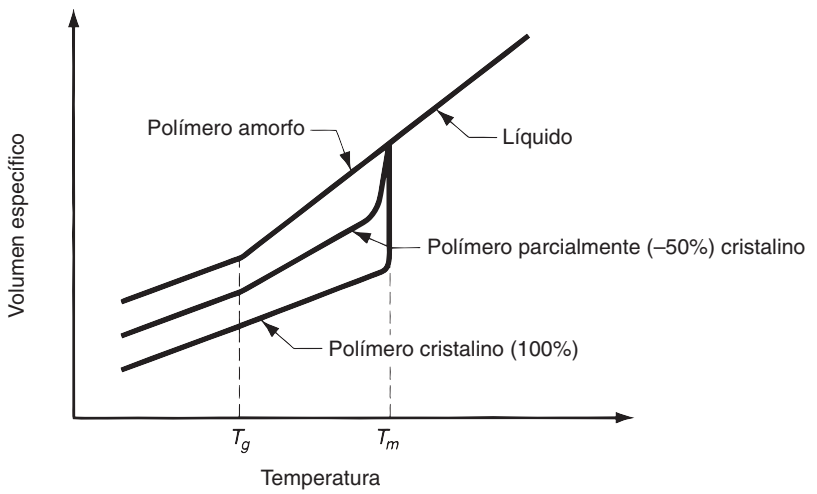
FIGURA 8.9 Regiones cristalizadas en un polímero: *a*) moléculas largas que forman cristales al azar mezcladas con material amorfo; y *b*) cadena plegada en forma de lámina, forma común de una región cristalizada.

la formación y crecimiento de cristales, como sucede en los metales y cerámicas; 5) la deformación mecánica, como en el estiramiento de un termoplástico calentado, tiende a alinear la estructura y a incrementar la cristalización; 6) los plastificadores (productos químicos que se agregan a un polímero para suavizarlo) reducen el grado de cristalinidad.

8.1.4 Comportamiento térmico de los polímeros

El comportamiento térmico de los polímeros con estructuras cristalinas es diferente del de aquellos que son amorfos (véase la sección 2.4). El efecto de la estructura se observa en la gráfica del volumen específico (el inverso de la densidad) como función de la temperatura, como se aprecia en la figura 8.10. Un polímero muy cristalino tiene un punto de fusión T_m en el que su volumen sufre un cambio abrupto. Asimismo, a temperaturas por arriba de T_m, la expansión térmica del material fundido es mayor que la del sólido por debajo de T_m. Un polímero amorfo no sufre los mismos cambios abruptos en la T_m. Conforme se enfría

FIGURA 8.10 Comportamiento de los polímeros como función de la temperatura.



a partir del estado líquido, su coeficiente de expansión térmica continúa la declinación a lo largo de la misma trayectoria, que tenía cuando estaba fundido, y se hace cada vez más viscoso con la disminución de la temperatura. Durante el enfriamiento por debajo de T_m, el polímero cambia de líquido a algo similar al caucho. Conforme la temperatura desciende, se alcanza un punto final en el que la expansión térmica del polímero amorfo cae de súbito. Ésta es la ***temperatura de transición al vidrio***, T_g (véase la sección 3.5), considerada como el cambio de pendiente. Por debajo de T_g, el material es duro y frágil.

Entre esos dos extremos, se encuentra un polímero cristalizado en forma parcial, como se indica en la figura 8.10. Es un promedio de los estados cristalino y amorfo que depende del grado de cristalinidad. Por arriba de T_m presenta las características viscosas de un líquido; entre T_m y T_g tiene propiedades viscoelásticas; y por debajo de T_g tiene las propiedades elásticas convencionales de un sólido.

Lo que se ha descrito en esta sección se aplica a los materiales termoplásticos, que se desplazan muchas veces hacia arriba y abajo de la curva de la figura 8.10. La manera en que se calientan y enfrían cambia la trayectoria que siguen. Por ejemplo, las tasas rápidas de enfriamiento inhiben la formación de cristales e incrementan la temperatura de transición al vidrio. Los termofijos y elastómeros enfriados a partir del estado líquido se comportan como un polímero amorfo hasta que ocurre el entrecruzamiento. Su estructura molecular restringe la formación de cristales. Y una vez que sus moléculas se entrecruzan ya no regresan al estado fundido si se calientan.

8.1.5 Aditivos

Las propiedades de los polímeros con frecuencia cambian para bien si se les combina con aditivos. Los aditivos alteran la estructura molecular del polímero, o bien agregan una segunda fase al plástico, y lo transforman, en efecto, en un material compuesto. Los aditivos se clasifican según su función como 1) rellenos, 2) plastificadores, 3) colorantes, 4) lubricantes, 5) retardantes de flama, 6) agentes de entrecruzamiento, 7) absorbedores de luz ultravioleta y 8) antioxidantes.

Relleno Los ***rellenos*** son materiales que se agregan en forma de partículas o fibras a un polímero, a fin de alterar las propiedades mecánicas de éste o sólo para reducir el costo del material. Otras razones para usar los rellenos son mejorar la estabilidad dimensional y térmica. Ejemplos de rellenos que se emplean con polímeros son las fibras y polvos de celulosa (por ejemplo, fibras de algodón y aserrín, respectivamente); polvos de sílice (SiO_2), carbonato de calcio ($CaCO_3$) y arcilla (silicato de aluminio hidratado); y fibras de vidrio, metal, carbono u otros polímeros. Los rellenos que mejoran las propiedades mecánicas se denominan ***agentes reforzadores***, y los compuestos que se crean de ese modo reciben el nombre de ***plásticos reforzados***; tienen más rigidez, resistencia, dureza y tenacidad que el polímero original. Las fibras proporcionan el efecto de resistencia más grande.

Plastificadores Los ***plastificadores*** son productos químicos que se agregan a un polímero para hacerlo más suave y flexible, y para mejorar sus características de flujo durante la formación. El plastificador funciona al reducir la temperatura de transición al vidrio por debajo de la del ambiente. En tanto que por debajo de T_g el polímero es duro y frágil, por arriba de esa temperatura es suave y rígido. Un buen ejemplo es el agregar un plastificador[1] al cloruro de polivinilo; en función de la proporción de plastificador que haya en la mezcla, el PVC obtiene un rango de propiedades, desde rígido y frágil a flexible y parecido al caucho.

[1] El plastificador normal en el PVC es el dioctil ftalato, un éster ftalato.

Colorantes Una ventaja que tienen muchos polímeros sobre los metales y cerámicos es que puede obtenerse el mismo material de cualquier color. Esto elimina la necesidad de operaciones secundarias de recubrimiento. Los colorantes para los polímeros son de dos tipos: pigmentos y tinturas. Los ***pigmentos*** son materiales pulverizados finamente, insolubles y que deben distribuirse de manera uniforme en todo el polímero en concentraciones muy bajas, por lo general menores a 1%. Es frecuente que agreguen opacidad o bien color al plástico. Las ***tinturas*** son productos químicos que es usual aplicar en forma líquida, y que por lo general son solubles en el polímero. Normalmente se usan para dar colores transparentes a plásticos tales como estireno y acrílicos.

Otros aditivos Los ***lubricantes*** en ocasiones se agregan al polímero para reducir la fricción y facilitar el flujo hacia la interfaz del molde. También son útiles para liberar la pieza del molde en las operaciones de inyección. Con frecuencia para el mismo propósito se utilizan agentes que se rocían en la superficie del molde para liberarlo.

Casi todos los polímeros arden si se suministra el calor y oxígeno requeridos. Algunos son más combustibles que otros. Los ***retardantes de flama*** son productos químicos que se agregan a los polímeros para reducir la inflamabilidad, por alguno de los mecanismos siguientes o combinación de ellos: 1) interferencia con la propagación de la flama, 2) producción de grandes cantidades de gases incombustibles o 3) aumento de la temperatura de combustión del material. Los productos químicos también sirven para 4) reducir la emisión de gases nocivos o tóxicos que se generan durante la combustión.

Entre los aditivos debe incluirse aquellos que hacen que haya entrecruzamiento en los polímeros termofijos y elastómeros. El término ***agente de entrecruzamiento*** se refiere a una variedad de ingredientes que ocasionan una reacción de entrecruzamiento o que actúan como catalizadores que la facilitan. Algunos ejemplos comerciales importantes son 1) el azufre en la vulcanización del caucho natural, 2) formaldehído de los fenoles para formar plásticos termofijos y 3) peróxidos para poliésteres.

Muchos polímeros son susceptibles de degradarse por acción de la luz ultravioleta (por ejemplo, la luz solar) y la oxidación. La degradación se manifiesta como el rompimiento de enlaces en las moléculas de cadena largas. Por ejemplo, el polietileno es vulnerable a ambos tipos de degradación, lo que lleva a una pérdida de la resistencia mecánica. Los ***absorbedores de luz ultravioleta*** y los ***antioxidantes*** son aditivos que reducen la susceptibilidad del polímero a estas formas de ataque.

8.2 POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS

En esta sección se estudian las propiedades del grupo de polímeros termoplásticos, y después se describen sus miembros importantes.

8.2.1 Propiedades de los polímeros termoplásticos

La propiedad definitoria de un polímero termoplástico es que puede calentarse desde el estado sólido hasta el líquido viscoso y después enfriarse hasta volver a ser sólido, y que es posible realizar muchas veces este ciclo de calentamiento y enfriamiento sin que el polímero se degrade. La razón de esta propiedad es que los polímeros TP consisten en macromoléculas lineales (o ramificadas) que no se entrecruzan cuando se calientan. Por el contrario, los termofijos y elastómeros pasan por un cambio químico si se les calienta, con entrecruzamiento de sus moléculas y transformación permanente de estos polímeros.

En realidad, los termoplásticos sí se deterioran químicamente con el calentamiento y enfriamiento repetidos. En el moldeo de plásticos, se hace una distinción entre el material

nuevo o ***virgen*** y el plástico que ya ha sido moldeado con anterioridad (por ejemplo, desechos, piezas defectuosas) y por ello han experimentado ciclos térmicos. Para ciertas aplicaciones sólo el material virgen resulta aceptable. Los polímeros termoplásticos también se degradan paulatinamente si se les sujeta a temperaturas elevadas por debajo de T_m. Este efecto de largo plazo se denomina ***envejecimiento térmico***, e involucra el deterioro químico lento. Algunos polímeros TP son más susceptibles al envejecimiento térmico que otros, y para un material dado, la tasa de deterioro depende de la temperatura.

Propiedades mecánicas En el estudio de las propiedades mecánicas que se hizo en el capítulo 3, se comparó los polímeros con los metales y cerámicos. El termoplástico común a temperatura ambiente se caracteriza por lo siguiente: 1) rigidez muy baja, con módulo de elasticidad de dos (en ciertos casos, de tres) órdenes de magnitud menos que el de los metales y cerámicos; 2) poca resistencia a la tensión, alrededor de 10% de la de los metales; 3) dureza mucho menor; y 4) ductilidad mayor, en promedio, pero con un rango muy amplio de valores, desde 1% de elongación para el poliestireno a 500% o más para el polipropileno.

Las propiedades mecánicas de los termoplásticos dependen de la temperatura. Las relaciones funcionales deben estudiarse en el contexto de las estructuras amorfa y cristalina. Los termoplásticos amorfos son rígidos y parecidos al vidrio por debajo de su temperatura de transición a éste, T_g, y flexibles o parecidos al caucho por arriba de ella. Conforme la temperatura se incrementa sobre T_g, el polímero se hace cada vez más suave, y al final se convierte en un fluido viscoso (nunca es un líquido delgado debido a su peso molecular elevado). El efecto sobre el comportamiento mecánico se ilustra en la figura 8.11, en la que se le define como la resistencia a la deformación. Ésta es análoga al módulo de elasticidad, pero permite observar el efecto de la temperatura sobre el polímero amorfo conforme ocurre la transición de sólido a líquido. Por debajo de T_g, el material es elástico y fuerte. A T_g, se observa una caída súbita en la resistencia a la deformación, cuando el material pasa a su fase de caucho; en esta región su comportamiento es viscoelástico. Conforme la temperatura se incrementa, gradualmente se parece más a un fluido.

Un termoplástico teórico con 100% de cristalinidad tendría un punto de fusión distinto, T_m, en el que se transformaría de sólido a líquido, pero no mostraría un punto T_g perceptible. Por supuesto, los polímeros reales tienen menos de 100% de cristalinidad. Para polímeros cristalizados parcialmente, la resistencia a la deformación se caracteriza por la curva que queda entre los dos extremos, y su posición está determinada por las proporciones relativas de las dos fases. El polímero cristalizado en forma parcial presenta características tanto de los plásticos amorfos como de los cristalizados por completo. Por debajo de T_g, es elástico con resistencia a la deformación que desciende con las

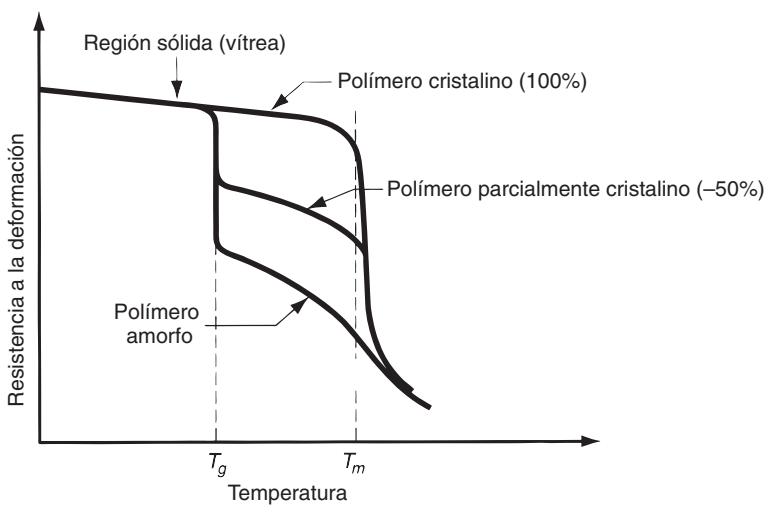


FIGURA 8.11 Relación de las propiedades mecánicas, representadas como resistencia a la deformación, como función de la temperatura para un termoplástico amorfo, uno 100% cristalino (teórico) y otro cristalizado en forma parcial.

temperaturas elevadas. Por arriba de T_g las porciones amorfas del polímero se suavizan, en tanto que las cristalinas quedan intactas. La totalidad del material muestra propiedades que en general son viscoelásticas. Conforme se alcanza T_m, los cristales se funden, lo que da al polímero una consistencia líquida; la resistencia a la deformación ahora se debe a las propiedades viscosas del fluido. El grado en que el polímero adopta características de líquido en la T_m y por arriba de ella depende del peso molecular y del grado de polimerización. Los DP y MW elevados reducen el flujo del polímero, lo que hace más difícil su procesamiento por moldeo y otros métodos parecidos para darle forma. Éste es el dilema que enfrentan aquellos que seleccionan estos materiales con base en que su MW y DP mayores significan una resistencia más grande.

Propiedades físicas Las propiedades físicas de los materiales se estudiaron en el capítulo 4. En general, los polímeros termoplásticos tienen las características siguientes: 1) densidades menores que las de los metales o cerámicos, las gravedades específicas comunes de los polímeros están alrededor de 1.2, las de los cerámicos son de cerca de 2.5, y las de los metales de 7.0; 2) coeficiente de expansión térmica mucho mayor, aproximadamente cinco veces el valor de los metales y 10 veces el de los cerámicos; 3) temperaturas de fusión mucho menores; 4) calores específicos que son de dos a cuatro veces las de los metales y cerámicos; 5) conductividades térmicas de alrededor de tres órdenes de magnitud menos que las de los metales; y 6) propiedades de aislamiento eléctrico.

8.2.2 Importancia comercial de los termoplásticos

Los productos termoplásticos incluyen artículos moldeados y extruidos, fibras, películas, hojas, materiales de empaque, pinturas y barnices. Es normal que las materias primas iniciales para estos productos se suministren al fabricante en forma de polvos o *pelets*, en bolsas, tambos o cargas grandes de camiones o vagones. En esta sección se estudian los polímeros TP más importantes. Para cada plástico se presenta una tabla que enlista la fórmula química y propiedades seleccionadas. Se da la participación aproximada en el mercado respecto de todos los plásticos (termoplásticos y termofijos).

Acetales ***Acetal*** es el nombre común que se da al ***polioximetileno,*** polímero de ingeniería preparado a partir de formaldehído (CH_2O) con mucha rigidez, resistencia, tenacidad y resistencia al desgaste. Además, tiene un punto de fusión alto, poca absorción de la humedad y es insoluble en los solventes comunes a temperatura ambiente. Debido a esta combinación de propiedades, las resinas de acetato compiten con ciertos metales (por ejemplo, latón y zinc) para elaborar componentes automotrices tales como manijas de puertas, carcasas de bombas y piezas similares, armazones de aparatos y componentes de maquinaria.

Acrílicos Los acrílicos son polímeros derivados del ácido acrílico ($C_3H_4O_2$) y de compuestos que se derivan de él. El termoplástico más importante del grupo de los acrílicos es el ***polimetilmetacrilato*** (PMMA) o Plexiglás (marca registrada de Rohn & Haas para el PMMA). En la tabla 8.3*b*) se enlistan los datos sobre el PMMA. Es un polímero amorfo

TABLA 8.3 Polímeros de importancia comercial: *a*) acetal.

Polímero:	Polioximetileno, también conocido como poliacetal $(OCH_2)_n$		
Símbolo:	POM	Elongación:	25% – 75%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.42
Grado de cristalinidad:	75%, común	Temperatura de transición al vidrio:	–80 °C (–112 °F)
Módulo de elasticidad:	3 500 MPa (500 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	180 °C (356 °F)
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb-in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Mucho menos de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *b*) acrílicos (termoplástico).

Polímero representativo:	Polimetilmetacrilato $(C_5H_8O_2)_n$		
Símbolo:	PMMA	Elongación:	5
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.2
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Temperatura de transición al vidrio:	105 °C (221 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	200 °C (392 °F)
Resistencia a la tensión:	55 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 1%

lineal. Su propiedad extraordinaria es la transparencia excelente, que lo hace competir con el vidrio en aplicaciones ópticas. Algunos ejemplos incluyen lentes para las luces traseras de automóviles, instrumentos ópticos y ventanas de los aviones. Su limitación es que, en comparación con el vidrio, tiene una resistencia a las rayaduras mucho menor. Otros usos del PMMA incluyen ceras para pisos y pinturas de emulsión de látex. Otro uso importante de los acrílicos es el de fibras para textiles; el poliacrilonitrilo es un ejemplo que resulta más conocido por sus nombres comerciales de Orlon (DuPont) y Acrilán (Monsanto).

Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno El ABS es un plástico de uso en la ingeniería por su combinación excelente de propiedades mecánicas, algunas de las cuales se enlistan en la tabla 8.3c. El ABS es un terpolímero de dos fases; una es la de copolímero duro de estireno-acrilonitrilo, y la otra es de copolímero de estireno-butadieno similar al caucho. El nombre del plástico se deriva de los tres monómeros iniciales, que están mezclados en proporciones diferentes. Las aplicaciones comunes incluyen componentes para automóviles, aparatos, máquinas de oficina, y tubos y accesorios.

Celulosas La ***celulosa*** $(C_6H_{10}O_5)$ es un polímero carbohidratado que ocurre de manera común en la naturaleza. La madera y fibras de algodón, que son las fuentes principales de celulosa para la industria, contienen alrededor de 50% y 95% del polímero, respectivamente. Cuando la celulosa se disuelve y precipita durante el procesamiento químico, el polímero que resulta se denomina ***celulosa regenerada***. Cuando ésta se produce como fibra para ropa se conoce como ***rayón*** (por supuesto, el algodón mismo se emplea mucho como fibra para telas). Cuando se produce como película delgada se conoce como ***celofán***, material común para empacar. La celulosa en sí no puede usarse como termoplástico debido a que con el aumento de temperatura se descompone antes de fundirse. Sin embargo, puede combinarse con distintos componentes para formar varios plásticos de importancia comercial; dos ejemplos son el ***acetato de celulosa*** (CA) y la ***celulosa de acetato butirato*** (CAB). El CA, cuyos datos se dan en la tabla 8.3d, se produce en forma de hojas (para envolver), película (para fotografía) y piezas moldeadas. El CAB es un material mejor para

TABLA 8.3 (*continúa*): *c*) acrilonitrilo-butadieno-estireno.

Polímero:	Terpolímero de acrilonitrilo (C_3H_3N), butadieno (C_4H_6), y estireno (C_8H_8).		
Símbolo:	ABS	Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in^2)
Método de polimerización:	Adición	Elongación:	10% a 30%
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Gravedad específica:	1.06
Módulo de elasticidad:	2 100 MPa (300 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 3%

TABLA 8.3 (*continúa*): *d*) celulosas.

Polímero representativo:	acetato de celulosa $(C_6H_9O_5–COCH_3)_n$		
Símbolo:	CA	Elongación:	10% a 50%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.3
Grado de cristalinidad:	Amorfo	Temperatura de transición al vidrio:	105 °C (221 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	306 °C (583 °F)
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

TABLA 8.3 (*continúa*): *e*) fluoropolímeros

Polímero representativo:	Politetrafluoretileno $(C_2F_4)_n$		
Símbolo:	PTFE	Elongación:	100% a 300%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	2.2
Grado de cristalinidad:	Cristalino en alrededor de 95%	Temperatura de transición al vidrio:	127 °C (260 °F)
Módulo de elasticidad:	425 MPa (60 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	327 °C (620 °F)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (2 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Recopilada de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

moldear que el CA, y tiene mayor resistencia al impacto, menor absorción de humedad y compatibilidad mejor con otros plastificadores. Los termoplásticos de celulosa tienen una participación en el mercado de alrededor de 1%.

Fluoropolímeros El ***politetrafluoretileno*** (PTFE), comúnmente conocido como ***Teflón***, abarca a cerca de 85% de la familia de los polímeros llamados ***fluoropolímeros***, en la que átomos de F remplazan a los átomos de H en la cadena de hidrocarburos. El PTFE es resistente en extremo al ataque químico y ambiental, no le afecta el agua, posee buenas propiedades eléctricas, buena resistencia al calor y coeficiente de fricción muy bajo. Estas dos últimas propiedades han extendido su uso en trastos de cocina antiadhesivos. Otras aplicaciones que se basan en la misma propiedad incluyen cojinetes que no requieren lubricación y otros componentes parecidos. El PTFE también tiene aplicaciones en equipo químico y de procesamiento de comida.

Poliamidas Una familia importante de polímeros que forma uniones de amidas (CO–NH) características durante la polimerización es la de las poliamidas (PA). Los miembros más importantes de la familia de las PA son los ***nylons***, de los que los dos principales grados son el nylon 6 y el nylon 6,6 (los números son códigos que indican el número de átomos de carbono en el monómero). Los datos que se dan en la tabla 8.3f son para el nylon-6,6, que se creó en DuPont en la década de 1930. Las propiedades del naylon-6, creado en Alemania, son similares. El nylon es fuerte, muy elástico, inflexible, resistente a la abrasión y autolubricante. A temperaturas alrededor de 125 ºC (250 ºF) conserva buenas propiedades mecánicas. Una desventaja es que absorbe agua y esto implica la degradación de sus propiedades. La mayoría de las aplicaciones del nylon (cerca de 90%) son en fibras para tapetes, ropa y cuerdas de neumáticos. El resto (10%) es para componentes de ingeniería; es común que el nylon sea un buen sustituto de los metales en cojinetes, engranes y piezas similares en las que se necesita resistencia y fricción baja.

Un segundo grupo de poliamidas es el de las ***aramidas*** (poliamidas aromáticas), de las que el ***Kevlar*** (nombre comercial de DuPont) ha ganado importancia como fibra para plásticos reforzados. La razón del interés en el Kevlar es que tiene la misma resistencia que el acero con 20% de su peso.

Policarbonato El policarbonato (PC) es notable por sus propiedades mecánicas excelentes en general, que incluyen tenacidad elevada y buena resistencia al escurrimiento plástico. Es uno de los termoplásticos mejores en cuanto a resistencia al calor y se puede usar a temperaturas cercanas a los 125 ºC (250 ºF). Además es transparente y resiste al fuego.

TABLA 8.3 (*continúa*): *f*) poliamidas.

Polímero representativo:	nylon-6,6 $((CH_2)_6(CONH)(CH_2)_4)_n$		
Símbolo:	PA-6,6	Elongación:	300%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.14
Grado de cristalinidad:	Altamente cristalino	Temperatura de transición al vidrio:	50 °C (122 °F)
Módulo de elasticidad:	700 MPa (100 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	260 °C (500 °F)
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	1% para todas las poliamidas

TABLA 8.3 (*continúa*): g) policarbonato.

Polímero:	Policarbonato $(C_3H_6(C_6H_4)_2CO_3)_n$		
Símbolo:	PC	Elongación:	110%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.2
Grado de cristalinidad:	Amorfo	Temperatura de transición al vidrio:	150 °C (302 °F)
Módulo de elasticidad:	2 500 MPa (350 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	230 °C (446 °F)
Resistencia a la tensión:	65 MPa (9 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

Sus aplicaciones incluyen piezas moldeadas para maquinaria, carcasas para máquinas de oficina, impulsores de bombas, cascos de seguridad y discos compactos (por ejemplo, audio, video y computadora). También se usa mucho en aplicaciones de cristales (ventanas y parabrisas).

Poliésteres El poliéster constituye una familia de polímeros formada por las uniones características del éster (CO–O). Son termoplásticos o termofijos, lo que depende si ocurre entrecruzamiento. De los poliésteres termoplásticos, un ejemplo representativo es el ***tereftalato de polietileno*** (PET), cuyos datos se presentan en la tabla. Puede ser amorfo o estar cristalizado parcialmente (hasta cerca de 30%), lo que depende de cómo se enfrió después de darle forma. El enfriamiento rápido favorece el estado amorfo, que es muy transparente. Las aplicaciones importantes incluyen contenedores de bebidas moldeados por soplado, películas fotográficas y cintas magnéticas de grabación. Además, el PET se usa mucho como fibras para telas. Las fibras de poliéster tienen absorción baja de humedad y buena recuperación ante la deformación, dos características que lo hacen ideal para prendas de vestir tipo "lavar y usar" que resisten ser exprimidas. Las fibras de PET casi siempre están mezcladas con algodón o lana. Algunos nombres familiares de fibras de poliéster incluyen el Dacron (DuPont), Fortrel (Celanese) y Kodel (Eastman Kodak).

Polietileno El polietileno (PE) se sintetizó por vez primera en la década de 1930, y hoy abarca el volumen más grande de todos los plásticos. Las características que hacen atractivo al PE como material de ingeniería son su costo bajo, y que es inerte químicamente y fácil de procesar. El polietileno se encuentra disponible en varios grados, los más comunes de los cuales son el ***polietileno de baja densidad*** (LPDE) y el ***polietileno de alta densidad*** (HDPE). El grado de densidad baja es un polímero muy ramificado con cristalinidad y densidad bajas. Las aplicaciones incluyen hojas, películas y aislamiento de alambres. El HDPE tiene una estructura más lineal, con cristalinidad y densidad elevadas. Estas diferencias hacen al HDPE más rígido y fuerte, y le dan una temperatura de fusión más alta. El HDPE se emplea para producir botellas, tubos y enseres domésticos. Ambos grados se procesan con la mayoría de métodos para conformar polímeros (véase el capítulo 13). En la tabla 8.3i se dan las propiedades de los dos grados.

Polipropileno A partir de su introducción a finales de la década de 1950, el polipropileno (PP) se ha convertido en un plástico importante, en especial para el moldeo por inyección.

TABLA 8.3 (*continúa*): *h*) poliésteres (termoplásticos).

Polímero representativo:	Tereftalato de polietileno $(C_2H_4–C_8H_4O_4)_n$		
Símbolo:	PET	Elongación:	200%
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Gravedad específica:	1.3
Grado de cristalinidad:	Amorfo a 30% cristalino	Temperatura de transición al vidrio:	70 °C (158 °F)
Módulo de elasticidad:	2 300 MPa (325 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	265 °C (509 °F)
Resistencia a la tensión:	55 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 2%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *i*) polietileno.

Polietileno:	$(C_2H_4)_n$ (densidad baja)	$(C_2H_4)_n$ (densidad alta)
Símbolo:	LDPE	HDPE
Método de polimerización:	Adición	Adición
Grado de cristalinidad:	Común 55%	Común 92%
Módulo de elasticidad:	140 MPa (20 000 lb/in^2)	700 MPa (100 000 lb/in^2)
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	30 MPa (4 000 lb/in^2)
Elongación:	100-500%	20-100%
Gravedad específica:	0.92	0.96
Temperatura de transición al vidrio:	–100 °C (–148 °F)	–115 °C (–175 °F)
Temperatura de fusión:	115 °C (240 °F)	135 °C (275 °F)
Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 20%	Alrededor de 15%

El PP se sintetiza en las estructuras isotáctica, sindiotáctica o atáctica, la primera de las cuales es la más importante y son sus características las que se presentan en la tabla. Es el más ligero de los plásticos y su resistencia a peso es elevada. El PP se compara con frecuencia con el HDPE debido a que su costo y muchas de sus propiedades son similares. Sin embargo, el punto de fusión elevado del polipropileno permite ciertas aplicaciones en las que se prefiere el uso del polietileno, por ejemplo, en componentes que deben esterilizarse. Otras aplicaciones son las piezas moldeadas por inyección para automóviles y enseres domésticos, y productos de fibra para alfombras. Una aplicación especial del polipropileno son las bisagras de una pieza que pueden sujetarse a un número elevado de ciclos de flexión sin que fallen.

Poliestireno Hay varios polímeros, copolímeros y terpolímeros que se basan en el monómero del estireno (C_8H_8), de los que el mayor volumen corresponde al poliestireno (PS). Es un homopolímero lineal con estructura amorfa que en general resulta notable por su fragilidad. El PS es transparente, se colorea con facilidad y se moldea con rapidez, pero a temperaturas elevadas se degrada y varios solventes lo disuelven. Debido a su fragilidad, algunos grados de PS contienen de 5% a 15% de caucho, tipos para los que se emplea el término ***poliestireno de alto impacto*** (HIPS). Tienen tenacidad alta, pero son pobres en transparencia y resistencia a la tensión. Además de las aplicaciones en moldeo por inyección (por ejemplo, juguetes moldeados, enseres domésticos), el poliestireno también se emplea para empacar, en forma de espumas de PS.

Cloruro de polivinilo El cloruro de polivinilo (PVC) es un plástico muy usado cuyas propiedades varían si se combinan aditivos con el polímero. En particular, se emplean plastificadores para obtener termoplásticos que van del PVC rígido (sin plastificadores) a PVC flexible (proporciones elevadas de plastificador). El rango de propiedades hace del PVC un polímero versátil, con aplicaciones que incluyen tubos rígidos (que se utilizan en la construcción y sistemas de agua, drenaje e irrigación), accesorios, aislamiento de alambres y cables, películas, hojas, empaque de comida, pisos y juguetes. El PVC en sí es relativamente inestable ante el calor y la luz, y deben agregarse estabilizadores para mejorar su resistencia en esas condiciones ambientales. Es necesario tener cuidado en la

TABLA 8.3 (*continúa*): *j*) polipropileno.

Polímero:	Polipropileno $(C_3H_6)_n$	Elongación:	10%–500%
Símbolo:	PP	Gravedad específica:	0.90
Método de polimerización:	Adición	Temperatura de transición al vidrio:	–20 °C (–4 °F)
Grado de cristalinidad:	Alto, varía con el procesamiento	Temperatura de fusión:	176 °C (249 °F)
Módulo de elasticidad:	1 400 MPa (200 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 13%
Resistencia a la tensión:	35 MPa (5 000 lb/in^2)		

[a] La elongación depende de los aditivos.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *k*) poliestireno.

Polímero:	Poliestireno $(C_8H_8)_n$		
Símbolo:	PS	Elongación:	1%
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.05
Grado de cristalinidad:	Ninguno (amorfo)	Temperatura de transición al vidrio:	100 °C (212 °F)
Módulo de elasticidad:	3 200 MPa (450 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	240 °C (464 °F)
Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 10%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.3 (*continúa*): *l*) Cloruro de polivinilo.

Polímero:	Cloruro de polivinilo $(C_2H_3CL)_n$		
Símbolo:	PVC	Elongación:	2% sin plastificador
Método de polimerización:	Adición	Gravedad específica:	1.40
Grado de cristalinidad:	Ninguno (estructura amorfa)	Temperatura de transición al vidrio:	81 °C (178 °F)
Módulo de elasticidad:	2 800 MPa (400 000 lb/in^2)	Temperatura de fusión:	212 °C (414 °F)
Resistencia a la tensión:	40 MPa (6 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 16%

[a] Sin plastificador.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

producción y manejo del monómero del cloruro de vinilo que se emplea para polimerizar al PVC, debido a su naturaleza cancerígena.

8.3 POLÍMEROS TERMOFIJOS

Los polímeros termofijos (TS) se distinguen por su estructura muy entrecruzada. En realidad, la pieza formada (por ejemplo, la manija de un recipiente o la cubierta de los interruptores eléctricos) se convierte en una sola macromolécula. Los termofijos siempre son amorfos y no presentan temperatura de transición al vidrio. En esta sección se estudian las características generales de los plásticos TS y se identifican los materiales importantes de esta categoría.

8.3.1 Propiedades y características generales

Debido a las diferencias de química y estructura molecular, las propiedades de los plásticos termofijos son distintas de las de los termoplásticos. En general, los termofijos son 1) más rígidos, su módulo de elasticidad es de dos a tres veces más grande; 2) frágiles, virtualmente no poseen ductilidad; 3) menos solubles en solventes comunes; 4) capaces de resistir temperaturas de uso elevadas; y 5) no son capaces de volverse a fundir; en vez de ello, se degradan o queman.

Las diferencias en las propiedades de los plásticos TS son atribuibles al entrecruzamiento, que forma una estructura estable en lo térmico, tridimensional y de enlaces covalentes en el interior de la molécula. El entrecruzamiento ocurre de tres maneras [7]:

1. ***Sistemas activados por temperatura***: En los sistemas más comunes, los cambios los ocasiona el calor que se suministra durante la operación de dar forma a la pieza (por ejemplo, moldeo). El material de inicio es un polímero lineal en forma granular que suministra la planta química. Conforme se agrega calor, el material se suaviza para ser moldeado; el calentamiento adicional da como resultado el entrecruzamiento del polímero. El término ***termofijo*** se aplica con más frecuencia a esta clase de polímeros.
2. ***Sistemas activados por catalizadores***: En estos sistemas, el entrecruzamiento ocurre cuando se agregan al polímero cantidades pequeñas de un catalizador, que está en forma líquida. Sin el catalizador, el polímero permanece estable; una vez que se combina con aquél, cambia a forma sólida.

TABLA 8.4 Polímeros termofijos de importancia comercial: *a*) amino resinas.

Polímero representativo:	Melamina-formaldehído		
Monómeros:	Melamina ($C_3H_6N_6$) y formaldehído (CH_2O)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Menos de 1%
Módulo de elasticidad:	9 000 MPa (1 300 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.5%
Resistencia a la tensión:	50 MPa (7 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 4% para urea-formaldehído y melamina-formaldehído.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

3. ***Sistemas activados por mezcla***: Ejemplos de estos sistemas son la mayoría de epóxicos. La mezcla de dos productos químicos provoca una reacción que forma un polímero sólido entrecruzado. En ocasiones se emplean temperaturas elevadas para acelerar las reacciones.

Las reacciones químicas que se asocian con el entrecruzamiento se denominan ***curado*** o ***fraguado***. El curado se efectúa en plantas de fabricación que dan forma a las piezas, a diferencia de las plantas químicas que suministran al fabricante los materiales de inicio.

8.3.2 Polímeros termofijos importantes

Los plásticos termofijos no se usan tanto como los termoplásticos, quizá por las complicaciones adicionales del procesamiento que involucra el curado de los polímeros TS. El volumen mayor de termofijos son las resinas fenólicas, cuyo volumen anual es alrededor de 6% del total de plásticos en el mercado. Esto es significativamente menos que el polietileno, el termoplástico líder, cuyo volumen es de cerca de 35% del total. En la tabla 8.4 se presentan los datos técnicos para estos materiales. Los datos de participación en el mercado se refieren al total de plásticos (TP más TS).

Amino resinas Los plásticos amino, caracterizados por el grupo del amino (NH_2), consisten en dos polímeros termofijos, urea-formaldehído y melamina-formaldehído, que se producen por la reacción del formaldehído (CH_2O) ya sea con la urea ($CO(NH_2)_2$) o con la melamina ($C_3H_6N_6$), respectivamente. En cuanto a importancia comercial, las amino resinas están justo por debajo de las demás resinas de formaldehído, fenol-formaldehído, que se estudian enseguida. La ***urea-formaldehído*** compite con los fenoles en ciertas aplicaciones, en particular como cubierta (triplay) y tablero de partículas adhesivas. Las resinas también se emplean como un compuesto moldeador. Es un poco más caro que el material de fenol. El plástico de ***melamina-formaldehído*** es resistente al agua y se utiliza para trastos y como recubrimiento en mesas laminadas y contracubiertas (Formica es un nombre comercial de Cyanamide Co.). Cuando se emplean como materiales moldeadores, los plásticos amino por lo general contienen proporciones significativas de rellenos, tales como la celulosa.

Epóxicos Las resinas epóxicas se basan en un grupo químico denominado ***epóxidos***. La formulación más sencilla del epóxido es el óxido de etileno (C_2H_3O). La epiclorohidrina (C_3H_5OCl) es un epóxido que se emplea mucho más para producir resinas epóxicas. Si no están curados, los epóxidos tienen un grado bajo de polimerización. Para incrementar el peso

TABLA 8.4 (*continúa*): *b*) epóxicos.

Ejemplo de química:	Epiclorohidrina (C_3H_5OCl) más un agente de curado como la trietilamina (C_6H_5–CH_2N–$(CH_3)_2$)		
Método de polimerización:	Condensación	Elongación	0%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.1
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 1%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.4 (*continúa*): *c*) fenol-formaldehído.

Ingredientes del monómero:	Fenol (C_6H_5OH) y formaldehído (CH_2O)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Menos de 1%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.4
Resistencia a la tensión:	70 MPa (10 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	6%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

molecular y el entrecruzamiento, debe usarse el epóxido, el agente de curado. Los posibles agentes de curado incluyen las poliaminas y los anhídridos de ácido. Los epóxicos curados son notables por su resistencia, adhesividad y resistencia al calor y al ataque químico. Las aplicaciones incluyen recubrimientos de superficies, pisos industriales, compuestos de fibra de vidrio reforzada y adhesivos. Las propiedades aislantes de los epóxicos termofijos los hacen útiles en varias aplicaciones electrónicas, tales como el encapsulamiento de circuitos integrados y la laminación de tarjetas de circuitos impresos.

Fenólicos El fenol (C_6H_5OH) es un compuesto ácido que reacciona con los aldehídos (alcoholes deshidrogenados), de los que el más reactivo es el formaldehído (CH_2O). El ***fenol-formaldehído*** es el más importante de los polímeros fenólicos; empezó a comercializarse alrededor de 1900 con el nombre comercial de ***bakelita***. Casi siempre se combina con rellenos tales como el aserrín, las fibras de celulosa y algunos minerales, cuando se emplea como material para moldear. Es frágil, posee buenas estabilidades térmica, química y dimensional. Su capacidad de aceptar colorantes es limitada: sólo está disponible en colores oscuros. Los productos moldeados constituyen únicamente cerca de 10% del total de fenoles que se usan. Otras aplicaciones incluyen adhesivos para madera laminada (triplay), tarjetas de circuitos impresos, contracubiertas y materiales de unión para frenos y ruedas abrasivas.

Poliésteres Los poliésteres, que contienen las uniones características de los ésteres (CO–O), son termofijos así como termoplásticos (véase la sección 8.2). Los poliésteres termofijos se emplean mucho en plásticos reforzados (compuestos) para fabricar objetos grandes tales como tubos, tanques, cascos de lanchas, piezas de carrocerías automotrices y paneles para la construcción. También se utilizan en diversos procesos de moldeo para producir piezas pequeñas. La síntesis del polímero inicial involucra la reacción de un ácido o anhídrido tal como el anhídrido maleico ($C_4H_2O_3$) con un glicol como el etilenglicol ($C_2H_6O_2$). Esto produce un ***poliéster insaturado*** de peso molecular relativamente bajo (MW = 1000 a 3000). Este ingrediente se mezcla con un monómero capaz de polimerizarse y entrecruzarse con el poliéster. El estireno (C_8H_8) se usa comúnmente para este propósito, en proporciones de 30% a 50%. Se agrega un tercer componente, denominado inhibidor, para impedir el entrecruzamiento prematuro. Esta mezcla forma el sistema de resina de poliéster que se suministra al fabricante. Los poliésteres se curan ya sea con calor (sistemas activados por temperatura) o por medio de un catalizador que se agrega a la resina de poliéster (sistema activado por catalizador). El curado se realiza en el momento de la fabricación (proceso de moldeo o de otro tipo) y da como resultado el entrecruzamiento del polímero.

Una clase importante de poliésteres son las resinas ***alquídicas*** (el nombre es una abreviatura y combinación de las palabras alcohol y ácido, y el cambio de algunas letras).

TABLA 8.4 (*continúa*): *d*) poliéster insaturado.

Ejemplo de química:	Anhídrido maleico ($C_4H_2O_3$) y etilenglicol ($C_2H_6O_2$) más estireno (C_8H_8)		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	0%
Módulo de elasticidad:	7 000 MPa (1 000 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.1
Resistencia a la tensión:	30 MPa (40 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	3%

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

TABLA 8.4 (*continúa*): *e*) poliuretano.

Polímero:	El poliuretano se forma por la reacción de un poliol y un isocianato. La química varía mucho.		
Método de polimerización:	Etapas (condensación)	Elongación:	Depende del entrecruzamiento.
Módulo de elasticidad:	Depende de la química y el procesamiento.	Gravedad específica:	1.2
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 4%, incluidos elastómeros

[a] Común para poliuretano muy entrecruzado.

Recopilada a partir de las referencias [2], [4], [6], [7], [9] y [14].

Se emplean sobre todo como bases de pinturas, barnices y lacas. También están disponibles compuestos alquídicos para moldeo, pero sus aplicaciones son limitadas.

Poliuretanos Incluyen una familia grande de polímeros, caracterizados todos por el grupo del uretano (NHCOO) en su estructura. La química de los poliuretanos es compleja y en la familia existen muchas variedades de ella. El rasgo característico es la reacción de un ***poliol***, cuyas moléculas contienen grupos de hidroxilos (OH), tales como el butileno éter glicol ($C_4H_{10}O_2$), y un ***isocianato***, como el diisocianato difenilmetano ($C_{15}H_{10}O_2N_2$). Según las variaciones de su química, entrecruzamiento y procesamiento, los poliuretanos pueden ser materiales termoplásticos, termofijos o elastoméricos, de los que estos dos últimos son los que tienen mayor importancia comercial. La aplicación principal del poliuretano es en espumas. Éstas varían entre elastoméricas y rígidas, y las últimas tienen un entrecruzamiento mayor. Las espumas rígidas se emplean como material de relleno en paneles huecos para la construcción y en las paredes de refrigeradores. En estos tipos de aplicaciones, el material proporciona un aislamiento térmico excelente, da rigidez a la estructura y no absorbe agua en cantidades significativas. Muchas pinturas, barnices y recubrimientos similares se basan en sistemas de uretano. En la sección 8.4 se estudian los elastómeros de poliuretano.

Silicones Éstos son polímeros inorgánicos y seminorgánicos, que se distinguen por la presencia de una unión repetitiva de siloxano (–Si–O–) en su estructura molecular. Una formulación común combina el radical metilo (CH_3) con (SiO) en distintas proporciones para obtener la unidad repetitiva, (($(CH_3)_m$)–SiO), donde ***m*** establece la proporcionalidad. Según las variaciones en su composición y procesamiento, los polisiloxanos se producen en tres formas: 1) fluidos, 2) elastómeros y 3) resinas termofijas. Los fluidos 1) son polímeros de peso molecular bajo que se usan como lubricantes, pulidores, ceras y otros líquidos; no son realmente polímeros en el sentido en que se emplea el término en este capítulo; no obstante, son productos de importancia comercial. Los elastómeros de silicón 2), que se estudian en la sección 8.4, y los termofijos 3), que se analizan aquí, son entrecruzados. Cuando el entrecruzamiento es muy alto, los polisiloxanos forman sistemas rígidos de resina que se emplean para pinturas, barnices y otros recubrimientos, y en laminaciones tales como las tarjetas para circuitos impresos. También se utilizan como materiales para moldearse y obtener piezas eléctricas. El curado se lleva a cabo por medio de calentamiento o dejando que se evaporen los solventes que contienen los polímeros. Los silicones son notables por su buena resistencia al calor y por ser repelentes al agua, pero su resistencia mecánica no es tan grande como la de otros polímeros entrecruzados. Los datos de la tabla 8.4f son para un polímero de silicón termofijo.

TABLA 8.4 (*continúa*): *f*) resinas de silicón termofijo.

Ejemplo de química:	$((CH_3)_6-SiO)_n$		
Método de polimerización:	Por lo general de etapas (condensación)	Elongación:	0%
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Gravedad específica:	1.65
		Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

8.4 ELASTÓMEROS

Los elastómeros son polímeros capaces de desarrollar una deformación elástica grande si se les sujeta a esfuerzos relativamente pequeños. Algunos elastómeros presentan extensiones de 500% o más y regresan a su forma original. El término más frecuente para un elastómero es, por supuesto, caucho. Los cauchos se dividen en dos categorías: 1) caucho natural, derivado de ciertos vegetales; y 2) elastómeros sintéticos, que se obtienen con procesos de polimerización similares a los que se emplean para los polímeros termoplásticos y termofijos. Antes de estudiar los cauchos naturales y sintéticos, se analizarán las características generales de los elastómeros.

8.4.1 Características de los elastómeros

Los elastómeros consisten en moléculas de cadena larga entrecruzadas (como los polímeros termofijos). Deben sus propiedades elásticas tan impresionantes a la combinación de dos características: 1) las moléculas largas están dobladas estrechamente cuando no están estiradas, y 2) el grado de entrecruzamiento está muy por debajo del de los termofijos. En la figura 8.12a se ilustran estas características, y se aprecia una molécula doblada estrechamente no sujeta a esfuerzo.

Cuando el material se estira, las moléculas se ven forzadas a desenrollarse y se enderezan, como se aprecia en la figura 8.12b. La resistencia natural de las moléculas para desenrollarse proporciona el módulo de elasticidad inicial del material agregado. Conforme se experimenta más estiramiento, los enlaces covalentes de las moléculas entrecruzadas comienzan a jugar un papel mayor en el módulo, y la rigidez se incrementa, como se ilustra en la figura 8.13. Con mayor entrecruzamiento, el elastómero se vuelve más rígido y su módulo de elasticidad es más lineal. Estas características se ilustran en la figura por medio de curvas esfuerzo-deformación para tres grados de caucho: natural crudo, cuyo entrecruzamiento es muy bajo; curado (vulcanizado) con entrecruzamiento de medio a bajo; y duro (ebonita), cuyo alto grado de entrecruzamiento lo transforma en un plástico termofijo.

Para que un polímero presente propiedades elastoméricas debe ser amorfo en condiciones sin estiramiento, y su temperatura debe estar por arriba de T_g. Si se encuentra por debajo de la temperatura de transición al vidrio, el material es duro y frágil; por arriba de T_g el polímero está en estado "de caucho". Cualquier polímero termoplástico amorfo tendrá propiedades elastoméricas por encima de T_g, durante un tiempo corto, porque sus moléculas lineales siempre están enrolladas hasta cierto grado, lo que permite la extensión elástica. Es la ausencia de entrecruzamiento en los polímeros TP lo que les impide ser elásticos en verdad; en lugar de ello, muestran un comportamiento viscoelástico.

En la mayoría de elastómeros comunes de hoy día, se requiere la cura para que se dé el entrecruzamiento. El término que se emplea para el curado en el contexto del caucho natural (y algunos sintéticos) es el de ***vulcanización***, que involucra la formación de entrecruzamientos químicos entre las cadenas del polímero. El entrecruzamiento común en el caucho es de 1 a 10 uniones por cien átomos de carbono en la cadena de polímero lineal, lo que depende de la rigidez que se desea para el material. Esto es considerablemente menos que el grado de entrecruzamiento de los termofijos.

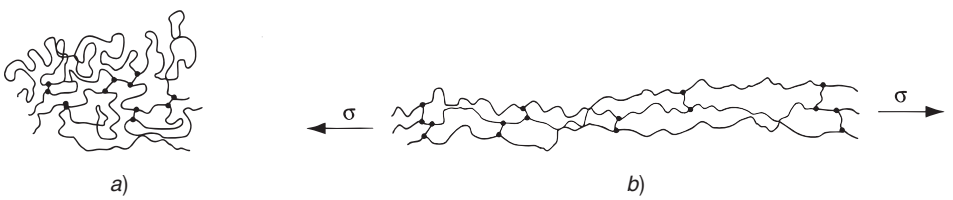


FIGURA 8.12 Modelo de moléculas largas de elastómero, con grado bajo de entrecruzamiento: *a*) sin estirar y *b*) sujetas a un esfuerzo de tensión.

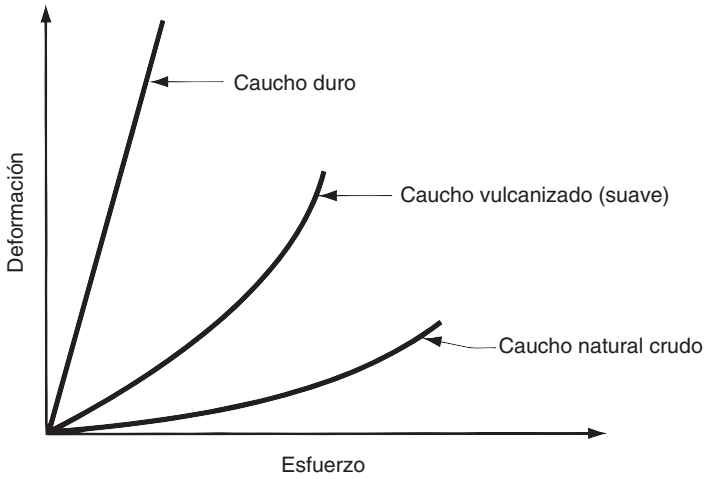


FIGURA 8.13 Aumento de la rigidez como función del esfuerzo para tres grados de caucho: natural, vulcanizado y duro.

Un método alternativo de curado involucra el empleo de químicos de inicio que reaccionan cuando se mezclan (a veces requieren de un catalizador o de calor) para formar elastómeros con entrecruzamientos relativamente raros entre las moléculas. Estos cauchos sintéticos se conocen como ***sistemas de elastómeros reactivos***. Ciertos polímeros que se curan por este medio, como los uretanos y silicones, se clasifican ya sea como termofijos o como elastómeros, lo que depende del grado de entrecruzamiento que se logra durante la reacción.

Una clase relativamente nueva de elastómeros, llamados ***elastómeros termoplásticos***, posee propiedades elastoméricas que resultan de la mezcla de dos fases, ambas termoplásticas. Una está por arriba de su T_g a temperatura ambiente, mientras que la otra está por debajo de T_g. Así, se tiene un polímero que incluye regiones de caucho suave entremezcladas con partículas duras que actúan como entrecruzamientos. El material compuesto es elástico en cuanto a su comportamiento mecánico, aunque no tan extensible como la mayoría de los demás elastómeros. Debido a que ambas fases son termoplásticas, el material agregado se puede calentar por arriba de su T_m para darle forma, con procesos que por lo general son más económicos que los que se emplean para el caucho.

En las dos secciones que siguen se estudian los elastómeros. La primera trata del caucho natural y la manera en que se vulcaniza para crear un material comercial útil; en la segunda se examinan los cauchos sintéticos.

8.4.2 Caucho natural

El caucho natural (CN) consiste sobre todo en poliisopreno, un polímero del isopreno (C_5H_8) de peso molecular alto. Se deriva del látex, sustancia lechosa producida por varias plantas, la más importante de las cuales es el árbol del hule (*Hevea brasiliensis*), que crece en los climas tropicales (véase la nota histórica 8.2). El látex es una emulsión en agua de poliisopreno (cerca de un tercio del peso), más otros ingredientes. El caucho se extrae del látex por medio de distintos métodos (por ejemplo, coagulación, secado y rocío) que eliminan el agua.

Nota histórica 8.2 *Caucho natural*

El primer uso del caucho natural parece haber sido en la forma de pelotas deportivas de los indígenas de América Central y del Sur, hace al menos 500 años. Colón observó eso durante su segundo viaje al Nuevo Mundo en 1493-1496. Las pelotas estaban hechas de goma seca del árbol del caucho. Los primeros hombres blancos de América del Sur llamaron al árbol ***caoutchouc***, que era su manera de pronunciar el nombre que los indios le daban. El nombre ***rubber* (*caucho*)**

proviene del químico inglés J. Priestley, quien descubrió (alrededor de 1770) que la goma de caucho podía borrar cualquier marca de lápiz. Los primeros artículos de caucho eran menos que satisfactorios: en el verano se derretían y en el invierno se endurecían. Una de las personas que estaba en el negocio de manufacturar y vender caucho era Charles Goodyear. Al reconocer las deficiencias del material natural, experimentó maneras de mejorar sus propiedades y descubrió que podía curarse por medio de calentarlo con azufre. Esto lo hizo en 1839 y patentó el proceso, que posteriormente se llamó ***vulcanización***, en 1844.

La vulcanización y la demanda emergente de productos de caucho llevaron a un crecimiento muy grande de la producción de este material y de la industria que lo procesaba. En 1876, Henry Wickham obtuvo miles de semillas del árbol del hule de la jungla brasileña y las plantó en Inglaterra: los retoños fueron trasplantados después a Ceilán y Malasia (en aquel entonces colonias británicas) para dar origen a plantaciones de caucho. Muy pronto, otros países de la región siguieron el ejemplo británico. El sureste de Asia se volvió la base de la industria del caucho.

En 1888, el médico veterinario británico John Dunlop patentó las llantas neumáticas para bicicletas. Hacia el siglo xx, en Estados Unidos y Europa se desarrollaba la industria automotriz. Las industrias del automóvil y el caucho crecieron juntas hasta ocupar posiciones de importancia inimaginable.

El caucho natural crudo (sin vulcanizar) es pegajoso en agua caliente, rígido y frágil en la fría. Para formar un elastómero de propiedades útiles, el caucho natural debe vulcanizarse. Tradicionalmente, la vulcanización se ha llevado a cabo mezclando cantidades pequeñas de azufre y otros productos químicos con el caucho natural que luego se calientan. El efecto químico de la vulcanización es crear entrecruzamientos; el resultado mecánico es que se incrementan la resistencia y la rigidez, pero se mantiene la elasticidad. El marcado cambio de las propiedades ocasionado por la vulcanización se observa en las curvas de esfuerzo-deformación que se presentan en la figura 8.13.

El azufre por sí solo ocasiona entrecruzamientos, pero el proceso es lento y toma varias horas. Se agregan otros productos químicos durante la vulcanización para acelerar el proceso y obtener otros resultados benéficos. Asimismo, el caucho se puede vulcanizar con el empleo de productos diferentes del caucho. Hoy día, los tiempos del curado se han reducido mucho en comparación con el curado por medio de azufre de los primeros años.

Como material de ingeniería, el caucho vulcanizado es notable entre los elastómeros por su alta resistencia a la tensión, resistencia al corte, resiliencia (capacidad de recuperar su forma después de la deformación) y resistencia ante el desgaste y la fatiga. Su debilidad radica en que se degrada si se sujeta a calor, luz del sol, oxígeno, ozono y aceite. Algunas de estas limitaciones se reducen con el uso de aditivos. En la tabla 8.5 se presentan las propiedades comunes y otros datos para el caucho natural vulcanizado. La participación en el mercado es relativa respecto del volumen total anual del caucho natural más el sintético. El volumen del caucho es alrededor de 15% del mercado total de polímeros.

El mercado individual más grande para el caucho natural es el de las llantas (neumáticos) de automóviles. En las llantas, un aditivo importante es el negro de humo; refuerza el caucho y sirve para incrementar su resistencia a la tensión, el desgarre y la abrasión. Otros productos hechos con caucho son suelas de zapatos, cojinetes, sellos y componentes que absorben los golpes. En cada caso, el caucho tiene la composición necesaria para adquirir las propiedades específicas que requiera la aplicación. Además de negro de humo, se emplean otros aditivos en el caucho, y algunos de los elastómeros sintéticos incluyen arcilla, caolín, sílice, talco y carbonato de calcio, así como productos químicos que aceleran y facilitan la vulcanización.

TABLA 8.5 Características y propiedades comunes del caucho vulcanizado.

Polímero:	Poliisopreno		
Símbolo:	CN		
Módulo de elasticidad:	18 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Gravedad específica:	0.93
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	80 °C (180 °F)
Elongación:	700% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 °C (−60 °F)
		Participación aproximada en el mercado:	22%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9] y otras fuentes.

8.4.3 Cauchos sintéticos

Hoy día, el peso de los cauchos sintéticos es más del triple del natural. El desarrollo de estos materiales sintéticos fue motivado ampliamente por las guerras mundiales, cuando era difícil obtener el CN (véase la nota histórica 8.3). El más importante de los sintéticos es el caucho de estireno-butadieno (SBR), un copolímero del butadieno (C_4H_6) y el estireno (C_4H_8). Igual que para la mayoría de los demás polímeros, la materia prima predominante en los cauchos sintéticos es el petróleo. Aquí sólo se estudian los cauchos de mayor importancia comercial. En la tabla 8.6 se presentan los datos técnicos. Los datos de participación en el mercado se refieren al volumen total de cauchos naturales y sintéticos. Sólo es utilizable cerca de 10% del volumen total de la producción de caucho, por lo que los pesos totales que aparecen en las tablas 8.5 y 8.6 no suman 100%.

Nota histórica 8.3 *Cauchos sintéticos*

En 1826, Faraday reconoció que la fórmula del caucho natural era C_5H_8. Intentos posteriores efectuados durante muchos años para reproducir esta molécula por lo general no tuvieron éxito. En forma lamentable, fueron las guerras mundiales las que crearon la necesidad, que es la madre de la invención, del caucho sintético. En la Primera Guerra Mundial, los alemanes, imposibilitados de acceder al caucho natural, inventaron un sustituto basado en el metil. Este material no tuvo mucho éxito, pero marcó la primera etapa de la producción a gran escala del caucho sintético.

Después de la Primera Guerra Mundial, el precio del caucho natural era tan bajo que se abandonaron muchos intentos de fabricar el sintético. Sin embargo, los alemanes, que quizá preveían el conflicto por venir, renovaron los esfuerzos por desarrollarlo. La empresa I. G. Farben creó dos cauchos sintéticos, a principios de la década de 1930, a los que llamó Buna-S y Buna-N. El término ***buna*** se deriva del ***bu***tadieno (C_4H_6), que se ha vuelto el ingrediente fundamental de muchos cauchos sintéticos modernos, y de **Na**, el símbolo del sodio, que se emplea para acelerar o catalizar el proceso de polimerización (la palabra en alemán que significa sodio es ***Natrium***). El símbolo **S** en Buna-S se refiere al estireno. Buna-S es el copolímero que se conoce hoy día como ***caucho de estireno-butadieno***, o SBR. La N de Buna-N es un acrónimo de acriloNitrilo, y el caucho sintético se llama ***caucho de nitrilo*** en el uso cotidiano.

Otros trabajos incluyeron el efectuado por la compañía DuPont en Estados Unidos, que condujo al desarrollo del policloropreno, que se comercializó por vez primera en 1932 con el nombre de Dupreno, y que cambió más tarde a ***Neopreno***, que es la denominación actual. Era (y es) un caucho sintético más resistente a los aceites que el caucho natural.

Durante la Segunda Guerra Mundial, los japoneses cortaron el acceso de E.U. al abasto de caucho natural del sureste de Asia. La producción a gran escala del caucho sintético Buna-S comenzó en ese país. El gobierno federal prefería emplear el nombre **GR-S** (Caucho-estireno del Gobierno) en vez del de Buna-S (su nombre en alemán). Hacia 1944, Estados Unidos superaba a Alemania en la producción de SBR en una proporción de diez a uno. Desde la década de 1960, la producción mundial de cauchos sintéticos ha superado la de los naturales.

Caucho de butadieno El ***polibutadieno*** (BR) es importante sobre todo en combinación con otros cauchos. Está compuesto de caucho natural y estireno (el caucho de estireno-butadieno se estudia más adelante) y se emplea para producir llantas de autos. Solo, tiene características de resistencia al desgarre y a la tensión, y facilidad de procesamiento, que lo hacen menos que conveniente.

TABLA 8.6 Características y propiedades comunes de los cauchos sintéticos: a) caucho de butadieno.

Polímero:	Polibutadieno		
Símbolo:	BR	Gravedad específica:	0.93
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	100 °C (210 °F)
Elongación:	500% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 °C (−60 °F)
		Participación aproximada en el mercado:	12%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *b*) caucho butilo.

Polímero:	Copolímero de isobutileno $(C_4H_8)_n$ e isopreno $(C_5H_8)_n$		
Símbolo:	PIB	Gravedad específica:	0.92
Módulo de elasticidad:	7 MPa (1 000 lb/in^2) con elongación del 300%.	Límite superior de temperatura:	110 ºC (220 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (3 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Alrededor de 3%
Elongación:	700%		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

Caucho butilo El caucho butilo es un copolímero de poliisobutileno (98.99%) y poliisopreno (1-2%). Se vulcaniza para darle al caucho una permeabilidad muy baja al aire, lo que tiene aplicaciones en productos inflables tales como cámaras interiores, revestimientos de llantas sin cámaras y artículos deportivos.

Caucho cloropreno El policloropreno fue uno de los primeros cauchos sintéticos que se desarrollaron (a principios de la década de 1930). Hoy se conoce como ***Neopreno***, que es un caucho importante de propósitos especiales. Cristaliza cuando se estira para dar buenas propiedades mecánicas. El caucho cloropreno (CR) es más resistente que el CN a los aceites, al clima, al ozono, al calor y a las llamas (el cloro hace que este caucho se autoextinga), pero algo más caro. Sus aplicaciones incluyen mangueras para combustible (y otras partes automotrices), bandas transportadoras y juntas, pero no llantas.

Caucho etileno-propileno La polimerización de etileno y propileno con proporciones pequeñas (3-8%) de un monómero dieno produce el terpolímero etileno-propileno-dieno (EPDM), un caucho sintético útil. Las aplicaciones son para piezas sobre todo en la industria automotriz, más que para llantas. Otros usos que tiene son para aislar alambres y cables.

Caucho isopreno El isopreno se polimeriza para sintetizar un equivalente químico del caucho natural. El ***poliisopreno*** sintético (sin vulcanizar) es más suave y se moldea con mayor facilidad que el caucho natural. Las aplicaciones del material sintético son similares a las de su contraparte natural, y las llantas de automóvil constituyen el mercado individual más grande. También se emplea para zapatos, bandas transportadoras y compuestos para calafatear. El costo por unidad de peso es 35% más alto que el del CN.

TABLA 8.6 (*continúa*): *c*) caucho cloropreno (neopreno).

Polímero:	Policloropreno $(C_4H_5Cl)_n$		
Símbolo:	CR	Gravedad específica:	1.23
Módulo de elasticidad:	7 MPa (1 000 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	120 ºC (250 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	220 ºC (210 ºF)
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	2%
Elongación:	500% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *d*) caucho etileno-propileno-dieno.

Polímero representativo:	Terpolímero de etileno (C_2H_4), propileno (C_3H_6) y un monómero dieno (3-8%) para el entrecruzamiento.		
Símbolo:	EPDM	Gravedad específica:	0.86
Resistencia a la tensión:	15 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	150 ºC (300 ºF)
Elongación:	300% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	5%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *e*) caucho isopreno (sintético).

Polímero:	Poliisopreno $(C_3H_8)_n$		
Símbolo:	IR	Gravedad específica:	0.93
Módulo de elasticidad:	17 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	80 ºC (180 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	25 MPa (3 500 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	2%
Elongación:	500% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

Caucho nitrilo Éste es un copolímero vulcanizado de butadieno (50-75%) y acrilonitrilo (25-50%). Su nombre técnico es ***caucho butadieno-acrilonitrilo***. Tiene resistencia buena a la tensión y también a la abrasión, al aceite, a la gasolina y al agua. Estas propiedades lo hacen ideal para aplicaciones tales como tanques de gasolina y sellos, así como para calzado.

Poliuretanos Los poliuretanos termofijos (véase la sección 8.3.2) con entrecruzamientos mínimos son elastómeros, y es común que la mayoría se produzcan como espumas flexibles. En esta forma, se emplean mucho como materiales para vestiduras de muebles y asientos de autos. El poliuretano que no es esponja se moldea en productos que van desde suelas de zapatos hasta defensas de coches, con el entrecruzamiento ajustado para obtener las propiedades que se quiere para la aplicación. Sin entrecruzamiento, el material es un elastómero termoplástico que se moldea por inyección. Como elastómero o termofijo, se utiliza la reacción de moldeo por inyección y otros métodos para darle forma.

Silicones Igual que los poliuretanos, los silicones son elastómeros o termofijos, lo que depende del grado de entrecruzamiento. Los elastómeros de silicón son notables por el rango amplio de temperaturas en que pueden utilizarse. Su resistencia a los aceites es baja. Los silicones poseen varias composiciones químicas, la más común es la de ***polidimetilsiloxano*** (véase la tabla 8.6h). Para obtener propiedades mecánicas aceptables, los elastómeros de silicón deben reforzarse, por lo general con polvos finos de sílice. Debido a su costo elevado, se les considera cauchos de propósito especial para aplicaciones tales como juntas, sellos, aislamiento para alambres y cables, aparatos ortopédicos y bases de materiales para calafatear.

TABLA 8.6 (*continúa*): *f*) caucho nitrilo.

Polímero:	Copolímero de butadieno (C_4H_6) y acrilonitrilo (C_3H_3N)		
Símbolo:	BR	Gravedad específica:	1.00 (sin rellenos)
Módulo de elasticidad:	10 MPa (1 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	120 ºC (250 ºF)
Resistencia a la tensión:	30 MPa (4 000 lb/in^2)	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
Elongación:	500% antes de fallar	Participación aproximada en el mercado:	2%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *g*) poliuretano.

Polímero:	Poliuretano (la composición química varía)		
Símbolo:	PUR	Gravedad específica:	1.25
Módulo de elasticidad:	10 MPa (1 200 lb/in^2) con elongación de 300%.	Límite superior de temperatura:	100 ºC (210 ºF)
		Límite inferior de temperatura:	−50ºC (−60 ºF)
Resistencia a la tensión:	60 MPa (8 000 lb/in^2)	Participación aproximada en el mercado:	Se enlista como termofijo, véase la tabla 8.4e.
Elongación:	700% antes de fallar		

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *h*) caucho de silicón.

Polímero representativo:	Polidimetilsiloxano $(SiO(CH_3)_2)_n$		
Símbolo:	VMQ	Gravedad específica:	0.98
Resistencia a la tensión:	10 MPa (1 500 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	230 ºC (450 ºF)
Elongación:	700% antes de fallar	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	Menos de 1%

Caucho estireno-butadieno El SBR es un copolímero aleatorio de estireno (alrededor de 25%) y butadieno (cerca de 75%). Originalmente se desarrolló en Alemania como caucho Buna-S antes de la Segunda Guerra Mundial. Hoy día, es el elastómero del que se produce el mayor peso, con 40% del total de todos los cauchos producidos (el caucho natural ocupa el segundo lugar por peso). Sus características atractivas son costo bajo, resistencia a la abrasión y mejor uniformidad que el CN. Cuando se refuerza con negro de humo y se vulcaniza, sus características y aplicaciones son similares a las del caucho natural. Su costo también es similar. Una comparación rigurosa revela que la mayoría de sus propiedades mecánicas, excepto la resistencia al desgaste, son inferiores que las del CN, pero su resistencia al envejecimiento térmico, al ozono, al clima y a los aceites es superior. Las aplicaciones incluyen llantas para carros, calzado y aislamiento de alambres y cables. Un material que se relaciona con el SBR es el bloque de copolímeros estireno-butadieno-estireno, elastómero termoplástico que se estudia a continuación.

Elastómeros termoplásticos Como ya se dijo, un elastómero termoplástico (TPE) es un termoplástico que se comporta como elastómero. Constituye una familia de polímeros que crece con rapidez en el mercado de elastómeros. Los TPE derivan sus propiedades elastoméricas no de los entrecruzamientos químicos, sino de las conexiones físicas entre las fases suave y dura que forman el material. Los elastómeros termoplásticos incluyen el bloque de copolímeros ***estireno-butadieno-estireno*** (SBS), en oposición al caucho estireno-butadieno (SBR), que es un copolímero aleatorio (véase la sección 8.1.2); ***poliuretanos termoplásticos; copolímeros de poliéster termoplástico*** y otros copolímeros y mezclas de polímeros. En la tabla 8.6j se presentan datos sobre el SBS. La química y estructura de estos materiales por lo general son complejas, e involucran materiales que son incompatibles, por lo que forman fases distintas con propiedades diferentes a temperatura ambiente. Debido a su termoplasticidad, los TPE no igualan a los elastómeros entrecruzados convencionales en cuanto a la resistencia a las temperaturas elevadas y al escurrimiento plástico. Sus aplicaciones comunes incluyen el calzado, bandas elásticas, tubería extruida, recubrimiento de alambres y de piezas moldeadas para automóviles y otros usos en los que se requieren propiedades elastoméricas. Los TPE no son apropiados para llantas.

TABLA 8.6 (*continúa*): *i*) caucho estireno-butadieno.

Polímero:	Copolímero de estireno (C_8H_8) y butadieno (C_4H_6)		
Símbolo:	SBR	Elongación:	700% antes de fallar
Módulo de elasticidad:	17 MPa (2 500 lb/in^2) con elongación de 300%.	Gravedad específica:	0.94
		Límite superior de temperatura:	110 ºC (230 ºF)
Resistencia a la tensión:	20 MPa (3 000 lb/in^2), reforzado	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	Ligeramente menor de 30%

Recopilada a partir de las referencias [2], [6], [9], [11] y otras fuentes.

TABLA 8.6 (*continúa*): *j*) elastómeros termoplásticos (TPE).

Polímero representativo:	Bloque de copolímeros estireno-butadieno-estireno		
Símbolo:	SBS (también YSBR)	Gravedad específica:	1.0
Resistencia a la tensión:	14 MPa (2 000 lb/in^2)	Límite superior de temperatura:	65 ºC (150 ºF)
Elongación:	400%	Límite inferior de temperatura:	−50 ºC (−60 ºF)
		Participación aproximada en el mercado:	12%

8.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE POLÍMEROS

Los polímeros casi siempre son conformados con consistencia caliente y muy plástica. Las operaciones comunes son extrusión y moldeo. Por lo general, el moldeo de termofijos es más complicado debido a que requieren curarse (entrecruzarlos). Los termoplásticos son más fáciles de moldear y se dispone de una variedad grande de operaciones de moldeo para procesarlos (véase el capítulo 13). Aunque los plásticos tienden con facilidad a la forma del procesado neto, en ocasiones se requiere maquinarlos (véase el capítulo 22); las piezas plásticas se ensamblan en productos por medio de técnicas de unión permanentes tales como la soldadura (véase el capítulo 31), juntas adhesivas (sección 32.3) o ensamblado mecánico (véase el capítulo 33).

El procesamiento del caucho tiene una historia más larga que la de los plásticos, y las industrias asociadas con estos materiales de polímero han estado tradicionalmente separadas, aunque su procesamiento sea similar de muchos modos. En el capítulo 14 se estudia la tecnología de procesamiento del caucho.

REFERENCIAS

[l] Alliger, G. y Sjothum, I. J. (eds.), ***Vulcanization of Elastomers***, Krieger Publishing Company, Nueva York, 1978.

[2] Billmeyer, F. W., Jr., ***Textbook of Polymer Science***, 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Blow, C. M. y Hepburn, C., ***Rubber Technology and Manufacture***, 2a. ed., Butterworth Scientific, Londres, 1982.

[4] Brandrup, J. e Immergut, E. E. (eds.), ***Polymer Handbook***, 4a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 2004.

[5] Brydson, J. A., ***Plastics Materials***, 4a. ed., Butterworths & Co., Ltd., Londres, U.K., 1999.

[6] Chanda, M. y Roy, S. K., ***Plastics Technology Handbook***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

[7] Charrier, J-M. ***Polymeric Materials and Processing***, Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[8] ***Engineering Materials Handbook***, vol. **2**, Engi-neering Plastics, ASM International. Materials Park, Ohio, 2000.

[9] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., **Engineering Materials and Applications**, 5a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[10] Hall, C., ***Polymer Materials***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1989.

[11] Hofmann, W., ***Rubber Technology Handbook***, Hanser Publishers, Munich, Alemania, 1988.

[12] Margolis, J. M., ***Engineering Thermoplastics–Pro-perties and Applications***, Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1985.

[13] McCrum, N. G., Buckley. C. P. y Bucknall, C. B. ***Principles of Polymer Engineering***, 2a. ed., Oxford University Press, Oxford, U.K., 1997.

[14] ***Modern Plastics Encyclopedia***, Modern Plastics, McGraw-Hill, Inc., Nueva Jersey, 1990.

[15] Reisinger, T. J. G., "Polymers of Tomorrow", ***Advanced Materials & Processes***, marzo de 2004, pp. 43-45.

[16] Rudin, A., ***The Elements of Polymer Science and Engineering***, 2a. ed., Academic Press. Inc., Orlando, Florida, 1998.

[17] Seymour, R. B. y Carraher, C. E., ***Seymour/Carraher's Polymer Chemistry***, 5a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 2000.

[18] Seymour. R. B., ***Engineering Polymer Sourcebook***, McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1990.

PREGUNTAS DE REPASO

8.1. ¿Qué es un polímero?

8.2. ¿Cuáles son las tres categorías básicas de los polímeros?

8.3. ¿Cómo se comparan las propiedades de los polímeros respecto de las de los metales?

8.4. ¿Qué indica el grado de polimerización?

8.5. ¿Qué es el entrecruzamiento de un polímero y cuál es su significado?

8.6. ¿Qué es un copolímero?

8.7. Los copolímeros poseen cuatro arreglos diferentes de sus meros constitutivos. Mencione y describa brevemente algunos de los cuatro arreglos.

8.8. ¿Qué es un terpolímero?

8.9. ¿Cómo se ven afectadas las propiedades de un polímero cuando adopta una estructura cristalina?

8.10. ¿Un polímero alguna vez es 100% cristalino?
8.11. ¿Cuáles son algunos de los factores que influyen en la tendencia a cristalizar de un polímero?
8.12. ¿Por qué se agregan rellenos a un polímero?
8.13. ¿Qué es un plastificador?
8.14. Además de los rellenos y plastificadores, ¿qué otros aditivos se emplean con los polímeros?
8.15. Describa la diferencia en propiedades mecánicas como función de la temperatura entre termoplásticos muy cristalinos y los amorfos.
8.16. ¿Qué es lo distinto del polímero celulosa?
8.17. ¿De qué grupo de polímeros son miembros los nylons?
8.18. ¿Cuál es la fórmula química del etileno, el monómero del polietileno?
8.19. ¿Cuál es la diferencia fundamental entre el polietileno de baja densidad y el de alta densidad?
8.20. ¿En qué difieren las propiedades de los polímeros termofijos de las de los termoplásticos?
8.21. El entrecruzamiento (curado) de los plásticos termofijos se lleva a cabo por una de tres maneras. Mencione estas tres.
8.22. Los polímeros elastómeros y termofijos son entrecruzados. ¿Por qué son tan diferentes sus propiedades?
8.23. ¿Qué le sucede a un elastómero cuando está por debajo de su temperatura de transición al vidrio?
8.24. ¿Cuál es el ingrediente polimérico principal del caucho natural?
8.25. ¿En qué difieren los elastómeros termoplásticos de los cauchos convencionales?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 20 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

8.1. De los tres tipos de polímeros, ¿cuál es el de mayor importancia comercial?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.2. ¿Cuál de los tres tipos de polímero no se considera normalmente como plástico?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.3. ¿Cuál de los tres tipos de polímero no involucra entrecruzamiento?: *a*) termoplásticos, *b*) termofijos o *c*) elastómeros.
8.4. Conforme el grado de cristalinidad de un polímero dado se incrementa, el polímero se vuelve más denso y rígido, y su temperatura de fusión disminuye: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.5. ¿Cuál de las siguientes es la fórmula química de la unidad repetitiva del polietileno?: *a*) CH_2, *b*) C_2H_4, *c*) C_3H_6, *d*) C_5H_8 o *e*) C_8H_8.
8.6. ¿Cuál de los siguientes es el grado de polimerización?: *a*) número promedio de meros en la cadena de moléculas; *b*) proporción del monómero que ha sido polimerizado; *c*) suma de los pesos moleculares de los meros en la molécula o *d*) ninguna de las anteriores.
8.7. Una estructura molecular ramificada es más fuerte en estado sólido y más viscosa si está fundida, que una estructura lineal del mismo polímero: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.8. Un copolímero es una mezcla de macromoléculas de dos homopolímeros diferentes: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.9. Conforme la temperatura de un polímero se incrementa, su densidad: *a*) aumenta, *b*) disminuye, *c*) permanece casi constante.
8.10. ¿Cuál de los plásticos siguientes tiene la mayor participación en el mercado?: *a*) fenoles, *b*) polietileno, *c*) polipropileno, *d*) poliestireno o *e*) cloruro de polivinilo.
8.11. ¿Cuáles de los polímeros siguientes normalmente son termoplásticos? (cuatro respuestas son las mejores): *a*) acrílicos, *b*) acetato de celulosa, *c*) nylon, *d*) fenoles, *e*) policloropreno, *f*) poliésteres, *g*) polietileno, *h*) poliisopreno e *i*) poliuretano.
8.12. El poliestireno (sin plastificadores) es amorfo, transparente y frágil: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.13. La fibra de rayón que se emplea en los textiles se basa en cuál de los polímeros siguientes: *a*) celulosa, *b*) nylon, *c*) poliéster, *d*) polietileno o *e*) polipropileno.
8.14. La diferencia básica entre el polietileno de baja densidad y el de alta es que este último tiene un grado mayor de cristalinidad: *a*) verdadero o *b*) falso.
8.15. Entre los polímeros termofijos, ¿cuál de los siguientes es el que más se utiliza en forma comercial?: *a*) epóxicos, *b*) fenoles, *c*) silicones o *d*) uretanos.
8.16. ¿Cuál de las que siguen es la fórmula química del poliisopreno en el caucho natural?: *a*) CH_2, *b*) C_2H_4, *c*) C_3H_6, d) C_5H_8 o *e*) C_8H_8.
8.17. ¿Cuál de los siguientes es el caucho sintético líder en el comercio?: *a*) caucho butilo, *b*) caucho isopreno, *c*) polinutadieno, *d*) poliuretano, *e*) caucho estireno-butadieno o *f*) elastómeros termoplásticos.

9 MATERIALES COMPUESTOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

9.1 Tecnología y clasificación de los materiales compuestos
- 9.1.1 Componentes de un material compuesto
- 9.1.2 La fase de reforzamiento
- 9.1.3 Propiedades de los materiales compuestos
- 9.1.4 Otras estructuras compuestas

9.2 Compuestos de matriz metálica
- 9.2.1 Cermets
- 9.2.2 Compuestos de matriz metálica de fibra reforzada

9.3 Compuestos de matriz cerámica

9.4 Compuestos de matriz de polímero
- 9.4.1 Polímeros de fibra reforzada
- 9.4.2 Otros compuestos de matriz de polímero

9.5 Guía para el procesamiento de los materiales compuestos

Además de los metales, cerámicos y polímeros, es posible distinguir una cuarta categoría de materiales: los compuestos. Un ***material compuesto*** es un sistema de materiales compuesto por dos o más fases distintas físicamente cuya combinación produce propiedades agregadas diferentes de las de sus componentes. En ciertos aspectos, los compuestos son los materiales más interesantes de la ingeniería debido a que su estructura es más compleja que la de los demás tipos.

El interés tecnológico y comercial de los materiales compuestos proviene del hecho de que sus propiedades no sólo son distintas de las de sus componentes, sino que con frecuencia son mucho mejores. Algunas de las posibilidades incluyen las siguientes:

- Es posible diseñar compuestos que sean muy fuertes y rígidos, pero de peso muy ligero, lo que les da relaciones resistencia-peso y rigidez-peso varias veces mayores que las del acero o el aluminio. Estas propiedades son muy deseables para aplicaciones que van de la aviación comercial al equipo deportivo.
- Sus propiedades de fatiga por lo general son mejores que las de los metales comunes de ingeniería. Asimismo, es frecuente que la tenacidad sea mayor.
- Se puede diseñar compuestos que no se corroan como el acero; esto es importante en los automóviles y otras aplicaciones.

- Con los materiales compuestos es posible obtener combinaciones de propiedades que no son alcanzables con los metales, cerámicos o polímeros.
- Con ciertos materiales compuestos es posible obtener superficies de mejor apariencia y control de su suavidad.

Junto con las ventajas, hay desventajas y limitaciones asociadas con los materiales compuestos. Éstas incluyen las siguientes: 1) las propiedades de muchos compuestos importantes son anisotrópicas, lo que significa que difieren de acuerdo con la dirección en que se miden; 2) muchos de los compuestos basados en polímeros son susceptibles al ataque químico o de solventes, igual que los polímeros en sí; 3) por lo general, los materiales compuestos son caros, aunque sus precios disminuyen conforme aumenta el volumen y 4) algunos de los métodos de manufactura para dar forma a los materiales compuestos son lentos y costosos.

En el estudio de los otros tres tipos de materiales ya se han encontrado varios materiales compuestos. Algunos ejemplos incluyen los carburos cementados (carburo de tungsteno con aglutinante de cobalto), compuestos para moldear plásticos que contienen rellenos (por ejemplo, fibras de celulosa, aserrín) y caucho mezclado con negro de humo. Estos materiales no siempre se identifican como compuestos; sin embargo, técnicamente satisfacen la definición que se dio. Incluso podría argüirse que una aleación metálica de dos fases (por ejemplo, Fe + Fe_3C) es un material compuesto, aunque no se clasifique como tal. Quizás el material compuesto más importante de todos sea la madera.

En la presentación de los materiales compuestos, primero se examina su tecnología y clasificación. Hay muchos materiales y estructuras diferentes que se emplean para formar compuestos; se estudian las distintas categorías y se dedica más tiempo a los plásticos de fibra reforzada, que son el tipo de mayor importancia comercial. En la última sección se da una guía para los procesos de manufactura de los compuestos.

9.1 TECNOLOGÍA Y CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Como se dijo en la definición, un material compuesto consiste en dos o más fases distintas. El término ***fase*** indica un material homogéneo, como metal o cerámico en los que todos los granos tienen la misma estructura cristalina, o un polímero sin rellenos. Al combinar las fases, con los métodos por describirse, se crea un material nuevo con rendimiento agregado que supera al de sus partes. El efecto es sinérgico.

Los materiales compuestos se pueden clasificar de varios modos. Una clasificación posible diferencia entre los compuestos 1) tradicionales y 2) los sintéticos. Los ***compuestos tradicionales*** son aquellos que ocurren en la naturaleza o que han sido producidos por las civilizaciones durante muchos años. La madera es un material compuesto que se da en la naturaleza, en tanto que el concreto (cemento Pórtland más arena o grava) y el asfalto mezclado con grava son compuestos tradicionales que se usan en la construcción. Los ***compuestos sintéticos*** son sistemas de materiales modernos que se asocian normalmente con las industrias manufactureras, en los que primero se producen los componentes por separado y después se combinan de manera controlada para alcanzar la estructura, propiedades y forma de las piezas que se desea. Estos materiales sintéticos son los compuestos en que es normal pensar en el contexto de los productos manufacturados. En este capítulo la atención se centró en esta clase de materiales.

9.1.1 Componentes de un material compuesto

En la manifestación más sencilla de la definición presentada, un material compuesto consiste en dos fases: una primaria y otra secundaria. La fase primaria forma la ***matriz*** en la que se encuentra incrustada la fase secundaria. En ocasiones a la fase incrustada

se le denomina como ***agente reforzador*** (o algún término similar), porque por lo general sirve para reforzar al compuesto. La fase reforzadora está en forma de fibras, partículas o algunas otras, como se verá. Generalmente, las fases son insolubles una en la otra, pero puede haber gran adhesividad en la interfaz.

La fase de la matriz es cualquiera de los tres tipos básicos de materiales: polímeros, metales o cerámicos. La fase secundaria también es uno de los tres materiales básicos, o un elemento como el carbono o el boro. Como se aprecia en la tabla 9.1, las combinaciones posibles en un material compuesto por dos constituyentes puede organizarse en arreglo de 3×4. Se observa que ciertas combinaciones no son factibles, como la de un polímero en una matriz cerámica. También se ve que las posibilidades incluyen dos estructuras de fase que consisten en componentes del mismo tipo de material, como fibras de Kevlar (polímero) en una matriz de plástico (polímero). En otros compuestos, el material incrustado es un elemento como el carbono o el boro.

El sistema de clasificación para los materiales compuestos que se usa en este libro se basa en la fase de la matriz. A continuación se enlistan las clases y se estudian en las secciones 9.2 a 9.4:

1. ***Compuestos de matriz metálica*** (MMC) incluyen mezclas cerámicas y metales, tales como los carburos cementados y otros cermets, así como aluminio o magnesio reforzado por fibras fuertes de alta rigidez.
2. ***Compuestos de matriz cerámica*** (CMC) son los de la categoría menos común. El óxido de aluminio y el carburo de silicio son los materiales que es posible incrustar con fibras para mejorar sus propiedades, en especial en aplicaciones de temperatura elevada.
3. ***Compuestos de matriz de polímero*** (PMC). Las resinas termofijas son los polímeros de mayor uso como PMC. Es común mezclar epóxicos y poliéster con fibras de refuerzo, y se mezcla fenol con polvos. Con frecuencia, los compuestos de termoplástico moldeado son reforzados con polvos (véase la sección 8.15).

La clasificación se aplica a compuestos tradicionales y a sintéticos. El concreto es un compuesto de matriz cerámica, en tanto que el asfalto y la madera son compuestos de matriz de polímero.

El material de la matriz desempeña varias funciones en el compuesto. En primer lugar, proporciona la forma general de la pieza o producto hecho del material compuesto. En segundo, mantiene la fase incrustada en su lugar, por lo general la encierra y con frecuencia la oculta. En tercer lugar, cuando se aplica una carga, la matriz comparte la carga con la fase secundaria, y en ciertos casos se deforma de modo que la fuerza la soporta en esencia el agente reforzador.

TABLA 9.1 Combinaciones posibles de materiales compuestos de dos constituyentes.

Fase secundaria (refuerzo)	Fase primaria (matriz)		
	Metal	Cerámico	Polímero
Metal	Piezas con polvo metálico infiltradas con un segundo metal	NA	Compuestos de plástico moldeado Llantas radiales con cinturones de acero
Cerámico	Cermets[a]	Al_2O_3 reforzado con filamentos de SiC	Compuestos de plástico moldeado Plástico reforzado con fibras de vidrio
Polímero	Piezas con polvo metálico impregnadas con polímero	NA	Compuestos de plástico moldeado Epóxico reforzado con Kevlar
Elementos (C, B)	Metales reforzados con fibras	NA	Caucho con negro de humo Plástico reforzado con fibra B o C

NA = no se aplica actualmente.

[a] Las cermets incluyen carburos cementados.



FIGURA 9.1 Formas físicas posibles de las fases incrustadas en los materiales compuestos: *a*) fibra, *b*) partícula y *c*) hojuela.

9.1.2 La fase de reforzamiento

Es importante entender que el papel jugado por la fase secundaria es reforzar a la primaria. Lo más común es que la fase incrustada tenga una de las formas que se ilustran en la figura 9.1: fibras, partículas u hojuelas. Además, la fase secundaria adopta la forma de una fase infiltrada en una matriz porosa o de esqueleto.

Fibras Las ***fibras*** son filamentos de material de refuerzo, por lo general de sección transversal circular, aunque en ocasiones se utilizan formas alternativas (por ejemplo, tubular, rectangular, hexagonal). Los diámetros varían de menos de 0.0025 mm (0.0001 in) a cerca de 0.13 mm (0.005 in), lo que depende del material.

El refuerzo con fibras proporciona la mayor oportunidad para mejorar la resistencia de las estructuras compuestas. En compuestos con fibra reforzadora es frecuente que ésta se considere el constituyente principal, puesto que soporta la parte mayor de la carga. Las fibras son de interés como agentes de refuerzo porque la mayor parte de materiales es significativamente más fuerte en forma de filamento que en otra voluminosa. En la figura 9.2 se observa el efecto del diámetro de la fibra sobre la resistencia a la tensión. Conforme el diámetro se reduce, el material se orienta en dirección del eje de la fibra y la probabilidad de que haya defectos en la estructura disminuye en forma significativa. Como resultado, la resistencia a la tensión aumenta mucho.

Las fibras que se emplean en los materiales compuestos son continuas o discontinuas. Las ***fibras continuas*** son muy largas; en teoría, ofrecen una trayectoria continua de modo que una carga se ve soportada por la parte compuesta. En realidad, esto es difícil de lograr debido a las variaciones en el material fibroso y a su procesamiento. Las ***fibras discontinuas*** (secciones cortadas de fibras continuas) son de longitud corta (L/D = 100, aproximadamente). Un tipo importante de fibra discontinua son los ***filamentos***, cristales individuales parecidos a cabello con diámetros inferiores a 0.001 mm (0.00004 in) y resistencia muy elevada.

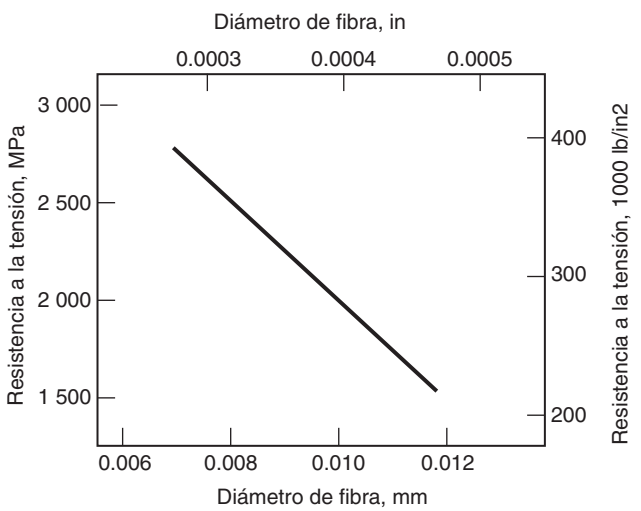


FIGURA 9.2 Relación entre la resistencia a la tensión y el diámetro para una fibra de carbono (fuente: [1]). Otros materiales filamentosos tienen relaciones similares.

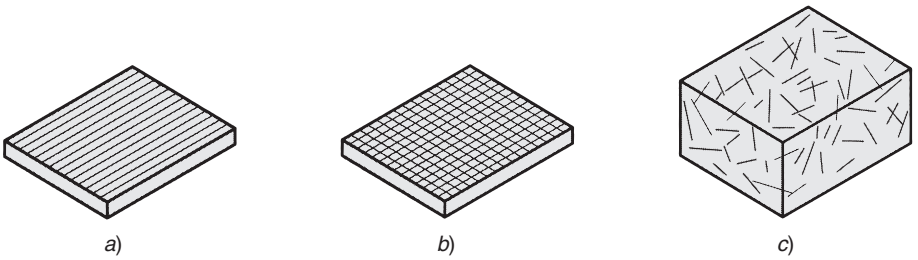


FIGURA 9.3 Orientación de las fibras en materiales compuestos: *a*) fibras continuas, unidimensionales; *b*) fibras continuas, planas, en forma de tejido; y *c*) fibras discontinuas al azar.

La orientación de las fibras es otro factor en las piezas compuestas. Se distinguen tres casos, que se ilustran en la figura 9.3: en el inciso *a*) se representa el refuerzo unidimensional, en el que la resistencia y rigidez máximas se obtienen en la dirección de la fibra; en el inciso *b*) se muestra el refuerzo plano, que en ciertos casos es en forma de tejido bidimensional, y en *c*) se muestra la orientación al azar o tridimensional, en la que el material compuesto tiende a poseer propiedades isotrópicas.

En los compuestos reforzados con fibras se usan materiales diferentes: metales, cerámicos, polímeros, carbono y boro. El uso de mayor importancia comercial de las fibras es en compuestos de polímero. Sin embargo, está creciendo el uso de metales y cerámicos reforzados con fibras. A continuación se presenta un análisis de los tipos importantes de materiales de fibra, cuyas propiedades se listan en la tabla 9.2.

- ***Vidrio*** La fibra de mayor uso en los polímeros, la ***fibra de vidrio***, se emplea para denotar el plástico reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés). Las dos fibras de vidrio comunes son el vidrio E y el S (cuyas composiciones se listan en la tabla 7.5). El vidrio E es fuerte y de costo bajo, pero su módulo es menor que el de otras fibras. El vidrio S es más rígido y su resistencia a la tensión es una de las mayores de todos los materiales fibrosos; sin embargo, es más caro que el vidrio E.
- ***Carbono*** El carbono (véase la sección 7.5.1) está hecho de fibras con módulos elevados. Además de la rigidez, otras propiedades atractivas incluyen densidad baja y poca expansión térmica. Las fibras C por lo general son una combinación de grafito y carbono amorfo.
- ***Boro*** El boro (véase la sección 7.5.3) tiene un módulo de elasticidad alto, pero su costo elevado limita sus aplicaciones a componentes aeroespaciales en los que esa propiedad (y otras) es de importancia fundamental.
- ***Kevlar 49*** Ésta es la fibra de polímero más importante; es una aramida altamente cristalina, miembro de la familia de las poliamidas (véase la sección 8.2.2). Su gravedad específica es baja, lo que le da una de las relaciones de resistencia-peso más altas de todas las fibras.
- ***Cerámicos*** El carburo de silicio (SiC) y el óxido de aluminio (Al_2O_3) son los materiales de fibra principales entre los cerámicos. Ambos tienen módulos de elasticidad elevados y pueden usarse para dar resistencia a metales de baja densidad, como al alumnio y al magnesio.

TABLA 9.2 Propiedades comunes de materiales de fibra que se emplean como refuerzo en los compuestos.

	Diámetro		Resistencia a la tensión		Módulo de elasticidad	
Material de fibra	mm	mils[a]	MPa	lb/in^2	GPa	lb/in^2
Metal: acero	0.13	5.0	1 000	150 000	206	30×10^6
Metal: tungsteno	0.013	0.5	4 000	580 000	407	59×10^6
Cerámico: Al_2O_3	0.02	0.8	1 900	275 000	380	55×10^6
Cerámico: SiC	0.13	5.0	3 275	475 000	400	58×10^6
Cerámico: vidrio E	0.01	0.4	3 450	500 000	73	10×10^6
Cerámico: vidrio S	0.01	0.4	4 480	650 000	86	12×10^6
Polímero: Kevlar	0.013	0.5	3 450	500 000	130	19×10^6
Elemento: Carbono	0.01	0.4	2 750	400 000	240	35×10^6
Elemento: Boro	0.14	5.5	3 100	450 000	393	57×10^6

Recopilada a partir de las referencias [3], [7], [11] y otras fuentes. Observe que la resistencia depende del diámetro de la fibra (véase la figura 9.2); las propiedades de esta tabla deben interpretarse en consecuencia.

[a] 1 mil = 0.001 in.

➢ ***Metal*** –Filamentos de acero, tanto continuos como discontinuos, se emplean como fibras de refuerzo en los plásticos. En la actualidad otros metales son menos comunes como fibras de refuerzo.

Partículas y hojuelas La segunda forma común de la fase incrustada es la de ***partículas***, cuyo tamaño varía entre microscópico y macroscópico. Las partículas son un material importante para los metales y cerámicos; en los capítulos 16 y 17 se estudia el carácter y producción de los polvos de ingeniería.

La distribución de las partículas en la matriz del compuesto es al azar, y por ello la resistencia y otras propiedades del material por lo general son isotrópicas. El mecanismo para dar resistencia depende del tamaño de las partículas. El tamaño microscópico está representado por polvos muy finos (alrededor de 1 μm) distribuidos en la matriz en concentraciones de 15% o menos. La presencia de estos polvos da como resultado la dispersión de la dureza de la matriz, en la que el movimiento de dislocación en el material de la matriz está restringido por las partículas microscópicas. En efecto, es la matriz misma la que aumenta su resistencia y ninguna porción significativa de la carga que se aplica es soportada por las partículas.

Conforme el tamaño de las partículas aumenta al rango macroscópico, y la proporción del material incrustada se incrementa a 25% o más, el mecanismo de fortalecimiento cambia. En este caso, la carga aplicada la comparten la matriz y la fase incrustada. El aumento de la resistencia ocurre debido a la capacidad de carga de las partículas y a las uniones de las partículas en la matriz. Esta forma de fortalecimiento compuesto ocurre en los carburos cementados, en los que el carburo de tungsteno está inmerso en un aglutinante de cobalto. La proporción de WC en la matriz de Co por lo común es de 80% o más.

Las ***hojuelas*** son básicamente partículas bidimensionales, plaquetas planas y pequeñas. Dos ejemplos de esta forma son los minerales de mica (silicatos de K y A) y talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), que se usan como agentes reforzadores en los plásticos. Por lo general son materiales de costo menor que el de los polímeros, y dan resistencia y rigidez a los compuestos de plástico moldeado. Por lo general, los tamaños de las plaquetas están en el rango de 0.01 a 1 mm (0.0004 a 0.040 in) en su sección transversal, con espesor de 0.001 a 0.005 mm (0.04 a 0.20 mils).

Fase infiltrada La cuarta forma de fase incrustada ocurre cuando la matriz tiene la forma de esqueleto poroso (como esponja) y la segunda fase tan sólo es un ***relleno***. En este caso, la fase incrustada adopta la forma de los poros de la matriz. Los rellenos metálicos en ocasiones se emplean para infiltrar la estructura porosa abierta de piezas elaboradas por medio de técnicas de metalurgia de polvos (véase la sección 16.3.4), lo que crea, en efecto, un material compuesto. Otro ejemplo de esta categoría podría considerarse los componentes de PM sinterizados impregnados de aceite, tales como cojinetes y engranes.

La interfase Siempre hay una ***interfase*** entre las fases constituyentes en un material compuesto. Para que éste opere en forma eficaz, las fases deben enlazarse en el sitio de unión. En ciertos casos hay un enlace directo entre los dos ingredientes, como se sugiere en la figura 9.4*a*). En otros casos, se agrega un tercer componente para facilitar el enlace de las dos fases primarias. Este tercer ingrediente, llamado ***interfase***, se considera un adhesivo. Un ejemplo importante es el recubrimiento de fibras de vidrio para lograr adhesividad con resinas termofijas en los plásticos reforzados con fibra de vidrio. Como se ilustra en la figura 9.4b, este caso da lugar a dos interfases, una en cada frontera de la interfase. Por último, una tercera forma de interfase ocurre cuando los dos componentes primarios no son insolubles por completo uno en el otro; en este caso, la interfase que se forma consiste en una solución de las fases, como se aprecia en la figura 9.4c. Un ejemplo de esto sucede en los carburos cementados (véase la sección 9.2.1); a las temperaturas de sinterización altas que se usan en estos materiales, se origina cierta solubilidad en las fronteras que crea la interfase.

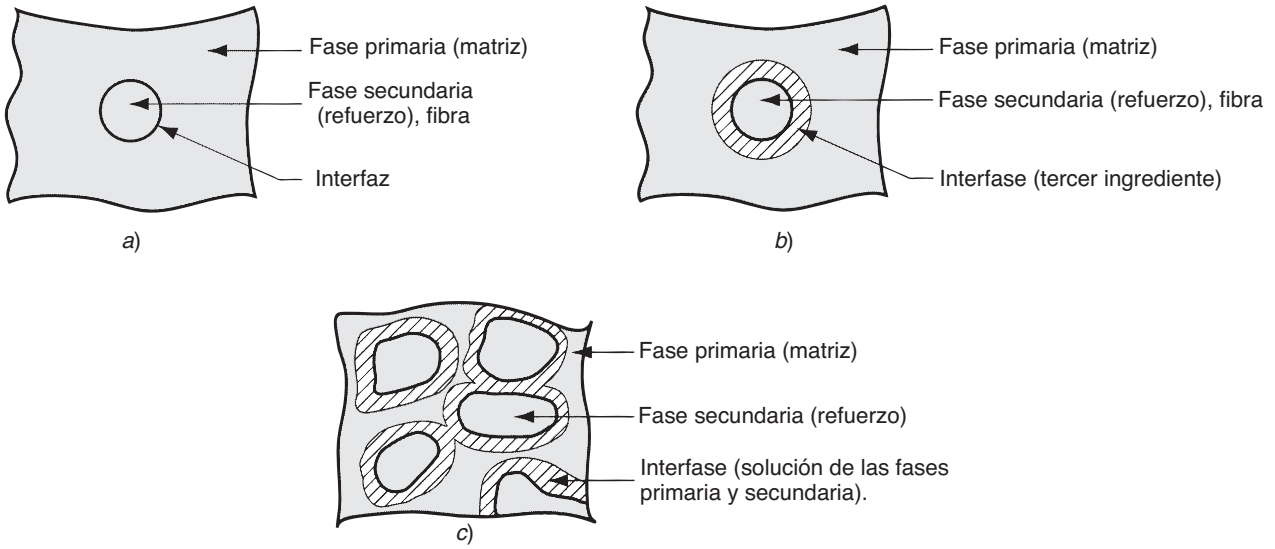


FIGURA 9.4 Uniones e interfases entre las fases de un material compuesto: *a*) enlace directo entre las fases primaria y secundaria; *b*) adición de un tercer ingrediente para unir las fases primaria y secundaria y formar una interfase; y *c*) formación de una interfase por solución de las fases primaria y secundaria en su frontera.

9.1.3 Propiedades de los materiales compuestos

En la selección de un material compuesto, en general se busca una combinación óptima de propiedades, en lugar de una propiedad en particular. Por ejemplo, el fuselaje y alas de una aeronave deben ser tanto ligeros como fuertes, rígidos y tenaces. Es difícil encontrar un material monolítico que satisfaga estos requerimientos. Son varios polímeros reforzados con fibra los que poseen esta combinación de propiedades.

Otro ejemplo es el caucho. El caucho natural es un material relativamente débil. A principios del siglo xx, se descubrió que si se agregan cantidades significativas de negro de humo (carbono casi puro) al caucho natural, su resistencia se eleva mucho. Los dos ingredientes interactúan para obtener un material compuesto que es significativamente mayor que cualquiera de los dos por sí solo. Por supuesto, el caucho también debe vulcanizarse para que adquiera toda su resistencia.

El caucho en sí es un aditivo útil para el poliestireno. Una de las propiedades distintivas y desventajosas del poliestireno es su fragilidad. Aunque la mayoría de otros polímeros tiene una ductilidad considerable, el PS no tiene virtualmente ninguna. Se agregan cantidades pequeñas (5 a 15%) de caucho (natural o sintético) para obtener poliestireno de alto impacto, que es más tenaz y resistente a los impactos.

Las propiedades de un material compuesto están determinadas por tres factores: 1) los materiales que se emplean como fases constituyentes en el compuesto, 2) formas geométricas de los constituyentes y estructura resultante del sistema compuesto y 3) la manera en que las fases interactúan una con otra.

Regla de las mezclas Las propiedades de un material compuesto son función de los materiales de inicio. Ciertas propiedades de un material compuesto se calculan por medio de la ***regla de las mezclas***, que involucra el cálculo de un promedio ponderado de las propiedades del material constitutivo. Un ejemplo de esta regla del promedio es la densidad. La masa de un material compuesto es la suma de las masas de las fases de la matriz y el refuerzo:

$$mc = m_m + m_r \tag{9.1}$$

donde m = masa, kg (lb); y los subíndices c, m y r indican las fases del compuesto, matriz y refuerzo, respectivamente. De manera similar, el volumen del compuesto es la suma de sus constituyentes:

$$V_c = V_m + V_r + V_v \tag{9.2}$$

donde V = volumen, cm^3 (in^3), V_v es el volumen de vacíos en el compuesto (por ejemplo, poros). La densidad del compuesto es la masa dividida entre el volumen.

$$\rho_c = \frac{m_c}{V_c} = \frac{m_m + m_r}{V_c} \tag{9.3}$$

Debido a que las masas de la matriz y la fase de refuerzo son sus densidades respectivas multiplicadas por sus volúmenes,

$$m_m = \rho_m V_m \quad \text{y} \quad m_r = \rho_r V_r$$

se sustituyen estos términos en la ecuación (9.3) y se concluye que

$$\rho_c = f_m \rho_m + f_r \rho_r \tag{9.4}$$

donde $f_m = V_m/V_c$ y $f_r = V_r/V_c$ son tan sólo las fracciones del volumen de las fases de la matriz y del refuerzo.

Compuestos de fibra reforzada Por lo general, la determinación de las propiedades mecánicas de los compuestos a partir de las propiedades de sus constituyentes es algo más complejo. La regla de las mezclas en ocasiones se emplea para estimar el módulo de elasticidad de un compuesto de fibra reforzada hecho de fibras continuas, donde E_c se mide en la dirección longitudinal. La situación se ilustra en la figura 9.5*a*); se supone que el material de la fibra es mucho más rígido que la matriz, y que el enlace entre las dos fases está garantizado. Con este modelo, el módulo del compuesto se predice como sigue:

$$E_c = f_m E_m + f_r E_r \tag{9.5}$$

donde E_c, E_m y E_r son los módulos de elasticidad del compuesto y sus constituyentes, MPa (lb/in^2); y f_m y f_r son, otra vez, las fracciones del volumen de las fases de la matriz y el refuerzo. El efecto de la ecuación (9.5) se aprecia en la figura 9.5*b*).

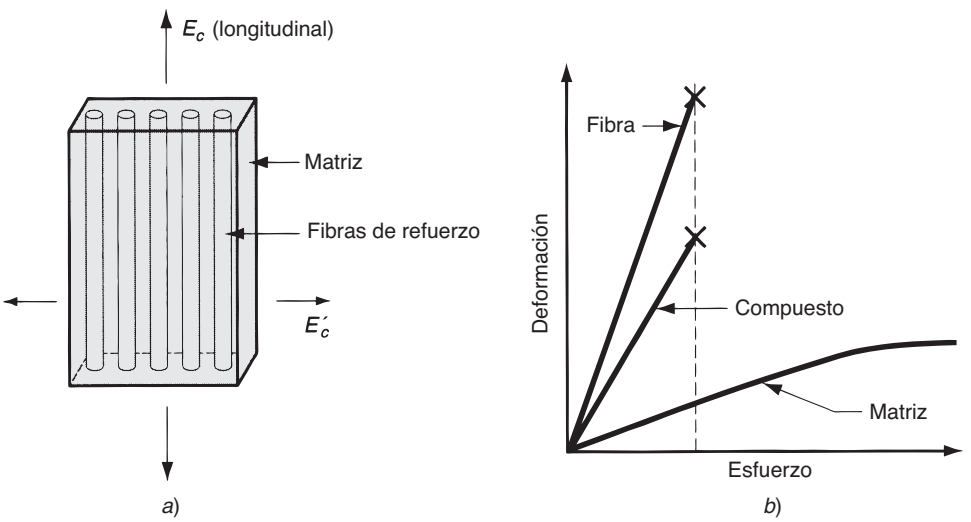


FIGURA 9.5 *a*) Modelo de un compuesto de fibra reforzada que muestra la dirección en la que se estima el módulo de elasticidad por medio de la regla de las mezclas. *b*) Relaciones esfuerzo-deformación para el material compuesto y sus constituyentes. La fibra es rígida pero frágil, en tanto que la matriz (un polímero, por lo común) es suave pero dúctil. El módulo del compuesto es un promedio ponderado de los módulos de sus componentes. Pero cuando las fibras de refuerzo fallan, también lo hace el compuesto.

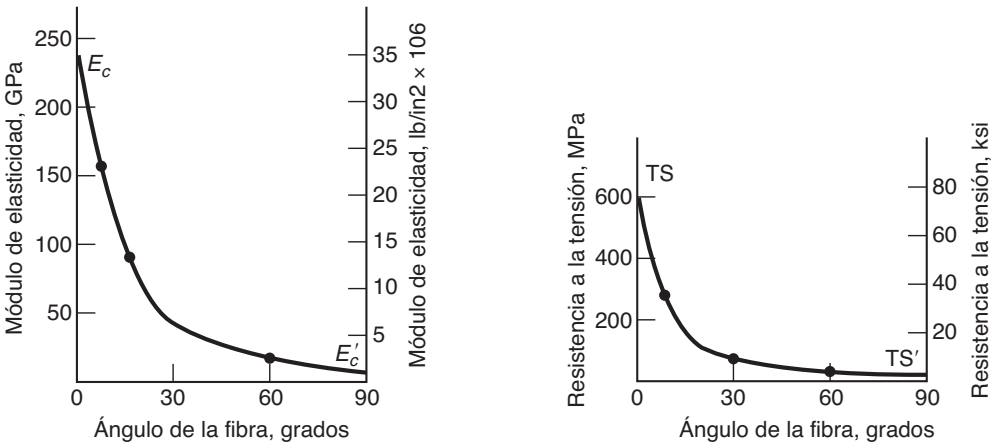


FIGURA 9.6 Variación del módulo de elasticidad y resistencia a la tensión, como función de la dirección de medida respecto del eje longitudinal de un compuesto epóxico reforzado con fibra de carbono (fuente: [7]).

En forma perpendicular a la dirección longitudinal, las fibras contribuyen poco a la rigidez conjunta, excepto por su efecto de relleno. El módulo compuesto se estima en esta dirección con la ecuación siguiente:

$$E_c = \frac{E_m E_r}{f_m E_r + f_r E_m} \tag{9.5}$$

donde E_c = módulo de elasticidad perpendicular a la dirección de la fibra, MPa (lb/in^2). Las dos ecuaciones para E_c demuestran la anisotropía significativa de los compuestos reforzados con fibra. Este efecto direccional se observa en la figura 9.6 para un compuesto de polímero reforzado con fibra, en la que tanto el módulo de elasticidad como la resistencia a la tensión se miden respecto de la dirección de la fibra.

Las fibras ilustran la importancia de la forma geométrica. La mayor parte de los materiales tienen resistencias a la tensión que son varias veces más grandes en forma de fibra que como cuerpo voluminoso. Sin embargo, las aplicaciones de las fibras están limitadas por defectos de la superficie, abombamiento cuando se les sujeta a compresión, y por las inconveniencias de la forma de un filamento cuando lo que se requiere es un componente sólido. Al incrustar las fibras en una matriz de polímero se obtiene un material compuesto que evita los problemas de las fibras pero aprovecha sus resistencias. La matriz proporciona la forma de volumen para proteger las superficies de las fibras y resistir el combamiento; las fibras tienden a transmitir su gran resistencia al compuesto. Cuando se aplica una carga, la matriz de resistencia baja se deforma y transmite la fuerza a las fibras de resistencia alta, que de ese modo soportan la carga. Si algunas fibras individuales se rompen, la carga se redistribuye hacia otras fibras a través de la matriz .

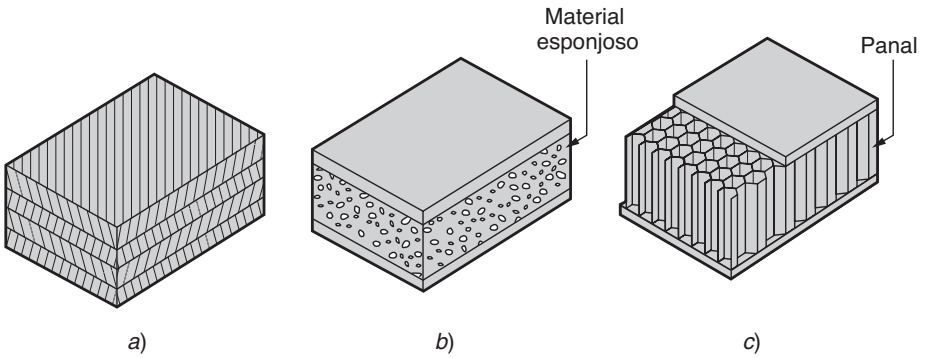


FIGURA 9.7 Estructuras de compuestos laminares: *a*) estructura laminar convencional, *b*) estructura de emparedado que usa un núcleo de esponja y *c*) estructura de emparedado de panal.

TABLA 9.3 Ejemplos de estructuras compuestas laminares.

Compuesto laminar	Descripción (consúltese el texto, si fuera aplicable)
Llantas de automóvil	Una llanta consiste en capas múltiples unidas; las capas son materiales compuestos (caucho reforzado con negro de humo), y los refuerzos consisten de tejidos impregnados de caucho (véase el capítulo 14).
Emparedado de panal	Una estructura ligera de panal está unida por ambas caras a láminas delgadas, como se aprecia en la figura 9.7*c*).
FRP	Los paneles de plástico de capas múltiples reforzados con fibra se emplean en los aviones, paneles de carrocerías automotrices y cascos de embarcaciones (véase el capítulo 15).
Triplay	Las hojas alternantes de madera están unidas con orientaciones y aislamientos diferentes para mejorar su resistencia.
Tarjetas de circuitos impresos	Se utilizan capas de cobre y plástico reforzado para la conducción y aislamiento eléctricos, respectivamente (véase la sección 36.2).
Esquís para nieve	Los esquís son estructuras compuestas laminares que consisten en capas múltiples de metales, tablero de partículas y plástico fenólico.
Parabrisas	Consiste en dos capas de vidrio a cada lado de una hoja de plástico rígido (véase la sección 12.3).

9.1.4 Otras estructuras compuestas

El modelo de material compuesto que se describió es uno en el que la fase de refuerzo está incrustada en una fase de matriz, y la combinación tiene propiedades superiores en ciertos aspectos a las de los constituyentes aislados. Sin embargo, los compuestos adoptan otras formas que no se ajustan a este modelo, algunas de las cuales tienen importancia comercial y tecnológica considerable.

Una ***estructura compuesta laminar*** consiste en dos o más capas unidas que forman una pieza integral, como se aprecia en la figura 9.7*a*). Por lo general, las capas son suficientemente gruesas como para que el compuesto se identifique con facilidad, que no siempre es el caso de otros compuestos. Es frecuente que las capas sean de materiales diferentes, pero esto no es imprescindible. El triplay es un ejemplo de ello; las capas son de la misma madera, pero los granos están orientados en forma diferente para incrementar la resistencia conjunta de la pieza laminada. Con frecuencia, un compuesto laminar emplea materiales diferentes en sus capas para adquirir la ventaja de combinar las propiedades particulares de cada uno. En ciertos casos, las capas en sí son de materiales compuestos. Ya se mencionó que la madera es un material compuesto; por tanto, el triplay es una estructura compuesta laminar en la que las capas en sí son materiales compuestos. En la tabla 9.3 se presenta una lista de ejemplos de compuestos laminares.

La ***estructura de emparedado*** a veces se clasifica como caso especial de la estructura compuesta laminar. Consiste en un núcleo relativamente grueso de material de baja densidad unido por ambas caras a hojas delgadas de materiales diferentes. El núcleo de baja densidad es un ***material esponjoso***, como se aprecia en la figura 9.7*b*), o un ***panal***, como en c). La razón de utilizar una estructura en emparedado es obtener un material con relaciones altas de resistencia a peso y de rigidez a peso.

9.2 COMPUESTOS DE MATRIZ METÁLICA

Los compuestos de matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) consisten en una matriz de metal reforzada por una segunda fase. Es común que las fases reforzadoras incluyan 1) partículas de cerámica y 2) fibras de materiales diversos, que incluyen otros metales, cerámicos, carbono y boro. Es común denominar a los MMC del primer tipo como cermets.

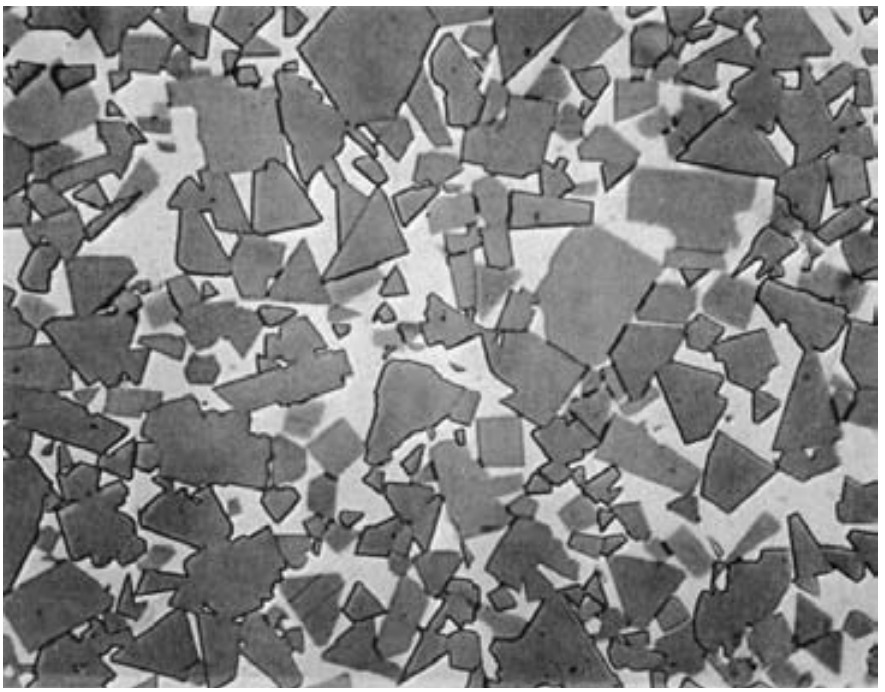


FIGURA 9.8 Microfotografía (alrededor de 1 500X) de carburo cementado con 85% de WC y 15% de Co. (Fotografía por cortesía de Kennametal Inc.).

9.2.1 Cermets

Un ***cermet***[1] es un material compuesto en el que un cerámico está contenido en una matriz metálica. Es frecuente que el cerámico domine la mezcla, pues a veces su volumen llega a ser de hasta 96%. El enlace puede mejorarse por medio de una solubilidad ligera entre las fases a temperaturas elevadas que se utilizan para procesar estos compuestos. Los cermets se dividen en 1) carburos cementados y 2) cermets con base en óxidos.

Carburos cementados Los ***carburos cementados*** están integrados de uno o más compuestos de carburo enlazados en una matriz metálica. El término ***cermet*** no se emplea para todos estos materiales, aun cuando es técnicamente correcto. Los carburos cementados comunes se basan en los carburos de tungsteno (WC), de titano (TiC) y de cromo (Cr_3C_2). También se emplea el carburo de tantalio (TaC) y otros, pero son menos comunes. Los aglutinantes metálicos principales son el cobalto y el níquel. Ya se estudiaron los cerámicos de carburo (véase la sección 7.3.2); constituyen el ingrediente principal de los carburos cementados, y es común que su contenido varíe de 80% a 95% del peso total.

Las piezas de carburo cementado se producen con técnicas de procesamiento de partículas (véase la sección 17.3). El cobalto es el aglutinante que se utiliza para el WC (véase la figura 9.8), y el níquel es el más común para el TiC y el Cr_3C_2. Aun cuando el aglutinante constituye sólo 5% a 15%, su efecto sobre las propiedades mecánicas es significativo en el material compuesto. Si se utiliza el WC-Co como ejemplo, se ve que conforme se incrementa el porcentaje de Co la dureza disminuye y la resistencia transversal a la ruptura (TRS) aumenta, como se aprecia en la figura 9.9. La TRS se correlaciona con la rigidez del compuesto de WC-Co.

Las herramientas de corte son la aplicación más común de los carburos cementados, con base en el ***carburo de tungsteno***. Otras aplicaciones de los carburos cementados de WC-Co incluyen los dados para estirar alambre, brocas para taladros de roca y otras herramientas de minería, troqueles para metalurgia de polvos, indentadores para probadores de dureza,

[1] La palabra *cermet* se usó por vez primera en la lengua inglesa alrededor de 1948.

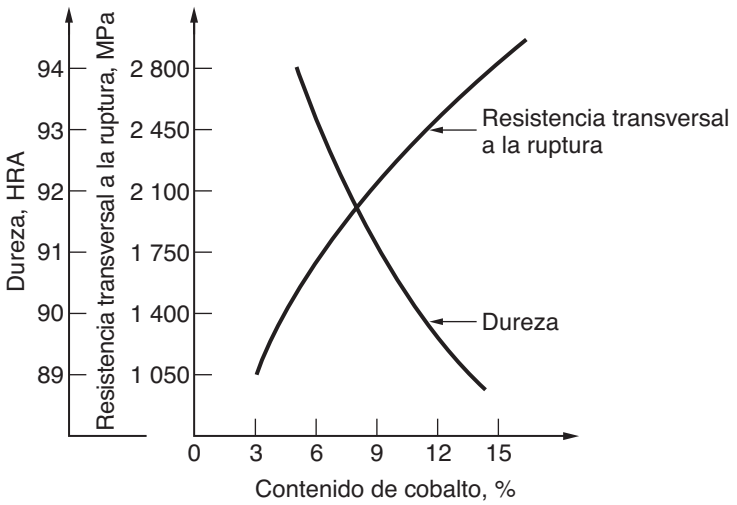


FIGURA 9.9 Gráfica normal de la resistencia transversal a la ruptura como función del contenido de cobalto.

y otras aplicaciones en las que la dureza y resistencia al desgaste son requerimientos de importancia crítica.

Los cermets de ***carburo de titanio*** se emplean principalmente en aplicaciones de alta temperatura. El níquel es el aglutinante preferido; su resistencia a la oxidación en condiciones de temperaturas elevadas es superior a la del cobalto. Las aplicaciones incluyen aspas de toberas de turbinas de gas, asientos de las válvulas, tubos de protección de termopares, boquillas de sopletes y herramientas giratorias de trabajo en caliente [11]. El TiC-Ni también se emplea como material de las herramientas de corte en las operaciones de maquinado.

En comparación con los carburos cementados de WC-Co, los ***carburos de cromo*** unidos por níquel son más frágiles, pero tienen estabilidad química y resistencia a la corrosión excelentes. Esta combinación, junto con su buena resistencia al desgaste, los hace apropiados para aplicaciones tales como bloques de calibrador, forros de válvulas, boquillas rociadoras y anillos para sellar cojinetes [11].

Cermets con base en óxidos La mayoría de estos compuestos emplean Al_2O_3 como la fase de partículas; el MgO es otro óxido que se utiliza en ocasiones. Una matriz metálica común es el cromo, aunque también se usan otros metales como aglutinantes. Las proporciones relativas de las dos fases varían de manera significativa, y cabe la posibilidad de que el aglutinante metálico sea el ingrediente principal. Las aplicaciones incluyen herramientas de corte, sellos mecánicos y escudos de termopares.

9.2.2 Compuestos de matriz metálica de fibra reforzada

Estos MMC son de interés debido a que combinan la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad elevados de una fibra con metales de densidad baja, lo que arroja buenas relaciones de resistencia peso y módulo a peso para el material compuesto que resulta. Los metales comunes que se emplean como matriz de densidad baja son el aluminio, magnesio y titanio. Algunos de los materiales de fibra importantes que se emplean en los compuestos son el Al_2O_3, boro, carbono y SiC.

Como era de esperarse, las propiedades de los MMC de fibra reforzada son anisotrópicos. La resistencia máxima a la tensión en la dirección preferente se obtiene con el empleo de fibras continuas enlazadas con fuerza a la matriz metálica. El módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión del material compuesto se incrementan con el aumento del volumen de las fibras. Los MMC con refuerzo de fibra tienen propiedades buenas de resistencia a temperaturas elevadas; y son buenos conductores eléctricos y térmicos. Las aplicaciones han sido sobre todo componentes de maquinaria y turbinas de aviones, en las que se aprovechan esas propiedades.



FIGURA 9.10 Fotografía muy amplificada de microscopio electrónico (alrededor de 3 000X) que muestra la superficie fracturada de un filamento cerámico (Al_2O_3) reforzada de SiC, que se usa como material para herramientas de corte. (Cortesía de Greenleaf Corporation.)

9.3 COMPUESTOS DE MATRIZ CERÁMICA

Los cerámicos tienen ciertas propiedades atractivas: rigidez, dureza, dureza en caliente y resistencia a la compresión elevadas, así como densidad relativamente baja. Los cerámicos también tienen varias desventajas: pocas tenacidad y resistencia a la tensión volumétrica, y son susceptibles de sufrir agrietamiento térmico. Los compuestos de matriz cerámica (CMC) representan un intento de conservar las propiedades deseables de los cerámicos al tiempo que compensan su debilidad. Los CMC consisten en una fase primaria de cerámica incrustada en una secundaria. A la fecha, el trabajo más fructífero se ha centrado en el uso de fibras como fase secundaria. El éxito ha sido elusivo. Las dificultades técnicas incluyen compatibilidad térmica y química de los constituyentes de los CMC durante el procesamiento. Asimismo, igual que con cualquier material cerámico, deben tomarse en cuenta las limitaciones de la forma de la pieza.

Los materiales cerámicos empleados como matrices incluyen la alúmina (Al_2O_3), carburo de boro (B_4C), nitruro de boro (BN), carburo de silicio (SiC), nitruro de silicio (Si_3N_4), carburo de titanio (TiC) y varios tipos de vidrio [10]. Algunos de estos materiales aún están en la etapa de desarrollo como matrices para CMC. Los materiales fibrosos en los CMC incluyen carbono, SiC y Al_2O_3.

La fase reforzadora en la tecnología actual de CMC consiste en cualquiera de las siguientes: fibras cortas, tales como filamentos, o fibras largas. Los productos con fibras cortas se han fabricado con éxito por medio de métodos de procesamiento de partículas (véase el capítulo 7), en los que las fibras se tratan como una forma de polvo en estos materiales. Aunque hay ventajas en cuanto al rendimiento en el empleo de fibras largas como refuerzo de ciertos compuestos de matriz cerámica, el desarrollo de técnicas económicas de procesamiento de esos materiales ha sido difícil. Una aplicación comercial prometedora de los CMC es en herramientas de corte de metal como competencia de los carburos cementados, como se ilustra en la figura 9.10. El material compuesto para herramientas tienen filamentos de SiC en una matriz de Al_2O_3. Otras aplicaciones potenciales existen en temperaturas elevadas y ambiente que son de química corrosiva para otros materiales.

9.4 COMPUESTOS DE MATRIZ DE POLÍMERO

Un ***compuesto de matriz de polímero*** (PMC, por sus siglas en inglés) consiste en una fase primaria de polímero en la que está incrustada una fase secundaria en forma de fibras, partículas u hojuelas. En el comercio, los PMC son los más importantes de las tres clases de compuestos sintéticos. Incluyen la mayoría de compuestos de plástico moldeado, caucho

reforzado con negro de humo y polímeros reforzados con fibras (FRP). De los tres, los FRP son los que se identifican más de cerca con el término compuesto. Si a un ingeniero de diseño se le dice "material compuesto", por lo general piensa en un FRP.

9.4.1 Polímeros de fibra reforzada

Un ***polímero de fibra reforzada*** es un material compuesto que consiste en una matriz de polímero incrustada con fibras de alta resistencia. Por lo general, la matriz de polímero es un plástico termofijo, como el poliéster insaturado o epóxico, pero también se emplean los polímeros termoplásticos, tales como los naylons (poliamidas), policarbonato, poliestireno y cloruro de polivinilo. Además, los elastómeros también se refuerzan con fibras para productos de caucho tales como llantas y bandas transportadoras.

Las fibras de los CMP adoptan formas diversas: discontinua (en trozos), continua o tejido como tela. Los materiales principales de la fibra en los FRP son el vidrio, el carbono y el Kevlar 49. Las fibras menos comunes incluyen el boro, SiC y Al_2O_3, y el acero. El vidrio (en particular el vidrio E) es el material de fibra más común en los FRP de hoy; su uso como reforzador de plásticos data de 1920, aproximadamente.

El término ***compuestos avanzados*** se emplea en ocasiones en relación con los FRP desarrollados a partir del final de la década de 1960 y que emplean boro, carbono o Kevlar como fibras reforzadoras [12]. La matriz de polímero más común es epóxica. Estos compuestos por lo general tienen alto contenido de fibras (más de 50% del volumen) y poseen elevadas resistencia y módulo de elasticidad. Cuando se combinan dos o más materiales de fibra en el compuesto FRP, se denomina ***compuesto híbrido***. Las ventajas de los híbridos sobre los FRP convencionales o avanzados incluyen el balance entre la resistencia y la rigidez, tenacidad y resistencia al impacto mejoradas, y peso reducido [11]. Los compuestos avanzados e híbridos se utilizan en aplicaciones aeroespaciales.

La forma más usada de los FRP es una estructura laminar, hecha por el apilamiento y unión de capas delgadas de fibra y polímero hasta que se obtiene el espesor deseado. Al variar la orientación de las fibras entre las capas, se logra el nivel de anisotropía especificado en las propiedades del laminado. Este método se emplea para formar piezas de sección transversal delgada tales como alas y secciones del fuselaje de los aviones, paneles de carrocería de autos y camiones, así como cascos de embarcaciones.

Propiedades Hay cierto número de características atractivas que distinguen a los plásticos reforzados con fibra entre los materiales de la ingeniería. Las más notables son: 1) relación elevada resistencia a peso, 2) razón grande módulo a peso y 3) gravedad específica baja. Un FRP común pesa sólo la quinta parte que el acero, pero su resistencia y módulo son similares en la dirección de la fibra. En la tabla 9.4 se comparan las propiedades para varios FRP, aceros y aleaciones de aluminio. Las propiedades que se listan en ella dependen de la proporción de fibras en el compuesto. Tanto la resistencia a la tensión como el módulo elástico se incrementan conforme aumenta el contenido de fibra, según la ecuación (9.5). Otras propiedades y características de los plásticos de fibra reforzada incluyen 4) buena resistencia a la fatiga; 5) buena resistencia a la corrosión, aunque los polímeros son solubles en diferentes productos químicos; 6) expansión térmica baja de muchos FRP, lo que lleva a una estabilidad dimensional apropiada y 7) anisotropía significativa de sus propiedades. En relación con este último rasgo, las propiedades mecánicas de los FRP que se dan en la tabla 9.4 son en la dirección de la fibra. Como ya se dijo, cuando se miden en una dirección diferente, sus valores son significativamente menores.

Aplicaciones Durante las últimas tres décadas ha habido un crecimiento sostenido en la aplicación de polímeros reforzados con fibra en productos que requieren mucha resistencia y poco peso, con frecuencia como sustitutos de metales. La industria aeroespacial es uno

TABLA 9.4 Comparación de las propiedades comunes de los plásticos de fibra reforzada y aleaciones metálicas representativas.

Material	Gravedad específica (*SG*)	Resistencia a la tensión (*TS*)		Módulo de elasticidad (*E*)		Índice[a]	
		MPa	lb/in^2	GPa	lb/in^2	*TS*/*SG*	*E*/*SG*
Acero al bajo C	7.87	345	50 000	207	30×10^6	1.0	1.0
Aleación de acero (tratada térmicamente)	7.87	3 450	500 000	207	30×10^6	10.0	1.0
Aleación de aluminio (tratada térmicamente)	2.70	415	60 000	69	10×10^6	3.5	1.0
FRP: fibra de vidrio en poliéster	1.50	205	30 000	69	10×10^6	3.1	1.7
FRP: carbono en epóxico[b]	1.55	1 500	220 000	140	20×10^6	22.3	3.4
FRP: carbono en epóxico[c]	1.65	1 200	175 000	214	31×10^6	16.7	4.9
FRP: Kevlar en matriz epóxica	1.40	1 380	200 000	76	11×10^6	22.5	2.1

Recopilado a partir de las referencias [3] y [7], y otras fuentes. Las propiedades están medidas en la dirección de la fibra.

[a] Los índices son relaciones de resistencia a la tensión-peso (TS/SG) y módulo de elasticidad-peso (E/SG), comparadas con el acero al bajo C (índice = 1.0 para la base).

[b] En los FRP se emplean fibras de carbono de alta resistencia a la tensión.

[c] En los FRP se utilizan fibras de carbono de módulo alto.

de los usuarios más grandes de los materiales compuestos. Los diseñadores luchan de manera continua para reducir el peso de las aeronaves a fin de incrementar la eficiencia del combustible y la capacidad de carga. Las aplicaciones de materiales compuestos en la aviación tanto militar como comercial han crecido en forma sostenida. Gran parte del peso estructural de los aviones y helicópteros de hoy día consiste en FRP. En la figura 9.11 se identifican los compuestos empleados en el Boeing 757.

La industria automotriz es otro usuario importante de FRP. Las aplicaciones más obvias de los FRP son en paneles de la carrocería de autos y camiones. Un ejemplo notable es el Chevrolet Corvette, que durante décadas ha sido producido con carrocería de FRP. En ciertos chasises y partes de motores hay aplicaciones menos evidentes. Las



FIGURA 9.11 Materiales compuestos en el Boeing 757. (Cortesía de Commercial. Airplane Group.)

aplicaciones automotrices difieren de las de la industria aeroespacial en dos aspectos significativos. En primer lugar, el requerimiento de una relación elevada resistencia a peso es menos demandante que en los aviones. Las aplicaciones de carros y camiones usan plásticos reforzados con fibra de vidrio convencionales en lugar de compuestos avanzados. En segundo lugar, las cantidades de producción son mucho mayores en las aplicaciones automotrices, lo que requiere de métodos más económicos de fabricación. El uso continuo de láminas de acero al bajo carbono para los automóviles a pesar de las ventajas de los FRP es una evidencia del costo bajo y facilidad de procesamiento del acero.

Los FRP se han adoptado ampliamente para el equipo recreativo y deportivo. El plástico reforzado con fibra de vidrio se ha empleado para cascos de embarcaciones desde la década de 1940. Las cañas de pescar fueron otra aplicación temprana. Hoy día, los FRP se hallan representados en un conjunto amplio de productos deportivos, incluidas raquetas para tenis, palos de golf, cascos de futbol, arcos y flechas, esquís y ruedas de bicicleta.

9.4.2 Otros compuestos de matriz de polímero

Además de los FRP, otros PMC contienen partículas, hojuelas y fibras cortas. Los ingredientes de la fase secundaria reciben el nombre de ***rellenos*** cuando se usan en compuestos de polímeros moldeados (véase la sección 8.1.5). Los rellenos se dividen en dos categorías: 1) refuerzos y 2) extensores. Los ***rellenos de refuerzo*** sirven para dar resistencia o mejorar de otro modo las propiedades mecánicas del polímero. Los ejemplos comunes incluyen: aserrín y polvo de mica en resinas fenólicas y de aminas para incrementar la resistencia, resistencia a la abrasión y estabilidad dimensional, así como negro de humo en el caucho para mejorar su resistencia, resistencia al corte y al desgaste. Los ***extensores*** sencillamente incrementan el volumen y reducen el costo por unidad de peso del polímero, pero tienen poco efecto o ninguno sobre sus propiedades mecánicas. Los extensores se formulan para mejorar las características del moldeo de la resina.

Los polímeros esponjosos (véase la sección 13.11) son una forma de compuestos en los que burbujas de gas están incrustadas en una matriz de polímero. La estiroesponja y la esponja de poliuretano son los ejemplos más comunes. La combinación de la densidad casi igual a cero del gas y la densidad relativamente baja de la matriz hacen que estos materiales sean de peso ligero en extremo. La mezcla de gas también conlleva conductividad térmica muy baja para aplicaciones en las que se requiere aislamiento del calor.

9.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos reciben su forma por medio de muchas tecnologías diferentes de procesamiento. Las dos fases por lo común se producen por separado antes de combinarse en la forma de la pieza compuesta. Las fases de la matriz por lo general se procesan con tecnologías que se describieron en los capítulos 6, 7 y 8 para los metales, cerámicos y polímeros.

Los métodos de procesamiento para la fase incrustada dependen de la forma. La producción de fibra se describe en la sección 12.2.3 para el vidrio, y en la 13.4 para los polímeros. Los métodos de producción de fibra para el carbono, boro y otros materiales se resumen en la tabla 15.1. La producción de polvo para los metales se estudia en la sección 16.2, y para los cerámicos en la 17.1.1. Las técnicas de procesamiento para fabricar MMC y CMC son similares a las que se emplean para metales en polvo y cerámicos (véanse los capítulos 16 y 17). En la sección 17.3 se trata el procesamiento específico de los cermets.

Es común que los procesos de moldeo se lleven a cabo en los PMC, de los tipos de fibra tanto en partículas como en trozos. Los procesos de moldeo para estos compuestos son los mismos que aquellos empleados para los polímeros (véase el capítulo 13). Otros procesos más especializados para los compuestos de matriz de polímero, en particular

los polímeros reforzados con fibra, se describen en el capítulo 15. Muchas estructuras compuestas laminadas y de panal se ensamblan por medio de uniones adhesivas (véase la sección 32.3)

REFERENCIAS

[1] Chawla, K. K. ***Composite Materials Science and Engineering,*** 2a. ed., Springer-Verlag, Nueva York, 2001.

[2] Delmonte, J., ***Metal-Polymer Composites,*** Van Nostrand Reinhold, Nueva York, 1990.

[3] ***Engineering Materials Handbook,*** vol. **1**, Composites, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.

[4] Flinn, R. A. y Trojan, P. K., ***Engineering Materials and Their Applications,*** 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[5] Greenleaf Corporation, ***WG-300–Whisker Reinforced Ceramic/Ceramic Composites*** (Marketing literature), Saegertown, Pennsylvania.

[6] Hunt, W. H., Jr. y Herling, S. R., "Aluminum Metal-Matrix Composites", ***Advanced Materials & Processes,*** febrero de 2004, pp. 39-42.

[7] Mallick, P. K., ***Fiber-Reinforced Composite: Materials, Manufacturing, and Designs,*** 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1993.

[8] McGrum, N. G., Buckley, C. P. y Bucknall, C. B., ***Principles of Polymer Engineering,*** 2a. ed., Oxford University Press, Inc., Oxford, UK, 1997.

[9] Morton-Jones, D. H., ***Polymer Processing,*** Chapman and Hall, Londres, UK, 1989.

[10] Naslain, R. y Harris, B. (eds.) ***Ceramic Matrix Composites,*** Elsevier Applied Science. Londres y Nueva York, 1990.

[11] Schwartz, M. M., ***Composite Materials Handbook,*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1992.

[12] Wick, C. y Veilleux R. F. (eds.), ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed. Volumen III-Materials, Finishing, and Coating, 1985, capítulo 8.

[13] Zweben, C., Hahn, H. T. y Chou, T-W, ***Delaware Composites Design Encyclopedia,*** vol. **1**, ***Mechanical Behavior and Properties of Composite Materials,*** Technomic Publishing Co. Inc., Lancaster, Pennsylvania, 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

9.1. ¿Qué es un material compuesto?

9.2. Identifique algunas de las propiedades características de los materiales compuestos.

9.3. ¿Qué significa el término anisotrópico?

9.4. ¿Cómo se distinguen los compuestos tradicionales de los sintéticos?

9.5. Mencione las tres categorías básicas de materiales compuestos.

9.6. ¿Cuáles son las formas comunes de la fase de refuerzo en los materiales compuestos?

9.7. ¿Qué es un filamento?

9.8. ¿Cuáles son las dos formas de la estructura de emparedado entre las estructuras de compuestos laminares? Describa con brevedad cada una.

9.9. Dé algunos ejemplos de productos comerciales que sean estructuras compuestas laminares.

9.10. ¿Cuáles son los tres factores generales que determinan las propiedades de un material compuesto?

9.11. ¿Cuál es la regla de las mezclas?

9.12. ¿Qué es un cermet?

9.13. ¿Qué clase de compuestos son los carburos cementados?

9.14. ¿Cuáles son algunas de las debilidades de los cerámicos que pueden corregirse en los compuestos de matriz cerámica reforzados con fibra?

9.15. ¿Cuál es el material más común para las fibras que se usan en los plásticos reforzados con ellas?

9.16. ¿Qué significa el término compuestos avanzados?

9.17. ¿Qué es un compuesto híbrido?

9.18. Identifique algunas de las propiedades importantes de los materiales compuestos de plástico reforzado con fibra.

9.19. Mencione algunas de las aplicaciones importantes de los FRP.

9.20. ¿Qué significa el término interfaz, en el contexto de los materiales compuestos?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 17 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

9.1. ¿Cuál de los siguientes es el significado de anisotrópico?: *a*) materiales compuestos con composición que consiste en más de dos materiales, *b*) las propiedades son las mismas en cualquier dirección, *c*) las propiedades varían en función de la dirección en que se miden o *d*) la resistencia y otras propiedades son función de la temperatura de curado.

9.2. La fase de refuerzo es la matriz dentro de la cual está incrustada la fase secundaria: *a*) verdadero o *b*) falso.

9.3. ¿Cuál de las siguientes formas de refuerzo ofrece el potencial más grande para mejorar la resistencia y rigidez en el material compuesto resultante?: *a*) fibras, *b*) hojuelas, *c*) partículas o *d*) fase infiltrada.

9.4. ¿Cuál de los tipos siguientes compuestos es de madera?: *a*) CMC, *b*) MMC o *c*) PMC.

9.5. ¿Cuáles de los materiales siguientes se emplean como fibras en los plásticos reforzados con fibras? (cuatro respuestas mejores): *a*) óxido de aluminio, *b*) boro, *c*) hierro colado, *d*) vidrio E, *e*) epóxicos, *f*) Kevlar 49, *g*) poliéster y *h*) silicio.

9.6. ¿Cuáles de los metales siguientes se usan como material de la matriz de los MMC reforzados con fibra? (dos respuestas mejores): *a*) aluminio, *b*) cobre, *c*) hierro, *d*) magnesio y *e*) zinc.

9.7. ¿Cuáles de los metales siguientes se emplean como matrices en casi todos los carburos cementados de WC y en los cermets de TiC? (dos respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) cromo, *c*) cobalto, *d*) plomo, *e*) níquel, *f*) tungsteno o *g*) carburo de tungsteno.

9.8. ¿Los compuestos de matriz cerámica están diseñados para corregir cuál de las debilidades siguientes de los cerámicos? (dos respuestas mejores): *a*) resistencia a la compresión, *b*) dureza, *c*) dureza en caliente, *d*) módulo de elasticidad, *e*) resistencia a la tensión o *f*) tenacidad.

9.9. ¿Cuáles de los tipos siguientes de polímero se usan más comúnmente en los compuestos de matriz de polímero?: *a*) elastómeros, *b*) termoplásticos o *c*) termofijos.

9.10. Identifique cuáles de los materiales siguientes no son compuestos (dos respuestas correctas): *a*) carburo cementado, *b*) compuesto fenólico moldeado, *c*) triplay, *d*) cemento Portland, *e*) caucho de las llantas de coches, *f*) madera o *g*) acero 1020.

PROBLEMAS

9.1. Un compuesto de fibra de vidrio está hecho de una matriz de éster vinílico y fibras reforzadoras de vidrio E. La fracción de volumen del vidrio E es de 35%. El resto corresponde al éster vinílico. La densidad del éster vinílico es de 0.882 g/cm^3, y su módulo de elasticidad es de 3.60 GPa. La densidad del vidrio E es de 2.60 g/cm^3 y su módulo de elasticidad es de 76.0 GPa. Una sección del compuesto de 1.00 cm × 50.00 cm × 200.00 está fabricada con las fibras de vidrio E colocadas en dirección longitudinal a lo largo de 200 cm. Suponga que en el compuesto no hay vacíos. Determine *a*) la masa del éster vinílico en la sección, *b*) la masa de las fibras del vidrio E en la sección y *c*) la densidad del compuesto.

9.2. Para el problema 9.1, determine el módulo de elasticidad en *a*) la dirección longitudinal de las fibras de vidrio y *b*) la dirección perpendicular a las fibras de vidrio.

9.3. Una muestra compuesta de epóxico reforzado con carbono tiene las dimensiones de 12 in × 12 in × 0.25 in, y una masa de 1.8 lb. Las fibras de carbono tienen un módulo de elasticidad de 50(10^6) lb/in^2, y una densidad de 0.069 lb/in^3. La matriz epóxica tiene un módulo de elasticidad de 0.61(10^6) lb/in^2 y una densidad de 0.042 lb/in^3. ¿Cuál es la fracción de volumen de *a*) las fibras de carbono y *b*) la matriz epóxica de la muestra? Suponga que en ésta no hay vacíos.

9.4. En el problema 9.3, ¿cuál es el valor pronosticado para el módulo de elasticidad *a*) en la dirección longitudinal y *b*) en forma perpendicular a las fibras de carbono?

9.5. Un compuesto tiene una matriz de poliéster con fibras de Kevlar 29. Las fracciones de volumen del poliéster y el Kevlar son 60% y 40%, respectivamente. Las fibras de Kevlar tienen un módulo de elasticidad de 60 GPa en dirección longitudinal y 3 GPa en dirección transversal. La matriz de poliéster tiene un módulo de elasticidad de 5.6 GPa en ambas direcciones. *a*) Determine el módulo de elasticidad del compuesto en dirección longitudinal. *b*) Determine el módulo de elasticidad en la dirección transversal.

Parte III
Procesos de solidificación

10 FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

10.1 Panorama de la tecnología de fundición
- 10.1.1 Procesos de fundición
- 10.1.2 Moldes para fundición en arena

10.2 Calentamiento y vertido
- 10.2.1 Calentamiento del metal
- 10.2.2 Vertido del metal fundido
- 10.2.3 Análisis de ingeniería del vertido
- 10.2.4 Fluidez

10.3 Solidificación y enfriamiento
- 10.3.1 Solidificación de los metales
- 10.3.2 Tiempo de solidificación
- 10.3.3 Contracción
- 10.3.4 Solidificación direccional
- 10.3.5 Diseño de la mazarota

En esta parte del libro se estudian aquellos procesos de manufactura en los que el material de inicio se encuentra en forma líquida o en condición muy plástica, y se crea un objeto a través de su solidificación. Los procesos de fundición y moldeo dominan esta categoría de operaciones de conformación. En relación con la figura 10.1, los procesos de solidificación se clasifican de acuerdo con el material de ingeniería que se procesa: 1) metales, 2) cerámicos, en específico vidrios,[1] y 3) polímeros y compuestos de matriz de polímero (PMC, por sus siglas en inglés). En este capítulo y el siguiente se cubre la fundición de metales. El trabajo del vidrio se estudia en el capítulo 12 y el procesamiento de polímeros y PMC se trata en los capítulos 13, 14 y 15.

La ***fundición*** es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término ***fundición*** también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. Es uno de los procesos más antiguos de conformación, pues se remonta a hace 6 000 años (véase la nota histórica 10.1). El principio de la fundición parece sencillo: se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa.

[1] Entre los cerámicos sólo el vidrio se procesa por solidificación; los cerámicos nuevos y tradicionales reciben su forma con el empleo de procesos de partículas (véase el capítulo 17).

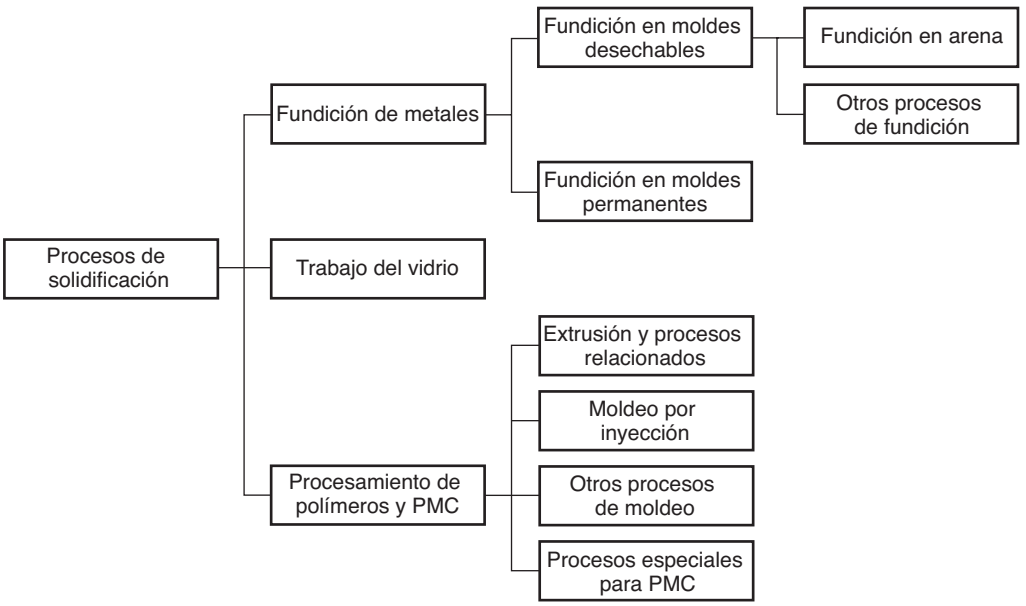


FIGURA 10.1 Clasificación de los procesos de solidificación.

Nota *histórica* 10.1 *Orígenes de la fundición*

La fundición de metales puede rastrearse hasta alrededor de 4000 a.C. El oro fue el primer metal descubierto y usado por las civilizaciones antiguas; era maleable y se martillaba con facilidad para darle forma a temperatura ambiente. Parecía que no hubiera necesidad de otras maneras para dar forma al oro. Fue el descubrimiento posterior del cobre lo que originó la necesidad de la fundición. Aunque el cobre podía forjarse para darle forma, el proceso era más difícil (debido al endurecimiento por deformación) y se limitaba a formas relativamente simples. Los historiadores creen que transcurrieron cientos de años antes de que el proceso de fundir cobre se llevara a cabo por vez primera, es probable que por accidente durante la reducción del mineral de cobre durante la preparación para martillar el metal en alguna forma útil. Así, por azar, nació el arte de la fundición. Es probable que el descubrimiento ocurriera en Mesopotamia, y la "tecnología" se difundiera con rapidez por el resto del mundo antiguo.

Fue una innovación de importancia significativa en la historia de la humanidad. Con la fundición podían obtenerse formas mucho más intrincadas que por medio del martillado. Era posible fabricar herramientas y armas más sofisticadas. Se obtenían implementos y ornamentos más detallados. Se hacía joyería fina de oro, más bella y valiosa que con los métodos anteriores. Primero se emplearon aleaciones para fundir, cuando se descubrió que la mezcla de cobre y estaño (la aleación que se formaba era bronce) producía fundidos mucho mejores que el cobre solo. La fundición permitió la creación de riqueza en aquellas naciones que la hacían del mejor modo. Durante la edad de bronce (cerca de 2 000 años), Egipto dominó el mundo civilizado antiguo gracias a su capacidad de efectuar el proceso de fundición.

Durante la Edad Media (de 400 a 1400 d.C.), la religión fue una influencia importante para perpetuar las habilidades del fundidor. La construcción de catedrales y templos requería la fundición de las campanas que se empleaban en esas estructuras. En realidad, el tiempo y esfuerzo necesarios para fundir las grandes campanas de bronce de esa época ayudaron a que el proceso de fundición pasara del ámbito del arte al de la tecnología. Hubo avances en las técnicas de fundición y hechura de moldes. Se mejoró el procedimiento de fundición que consistía en el moldeo por fosos, en el que los moldes se formaban en un pozo profundo ubicado frente al horno para simplificar el proceso de vertido. Además, el fundidor de campanas aprendió la relación que había entre el tono de éstas, que era la medición importante de la calidad del producto, y su tamaño, forma, espesor y composición del metal.

Otro producto importante asociado con el desarrollo de la fundición fue el cañón. Cronológicamente, siguió

a la campana y por ello muchas de las técnicas que se usaron para fundirlas se aplicaban a la fabricación de cañones. El primero de ellos se elaboró en Ghent, Bélgica, en el año 1313. De entre todas las personas posibles, lo hizo un monje. Estaba hecho de bronce y el agujero se formó por medio de un núcleo durante la fundición. Debido a la rugosidad del agujero que se creaba durante el proceso de fundición, estas armas primeras no eran exactas y tenían que dispararse en un rango relativamente corto para que fueran eficaces. Pronto se hizo manifiesto que la exactitud y rango se podrían mejorar si el agujero se hacía suave mediante la maquinación de la superficie. Este proceso de maquinado recibió el nombre muy apropiado de perforado (taladrado) (sección 22.1.5).

La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. El término ***lingote*** por lo general se asocia con las industrias primarias de metales; describe un fundido grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como rolado o forjado. En el capítulo 6 se estudió la formación de lingotes. Una ***fundición de forma*** involucra la producción de formas más complejas que están mucho más cerca de la forma final que se desea que tenga la pieza o producto. Este capítulo y el siguiente tienen que ver más con la fundición de formas que con la de lingotes.

Existe una variedad de métodos de fundición de formas, lo que la hace uno de los procesos de manufactura más versátiles. Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de ***forma neta***. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de ***forma casi neta***, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.

Asociadas con la fundición también hay algunas desventajas, distintas para métodos diferentes. Entre éstas se incluyen limitaciones de las propiedades mecánicas; porosidad, exactitud dimensional y acabado de la superficie defectuosa para ciertos procesos de fundición; peligros para la seguridad de los seres humanos cuando procesan metales fundidos y problemas ambientales.

Las piezas fabricadas con procesos de fundición varían su tamaño desde componentes pequeños que pesan unas cuantas onzas hasta productos muy grandes de varias toneladas. La lista de piezas incluye coronas dentales, joyería, estatuas, estufas para quemar madera, bloques y cabezas de motores para vehículos automotrices, armazones de maquinaria, ruedas de ferrocarril, cacerolas para freír, tubería y carcasas de bombas. Todas las variedades de metales pueden fundirse, ferrosos y no ferrosos.

La fundición también se emplea con materiales tales como polímeros y cerámicos; sin embargo, los detalles son suficientemente distintos como para posponer el estudio de los procesos de fundición de esos materiales a capítulos posteriores. Este capítulo y el siguiente tienen que ver en forma exclusiva con la fundición de metales. En éste se examinan los fundamentos que se aplican prácticamente a todas las operaciones de fundido. En el capítulo que sigue se describen los procesos individuales de fundición, así como algunos de los temas del diseño de productos que deben considerarse cuando se fabrican piezas fundidas.

10.1 PANORAMA DE LA TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

Como proceso de producción, la fundición se lleva a cabo por lo general en una fundidora. Una ***fundidora*** es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar metal en forma derretida, ejecutar el proceso de fundición y limpiar el fundido terminado. Los trabajadores que llevan a cabo las operaciones de fundido en estas fábricas reciben el nombre de ***fundidores***.

10.1.1 Procesos de fundición

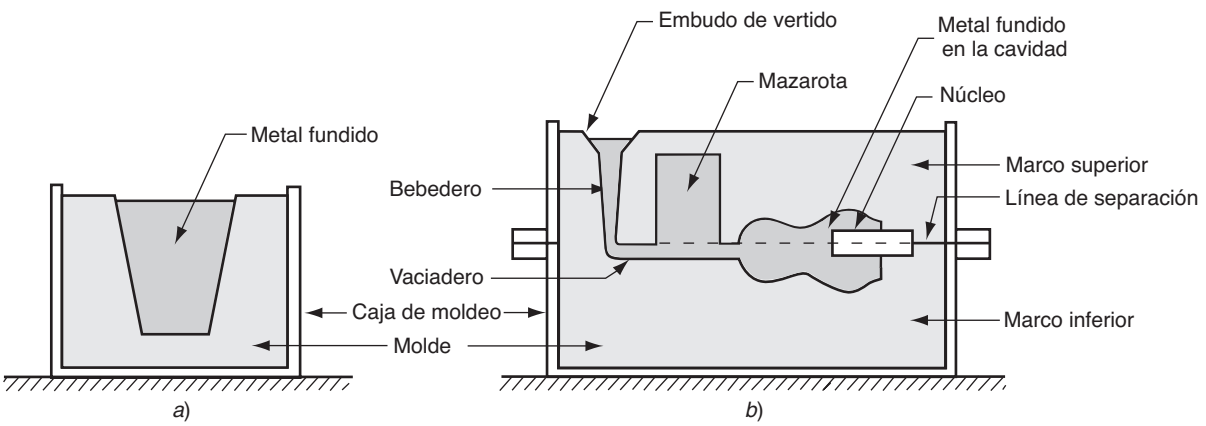
El estudio de la fundición comienza en forma lógica con el molde. El ***molde*** contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida. El tamaño y forma reales de la cavidad deben sobredimensionarse un poco para permitir la contracción de metal que ocurre durante la solidificación y enfriamiento. A metales diferentes corresponden cantidades distintas de contracción, por lo que la cavidad del molde debe diseñarse para el metal en particular que se va a fundir, si la exactitud dimensional es de importancia crítica. Los moldes están hechos de varios materiales, que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Es frecuente que los procesos varios de fundición se clasifiquen de acuerdo con estos tipos diferentes de moldes.

Para llevar a cabo la operación de fundido, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido. Después se vierte, o se dirige, hacia la cavidad del molde. En un ***molde abierto***, figura 10.2a, el metal líquido simplemente se vierte hasta que llena la cavidad abierta. En un ***molde cerrado***, figura 10.2b, se adapta un pasaje denominado sistema de paso, que permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es con mucho la categoría más importante de las operaciones productivas de fundición.

Tan pronto como el metal fundido llega al molde, comienza a enfriarse. Cuando la temperatura baja lo suficiente (por ejemplo, al punto de congelación para un metal puro), empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal. Se requiere de tiempo para completar el cambio de fase, y en el proceso se pierde una cantidad considerable de calor. Es durante esta etapa del proceso que el metal adopta la forma sólida de la cavidad del molde, y también cuando se establecen muchas de las propiedades y características del fundido.

Una vez que el fundido se ha enfriado lo suficiente, se retira del molde. En función del método de fundido y el metal empleado, podría requerirse un procesamiento adicional.

FIGURA 10.2 Dos formas de molde: *a*) molde abierto es tan sólo un contenedor con la forma de la pieza que se desea y *b*) molde cerrado, en la que la forma del molde es más compleja y requiere un sistema de paso (pasaje) que conduzca a la cavidad.



Esto incluye cortar el exceso de metal de la pieza fundida real, limpiar la superficie, inspeccionar el producto y dar tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, quizá se requiera maquinar (véase el capítulo 22), con objeto de lograr tolerancias más estrechas para ciertas características de las piezas, y eliminar la superficie del fundido.

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias, de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con molde permanente. ***Molde desechable*** significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirar el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables. En la fundición con arena, se vierte metal derretido en un molde de arena. Una vez que el metal se endurece, debe destruirse el molde a fin de recuperar el fundido.

Un ***molde permanente*** es el que se utiliza una vez y otra para producir muchos fundidos. Está hecho de metal (o de un material refractario cerámico, lo que es menos común) que soporte las temperaturas elevadas de la operación de fundido. En la fundición con molde permanente, éste consiste en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada. El troquel de fundición es el proceso más familiar de este grupo.

Con los procesos de molde desechable por lo general son posibles formas más intrincadas para el fundido. En los procesos con molde permanente las formas de la pieza están limitadas por la necesidad de abrir el molde. Por otro lado, algunos de los procesos con molde permanente tienen ciertas ventajas económicas en operaciones de producción elevada. En el capítulo 11 se estudian los procesos de fundición con moldes desechables y permanentes.

10.1.2 Moldes para fundición en arena

La fundición con arena es por mucho el proceso de fundición más importante. Para describir las características básicas de un molde se usará un molde para fundición en arena. Muchas de estas características y términos son comunes a los moldes que se emplean en otros procesos de fundición. La figura 10.2*b*) muestra la sección transversal de un molde común de fundición de arena, en la que se indica parte de la terminología. El molde consiste en dos mitades: el marco superior y el marco inferior. El ***marco superior*** es la mitad superior del molde y el ***marco inferior*** es la mitad inferior. Estas dos partes del molde están contenidas en una caja, llamada ***caja de moldeo***, que también está dividida en dos mitades, una para el marco superior y la otra para el inferior. Las dos mitades del molde se separan en la ***línea de separación***.

En la fundición con arena (y en otros procesos con moldes desechables), la cavidad del molde se forma por medio de un ***modelo***, hecho de madera, metal, plástico u otro material, y tiene la forma de la pieza por fundir. La cavidad se forma apisonando arena alrededor del modelo, sobre las mitades del marco superior y el inferior, de modo que cuando se retira el modelo, el vacío que queda tiene la forma que se desea para la pieza. El modelo por lo general está sobredimensionado a fin de permitir la contracción del metal cuando éste se solidifica y se enfría. La arena del molde está húmeda y contiene un aglutinante para que conserve su forma.

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la pieza fundida. Además, un fundido puede tener superficies internas. Éstas quedan determinadas por medio de un **núcleo**, forma que se coloca dentro de la cavidad del molde para definir la forma interior de la pieza. En la fundición con arena, los núcleos por lo general están hechos también de arena, aunque pueden emplearse otros materiales tales como metales, yeso y cerámicos.

El ***sistema de paso*** de un molde de fundición es el canal, o red de canales, por los que fluye el metal derretido desde el exterior hacia la cavidad. Como se aprecia en la figura, es común que el sistema de paso conste de un ***bebedero de vertido*** (también llamado sólo ***bebedero***), por la que el metal ingresa por un ***vaciadero*** que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero, es frecuente que se use un ***embudo de vertido***

para minimizar las salpicaduras y turbulencia conforme el metal fluye en el bebedero. En el diagrama aparece como un embudo sencillo en forma de cono. Algunos embudos de vertido están diseñados en forma de tazón, con un canal abierto que lleva al bebedero.

Además del sistema de paso, cualquier fundido en el que la contracción sea significativa requiere una mazarota conectada a la cavidad principal. La ***mazarota*** es un almacenamiento en el molde que sirve como fuente de metal líquido para que el fundido compense la contracción durante la solidificación. La mazarota debe estar diseñada para que se solidifique después del fundido principal a fin de que cumpla su función.

Conforme el metal pasa al molde, el aire que ocupaba en forma previa la cavidad, o bien los gases calientes que se forman por las reacciones del metal fundido, deben ser evacuados de modo que el metal llene por completo el espacio vacío. Por ejemplo, en la fundición con arena la porosidad natural de ésta permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los moldes permanentes de metal se perforan pequeños agujeros en el molde, o se maquinan hacia la línea de separación, para permitir la salida del aire y gases.

10.2 CALENTAMIENTO Y VERTIDO

Para llevar a cabo una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura algo más elevada que su punto de fusión y luego verterse a la cavidad del molde para que se solidifique. En esta sección se estudian aspectos diversos de estas dos etapas de la fundición.

10.2.1 Calentamiento del metal

Para calentar el metal a una temperatura de fusión suficiente para la fundición se utilizan hornos de varias clases (véase la sección 11.4.1). La energía calorífica que se requiere es la suma de 1) el calor para elevar la temperatura al punto de fusión, 2) el calor de fusión para convertirlo de sólido a líquido y 3) el calor para poner el metal fundido a la temperatura deseada para verterlo. Esto se expresa así:

$$H = \rho V\{C_s(T_m - T_o) + H_f + C_l(T_p - T_m)\} \tag{10.1}$$

donde H = calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura a que se vierte, J (Btu); ρ = densidad, g/cm^3 (lbm/in^3); C_s = calor específico por peso para el metal sólido, J/g-C (Btu/lbm-F); T_m = temperatura de fusión del metal, C (F); T_o = temperatura de inicio, la ambiental, por lo general, C (F); H_f = calor de fusión, J/g (Btu/lbm); C_l = calor específico por peso del metal líquido, J/g-C (Btu(lbm-F); T_p = temperatura de vertido, C (F); y V = volumen del metal que se calienta, cm^3 (in^3).

Ejemplo 10.1 Calentamiento de metal para fundición

Un metro cúbico de cierta aleación eutéctica se calienta en un crisol, desde la temperatura ambiente a 100 ºC por arriba de su punto de fusión para fundirlo. La densidad de la aleación es de 7.5 g/cm^3, el punto de fusión es de 800 ºC, calor específico de 0.33 J/g °C en estado sólido y 0.29J/g °C en estado líquido; y el calor de fusión es de 160 J/g. ¿Cuánta energía calorífica debe agregarse para completar el calentamiento si se supone que no hay pérdidas?

Solución: Se supone que en la fundidora la temperatura ambiente es de 25 ºC y que la densidad de los estados líquido y sólido del metal es la misma. Como un m^3 es igual a 10^6 cm^3, al sustituir los valores apropiados en la ecuación (10.1) se tiene que

$$H = (7.5)(10^6)\{0.33(800 - 25) + 160 + 0.29(100)\} = 3335(10^6)\text{J}$$

La ecuación anterior tiene valor conceptual; sin embargo, su valor de cálculo es limitado y no representa al ejemplo del cálculo. El empleo de la ecuación (10.1) es complicado por los factores siguientes: 1) el calor específico y otras propiedades térmicas del metal

sólido varían con la temperatura, en especial si el metal sufre un cambio de fase durante el calentamiento. 2) El calor específico de un metal puede ser diferente en los estados sólido y líquido. 3) La mayoría de los metales que se funden son aleaciones, y la mayor parte de éstas se funden por arriba de una temperatura que varía entre la de solidus y liquidus, más bien que con un solo punto de fusión; así, el calor de fusión no puede aplicarse en forma tan simple como la que se ilustró. 4) En la mayoría de los casos, no se dispone de los valores apropiados que se requieren en la ecuación para una aleación particular. 5) Existen pérdidas caloríficas significativas hacia el ambiente durante el calentamiento.

10.2.2 Vertido del metal fundido

Después del calentamiento, el metal está listo para verterlo. La introducción del metal derretido en el molde, que incluye el flujo a través del sistema de paso y hacia la cavidad, es una etapa crítica del proceso de fundición. Para que esta etapa tenga éxito, el metal debe fluir hacia todas las regiones del molde antes de solidificarse. Los factores que afectan la operación de vertido incluyen los siguientes: temperatura a la que se vierte, velocidad de vertido y turbulencia.

La ***temperatura de vertido*** es aquella que tiene el metal derretido cuando se introduce al molde. Lo que importa aquí es la diferencia entre la temperatura a que se vierte y la que tiene al comenzar la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura de liquidus para una aleación). Esta diferencia de temperatura en ocasiones se conoce como la de ***sobrecalentamiento***. Este término también se emplea para la cantidad de calor que debe retirarse del metal derretido entre el vertido y el inicio de la solidificación [6].

La ***velocidad de vertido*** se refiere a la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde. Si la tasa es demasiado baja, el metal se enfriará y solidificará antes de llenar la cavidad. Si la tasa de vertido es excesiva, la turbulencia se vuelve un problema serio. La ***turbulencia*** en el flujo de un fluido se caracteriza por variaciones erráticas en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido. El flujo se agita y es irregular en vez de ser suave y seguir líneas de corriente, como ocurre con el flujo laminar. Debe evitarse el flujo turbulento durante el vertido, por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados durante la solidificación, lo que degrada la calidad del fundido. La turbulencia también agrava la ***erosión del molde***, que es la pérdida gradual de superficies del molde debido al impacto del flujo de metal derretido. Las densidades de la mayoría de los metales que se funden son mucho mayores que la del agua y otros fluidos que se estudia normalmente. Estos metales fundidos también tienen una química mucho más reactiva que cuando se encuentran a temperatura ambiente. En consecuencia, el desgaste ocasionado por el flujo de ellos en el molde es significativo, en especial en condiciones de turbulencia. La erosión es seria en especial si ocurre en la cavidad principal debido a que la forma de la pieza fundida resulta afectada.

10.2.3 Análisis de ingeniería del vertido

Hay varias relaciones que gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de paso y dentro del molde. Una importante es el ***teorema de Bernoulli***, que establece que la suma de las energías (piezométrica, presión, cinética y fricción) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye son iguales. Esto se escribe de la forma siguiente:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \tag{10.2}$$

donde h = altura piezométrica, cm (in); p = presión del líquido, N/cm^2 (lb/in^2); ρ = densidad, g/cm^3 (lbm/in^3); v = velocidad de flujo, cm/s (in/s); g = constante de la aceleración de la gravedad, 981 cm/s/s (32.2 × 12 = 386 in/s/s); y F = pérdidas piezométricas debidas a la fricción, cm (in). Los subíndices 1 y 2 indican dos ubicaciones cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli se simplifica de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción (seguramente, la fricción afectará el flujo del líquido a través de un molde de arena) y se supone que entre tanto el sistema permanece a presión atmosférica, entonces la ecuación se reduce a

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \tag{10.3}$$

Esto se utiliza para determinar la velocidad del metal derretido en la base del bebedero. Se define como punto 1 la parte superior de la mazarota, y punto 2 la base. Si el punto 2 se usa como el plano de referencia, entonces la altura piezométrica en él es igual a cero ($h_2 = 0$) y h_1 es la altura (longitud) de la entrada. Cuando el metal se vierte en el embudo y fluye por el bebedero, su velocidad inicial en la parte superior es de cero ($v_1 = 0$). Así, la ecuación (10.3) se simplifica aún más y queda

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

que se resuelve para la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \tag{10.4}$$

donde v = velocidad del metal líquido en la base de la mazarota, cm/s (in/s); g = 981 cm/s/s (386 in/s/s); y h = altura del bebedero, cm (in).

Otra relación importante durante el vertido es la ***ley de continuidad***, que establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través del líquido. El gasto volumétrico es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del líquido que fluye. La ley de la continuidad se expresa como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \tag{10.5}$$

donde Q = gasto volumétrico, cm^3/s (in^3/s); v = velocidad; A = área de la sección transversal del líquido, cm^2 (in^2); y los subíndices se refieren a dos puntos cualesquiera del sistema de flujo. Así, un incremento del área da lugar a una disminución de la velocidad, y viceversa.

Las ecuaciones (10.4) y (10.5) indican que el bebedero debe ser ahusado. Conforme el metal acelera durante su descenso por la abertura del bebedero, el área de la sección transversal del canal debe reducirse; de otro modo, mientras la velocidad del metal aumenta en su camino hacia la base del bebedero, el líquido podría aspirar aire y llevarlo a la cavidad del molde. Para impedir esta condición, el bebedero se diseña con un ahusamiento, de modo que el gasto volumétrico vA siempre es el mismo en las partes superior e inferior de ella.

Si se supone que el vaciadero que va de la base del bebedero a la cavidad del molde es horizontal (y por tanto la altura piezométrica h es la misma que en la base del bebedero), entonces el gasto volumétrico a través del paso hacia la cavidad del molde permanece igual a vA en la base. En consecuencia, es posible estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de volumen V, así:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \tag{10.6}$$

donde T_{MF} = tiempo de llenado del molde, s; V = volumen de la cavidad del molde, cm^3 (in^3); y Q = gasto volumétrico. El tiempo de llenado del molde calculado por medio de la ecuación (10.6) debe considerarse un tiempo mínimo. Esto se debe a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible obstrucción del flujo en el sistema de paso; así, el tiempo de llenado del molde debe ser mayor que el que se obtiene con la ecuación (10.6).

Ejemplo 10.2 Cálculos del vertido

El bebedero de un molde mide 20 cm de largo, y el área de la sección transversal en su base es de 2.5 cm^2. El bebedero alimenta un vaciadero horizontal que conduce a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 1 560 cm^3. Determine: *a*) la velocidad del metal derretido

en la base del bebedero, *b*) la tasa de flujo volumétrico, y *c*) el tiempo que toma llenar el molde.

Solución: *a*) La velocidad del flujo de metal en la base de la entrada está dada por la ecuación (10.4):

$$v = \sqrt{2(981)(20)} = 198.1 \text{ cm/s}$$

b) El gasto volumétrico es

$$Q = (2.5 \text{ cm}^2)(198.1 \text{ cm/s}) = 495 \text{ cm}^2/\text{s}$$

c) El tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de 100 in^3 con ese gasto es

$$T_{MF} = 1560 / 495 = 3.2 \text{ s}$$

10.2.4 Fluidez

Es frecuente que las características del flujo de un metal derretido se describan con el término ***fluidez***, medida de la capacidad de un metal para fluir hacia un molde y llenarlo antes de solidificarse. La fluidez es el inverso de la viscosidad (véase la sección 3.4); conforme la viscosidad se incrementa, la fluidez disminuye. Existen métodos estándar de prueba para evaluar la fluidez, incluida la prueba del molde espiral que se ilustra en la figura 10.3, en el que la fluidez queda indicada por la longitud del metal que se solidifica en el canal espiral. Una espiral más larga de fundido significa fluidez mayor del metal derretido.

Los factores que afectan la fluidez incluyen la temperatura de vertido respecto del punto de fusión, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y la transferencia de calor al ambiente. Una temperatura de vertido más elevada respecto del punto de solidificación del metal aumenta el tiempo que permanece en estado líquido, lo que permite que fluya más antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas del fundido tales como la formación de óxidos, porosidad por gases y penetración de metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que forman el molde. Este último problema ocasiona que la superficie del fundido contenga partículas de arena incrustadas, lo que la hace más áspera y abrasiva que lo normal.

La composición también afecta la fluidez, en particular respecto al mecanismo de solidificación del metal. La mejor fluidez se obtiene con metales que se solidifican a temperatura constante (por ejemplo, metales puros y aleaciones eutécticas). Cuando la solidificación ocurre en un rango de temperatura (la mayor parte de aleaciones pertenecen a esta categoría), la porción solidificada en forma parcial interfiere con el flujo de la porción líquida, lo que reduce la fluidez. Además del mecanismo de solidificación, la composición del metal también determina el ***calor de fusión***, la cantidad de calor que se requiere para solidificar el metal a partir de su estado líquido. Un calor de fusión más elevado tiende a incrementar la medida de la fluidez en la fundición.

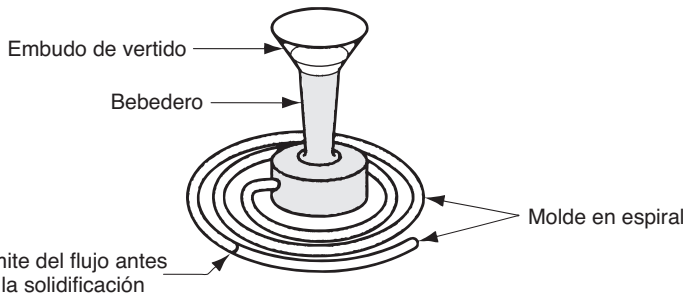


FIGURA 10.3 Prueba del molde espiral para la fluidez, en la que ésta se mide como la longitud del canal espiral que se llena con metal derretido antes de que ocurra la solidificación.

10.3 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Después de que se vierte al molde, el metal derretido se enfría y solidifica. En esta sección se estudia el mecanismo físico de la solidificación que ocurre durante la fundición. Los temas asociados con ella incluyen el tiempo que necesita un metal para solidificarse, las contracciones, la solidificación direccional y el diseño de la mazarota.

10.3.1 Solidificación de los metales

La solidificación involucra la transformación del metal derretido de nuevo al estado sólido. El proceso de solidificación difiere en función de si el metal es un elemento puro o una aleación.

Metales puros Un metal puro se solidifica a una temperatura constante igual a su punto de adhesión, el cual es el mismo punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros se conocen y están bien documentados (véase la tabla 4.1). El proceso ocurre a lo largo del tiempo, como se ilustra en la gráfica que aparece en la figura 10.4, que se denomina curva de enfriamiento. La solidificación real toma tiempo, llamado ***tiempo local de solidificación*** del fundido, durante el cual el calor de fusión latente del metal se libera hacia el molde que lo rodea. El ***tiempo total de solidificación*** es aquel que transcurre entre el vertido y la solidificación completa. Después de que el fundido se ha solidificado por completo, el enfriamiento continúa a la tasa indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción enfriadora de la pared del molde, al principio se forma una capa delgada de metal sólido en la interfaz inmediatamente después del vertido. El espesor de esta capa se incrementa y forma una costra alrededor del metal derretido conforme la solidificación avanza hacia el centro de la cavidad. La tasa a la que la solidificación sucede depende de la transferencia de calor al molde, así como de las propiedades térmicas del metal.

Es de interés examinar la formación de granos metálicos y su crecimiento durante el proceso de solidificación. El metal que forma la capa inicial se ha enfriado con rapidez por la extracción de calor a través de la pared del molde. Esta acción de enfriamiento ocasiona que los granos de la capa sean finos, de ejes iguales y orientados al azar. Conforme el enfriamiento continúa, se forman más granos y crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor. Como ésta ocurre a través de la capa y pared del molde, los granos

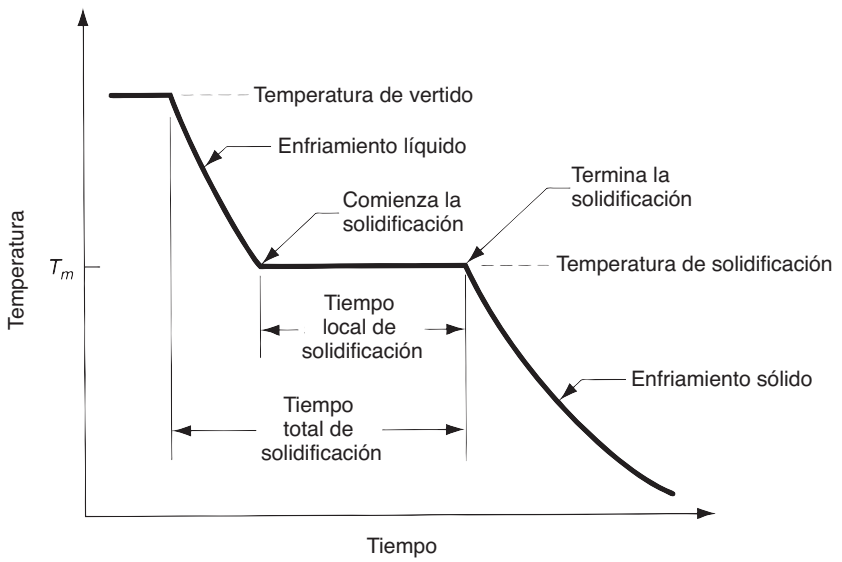


FIGURA 10.4 Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.

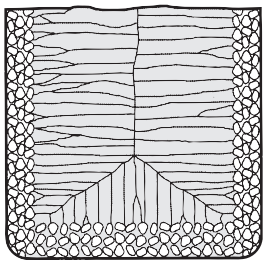


FIGURA 10.5 Estructura característica de los granos en un fundido de metal puro, en la que se ilustran los granos de tamaño pequeño orientados al azar cerca de la pared del molde, y granos grandes alargados orientados hacia el centro del fundido.

crecen hacia el interior como agujas o espinas de metal sólido. Conforme estas espinas crecen se forman ramas laterales, y mientras éstas también crecen se forman otras ramas a ángulos rectos de las primeras. Este tipo de crecimiento de granos se conoce como ***crecimiento dendrítico***, y ocurre no sólo en la solidificación de los metales puros sino también en la de aleaciones. Estas estructuras parecidas a árboles se llenan en forma gradual durante la solidificación, conforme se deposita más metal en las dendritas, hasta que ocurre la solidificación completa. Los granos que resultan de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente, tienden a ser gruesos y hay granos alargados en dirección del centro del fundido. En la figura 10.5 se ilustra la formación de granos que resulta.

Mayoría de aleaciones La mayor parte de aleaciones se solidifican en un rango de temperaturas en vez de a una temperatura única. El rango exacto depende del sistema de aleación y la composición particular. La solidificación de una aleación se explica con auxilio de la figura 10.6, que muestra el diagrama de fase para un sistema particular de aleación (véase la sección 6.1.2) y la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme la temperatura cae, comienza la solidificación a la temperatura indicada por el ***liquidus*** y termina cuando se alcanza el ***solidus***. El comienzo de la solidificación es similar a la de un metal puro. Se forma una capa delgada en la pared del molde debido al gradiente de temperatura mayor en esa superficie. Luego, la solidificación continúa igual que se describió antes, con la formación de dendritas que crecen hacia afuera de las paredes. Sin embargo, debido a la dispersión de temperatura entre el liquidus y el solidus, la naturaleza del crecimiento dendrítico es tal que se forma una zona de avance en la que coexiste metal tanto líquido como sólido. Las porciones sólidas son las estructuras dendríticas que se formaron lo suficiente como para atrapar islas pequeñas de metal

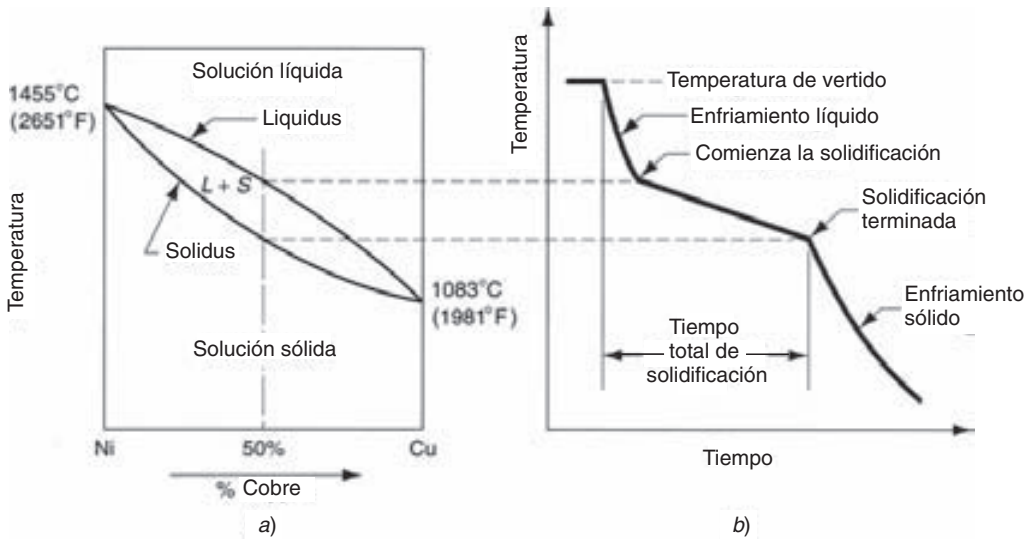


FIGURA 10.6 *a*) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel y *b*) curva de enfriamiento asociada para una composición de 50% Ni y 50% Cu, durante la fundición.

líquido en la matriz. Esta región sólida-líquida tiene consistencia suave que ha dado lugar a su nombre de ***zona blanda***. En función de las condiciones de solidificación, la zona blanda puede ser relativamente angosta, o existir a través de la mayor parte del fundido. Esta última condición la favorecen factores tales como la transferencia lenta de calor a partir del metal caliente, y una diferencia grande entre las temperaturas del liquidus y el solidus. En forma gradual, las islas de líquido en la matriz dendrítica se solidifican conforme disminuye la temperatura del fundido hacia la de solidus para la composición de la aleación dada.

Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es que cuando comienzan a formarse las dendritas su composición favorece al metal con el punto de fusión más elevado. En tanto la solidificación continúa y las dendritas crecen, se desbalancea la composición entre el metal que ya se solidificó y el restante que sigue derretido. Este desbalanceo en la composición se manifiesta al final, en el fundido terminado, en forma de la segregación de los elementos. La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. Microscópicamente, la composición química varía entre los granos individuales. Esto se debe al hecho de que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción mayor de uno de los elementos de la aleación. Conforme las dendritas crecen, deben expandirse con el uso del metal líquido restante que ha disminuido parcialmente del primer componente. Al final, el último metal en solidificarse en cada grano es el que ha sido atrapado por las ramas de las dendritas, y su composición está aún más fuera de balance. Así, se tiene una variación de la composición química dentro de los granos individuales del fundido.

Macroscópicamente, la composición química varía en todo el fundido. Como sus regiones que se solidificaron primero (hacia fuera, cerca de las paredes del molde) son más ricas en un componente que en otro, la aleación derretida restante queda privada de él en el momento en que ocurre la solidificación en el interior. Así, hay una segregación general a través de la sección transversal del fundido, que a veces se denomina ***segregación de lingote***, como se ilustra en la figura 10.7.

Aleaciones eutécticas Éstas constituyen una excepción al proceso general por el que se solidifican las aleaciones. Una ***aleación eutéctica*** es una composición particular de un sistema de aleación para el que el solidus y el liquidus están a la misma temperatura. Así, la solidificación ocurre a temperatura constante en lugar de en un rango, como se describió antes. El efecto se observa en el diagrama de fase del sistema plomo-estaño que aparece en la figura 6.3. El plomo puro tiene un punto de fusión de 327 ºC (621 ºF), mientras que el estaño puro se funde a 232 ºC (450 ºF). Aunque la mayor parte de las aleaciones plomo-estaño presentan el rango de temperatura frecuente solidus-liquidus, la composición particular de 61.9% de estaño y 38.1% de plomo tiene un punto de fusión (solidificación) de 183 ºC (362 ºF). Esta composición es la ***composición eutéctica*** del sistema de la aleación plomo-estaño, y 183 ºC es su ***temperatura eutéctica***. No es común utilizar aleaciones plomo-estaño para hacer fundiciones, pero las aleaciones Pb-Sn casi eutécticas se emplean en las soldaduras eléctricas, en las que el punto de fusión bajo es una ventaja. Algunos ejemplos de aleaciones eutécticas que se encuentran en la fundición incluyen aluminio-silicio (11.6%) y hierro fundido (4.3% de C).

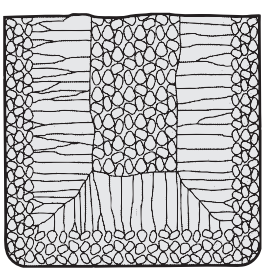


FIGURA 10.7 Estructura de grano característica de un fundido de aleación, en la que se aprecia la segregación de los componentes de la aleación en el centro del fundido.

10.3.2 Tiempo de solidificación

Sea que el fundido consista en un metal puro o en una aleación, la solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el que se requiere para que el fundido se solidifique después del vertido. Este tiempo depende del tamaño y forma del fundido, en una relación empírica conocida como ***regla de Chvorinov***, que establece lo siguiente:

$$T_{TS} = C_m\left(\frac{V}{A}\right)^n \tag{10.7}$$

donde T_{TS} = tiempo total de solidificación, min; V = volumen del fundido, cm^3 (in^3); A = área de la superficie del fundido, cm^2 (in^2); n es un exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2; y C_m es la ***constante del molde***. Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son min/cm^2 (min/in^2), y su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, incluido el material del molde (por ejemplo, calor específico, conductividad térmica), propiedades térmicas del metal que se funde (por ejemplo, calor de fusión, calor específico, conductividad térmica) y la temperatura de vertido respecto al punto de fusión del metal. El valor de C_m para una operación de fundido se basa en datos experimentales de operaciones anteriores efectuadas con el empleo del mismo material del molde, metal, y temperatura de vertido, aun si la forma de la pieza fuera muy diferente.

La regla de Chvorinov indica que un fundido con una razón grande de volumen a superficie se enfriará y solidificará con más lentitud que otra con una razón menor. Este principio se emplea para diseñar la mazarota de un molde. Para que desempeñe su función de alimentar el metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase sólida más tiempo que el fundido. En otras palabras la T_{TS} para la mazarota debe exceder la T_{TS} del fundido principal. Como las condiciones del molde son las mismas tanto para la mazarota como para el fundido, sus constantes de molde deben ser iguales. Si se diseña la mazarota para que tenga una razón mayor de volumen a área, se puede tener seguridad razonable en que el fundido principal se solidifique primero y que los efectos de la contracción se minimicen. Antes de considerar la manera en que se diseña la mazarota con la regla de Chvorinov, se estudiará el tema de la contracción, que es la razón por la que se necesitan las mazarotas.

10.3.3 Contracción

El estudio presente de la solidificación ha ignorado el efecto de la contracción que tiene lugar durante el enfriamiento y solidificación. La contracción ocurre en tres etapas: 1) contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación, 2) contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida, llamada ***contracción por solidificación***, y 3) contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente. Las tres etapas se explican en relación con un fundido cilíndrico hecho en un molde abierto, como se ilustra en la figura 10.8. El metal fundido inmediatamente después del vertido aparece en el inciso 0 de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento desde la temperatura de vertido hasta la de solidificación hace que la altura del líquido se reduzca de su nivel inicial, como se ilustra en el inciso 1 de la figura. La cantidad de esta contracción líquida por lo general es de alrededor de 0.5%. La contracción por solidificación que se observa en el inciso 2 tiene dos efectos. En primer lugar, ocasiona una reducción adicional en la altura del fundido. En segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción central superior del fundido se ve restringida. En general ésta es la última región que se solidifica, y la ausencia de metal crea un vacío en esa ubicación del fundido. Los trabajadores de la fundición llaman ***rechupe*** a esa cavidad por contracción. Una vez que se solidifica, el fundido experimenta más contracción de su altura y diámetro durante su enfriamiento, como se aprecia en el inciso 3 de la figura. Esta contracción está determinada por el coeficiente de expansión térmica del metal, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

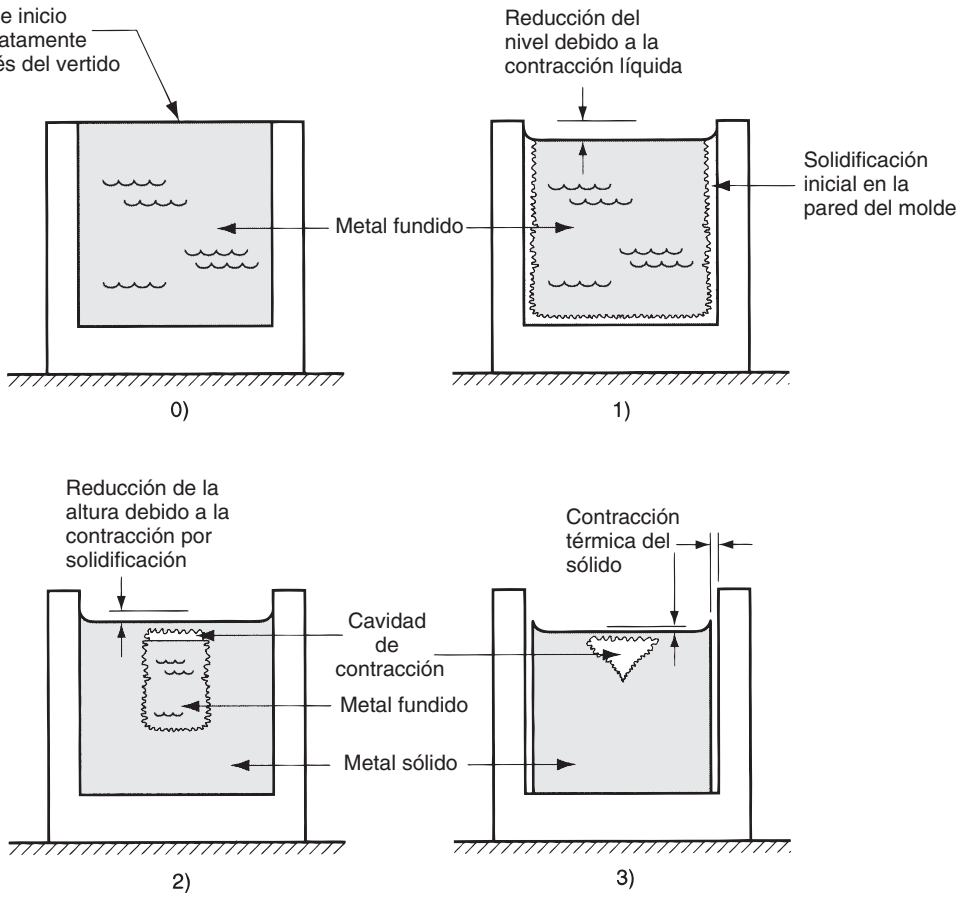


FIGURA 10.8 Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento: 0) nivel de inicio del metal fundido inmediatamente después del vertido, 1) reducción del nivel ocasionado por la contracción líquida durante el enfriamiento, 2) disminución de la altura y formación de una cavidad de contracción ocasionada por la contracción de la solidificación y 3) reducción adicional de la altura y diámetro debido a la contracción térmica durante el enfriamiento del metal sólido. Por claridad, las reducciones dimensionales se han exagerado en los dibujos.

En la tabla 10.1 se presentan algunos valores comunes de contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la contracción del sólido, etapas 2 y 3. La contracción por solidificación ocurre en casi todos los metales porque la fase sólida tiene una densidad mayor que la líquida. La transformación de fase que acompaña a la solidificación ocasiona una reducción del volumen por unidad de peso del metal. La excepción de la tabla 10.1 es el hierro colado con alto contenido de carbono, cuya solidificación se complica por la existencia de un periodo de grafitización durante las

TABLA 10.1 Contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la del sólido.

	Contracción volumétrica debida a:	
Metal	Contracción por solidificación, %	Contracción térmica del sólido, %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (común)	7.0	5.0
Hierro colado gris	1.8	3.0
Hierro colado gris, alto C	0	3.0
Acero fundido al bajo C	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (Cu-Sn)	5.5	6.0

Recopilada a partir de la referencia [3].

etapas finales de la solidificación, lo que origina una expansión que tiende a compensar la disminución volumétrica que se asocia con el cambio de fase [6].

Los modelistas intervienen en la contracción por solidificación y en la térmica, porque hacen que las cavidades del molde aumenten su tamaño. La cantidad en la que el molde debe hacerse más grande en relación con el tamaño del fundido final se denomina ***tolerancia por contracción del modelo***. Aunque la contracción es volumétrica, las dimensiones del fundido casi siempre se expresan linealmente, por lo que las tolerancias deben aplicarse en concordancia. Para hacer los modelos y moldes más grandes que el fundido que se desea en la cantidad apropiada, se usan "reglas de contracción" especiales con escalas elongadas ligeramente. En función del metal que se va a fundir, estas reglas de contracción son entre 1% y 5% mayores que la regla estándar.

10.3.4 Solidificación direccional

A fin de minimizar los efectos del daño que causa la contracción, es deseable que las regiones del fundido más lejos del suministro de metal líquido se solidifiquen primero, y que este proceso avance desde ellas hacia la(s) mazarota(s). De esta manera, se dispone en forma continua de metal derretido en los vertedores para impedir que se formen vacíos de contracción durante la solidificación. El término ***solidificación direccional*** se utiliza para describir este aspecto del proceso de solidificación y los métodos con los que se controla. La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov en el diseño del fundido en sí, su orientación dentro del molde y el diseño del sistema de la mazarota que lo alimenta. Por ejemplo, si se colocan secciones del fundido con razones *V/A* menores lejos de la mazarota, la solidificación ocurrirá primero en esas regiones y el suministro de metal líquido para el resto del fundido permanecerá abierto hasta que se solidifiquen dichas secciones voluminosas.

Otra manera de facilitar la solidificación direccional es el empleo de ***enfriadores***, sumideros de calor internos o externos que ocasionan el enfriamiento rápido de ciertas regiones del fundido. Los ***enfriadores internos*** son piezas metálicas pequeñas que se sitúan dentro de la cavidad antes del vertido, de modo que el metal derretido se solidificará primero alrededor de ellas. El enfriador interno debe tener una composición química similar a la del metal que se vierte, lo que se logra con mayor facilidad si se le fabrica del mismo metal que el fundido mismo.

Los ***enfriadores externos*** son inserciones de metal en las paredes de la cavidad del molde, que absorben calor del metal fundido con más rapidez que la arena circundante a fin de que faciliten la solidificación. Se usan con frecuencia con eficacia en secciones del fundido que son difíciles de alimentar con metal derretido, con lo que se facilita la solidificación rápida de esas secciones mientras la conexión al metal líquido sigue abierta. En la figura 10.9 se ilustra una aplicación posible de enfriadores externos y el resultado probable en el fundido si no se emplearan.

Tan importante como el inicio de la solidificación en regiones apropiadas de la cavidad, es evitar la solidificación prematura en las secciones del molde más cerca de la mazarota. El pasaje entre la mazarota y la cavidad principal tiene importancia particular.

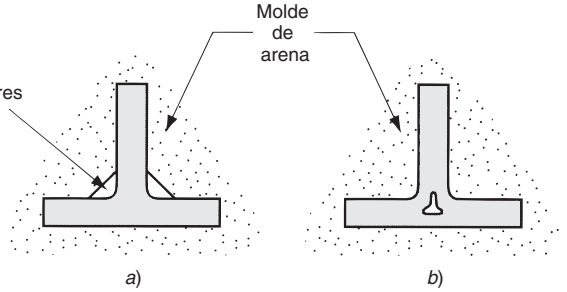


FIGURA 10.9 *a*) Enfriador externo para favorecer la solidificación rápida del metal derretido en una sección delgada del fundido y *b*) resultado probable si no se usara el enfriador externo.

Esta conexión debe diseñarse de modo que no se solidifique antes que el fundido, lo que aislaría al fundido del metal fundido de la mazarota. Aunque por lo general es deseable minimizar el volumen en la conexión (para reducir el desperdicio de metal), el área de la sección transversal debe ser suficiente a fin de retrasar la solidificación. Este objetivo se facilita si se hace corto el pasaje, de modo que absorba calor del metal fundido en la mazarota y en el fundido.

10.3.5 Diseño de la mazarota

Como ya se describió, la mazarota (véase la figura 10*b*) se emplea en un molde de fundición con arena para alimentar el metal líquido al fundido durante la solidificación, con objeto de compensar la contracción por solidificación. Para que funcione, la mazarota debe permanecer derretida hasta después de que el fundido se solidifica. La regla de Chvorinov se utiliza para calcular el tamaño de la mazarota que satisfará ese requerimiento. El ejemplo siguiente ilustra el cálculo.

Ejemplo 10.3 Diseño de la mazarota con la regla de Chvorinov

Debe diseñarse la mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. El fundido en sí es una placa rectangular de acero con dimensiones de 7.5 cm × 12.5 cm × 2.0 cm. Observaciones anteriores indican que el tiempo total de solidificación (T_{TS}) para este fundido es de 1.6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación diámetro a altura de 1.0. Determine las dimensiones del vertedor de modo que $T_{TS} = 2.0$ min.

Solución: En primer lugar se determina la relación V/A para la placa. Su volumen es $V = 7.5 \times 12.5 \times 2.0 = 187.5$ cm^3 y el área de su superficie es $A = 2(7.5 \times 12.5 + 7.5 \times 2.0 + 12.5 \times 2.0) = 267.5$ cm^2. Dado que $T_{TS} = 1.6$ min, se determina la constante del molde, C_m, a partir de la ecuación (10.7), con el uso de un valor de $n = 2$ en ella.

$$C_m = \frac{T_{TS}}{(V/A)^2} = \frac{1.6}{(187.5/267.5)^2} = 3.26 \text{ min/cm}^2$$

A continuación debe diseñarse la mazarota de modo que su tiempo total de solidificación sea de 2.0 min, con el empleo del mismo valor de la constante del molde. El volumen de la mazarota está dado por

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

y el área de la superficie está dada por $A = \pi Dh + \dfrac{2\pi D^2}{4}$

Como se está usando una razón $D/H = 1.0$, entonces, $D = H$. Al sustituir D por H en las fórmulas del volumen y área, se obtiene

$$V = \pi D^3/4$$

y

$$A = \pi D^2 + 2\pi D^2/4 = 1.5\pi D^2$$

Así, la razón $V/A = D/6$. Con el uso de esta razón en la ecuación de Chvorinov, se tiene

$$T_{TS} = 2.0 = 3.26\left(\frac{D}{6}\right)^2 = 0.09056\, D^2$$

$$D^2 = 2.0/0.09056 = 22.086 \text{ cm}^2$$

$$D = 4.7 \text{ cm}$$

Como $H = D$, entonces también $H = 4.7$ cm.

La mazarota representa un desperdicio de metal que debe separarse de la pieza fundida y volverse a fundir en operaciones posteriores. Es deseable que el volumen de metal

en la mazarota sea mínimo. Como la forma de la mazarota normalmente se selecciona para maximizar la razón V/A, esto tiende a reducir el volumen de aquél tanto como sea posible. Obsérvese que el volumen de la mazarota del ejemplo es $V = \pi(4.7)^3/4 = 81.5$, que es sólo 44% del volumen de la placa (fundido), aun cuando su tiempo total de solidificación es mayor en 25%.

Las mazarotas se diseñan de formas distintas. El diseño que se muestra en la figura 10.2*b*) es una ***mazarota lateral***. Se adjunta al lado del fundido por medio de un canal pequeño. Una ***mazarota superior*** es aquella que se conecta a la superficie superior del fundido. Las mazarotas son abiertas o ciegas. Una ***mazarota abierta*** está expuesta al exterior en la superficie superior del marco superior. Esto tiene la desventaja de permitir que escape más calor, lo que favorece la solidificación más rápida. Una ***mazarota ciega*** está cerrada por completo dentro del molde, como se ve en la figura 10.2*b*).

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., ***Manufacturing Processes,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.

[2] Beeley, P. R., ***Foundry Technology,*** Butterworths-Heinemann, Oxford, Inglaterra, 2001.

[3] Datsko, J., ***Material Properties and Manufacturing Processes,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.

[4] Edwards L. y Endean, M., ***Manufacturing with Materials,*** Open University, Milton Keynes y Butterworth Scientific Ltd., Londres, 1990.

[5] Flinn, R. A., ***Fundamentals of Metal Casting,*** American Foundrymens Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1987.

[6] Heine, R. W., Loper, Jr., C. R. y Rosenthal, C., ***Principles of Metal Casting,*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Co. Nueva York, 1967.

[7] Kotzin, E. L. (ed.). ***Metalcasting and Molding Processes,*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1981.

[8] Lessiter, M. J. y K. Kirgin, "***Trends in the Casting Industry," Advanced Materials & Processes,*** enero de 2002, pp. 42-43.

[9] ***Metals Handbook,*** 9a. ed., vol. 15: ***Casting,*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.

[10] Mikelonis, P. J. (ed.), ***Foundry Technology,*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.

[11] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A., ***Modern Manufacturing Process Engineering,*** McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.

[12] Simpson, B. L., ***History of the Metalcasting Industry,*** American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1997.

[13] Taylor, H. F., Flemings, M. C. y Wulff, J., ***Foundry Engineering,*** 2a. ed., American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1987.

[14] Wick, C., Blenedict, J. T. y Veilleux, R. F., ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed. Vol. II, ***Forming,*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

10.1. Identifique algunas de las ventajas importantes de los procesos de obtener formas con fundición.

10.2. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones y desventajas de la fundición?

10.3. ¿Cómo se llama por lo general a la fábrica que ejecuta operaciones de fundición?

10.4. ¿Cuál es la diferencia entre un molde abierto y uno cerrado?

10.5. Mencione los dos tipos básicos de molde que diferencian a los procesos de fundición.

10.6. ¿Cuál es el proceso de fundición de mayor importancia comercial?

10.7. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo y un núcleo, en el moldeo en arena?

10.8. ¿Qué significa el término sobrecalentamiento?

10.9. ¿Por qué debe evitarse el flujo turbulento de un metal fundido en el molde?

10.10. ¿Cuál es la ley de la continuidad según se aplica al flujo de metal derretido en la fundición?

10.11. ¿Cuáles son algunos de los factores que afectan la fluidez de un metal derretido durante el vertido en la cavidad de un molde?

10.12. ¿Qué significa calor de fusión en el contexto de la fundición?

10.13. ¿En qué difiere la solidificación de aleaciones de la solidificación de los metales puros?

10.14. ¿Qué es una aleación eutéctica?
10.15. ¿Cuál es la relación conocida como regla de Chvorinov en la fundición?
10.16. Identifique las tres fuentes de contracción en la fundición de un metal después del vertido.
10.17. ¿Qué es un enfriador en el contexto de la fundición?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

10.1. ¿En cuál de los tipos siguientes se realiza la fundición en arena?: *a*) molde desechable o *b*) molde permanente.
10.2. De las siguientes denominaciones, ¿cuál es la de la mitad superior de un molde de fundición con arena: *a*) marco superior o *b*) marco inferior?
10.3. En la fundición, ¿cuál de los siguientes es una caja de moldeo?: *a*) botella de bebida de los fundidores, *b*) caja que contiene el marco superior y el inferior, *c*) contenedor de metal líquido o *d*) metal que se extruye entre las mitades del molde.
10.4. En el trabajo de fundición, ¿cuál de los siguientes es un vaciadero?: *a*) canal en el molde que conduce del bebedero a la cavidad principal del molde, *b*) hombre que transporta el metal derretido hacia el molde o *c*) canal vertical por el que el metal fundido se vierte al molde.
10.5. La turbulencia durante el vertido de metal fundido es indeseable, ¿por cuáles de las razones siguientes? (dos razones son las mejores): *a*) ocasiona decoloramiento de la superficie del molde, *b*) disuelve el aglutinante que se emplea para mantener unido el molde de arena, *c*) incrementa la erosión de las superficies del molde, *d*) aumenta la formación de óxidos metálicos que quedan atrapados durante la solidificación, *e*) incrementa el tiempo de llenado del molde y *f*) aumenta el tiempo total de solidificación.
10.6. El tiempo total de solidificación se define ¿como cuál de los siguientes?: *a*) tiempo entre el vertido y la solidificación completa, *b*) tiempo entre el vertido y el enfriamiento a temperatura ambiente, *c*) tiempo entre la solidificación y el enfriamiento a temperatura ambiente o *d*) tiempo para que se disipe el calor de fusión.
10.7. Durante la solidificación de una aleación cuando está presente una mezcla de metales sólido y líquido, ¿la mezcla sólido-líquida se refiere a cuál de las siguientes?: *a*) composición eutéctica, *b*) segregación de lingote, *c*) liquidus, *d*) zona blanda o *e*) solidus.
10.8. La regla de Chvorinov establece que el tiempo total de solidificación es proporcional a cuál de las cantidades siguientes: a) $(A/V)^n$, b) H_f, c) T_m, d) V, e) V/A o *f*) $(V/A)^2$; donde A = área superficial del fundido, H_f = calor de fusión, T_m = temperatura de fusión y V = volumen del fundido.
10.9. En la fundición, una mazarota se describe ¿como cuál de los siguientes? (hay tres respuestas correctas): *a*) inserto en el fundido que inhibe la flotabilidad del núcleo, *b*) sistema de paso en el que el bebedero alimenta directamente a la cavidad, *c*) metal que no es parte del fundido, *d*) fuente de metal derretido que alimenta al fundido y compensa la contracción durante la solidificación y *e*) metal que se desperdicia y que por lo general se recicla.
10.10. En un molde de fundición con arena, la razón V/A de la mazarota debe ser: *a*) igual a, *b*) mayor que o *c*) menor que, la razón V/A del fundido en sí.
10.11. ¿Cuál de los tipos siguientes de mazarota queda encerrado por completo en el molde de arena y conectado a la cavidad principal por medio de un canal que alimenta el metal fundido? (dos respuestas correctas): *a*) mazarota ciega, *b*) mazarota abierta, *c*) mazarota lateral y *d*) mazarota superior.

PROBLEMAS

Calentamiento y vertido

10.1. Va a fundirse un disco de aluminio puro de 40 cm de diámetro y 5 cm de espesor, en una operación de fundición con molde abierto. La temperatura de fundición del aluminio es de 660 ºC, y durante el vertido es de 800 ºC. Suponga que la cantidad de aluminio por calentar será 5% más que lo que se necesita para llenar la cavidad del molde. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal para calentarlo a la temperatura de vertido, si se inicia a la temperatura ambiente de 25 ºC. El calor de fusión del aluminio es de 389.3 J/g. Otras propiedades se pueden obtener de las tablas 4.1 y 4.2 del texto. Suponga que el calor específico tiene el mismo valor para el aluminio sólido y fundido.
10.2. Va a calentarse una cantidad suficiente de cobre puro para fundir una placa grande en un molde abierto. La placa tiene estas dimensiones: largo = 20 in, ancho = 10 in y espesor = 3 in. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal

para calentarlo a la temperatura de 2 150 °F para verterlo. Suponga que la cantidad de metal que se va a calentar es 10% más que lo necesario para llenar la cavidad del molde. Las propiedades del metal son: densidad = 0.324 lbm/in^3, punto de fusión = 1 981 ºF, calor específico del metal = 0.093 Btu/lbm-F en estado sólido y 0.090 Btu/lbm-F en estado líquido y calor de fusión = 80 Btu/lbm.

10.3. El bebedero que conduce al vaciadero de cierto molde tiene una longitud de 175 mm. El área de la sección transversal en la base del bebedero es de 400 mm^2. La cavidad del molde tiene un volumen de 0.001 m^3. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.

10.4. Un molde tiene un bebedero con longitud de 6.0 in. El área de la sección transversal en el fondo del bebedero es de 0.5 in^2. El bebedero lleva a un vaciadero horizontal que alimenta la cavidad del molde, cuyo volumen es de 75 in^3. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.

10.5. El gasto del metal líquido en el bebedero de un molde es de 1 litro/s. El área de la sección transversal en la parte superior del bebedero es de 800 mm^2 y su longitud es de 175 mm. ¿Cuál es el área que debe usarse en la base del bebedero para evitar la aspiración de metal fundido?

10.6. El gasto volumétrico de metal fundido hacia el bebedero desde el embudo es de 50 in^3/s. En la parte superior, donde el embudo lleva al bebedero, el área de la sección transversal es de 1.0 in^2. Determine cuál debe ser el área en la parte inferior del bebedero si su longitud es de 8.0 in. Se desea mantener un gasto constante arriba y abajo, a fin de evitar la aspiración del metal líquido.

10.7. Va a verterse metal fundido al embudo de un molde de arena, a una tasa estable de 1 000 cm^3/s. El metal fundido sobrepasa al embudo y fluye hacia el bebedero. La sección transversal del bebedero es redonda, con diámetro superior de 3.4 cm. Si el bebedero mide 25 cm de largo, determine el diámetro apropiado en su base de modo que se mantenga el mismo gasto volumétrico.

10.8. Durante el vertido hacia un molde de arena, el metal fundido se vierte al bebedero con un gasto constante durante el tiempo que toma llenar el molde. Al final del vertido, el bebedero se llena y hay una cantidad despreciable de metal en el embudo. El bebedero mide 6.0 in de largo. El área de la sección transversal en la parte superior es de 0.8 in^2, y en la base es de 0.6 in^2. El área de la sección transversal del vaciadero que lleva al bebedero también es de 0.6 in^2 y tiene 8.0 in de largo antes de llegar a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 65 in^3. El volumen de la mazarota que se ubica a lo largo del vaciadero cerca de la cavidad del molde es de 25 in^3. Toma un total de 3.0 s para que se llene todo el molde (incluidos la cavidad, mazarota, vaciadero y bebedero). Esto es más que el tiempo teórico que se requiere, lo que indica una pérdida de velocidad debida a la fricción en el bebedero y el vaciadero. Encuentre *a*) la velocidad teórica y gasto en la base del bebedero, *b*) el volumen total del molde, *c*) la velocidad real y gasto en la base del bebedero y *d*) la pérdida de altura piezométrica en el sistema de paso debido a la fricción.

Contracción

10.9. La cavidad de un molde tiene la forma de un cubo de 100 mm por lado. Determine las dimensiones y volumen del cubo final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es cobre. Suponga que el molde está lleno al principio de la solidificación, y que ocurre una contracción uniforme en todas direcciones. Use los valores de la contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.10. La cavidad de un molde para fundición tiene las dimensiones siguientes: L = 250 mm, W = 125 mm, y H = 20 mm. Determine las dimensiones del fundido final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es aluminio. Suponga que al principio de la solidificación el molde se encuentra lleno y que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.11. Determine la escala de una "regla de contracción" que van a usar los modelistas para el acero al bajo carbono. Exprese su respuesta en términos de fracciones decimales de pulgadas de elongación por pie de longitud, en comparación con una regla estándar. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.12. Determine la escala de una "regla de contracción" que se va a emplear por parte de los modelistas para el latón que consiste en 70% de cobre y 30% de zinc. Exprese la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, comparada con una regla estándar. Use los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.

10.13. Determine la escala de una "regla de contracción" que van a emplear los modelistas para el hierro colado gris. El hierro colado gris tiene una contracción volumétrica de –2.5%, lo que significa que se expande durante la solidificación. Exprese la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, en comparación con una regla estándar. Emplee los valores de contracción que se proporcionan en la tabla 10.1.

10.14. Las dimensiones finales de un fundido en forma de disco de acero al bajo carbono son: diámetro = 12.0 in, y espesor = 0.75 in. Determine las dimensiones de la cavidad del molde de modo que se tome en cuenta la contracción. Suponga que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Use los valores de contracción que aparecen en la tabla 10.1.

Tiempo de solidificación y diseño de la mazarota

10.15. En el fundido de acero en ciertas condiciones de molde, por experiencias anteriores se sabe que la constante de éste para la regla de Chvorinov es de 4.0 min/cm^2. El fundido es una placa plana que mide 30 cm de longitud, 10 cm de ancho y 20 mm de espesor. Determine cuánto tiempo tomará para que el molde se solidifique.

10.16. Resuelva para el tiempo de solidificación total del problema anterior, con el uso de un exponente de 1.9 in en lugar de 2.0 en la regla de Chvorinov. ¿Qué ajuste debe hacerse en las unidades de la constante del molde?

10.17. Una parte con forma de disco va a fundirse con aluminio. El diámetro del disco es de 500 mm y su espesor de 20 mm. Si la constante del molde es de 2.0 s/mm^2 en la regla de Chvorinov, ¿cuánto tiempo tomará que el fundido se solidifique?

10.18. En experimentos de fundición llevados a cabo con cierta aleación y tipo de molde de arena, tomó 155 s para que se solidificara un fundido en forma de cubo. El cubo medía 50 mm de lado. *a*) Determine el valor de la constante del molde en la regla de Chvorinov. *b*) Si se utiliza la misma aleación y tipo de molde, encuentre el tiempo total de solidificación para un fundido cilíndrico con diámetro de 30 mm y longitud de 50 mm.

10.19. Un fundido de acero tiene una forma cilíndrica de 4.0 in de diámetro y pesa 20 libras. A este fundido le toma 6.0 minutos solidificarse por completo. Otro fundido de forma cilíndrica con la misma razón de diámetro a longitud pesa 12 libras. Está hecho del mismo acero, y se emplearon las mismas condiciones de molde y contracción. Determine: *a*) la constante del molde en la regla de Chvorinov, *b*) las dimensiones y *c*) el tiempo total de solidificación del fundido más ligero. La densidad del acero es de 490 lb/ft^3.

10.20. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) una esfera con diámetro de 10 cm, 2) un cilindro con diámetro de 10 cm y la misma medida de longitud y 3) un cubo con lado de 10 cm. En los tres casos va a emplearse la misma aleación para la fundición. *a*) Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b*) Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mejor mazarota? *c*) Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.

10.21. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) esfera, 2) cilindro, en el que la razón longitud a diámetro es de 1.0 y 3) cubo. Para las tres formas el volumen es de 1 000 cm^3 y va a emplearse la misma aleación para el fundido. *a*) Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b*) Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mazarota mejor? *c*) Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.

10.22. Va a usarse una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. Para un volumen dado de cilindro, determine la razón diámetro a longitud que maximiza el tiempo de solidificación.

10.23. Va a diseñarse una mazarota de forma esférica para un molde de fundición con arena. El fundido es una placa rectangular con longitud de 200 mm, ancho de 100 mm y espesor de 18 mm. Si se sabe que el tiempo total de solidificación del fundido en sí es de 3.5 min, determine el diámetro de la mazarota de modo que a éste le tome 25% más tiempo para solidificarse.

10.24. Se va a diseñar una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. La longitud del cilindro va a ser 1.25 veces su diámetro. El fundido es una placa cuadrada con lado de 10 in y espesor de 0.75 in. Si el metal es hierro colado y la constante del molde es de 16.0 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que le tome 30% más tiempo solidificarse.

10.25. Se diseñará una mazarota cilíndrica con razón diámetro a longitud de 1.0 para un molde de fundición con arena. La forma del fundido se ilustra en la figura P10.25, en la que las unidades son pulgadas. Si la constante del molde es de 19.5 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que solidificarse le tome 0.5 min más que al fundido en sí.

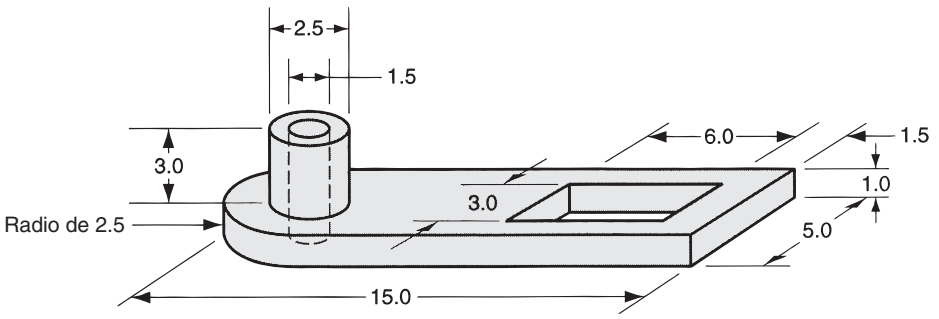


FIGURA P10.25 Forma del fundido para el problema 10.25 (las unidades son in).

11 PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

11.1 Fundición en arena
- 11.1.1 Modelos y núcleos
- 11.1.2 Moldes y su fabricación
- 11.1.3 La operación de fundición

11.2 Otros procesos de fundición con moldes desechables
- 11.2.1 Moldeo en cascarón
- 11.2.2 Moldeo al vacío
- 11.2.3 Procesos de poliestireno expandido
- 11.2.4 Fundición por revestimiento
- 11.2.5 Fundición con moldes de yeso y de cerámica

11.3 Procesos de fundición con moldes permanentes
- 11.3.1 El proceso básico con moldes permanentes
- 11.3.2 Variaciones de la fundición con moldes permanentes
- 11.3.3 Fundición con troquel
- 11.3.4 Fundición centrífuga

11.4 La práctica de la fundición
- 11.4.1 Hornos
- 11.4.2 Vertido, limpieza y tratamiento térmico

11.5 Calidad del fundido

11.6 Los metales para fundición

11.7 Consideraciones sobre el diseño del producto

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías, con base en el tipo de molde: 1) moldes desechables y 2) moldes permanentes. En las operaciones de fundición con un molde desechable, debe sacrificarse éste con objeto de retirar la pieza fundida. Como para cada fundido se requiere un molde nuevo, es frecuente que las tasas de producción con procesos de moldes desechables estén limitadas por el tiempo que se requiere para hacer el molde, más que por el que se necesita para el fundido en sí. Sin embargo, para ciertas formas de las piezas, los moldes de arena pueden producirse y hacerse los fundidos a tasas de 400 piezas por hora y aún más. En los procesos de fundición con moldes permanentes, se fabrica el molde con metal (u otro material duradero) y se emplea muchas veces para elaborar fundidos numerosos. En consecuencia, estos procesos tienen una ventaja natural en términos de tasas de producción.

El estudio de los procesos de fundición está organizado en este capítulo como sigue: 1) fundición en arena, 2) otros procesos de fundición con moldes desechables y 3) procesos de fundición con moldes permanentes. El capítulo también incluye el equipo y prácticas de fundición que se emplean en las fundidoras. Otra sección se ocupa de la inspección y temas de calidad. En la sección final se presentan los lineamientos para el diseño de productos.

11.1 FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, níqueles y titanios. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande (véase la figura 11.1) y en cantidades de producción que van desde uno a millones.

La ***fundición en arena***, también conocida como ***fundición en molde de arena***, consiste en verter metal derretido en un molde de arena y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar el fundido. El fundido debe limpiarse e inspeccionarse, y a veces se requiere darle tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas. La cavidad del molde de arena se forma por la compresión de arena alrededor de un modelo (un duplicado aproximado de la pieza por fundir), y luego se retira el modelo separando el molde en dos mitades. El molde también contiene el sistema de paso o sistema de vaciado y la mazarota. Además, si el fundido va a tener superficies interiores (por ejemplo, partes huecas o con agujeros), debe incluirse un núcleo en el molde. Como éste se sacrifica para retirar el fundido, debe hacerse un molde nuevo por cada pieza que se produce. De esta descripción breve, se considera que la fundición con arena no sólo es la operación de fun-



FIGURA 11.1 Pieza grande fundida con arena, pesa más de 680 kg (1 500 lb), para la estructura de un compresor de aire. (Cortesía de Elkhart Foundry, fotografía por Paragon Inc., Elkhart, Indiana).

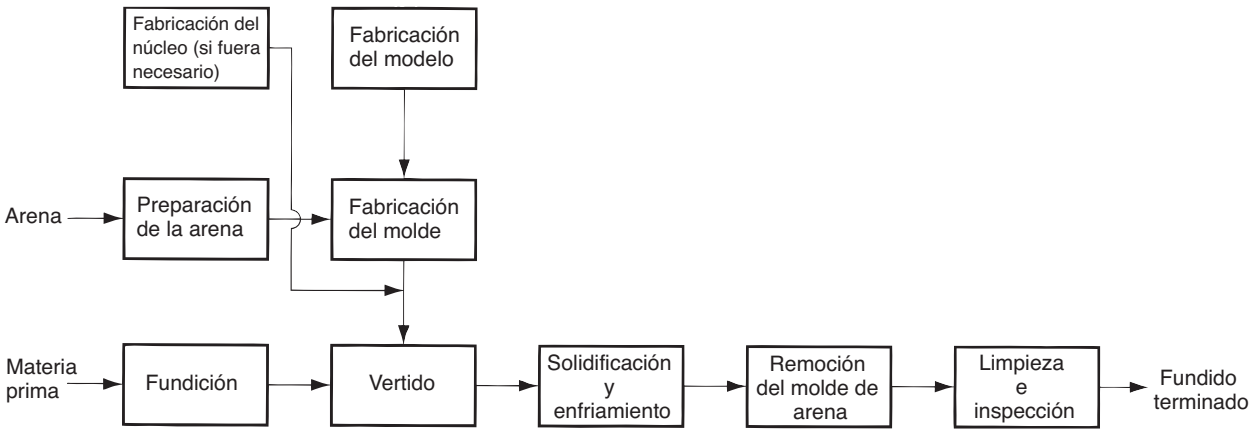


FIGURA 11.2 Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena. Se incluye no sólo la operación de fundición sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde.

dido en sí, sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde. La secuencia de producción se presenta en la figura 11.2.

En las secciones siguientes el estudio tiene que ver con: modelos, núcleos, moldes y su fabricación, la operación de fundido, y limpieza e inspección.

11.1.1 Modelos y núcleos

La fundición con arena requiere un ***modelo***, es decir, un "patrón" de tamaño real de la pieza, aunque más grande para que se tome en cuenta las tolerancias por contracción y maquinado en el fundido final. Los materiales que se usan para fabricar modelos incluyen madera, plásticos y metales. La madera es un material común para hacer modelos debido a la facilidad para darle forma. Sus desventajas son que tiende a deformarse y la arena que se compacta alrededor de ella la erosiona, lo que limita el número de veces que puede volver a utilizarse. Los modelos de metal son más caros, pero duran mucho más. Los plásticos representan un acomodo entre la madera y el metal. La selección del material apropiado para el modelo depende mucho de la cantidad total de fundidos por hacer.

Como se ilustra en la figura 11.3, hay varios tipos de modelos. El más simple está hecho de una sola pieza y recibe el nombre de ***modelo sólido***, tiene la misma forma que el fundido y su tamaño está ajustado para la contracción y el maquinado. Aunque es el modelo más fácil de fabricar, no es el más fácil de usar para hacer moldes de arena. La determinación de la ubicación de la línea de separación de las dos mitades del molde de un modelo sólido puede ser un problema, y la incorporación del sistema de paso y la mazarota al molde queda a juicio y habilidad del trabajador que funde. En consecuencia, los modelos sólidos se limitan por lo general a cantidades muy bajas de producción.

Los ***modelos deslizantes*** consisten en dos piezas, que dividen la parte a lo largo de un plano que coincide con la línea divisoria del molde. Los modelos deslizantes son apropiados para piezas con configuraciones geométricas complejas y cantidades moderadas de producción. La línea de división del molde está predeterminada por las dos mitades del modelo, y no se deja al criterio del operador.

Para cantidades de producción mayores se emplean modelos de placas ajustadas o de capucha y base. En los modelos de ***placas ajustadas***, las dos piezas del modelo deslizante están sujetas a los lados opuestos de una placa de madera o metal. Los agujeros en la placa permiten que los marcos superior e inferior (capucha y base) del molde se alineen en

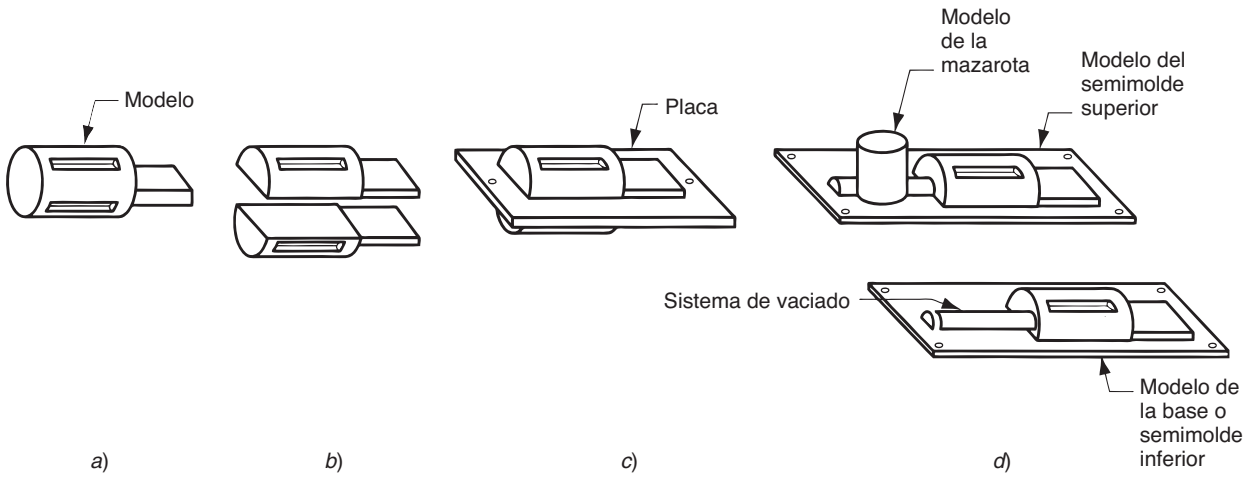
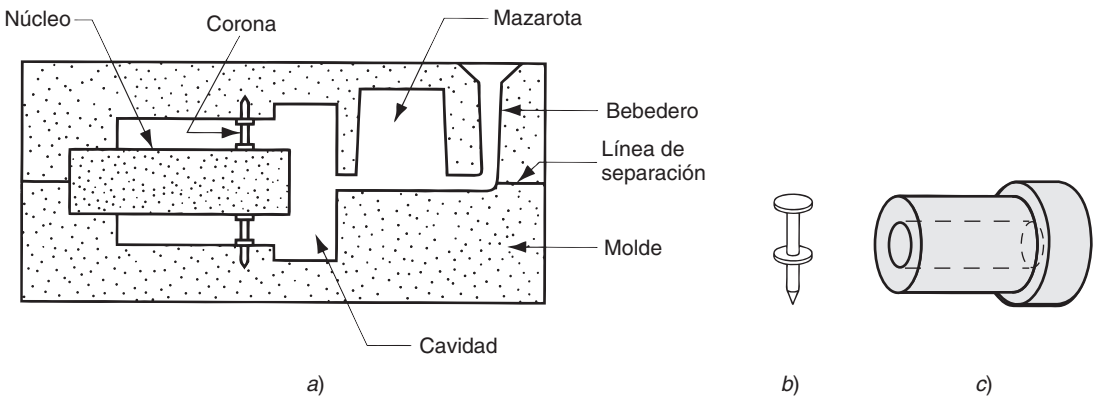


FIGURA 11.3 Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena: *a*) sólido, *b*) de deslizamiento, *c*) de placas ajustadas y *d*) de capucha y base.

forma adecuada. Los ***modelos de capucha y base*** son similares a los de placas ajustadas, excepto porque las mitades que se separan están ajustadas a placas diferentes, de modo que las secciones de la capucha y base del molde se fabrican de manera independiente en lugar de usar las mismas herramientas para ambas. En el inciso d de la figura se muestra el sistema de paso y mazarota de los modelos de capucha y base.

Los modelos definen la forma externa del vertido de la pieza por fundir. Si el fundido va a tener superficies internas se requiere un núcleo. Un ***núcleo (corazón)*** es un modelo a tamaño real de las superficies interiores de la pieza. Se inserta en la cavidad del molde antes del vertido, de modo que el metal derretido fluirá y se solidificará entre la cavidad del molde y el núcleo, para formar las superficies externa e interna del fundido. Por lo general, el núcleo está hecho de arena, compactada para que tenga la forma que se desea. Igual que el modelo, el tamaño real del núcleo debe incluir tolerancias para la contracción y el maquinado. En función de la forma de la pieza, el núcleo quizá requiera soportes para quedar en posición en la cavidad del molde durante el vertido. Estos soportes, llamados ***coronas***, están hechos de un metal con temperatura de fusión más alta que la del metal que se va a fundir. Por ejemplo, para hacer fundidos de hierro se usarían coronas de acero. En el vertido y solidificación, las coronas se unen en el fundido. En la figura 11.4 se ilustra un arreglo posible de un núcleo en un molde con coronas. La parte de la corona que sobresale del fundido se corta posteriormente.

FIGURA 11.4 *a*) Núcleo mantenido en su sitio dentro de la cavidad del molde por medio de coronas, *b*) diseño posible de las coronas, *c*) fundido con cavidad interna.



11.1.2 Moldes y su fabricación

Las arenas de fundición son sílice (SiO_2) o sílice mezclado con otros minerales. La arena debe tener buenas propiedades refractarias, es decir, capacidad de soportar temperaturas altas sin que se funda o sufra algún otro tipo de degradación. Otras características importantes de la arena son el tamaño del grano, su distribución en la mezcla y la forma de los granos individuales (véase la sección 16.1). Los granos pequeños dan una mejor superficie al terminado de la pieza fundida, pero los de tamaño grande son más permeables (para permitir el escape de los gases durante el vertido). Los moldes elaborados con granos irregulares tienden a ser más fuertes que los hechos con granos redondeados debido a la imbricación, aunque ésta tiende a restringir la permeabilidad.

Al hacer el molde, los granos de arena se mantienen unidos por una mezcla de agua y arcilla adhesiva. Una mezcla común (en volumen) es de 90% de arena, 3% de agua y 7% de arcilla. Para mantener a la arcilla en su sitio se emplean distintos agentes adhesivos, como resinas orgánicas (por ejemplo, resinas fenólicas) y aglutinantes inorgánicos (por ejemplo, silicato de sodio y fosfato). Además de la arena y el aglutinante, en ocasiones se agregan aditivos a la mezcla a fin de mejorar propiedades tales como la resistencia o la permeabilidad del molde.

Para formar la cavidad del molde, el método tradicional consiste en compactar la arena alrededor del modelo para la capucha y base, en un contenedor llamado ***caja de moldeo***. El proceso de compactación se lleva a cabo con métodos diferentes. El más simple es golpear con la mano, lo que lleva a cabo un trabajador de la fundición. Además, se han inventado diversas máquinas para mecanizar el procedimiento de compactación. Éstas operan con distintos mecanismos, entre ellos: 1) comprimir la arena alrededor del modelo por medio de presión neumática, 2) ejecutar una acción de golpeteo en la que la arena, contenida en la caja de moldeo con el modelo, se deja caer repetidas veces a fin de que se comprima en su sitio y 3) realizar una acción de lanzamiento en la que los granos de arena chocan a gran velocidad contra el modelo.

Una alternativa a las cajas tradicionales para cada molde de arena es el ***moldeo sin caja de moldeo***, que se refiere al uso de una caja de moldeo maestra, en un sistema mecanizado de producción de moldes. Cada molde de arena se produce por medio de la misma caja de moldeo maestra. Con este método se afirma que la producción de moldes alcanza los 600 por hora [6].

Para determinar la calidad del molde de arena se emplean diferentes indicadores [5]: 1) ***resistencia***, capacidad del molde para conservar su forma y resistir la erosión ocasionada por el flujo de un metal fundido; depende de la forma del grano, cualidades adhesivas del aglutinante, y otros factores; 2) ***permeabilidad***, capacidad del molde para permitir que pasen el aire y los gases calientes a través de los vacíos de la arena, durante la operación de fundido; 3) ***estabilidad térmica***, característica de la arena en su superficie de la cavidad del molde para resistir el agrietamiento y la deformación ante el contacto con el metal fundido; 4) ***colapsabilidad***, facilidad de que el molde se retire y permita que el fundido se contraiga sin que se agriete; también se refiere a la facilidad con que se quita la arena del fundido durante su limpieza, y 5) ***reutilización***, ¿es posible reutilizar la arena del molde roto para hacer otros moldes? En ocasiones, estas medidas son incompatibles: por ejemplo, un molde con mucha resistencia es menos colapsable.

Con frecuencia, los moldes de arena se clasifican como de arena verde, arena seca o de superficie seca. Los ***moldes de arena verde*** están elaborados con una mezcla de arena, arcilla y agua; la palabra ***verde*** se refiere al hecho de que el molde contiene humedad en el momento del vertido. Los moldes de arena verde tienen resistencia suficiente para la mayoría de aplicaciones, buenas colapsabilidad, permeabilidad y posibilidades de reuso, y son los menos caros de todos los moldes. Son el tipo de molde que más se emplea, pero no carecen de problemas. La humedad de la arena ocasiona defectos a ciertos fundidos, lo que depende del metal y forma de la pieza. Un ***molde de arena seca*** está hecho con aglutinantes orgánicos en lugar de arcilla, y se cuece en un horno grande a temperaturas

que van de 200 ºC a 320 ºC (400 ºF a 600 ºF) [6]. El horneado da resistencia al molde y endurece la superficie de la cavidad. Los moldes de arena seca proporcionan mejor control dimensional del producto fundido, en comparación con los de arena verde. Sin embargo, es más caro hacer moldes de arena seca, y la tasa de producción disminuye debido al tiempo de secado. Las aplicaciones se limitan por lo general a fundidos medios y grandes con tasas de producción pequeñas o medianas. Con un ***molde de superficie seca***, se obtienen las ventajas de los de arena seca secando la superficie de un molde de arena verde hasta una profundidad de 10 a 25 mm (0.4 a 1 in) de la cavidad del molde, mediante sopletes, lámparas de calor u otros medios. Para dar resistencia a la superficie de la cavidad debe agregarse a la mezcla de arena materiales adhesivos especiales.

Las clasificaciones anteriores de los moldes se refieren al uso de aglutinantes convencionales que consisten en arcilla y agua o aquellos que requieren curado con calor. Además de estas clasificaciones, se han creado moldes aglutinados en forma química que no se basan en ninguno de los ingredientes de unión tradicionales. Algunos de los materiales aglutinantes que se emplean en estos sistemas "sin horno" incluyen resinas de furanos (que consisten en alcohol, urea y formaldehído), fenoles y aceites alquidálicos. Los moldes sin horno se usan cada vez más debido a su buen control dimensional y aplicaciones de alta producción.

11.1.3 La operación de fundición

Después de colocar en posición el núcleo (si lo hay) y de que las dos mitades del molde se hacen embonar, se procede a hacer la fundición. Ésta consiste en el vertido, solidificación y enfriamiento de la pieza fundida (véanse las secciones 10.2 y 10.3). El sistema de paso y la mazarota del molde deben diseñarse para llevar metal líquido a la cavidad y proporcionarle almacenamiento suficiente durante la contracción por solidificación. Debe permitirse que escapen el aire y los gases.

Uno de los peligros durante el vertido es que la flotación inducida por el metal fundido desplace al núcleo. La flotación resulta, según el principio de Arquímedes, del peso del metal fundido que desplaza el núcleo. Dicha fuerza tiende a elevar el núcleo y es igual al peso del líquido desplazado menos el peso del núcleo en sí. En forma de ecuación se expresa así:

$$F_b = W_m - W_c \tag{11.1}$$

donde F_b = fuerza de flotación, N (lb); W_m = peso del metal fundido desplazado, N (lb) y W_c = peso del núcleo, N (lb). Los pesos se determinan como el volumen del núcleo multiplicado por las densidades respectivas del material que lo constituye (arena, por lo común) y del metal por fundir. La densidad de un núcleo de arena es de aproximadamente 1.6 g/cm^3 (0.058 lb/in^3). En la tabla 1.1 se dan las densidades de varias aleaciones de fundición comunes.

TABLA 11.1 Densidades de aleaciones de fundición seleccionadas.

	Densidad			Densidad	
Material	g/cm^3	lb/in^3	Material	g/cm^3	lb/in^3
Aluminio (con pureza de 99%)	2.70	0.098	Hierro colado, gris[a]	7.16	0.260
Aleación de aluminio-silicio	2.65	0.096	Cobre (con pureza de 99%)	8.73	0.317
Aluminio-cobre (92% de aluminio)	2.81	0.102	Plomo (puro)	11.30	0.410
Latón[a]	8.62	0.313	Acero	7.82	0.284

Fuente: [5].

[a] La densidad depende de la composición de la aleación; los valores que se dan son los más comunes.

Ejemplo 11.1 La flotación en el moldeo con arena

Un núcleo de arena tiene un volumen de 1 875 cm^3 y se localiza dentro de la cavidad de un molde de arena. Determine la fuerza de flotación que tiende a elevar el núcleo durante el vertido de plomo dentro del molde.

Solución: La densidad del núcleo de arena es de 1.6 g/cm^3. El peso del núcleo es de 1 875(1.6) = 3 000 g = 3.0 kg. Con base en la tabla 11.1, la densidad del plomo es de 11.3 g/cm^3. El peso del plomo que desplaza el núcleo es de 1 875(11.3) = 21, 188 g = 21.19 kg. La diferencia es de 21.19 – 3.0 = 18.19 kg. Dado que 1 kg = 9.81 N, la fuerza de flotación es F_b = 9.81(18.19) = **178.4 N**.

Después de la solidificación y enfriamiento, se rompe el molde de arena que contiene al fundido para retirar éste. Luego, se limpia la pieza, el sistema de paso y ls mazarota se separan y se quita la arena. Después, se inspecciona el fundido (véase la sección 11.5).

11.2 OTROS PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES DESECHABLES

No obstante que la fundición con arena es tan versátil, existen otros procesos de fundición creados para satisfacer necesidades especiales. Las diferencias entre dichos métodos estriban en la composición del material del molde o la manera en que se le fabrica, o bien en la forma en que se hace el modelo.

11.2.1 Moldeo en cascarón o concha

El ***moldeo en cascarón o concha*** es un proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado (es común que mida 9 mm o 3/8 de in) hecho de arena y que se mantiene cohesionado por medio de un aglutinante de resina termofija. Se inventó en Alemania a principios de la década de 1940 y el proceso se describe e ilustra en la figura 11.5.

El proceso de moldeo en cascarón tiene muchas ventajas. La superficie de la cavidad de un molde en cascarón es más suave que la del molde convencional de arena verde, y esta suavidad permite un flujo más fácil durante el vertido del metal líquido y un acabado mejor de la superficie del fundido final. Es posible obtener acabados de 2.5 μm (100 μ-in). También se alcanza una exactitud dimensional buena, con tolerancias posibles de ±0.25 mm (±0.010 in) en piezas de tamaño pequeño a medio. Es frecuente que el acabado y exactitud buenos excluyan la necesidad de maquinado adicional. La colapsabilidad del molde por lo general es suficiente para evitar la rugosidad y agrietamiento del fundido.

Las desventajas del moldeo en cascarón incluyen un modelo de metal más caro que el correspondiente al moldeo con arena verde. Esto hace que el moldeo con concha sea difícil de justificar para cantidades pequeñas de piezas, pero puede mecanizarse para la producción masiva y es muy económico para cantidades grandes. Parece apropiado en especial para fundidos de acero de menos de 20 libras. Algunos ejemplos de piezas fabricadas con el empleo de moldeo con concha incluyen engranajes, cuerpos de válvulas, boquillas y árboles de levas.

11.2.2 Moldeo al vacío

El ***moldeo al vacío***, también llamado ***proceso V***, se inventó en Japón alrededor de 1970. Utiliza un molde de arena que se mantiene unido por medio de una presión de vacío en lugar de emplear un aglutinante químico. En consecuencia, el término ***vacío*** se refiere, en el contexto de este proceso, a la fabricación del molde en lugar de a la operación de fundido en sí. En la figura 11.6 se explican las etapas del proceso.

Una de las varias ventajas del moldeo al vacío es la recuperación de arena, debido a que no se emplean aglutinantes. Asimismo, la arena no requiere el reacondicionamiento

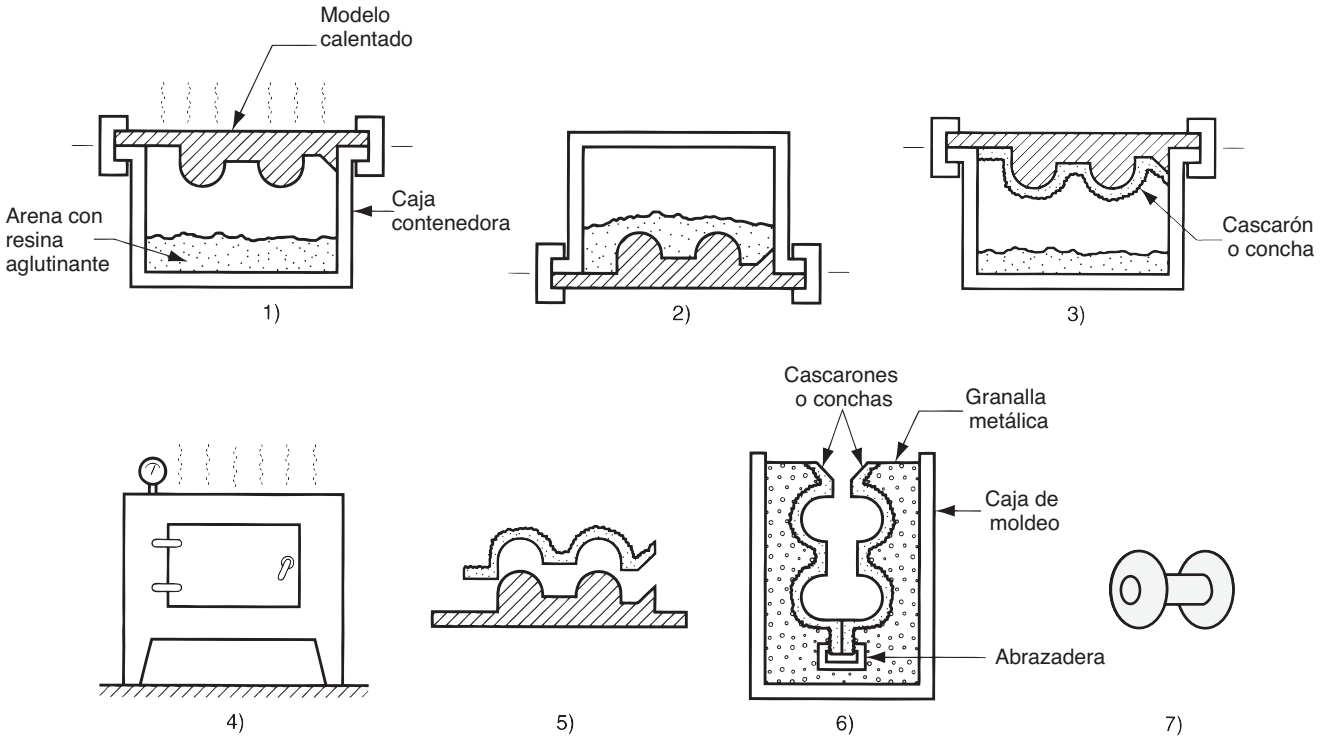


FIGURA 11.5 Etapas del moldeo en cascarón: 1) se calienta una placa de ajuste o de capucha y base, y se coloca sobre una caja que contiene arena mezclada con alguna resina termofija; 2) se invierte la caja de modo que la arena y la resina caigan sobre el modelo caliente, lo que ocasiona que una capa de la mezcla se cure parcialmente sobre la superficie y forme una concha dura; 3) la caja vuelve a su posición original de modo que caigan las partículas sueltas que no resultaron curadas; 4) el cascarón de arena se calienta en un horno durante varios minutos, a fin de completar el curado; 5) el molde en cascarón se separa del modelo; 6) se ensamblan dos mitades del molde en cascarón, apoyadas en dosis de arena o metal en el interior de una caja; y se realiza el vertido. Se retira el fundido terminado, con el bebedero removido, como se aprecia en el 7) de la figura.

mecánico intenso que es normal hacer cuando se emplean aglutinantes para la arena. Como no se mezcla agua con la arena, el producto no tiene los defectos relacionados con la humedad. Las desventajas del proceso V son que es relativamente lento y que no se adapta con facilidad a la mecanización.

11.2.3 Procesos de poliestireno expandido

El ***proceso de fundición con poliestireno expandido*** usa un molde de arena compactada alrededor de un modelo de espuma de poliuretano que se vaporiza cuando el metal fundido se vierte en el molde. El proceso y sus variaciones se conocen también con otros nombres, tales como ***proceso de espuma perdida***, ***proceso de patrón perdido***, ***proceso de evaporación de espuma*** y ***proceso de molde lleno*** (este último es una marca registrada). El modelo de poliestireno incluye la mazarota, vertedores y sistema de paso, y también contiene núcleos internos (de ser necesarios), lo que elimina la necesidad de contar con un núcleo por separado en el molde. Asimismo, dado que el modelo de espuma en sí se convierte en la cavidad en el molde, se puede ignorar otras consideraciones sobre las líneas de separación y dibujo. El molde no tiene que estar abierto en las secciones de capucha y base. En la figura 11.7 se ilustra y describe la secuencia de este proceso de fundición. Se usan diferentes métodos para hacer el modelo, en función de la cantidad de fundidos por producir. Para fundidos de una sola clase, la espuma se corta en forma manual de rollos grandes y se ensambla para formar el modelo. Para corridas grandes de producción, se

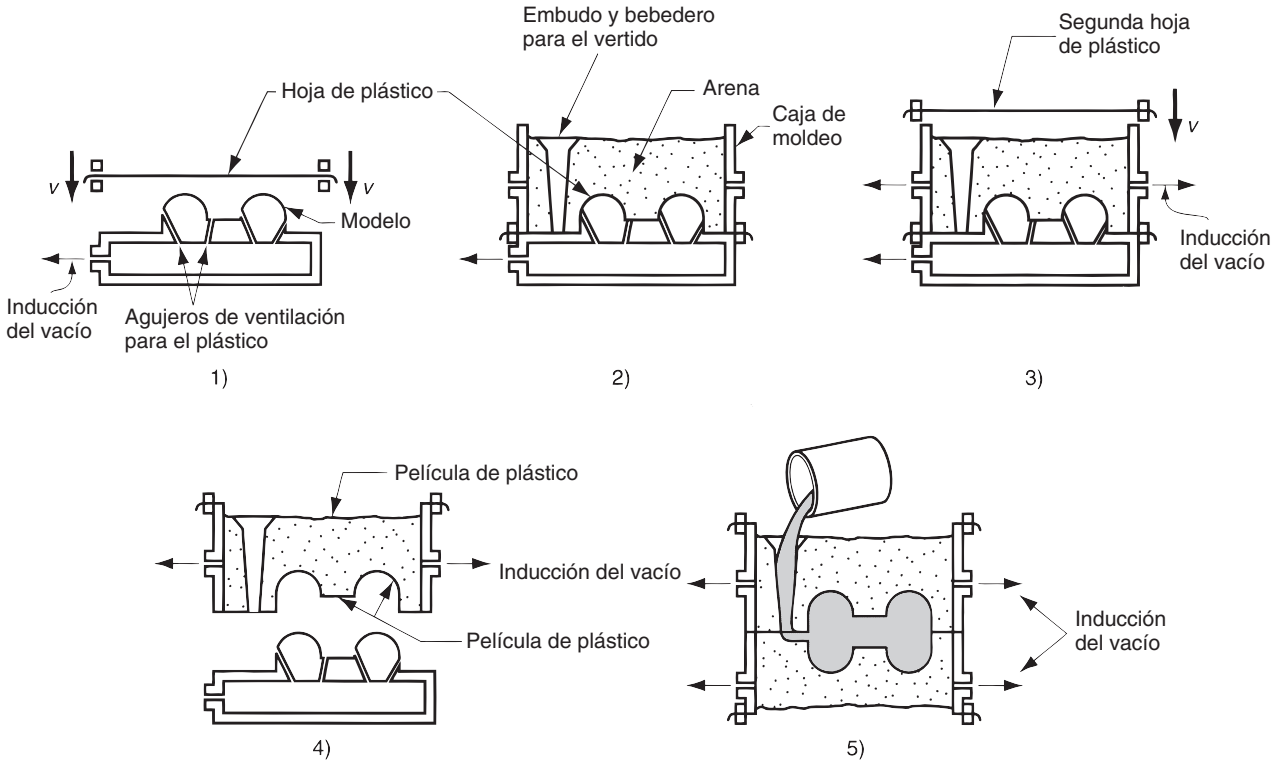


FIGURA 11.6 Etapas del moldeo al vacío: 1) Se precalienta una película delgada de plástico y se coloca sobre una placa de ensamble o modelo de capucha y base por medio de vacío; el modelo tiene agujeros de ventilación pequeños para facilitar la formación del vacío; 2) sobre la placa del modelo se coloca una caja de moldeo de diseño especial y se llena con arena, en la que se forma un bebedero y embudo de vertido; 3) sobre la caja de moldeo se pone otra película de plástico delgada y se induce un vacío que hace que los granos de arena permanezcan unidos, lo que forma un molde rígido; 4) el vacío sobre el modelo del molde se libera para permitir que éste salga del molde; 5) este molde se ensambla con su mitad correspondiente para formar la capucha y base, y manteniendo el vacío sobre ambas mitades se hace el vertido. La película de plástico se quema con rapidez al contacto del metal fundido. Después de la solidificación, se recupera casi toda la arena para volver a emplearla.

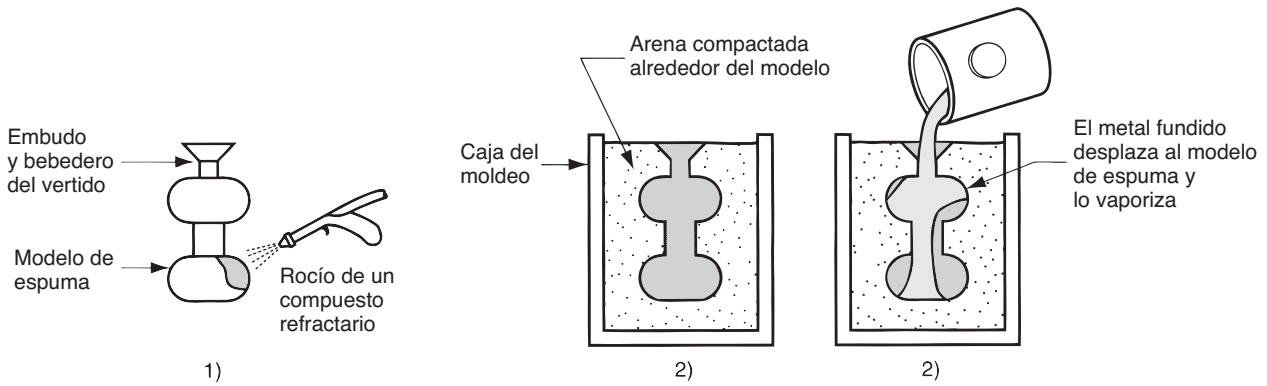


FIGURA 11.7 Proceso de fundición con poliestireno expandido: 1) el modelo de poliestireno se recubre con un compuesto refractario; 2) el modelo de espuma se coloca en la caja del molde, y alrededor de él se compacta arena; 3) se vierte metal fundido en la porción del patrón que constituye el embudo y el bebedero del vertido. Conforme el metal ingresa al molde, la espuma de poliestireno se vaporiza al contacto con el líquido, lo que permite que se llene la cavidad del molde.

prepara una operación de moldeo automatizada para moldear los modelos antes de fabricar los moldes para la fundición. Normalmente, éste se recubre con un compuesto refractario que proporciona una superficie más suave sobre él y para mejorar su resistencia a la alta temperatura. Por lo general, los moldes de arena incluyen agentes de unión. Sin embargo, en ciertos procesos de este grupo se emplea arena seca, lo que ayuda al recubrimiento y reuso.

Una ventaja significativa de este proceso es que el modelo no necesita retirarse del molde. Esto simplifica y agiliza la fabricación de éste. En un molde convencional de arena verde, se requiere de dos mitades con líneas de separación apropiadas, se debe proveer de tolerancias en el diseño del molde, los núcleos deben insertarse y debe agregarse el sistema de paso y mazarota. Con el proceso de poliestireno expandido, estas etapas se incluyen en el modelo mismo. La desventaja del proceso es que se necesita un modelo nuevo para cada fundición. La justificación económica del proceso de poliestireno expandido depende mucho del costo de producción de los modelos. El proceso de fundido con poliestireno expandido se ha aplicado para producir en masa fundiciones para motores de automóviles. A fin de moldear los modelos de espuma de poliestireno para estas aplicaciones, se instalan sistemas de producción automatizada.

11.2.4 Fundición por revestimiento

En la ***fundición por revestimiento***, se elabora un modelo de cera y se recubre con un material refractario para formar el molde, después de lo cual se derrite la cera antes de verter el metal fundido. El término ***revestimiento*** proviene de una de las definiciones menos familiares de la palabra ***revestir***, que es "cubrir por completo", lo que se refiere al recubrimiento del material refractario alrededor del modelo de cera. Es un proceso de precisión para fundir, debido a que es capaz de generar fundidos de gran exactitud y detalles intrincados. El proceso se remonta al antiguo Egipto (véase la nota histórica 11.1) y también se le conoce como ***proceso de la cera perdida***, debido a que el modelo de ese material se pierde en el molde antes de la fundición.

En la figura 11.8 se describen las etapas de la fundición por revestimiento. Como el modelo de cera se derrite después de hacer el molde refractario, debe elaborarse un

Nota histórica 11.1 *Fundición por revestimiento*

El proceso de fundición por cera perdida fue creado por los antiguos egipcios hace 3 500 años. Aunque los registros escritos no identifican cuándo ocurrió el invento o el artesano que lo hizo, los historiadores especulan que el proceso resultó de la asociación cercana entre la cerámica y el moldeo en tiempos remotos. Fue el ceramista quien elaboró los moldes que se usaban para fundir. La idea del proceso de la cera perdida debe haberse originado con un ceramista que estaba familiarizado con el proceso de fundición. Un día, mientras trabajaba en una pieza de cerámica, quizá un vaso o tazón ornamental, se le ocurrió que el artículo debería ser más atractivo y durable si se hiciera de metal, por lo que elaboró un núcleo con la forma general de la pieza, pero más pequeño que las dimensiones finales que deseaba, y lo recubrió con cera para establecer el tamaño. La cera proporcionó un material fácil de conformar, y los artesanos fueron capaces de crear diseños y formas intrincados. Sobre la superficie de la cera, empastó con cuidado varias capas de arcilla y vislumbró un medio de mantener unidos los componentes resultantes. Después, horneó el molde, de modo que la arcilla se endureció y la cera se fundió y drenó para formar una cavidad. Al fin, vertió bronce derretido en ésta y, después de que el fundido se hubiera solidificado y enfriado, rompió el molde para recuperar la pieza. Si se considera la educación y experiencia de este fabricante ancestral de vasijas y las herramientas que tenía para trabajar, el desarrollo del proceso de la fundición con cera perdida demostró gran innovación y percepción. "Los arqueólogos no podrían mencionar ningún otro proceso tan pleno de deducción, capacidad de ingeniería e ingenio" [1].

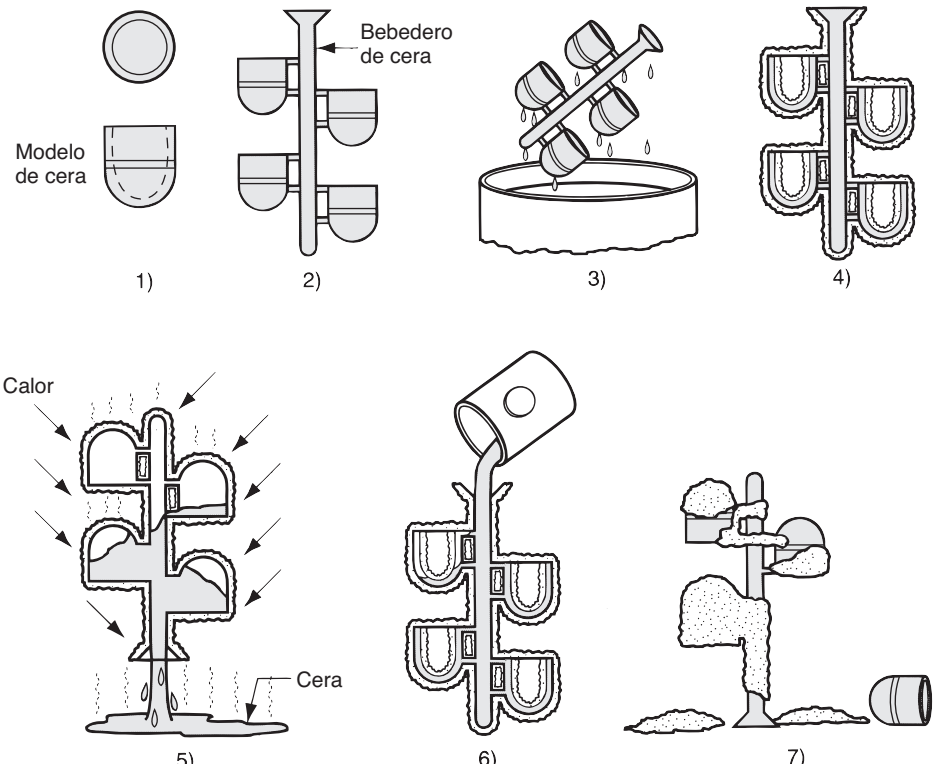


FIGURA 11.8 Etapas de la fundición por revestimiento: 1) se producen los modelos de cera; 2) se unen varios modelos a un bebedero para formar un árbol con ellos; 3) el árbol de modelos se recubre con una capa delgada de material refractario; 4) se forma el molde con el árbol recubierto con material refractario suficiente para volverlo rígido; 5) se mantiene el molde en posición invertida y se calienta para fundir la cera y permitir que salga de la cavidad; 6) el molde se precalienta a temperatura elevada, lo que garantiza que todos los contaminantes del molde se eliminen; eso también permite que el metal líquido fluya con más facilidad dentro de la cavidad detallada; se vierte el metal fundido; se solidifica; y 7) se rompe el molde del fundido terminado. Se separan las partes del bebedero.

modelo separado por cada fundido. La producción de modelos por lo general se lleva a cabo por medio de una operación de moldeo, vertiendo o inyectando la cera caliente en un ***troquel maestro*** diseñado con tolerancias apropiadas para permitir la contracción tanto de la cera como del fundido metálico subsecuente. En los casos en que la forma de la pieza es complicada, pueden unirse varias piezas separadas de cera para formar el modelo. En operaciones de producción grande, se unen varios modelos a un bebedero, también hecho de cera, para formar un ***árbol de modelos***; ésta es la configuración geométrica que se fundirá con el metal.

El recubrimiento con material refractario (etapa 3) por lo general se lleva a cabo con la inmersión del árbol de modelos en una masa muy fina de sílice granular u otro refractario (casi en polvo) mezclado con la pasta para unir el molde a la forma. El grano pequeño del material refractario proporciona una superficie suave y captura los detalles intrincados del modelo de cera. El molde final (etapa 4) se lleva a cabo sumergiendo el árbol repetidas veces en la masa refractaria o compactando con suavidad el material refractario alrededor del árbol en un contenedor. Se deja secar el molde alrededor de ocho horas para endurecer el aglutinante.

Las ventajas de la fundición por revestimiento incluyen las siguientes: 1) es posible fundir piezas de gran complejidad y detalle, 2) se puede tener mucho control dimensional, tolerancias de ±0.075 mm (±0.003 in), 3) se tiene un acabado bueno de la superficie, 4) por lo general se puede recuperar la cera para volver a emplearla y 5) normalmente no se requiere maquinado adicional; éste es un proceso de forma neta. Debido a que en esta operación de fundido están involucradas muchas etapas, es un proceso relativamente caro. Lo normal es que las piezas elaboradas por medio de fundición por revestimiento sean pequeñas, aunque se ha llegado a fundir con éxito piezas con formas complejas que pesan hasta 75 libras. Todos los tipos de metales, incluidos aceros, aceros inoxidables y otras



FIGURA 11.9 Estator de una pieza para un compresor, con 108 aletas aerodinámicas separadas, elaborado por medio de fundición por revestimiento (cortesía de Howmet Corp.).

aleaciones de temperatura alta, son susceptibles de usarse en la fundición por revestimiento. Algunos ejemplos de piezas incluyen elementos complejos de maquinaria, aspas y otros componentes de motores de turbina, joyería y piezas dentales. En la figura 11.9 se ilustra una pieza que muestra las características intrincadas que son posibles con la fundición por revestimiento.

11.2.5 Fundición con moldes de yeso y de cerámica

La ***fundición con molde de yeso*** es similar a aquella con arena, excepto que el molde está hecho de yeso de París ($CaSO_4$–$2H_2O$), en vez de arena. Con el yeso se mezclan aditivos tales como el talco y polvo de sílice para controlar la contracción y el tiempo de preparación, reducir el agrietamiento y aumentar la resistencia. Para hacer el molde, se vierte la mezcla de yeso y agua sobre un modelo de plástico o metal en un recipiente y se deja reposar. Por lo general los modelos de madera son insatisfactorios debido al contacto largo con el agua del yeso. La consistencia del fluido permite que la mezcla de yeso fluya con facilidad alrededor del modelo y capture sus detalles y acabado de la superficie. Así, el producto que se funde en moldes de yeso es notable por tener dichos atributos.

Una de las desventajas del proceso es la cura del molde de yeso, al menos en producción elevada. El molde debe permanecer en reposo alrededor de 20 minutos antes de que el modelo se desmonte. Después, el molde se hornea durante varias horas a fin de eliminar la humedad. Aun con el horneo, no todo el contenido de humedad llega a eliminarse. El dilema que enfrentan los fundidores es que la resistencia del molde se pierde cuando la

pasta se deshidrata demasiado, por lo que el contenido de humedad ocasiona defectos en la fundición del producto. Debe llegarse a un balance entre estas alternativas indeseables. Otra desventaja con el molde de yeso es que no es permeable, lo que limita el escape de los gases de la cavidad del molde. Este problema se puede resolver de distintos modos: 1) con la evacuación del aire de la cavidad del molde antes del vertido 2) por medio del oreo de la masa de yeso antes de fabricar el molde, de modo que la pasta dura que resulte contenga vacíos dispersados finamente y 3) con el uso de una composición especial del molde y el tratamiento conocido como ***proceso de Antioquia***. Éste consiste en usar 50% de arena mezclada con el yeso, calentar el molde en un autoclave (horno que utiliza vapor supercaliente y a presión) y después dejar que se seque. El molde que resulta tiene una permeabilidad considerablemente mayor que la de uno de yeso convencional.

Los moldes de yeso no resisten temperaturas tan altas como las de los moldes de arena. Por tanto, están limitados a la fundición de aleaciones con puntos de fusión bajos, como las de aluminio, magnesio y algunas con base de cobre. Las aplicaciones incluyen moldes de metal para moldear caucho y plástico, impulsores de turbinas y bombas, y otras piezas de forma relativamente intrincada. Los tamaños de los fundidos van de alrededor de 20 g (menos de 1 onza) a más de 100 kg (más de 200 libras). Las más comunes son las piezas que pesan 10 kg (20 libras), aproximadamente. Las ventajas de los moldes de yeso para estas aplicaciones son el buen terminado de la superficie, la exactitud dimensional y la capacidad de fabricar fundidos de sección transversal delgada.

El ***fundido con moldes cerámicos*** es similar al fundido con aquéllos de yeso, excepto que el molde se elabora con materiales cerámicos refractarios que resisten temperaturas más elevadas que los de yeso. Así, los moldes cerámicos se emplean para fundir aceros, hierro y otras aleaciones de alta temperatura. Sus aplicaciones (moldes y piezas relativamente intrincadas) son similares a las de las fundiciones hechas en moldes de yeso, excepto para la fundición de metales. Sus ventajas (exactitud y terminado buenos) también son parecidas.

11.3 PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES PERMANENTES

La desventaja económica de cualquiera de los procesos con molde desechable es que se requiere uno nuevo para cada fundido. En la fundición con molde permanente, el molde se reutiliza muchas veces. En esta sección se trata la fundición con moldes permanentes como el proceso básico del grupo de procesos de fundido que emplean moldes de metal susceptibles de volver a emplearse; otros procesos del grupo son la fundición a troquel y la fundición centrífuga.

11.3.1 El proceso básico con moldes permanentes

La ***fundición con moldes permanentes*** usa un molde de metal construido con dos secciones diseñadas para tener facilidad de apertura y cierre. Es común que estos moldes estén hechos de acero o hierro fundido. La cavidad, con el sistema de paso incluido, se maquina en las dos mitades para proporcionar dimensiones exactas y buen acabado de la superficie. Los metales que es común fundir en moldes permanentes son aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre y hierro colado. Sin embargo, el hierro colado requiere una temperatura de vertido elevada, de 1 250 ºC a 1 500 °C (2 300 ºF a 2 700 ºF), que tiene un efecto grande en la vida del molde. Las temperaturas de vertido muy altas del acero hacen que los moldes permanentes no sean apropiados para este metal, a menos que el molde se fabrique con material refractario.

Es posible usar núcleos en los moldes permanentes a fin de formar superficies internas en el producto fundido. Los núcleos están hechos de metal, pero su forma debe permitir la

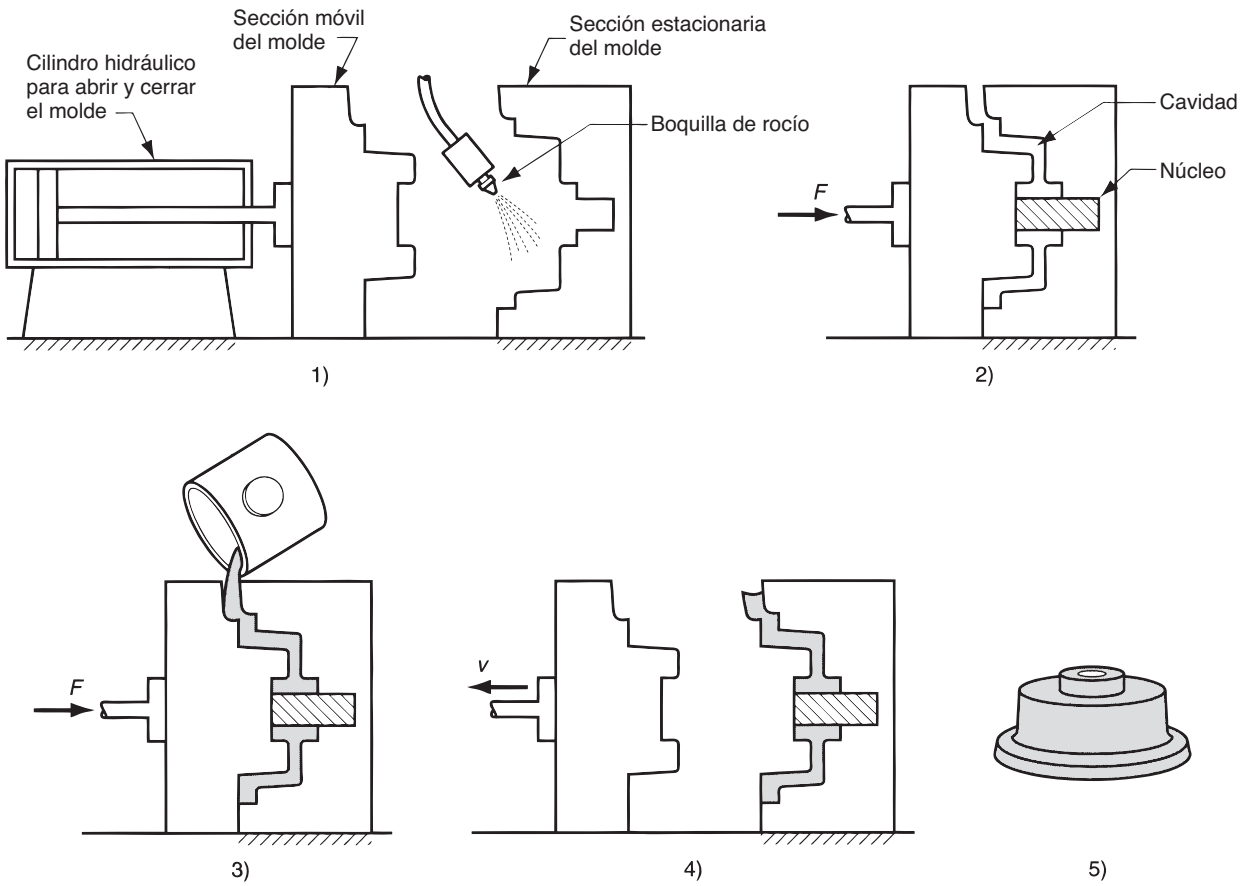


FIGURA 11.10 Etapas del fundido con moldes permanentes: 1) se precalienta y recubre el molde, 2) se insertan los núcleos (si los hay) y se cierra el molde, 3) se vierte metal derretido en el molde y 4) se abre el molde. La pieza terminada se presenta en 5).

remoción del fundido o bien deben colapsarse en forma mecánica para lograr ese cometido. Si el retiro del núcleo de metal es difícil o imposible, hay que usar moldes de arena, caso en el que es frecuente referirse al proceso como ***fundición con molde semipermanente***.

En la figura 11.10 se describe el proceso básico de fundición con moldes permanentes. En la preparación del fundido, primero se precalienta el molde y se rocían uno o más recubrimientos sobre la cavidad. El precalentamiento facilita que el metal fluya a través del sistema de paso y hacia la cavidad. Los recubrimientos ayudan a disipar el calor y lubrican las superficies del molde para que sea más fácil la separación del producto fundido. Después del vertido, tan pronto como se solidifica el metal, se abre el molde y se retira el fundido. A diferencia de los moldes desechables, los permanentes no se colapsan, por lo que deben abrirse antes de que ocurra una contracción apreciable por el enfriamiento a fin de impedir la formación de grietas en el fundido.

Las ventajas de la fundición con moldes permanentes incluyen buen acabado de la superficie y control dimensional estrecho, como ya se dijo. Además, la solidificación más rápida ocasionada por el molde metálico da como resultado una estructura de grano más fina, por lo que se producen fundidos más fuertes. El proceso se limita por lo general a metales con puntos de fusión bajos. Otras limitaciones son que las formas de las piezas son más sencillas, en comparación con las de la fundición con arena (debido a la necesidad de abrir el molde), y lo caro del molde. Debido a que el costo del molde es elevado, el proceso se adapta mejor a una producción elevada y se puede automatizar en consecuencia. Los productos comunes incluyen pistones de automóviles, cuerpos de bombas y ciertos fundidos para aeronaves y misiles.

11.3.2 Variaciones de la fundición con moldes permanentes

Varios procesos de fundición son muy parecidos al método básico con molde permanente. Éstos incluyen la fundición con molde permanente en hueco, a baja presión y al vacío.

Fundición en hueco La ***fundición en hueco*** es un proceso con molde permanente en el que un fundido hueco se forma por medio de la inversión del molde después de la solidificación parcial de la superficie a fin de drenar el metal líquido del centro. La solidificación comienza en las paredes del molde porque están relativamente frías, y con el paso del tiempo avanza hacia la mitad del fundido (véase la sección 10.3.1). El espesor del cascarón o concha se controla por el tiempo que se permite transcurra antes del drenado. La fundición en hueco se emplea para hacer estatuas, pedestales de lámparas y juguetes, con metales de punto de fusión bajo, tales como plomo, zinc y estaño. En esos artículos es importante la apariencia exterior, pero la resistencia y la forma interior del fundido son consideraciones menores.

Fundición a baja presión En el proceso básico de molde permanente y en la fundición en hueco, el flujo del metal hacia la cavidad del molde está ocasionado por la gravedad. En la ***fundición a baja presión*** el metal líquido se fuerza a pasar a la cavidad sujeto a baja presión, aproximadamente 0.1 MPa (15 lb/in^2), desde abajo, de modo que el flujo es hacia arriba, como se ilustra en la figura 11.11. La ventaja de este enfoque sobre el vertido tradicional es que al molde se introduce metal derretido limpio desde el centro del recipiente, en vez de metal que ya se haya expuesto al aire. De ese modo se minimizan los defectos de porosidad por gas y oxidación, y mejoran las propiedades mecánicas.

Fundición al vacío con molde permanente La ***fundición al vacío con molde permanente*** (no confundir con el molde al vacío, véase la sección 11.2.2) es una variación de aquélla a baja presión, en la cual se emplea un vacío para impulsar el metal derretido hacia la cavidad del molde. La configuración general del proceso de fundición al vacío con molde permanente es similar a la de la operación de fundición a baja presión. La diferencia está en que se utiliza la presión reducida del aire desde el vacío del molde para llevar metal líquido hacia la cavidad, en lugar de forzarlo con presión positiva de aire desde abajo. Hay varios beneficios en la técnica de vacío, relacionados con la fundición a baja presión: se reduce la porosidad por aire y los defectos relacionados con ésta, y se da mayor resistencia al producto fundido.

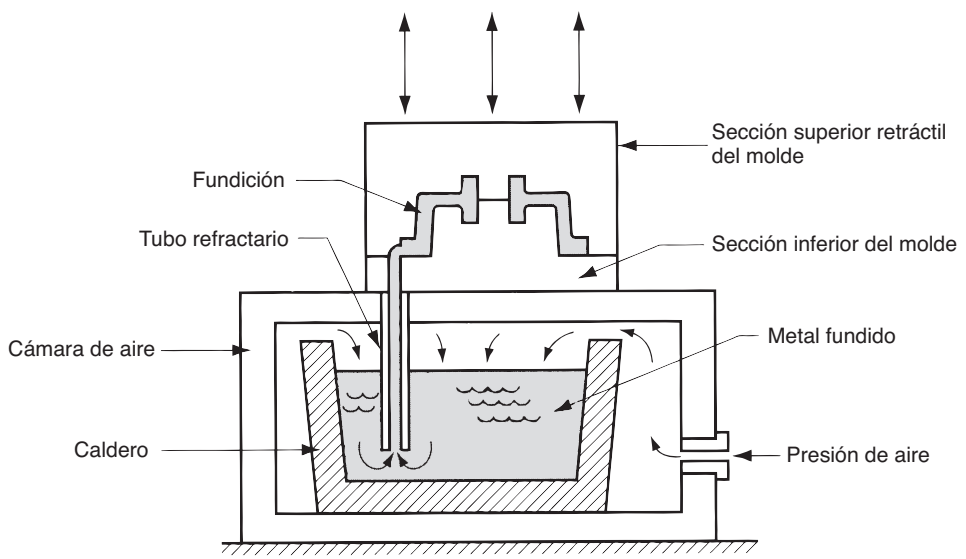


FIGURA 11.11 Fundición a baja presión. El diagrama muestra el uso de la presión baja del aire para forzar al metal fundido en el recipiente a que pase a la cavidad del molde. La presión se mantiene hasta que el fundido se ha solidificado.

11.3.3 Fundición con troquel

La ***fundición con troquel*** es un proceso de fundición con molde permanente en el que se inyecta a presión elevada metal fundido a la cavidad del molde. Las presiones comunes son de 7 a 350 MPa (1 000 a 50 000 lb/in^2). La presión se mantiene durante la solidificación, después de la cual el molde se abre y se retira la pieza. Los moldes para esta operación de fundido reciben el nombre de troqueles, de donde deriva su nombre el proceso. La característica más notable que diferencia a este proceso de los demás de la categoría de moldes permanentes, es el uso de presión elevada para forzar el paso del metal a la cavidad del troquel.

Las operaciones de fundición con troquel se llevan a cabo en máquinas especiales (véase la nota histórica 11.2). Éstas se diseñan para que las dos mitades del molde embonen y cierren con exactitud, y las mantengan cerradas mientras se fuerza al metal líquido a pasar a la cavidad. En la figura 11.12 se aprecia la configuración general. Hay dos tipos principales de máquinas para fundición con troquel: 1) cámara caliente y 2) cámara fría, que se diferencian en la manera en que el metal derretido se inyecta a la cavidad.

Nota histórica 11.2 *Máquinas de fundición con troquel.*

La máquina moderna de fundición con troquel tiene sus orígenes en la industria de la impresión, y en la necesidad que hubo en la segunda mitad del siglo XIX de satisfacer a una población cada vez más letrada con apetito creciente por la lectura. El linotipo, inventado y desarrollado por O. Mergenthaler a finales del siglo XIX, es una máquina que produce tipos de imprenta. Es una máquina fundidora porque funde una línea de caracteres de tipos hechos de plomo, para que se utilicen en la preparación de placas de imprenta. El nombre ***linotipo*** se deriva del hecho de que la máquina produce una línea de caracteres de tipos durante cada ciclo de operación.

La máquina fue usada por primera vez con éxito en forma comercial en la ciudad de Nueva York, en 1886, por ***The Tribune***.

El linotipo dio factibilidad a las máquinas de fundición mecanizadas. La primera de éstas la patentó H. Doehler en 1905 (esta máquina está en exhibición en Smithsonian Institution, en Washington, D.C.). En 1907, E. Wagner inventó la primera máquina de fundición con troquel que utilizó el diseño de cámara caliente. Se empleó por vez primera durante la Segunda Guerra Mundial para fundir partes de binoculares y máscaras de gas.

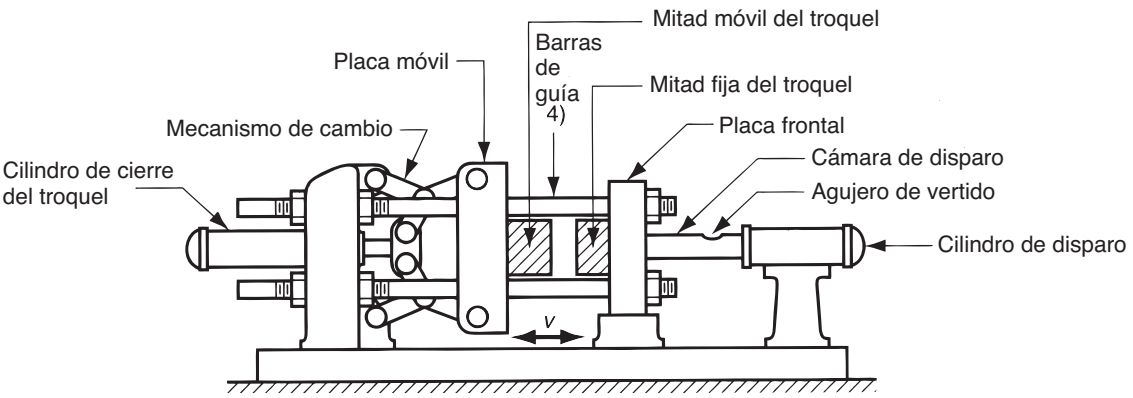


FIGURA 11.12 Configuración general de una máquina de fundición con troquel (cámara fría).

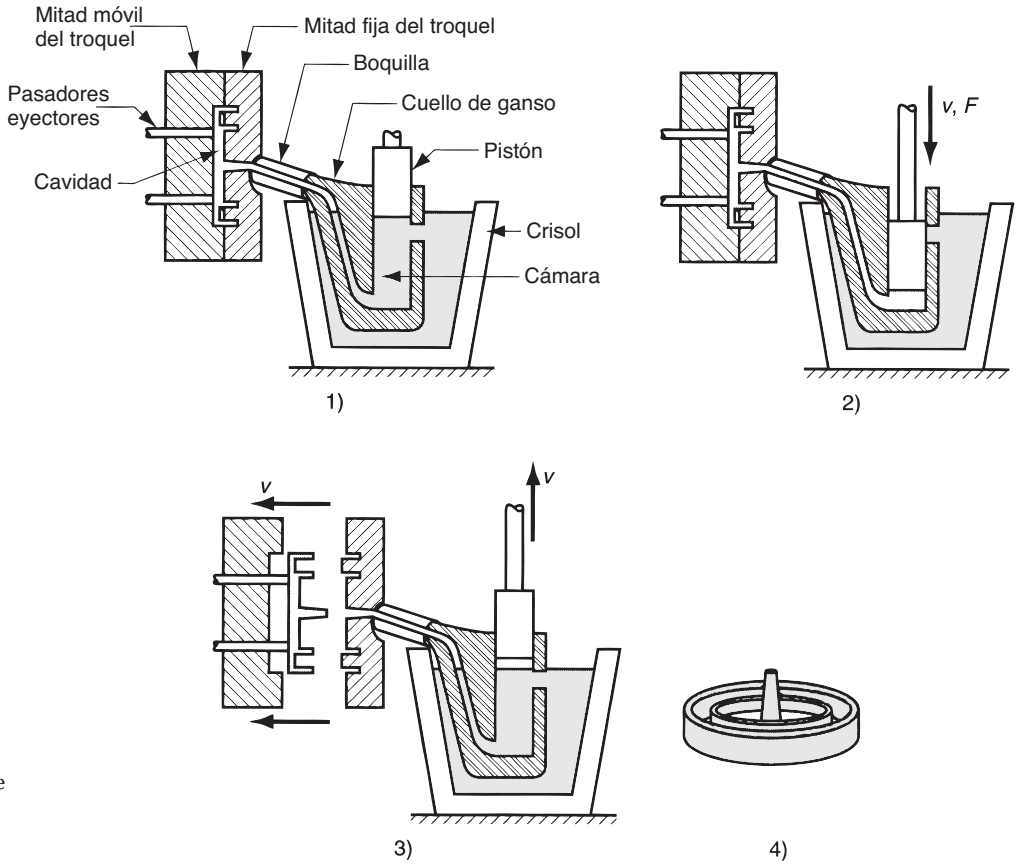


FIGURA 11.13 Ciclo de la fundición con cámara caliente: 1) con troquel cerrado y pistón fuera, el metal derretido fluye a la cámara; 2) el pistón fuerza al metal a fluir hacia la cámara para que pase al troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el pistón, se abre el troquel y se expulsa la pieza solidificada. En el inciso 4 se ilustra el elemento terminado.

En las ***máquinas de cámara caliente*** el metal se derrite en un contenedor adosado a la máquina, y se emplea un pistón para inyectar metal líquido a alta presión hacia el troquel. Las presiones de inyección comunes son de 7 a 35 MPa (1 000 a 5 000 lb/in^2). El ciclo de fundición se resume en la figura 11.13. No son raras tasas de producción de hasta 500 piezas por hora. La fundición con troquel de cámara caliente plantea un reto especial al sistema de inyección debido a que gran parte de éste se encuentra sumergido en el metal fundido. Por tanto, el proceso está limitado a aplicaciones con metales de punto bajo de fusión que no impongan ataque químico al pistón y otros componentes mecánicos. Los metales incluyen zinc, estaño, plomo y en ocasiones magnesio.

En las ***máquinas de fundición con troquel de cámara fría*** se vierte metal derretido hacia una cámara que no está caliente, desde un contenedor externo, y se emplea un pistón para inyectarlo a alta presión hacia la cavidad del troquel. Las presiones de inyección comunes que se usan en estas máquinas son de 14 a 140 MPa (2 000 a 20 000 lb/in^2). En la figura 11.14 se explica el ciclo de producción. En comparación con las máquinas de cámara caliente, las tasas del ciclo por lo general no son tan rápidas debido a la necesidad de una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa hacia la cámara. No obstante, este proceso de fundición es una operación de producción elevada. Las máquinas de cámara fría se usan por lo común para fundir aleaciones de aluminio, latón y magnesio. Aleaciones con punto de fusión bajo (zinc, estaño, plomo) también pueden fundirse en máquinas de cámara fría, pero por lo general las ventajas del proceso con cámara caliente favorecen su uso sobre estos metales.

Generalmente, los moldes que se usan en operaciones de fundición con troquel están hechos de acero para herramientas, acero para moldes o acero al níquel con bajo contenido de carbono. También se emplean tungsteno y molibdeno con calidades refractarias buenas, en especial para fundir acero con troquel y hierro colado. Los troqueles pueden ser de una cavidad o varias. En las figuras 11.13 y 11.14 se ilustran troqueles de una sola cavidad.

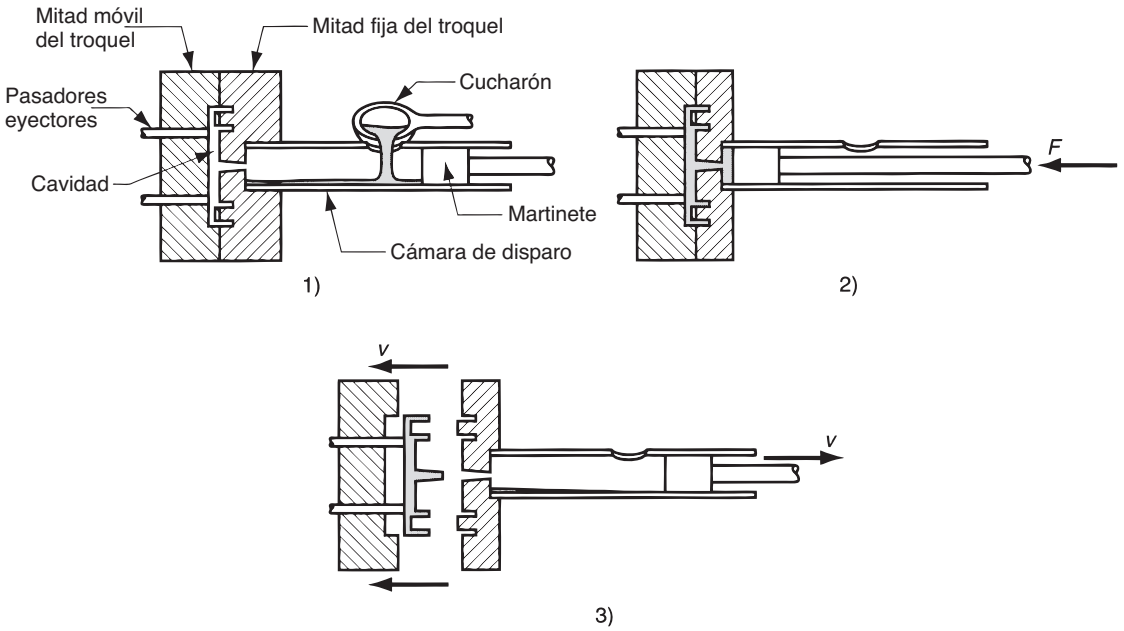


FIGURA 11.14 Ciclo de fundición con cámara fría: 1) con troquel cerrado y martinete retirado, el metal fundido se vierte a la cámara; 2) el martinete fuerza al metal a fluir en el troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el martinete, el troquel se abre y la pieza es expulsada. (El sistema de paso está simplificado).

Los pasadores eyectores se requieren para retirar la pieza del troquel cuando éste se abre, como se observa en los diagramas. Estos pasadores empujan la pieza hacia afuera de la superficie del molde de modo que pueda retirarse. También deben rociarse lubricantes en las cavidades, a fin de impedir que estén pegajosas.

Debido a que los materiales del troquel no tienen porosidad natural, y que el metal fundido fluye con rapidez hacia éste durante la inyección, deben hacerse agujeros de ventilación y vías de paso en los troqueles, en la línea de separación, para evacuar el aire y gases de la cavidad. Las ventilaciones son muy pequeñas; en realidad se llenan con metal durante la inyección. Este metal debe recortarse de la pieza más tarde. Asimismo, en la fundición con troquel es común la formación de una ***rebaba***, que entra como metal líquido a presión alta al espacio pequeño entre las mitades del troquel, en la línea de separación o en los claros alrededor de los núcleos y los pasadores eyectores. Esta rebaba debe recortarse del fundido, junto con el bebedero y el sistema de paso.

Entre las ventajas de la fundición con troquel se incluyen las siguientes: 1) son posibles tasas elevadas de producción, 2) es económica para cantidades grandes de producción, 3) se pueden tener tolerancias estrechas, del orden de ±0.076 mm (±0.003 in) para piezas pequeñas, 4) buen acabado de la superficie, 5) son posibles las secciones delgadas, por debajo de 0.5 mm (0.020 in) y 6) el enfriamiento rápido proporciona un tamaño pequeño del grano y buena resistencia al fundido. La limitación de este proceso, además de los metales por fundir, es la restricción de la forma. La configuración geométrica de la pieza debe permitir su retiro de la cavidad del troquel.

11.3.4 Fundición centrífuga

La ***fundición centrífuga*** se refiere a varios métodos de fundición en los que el molde gira a gran velocidad de modo que la fuerza centrífuga distribuye el metal derretido a las regiones externas de la cavidad del troquel. El grupo incluye 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrífugada.

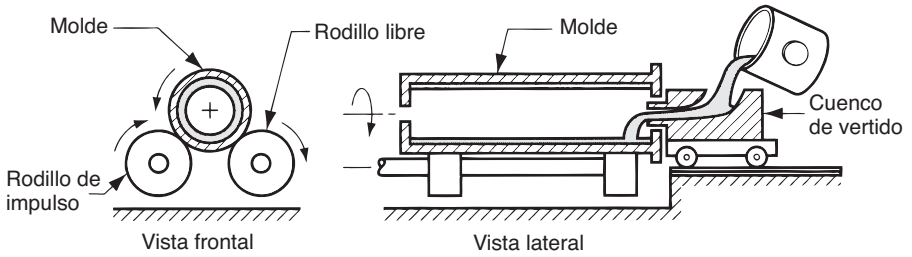


FIGURA 11.15 Arreglo para la fundición centrífuga real.

Fundición centrífuga real En la fundición centrífuga real, se vierte metal fundido a un molde rotatorio para producir una pieza tubular. Algunos ejemplos de las piezas que se fabrican con este proceso incluyen tuberías, tubos, boquillas y anillos. En la figura 11.15 se ilustra un arreglo posible. Se vierte metal derretido por un extremo del molde horizontal rotatorio. En algunas operaciones, la rotación del molde comienza después del vertido y no antes. La gran velocidad de rotación ocasiona que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. Así, la forma exterior del fundido puede ser redonda, octagonal, hexagonal, etcétera. Sin embargo, la forma interior del fundido es (en teoría) perfectamente circular, debido a las fuerzas con simetría radial que actúan.

La orientación del eje de rotación del molde es horizontal o vertical, y el más común es el primero. A continuación se estudiará cuán rápido debe girar el molde en una ***fundición centrífuga horizontal***, a fin de que el proceso tenga éxito. La fuerza centrífuga está definida por la siguiente ecuación de física:

$$F = \frac{mv^2}{R} \tag{11.2}$$

donde F = fuerza, N (lb); m = masa, kg (lbm); v = velocidad, m/s (ft/s); y R = radio interior del molde, m (ft). La fuerza de gravedad es su peso, $W = mg$, donde W se expresa en kg (lb), y g = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 (32.2 ft/s^2). El llamado factor G, GF, es la razón de la fuerza centrífuga dividida entre el peso:

$$GF = \frac{mv^2}{R} = \frac{mv^2}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \tag{11.3}$$

La velocidad, v, se expresa como $2\pi RN/60 = \pi RN/30$, donde N = velocidad rotacional, rev/min. Al sustituir esta expresión en la ecuación (11.3), se obtiene

$$GF = \frac{R\left(\frac{\pi N}{30}\right)^2}{g} \tag{11.4}$$

Al reacomodar ésta a fin de resolverla para la velocidad rotatoria, N, y con el uso del diámetro, D, en vez del radio en la ecuación resultante, se tiene

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2gGF}{D}} \tag{11.5}$$

donde D es el diámetro interior del molde, m (ft). Si el factor G es demasiado pequeño en la fundición centrífuga, el metal líquido no se verá forzado a permanecer contra la pared del molde durante la mitad superior de la trayectoria circular, sino que "lloverá" dentro de la cavidad. Hay un deslizamiento entre el metal fundido y la pared del molde, lo que significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde. Con una base empírica, se ha encontrado [2] que para la fundición centrífuga horizontal son apropiados valores de GF de 60 a 80, aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde.

Ejemplo 11.2 Velocidad de rotación en la fundición centrífuga real

Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal, a fin de fabricar secciones de tubo de cobre con diámetro exterior (DE) de 25 cm y diámetro interior (DI) de 22.5 cm. ¿Cuál es la velocidad rotacional que se requiere si se va a usar un factor G de 65 para fundir el tubo?

Solución: El diámetro interior del molde D = DE del fundido es de 25 cm = 0.25 m. Con la ecuación (11.5) se calcula la velocidad rotacional requerida, como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2(9.8)(26)}{0.25}} = \mathbf{681.7\ rev / min.}$$

En la ***fundición centrífuga vertical***, el efecto de la gravedad sobre el metal líquido ocasiona que la pared del fundido sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la pared del fundido adopta una forma parabólica. La diferencia de los radios interiores en las partes superior e inferior está relacionada con la velocidad de rotación, del modo siguiente:

$$N = \frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{2gL}{R_t^2 - R_b^2}} \tag{11.6}$$

donde L es la longitud vertical del fundido, m (ft); R_t es el radio interior en la parte superior del fundido, m (ft); y R_b es el radio interior en la parte inferior del fundido, m (ft). La ecuación (11.6) se utiliza para determinar la velocidad rotacional requerida para la fundición centrífuga vertical, dadas las especificaciones para los radios interiores superior e inferior. En la fórmula se observa que para R_t igual a R_b, la velocidad de rotación N tendría que ser infinita, lo que es imposible, por supuesto. Como algo práctico, las longitudes de las piezas que se fabrican con fundición centrífuga vertical por lo general no son más del doble que sus diámetros. Esto es muy satisfactorio para rodamientos y otros elementos que tienen diámetros grandes en relación con sus longitudes, en especial si va a emplearse maquinado para dar la medida exacta al diámetro interior.

Los fundidos hechos con fundición centrífuga real se caracterizan por su densidad elevada, en especial en las regiones exteriores de la pieza, donde F es máxima. La contracción por la solidificación en el exterior del tubo fundido no es un factor, porque la fuerza centrífuga distribuye continuamente metal derretido en dirección de la pared del molde durante la solidificación. Cualesquiera impurezas del fundido tienden a estar en la pared interna y de ser necesario se eliminan con maquinado.

Fundición semicentrífuga Con este método, se emplea la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas, como se aprecia en la figura 11.16, en vez de piezas tubulares. La

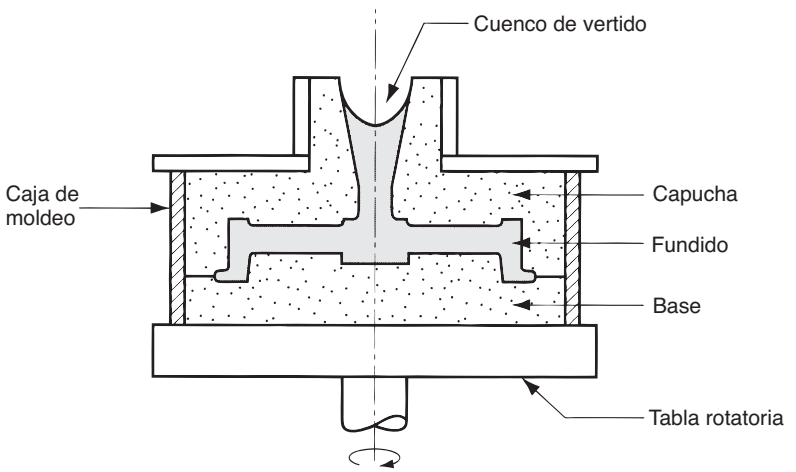


FIGURA 11.16 Fundición semicentrífuga

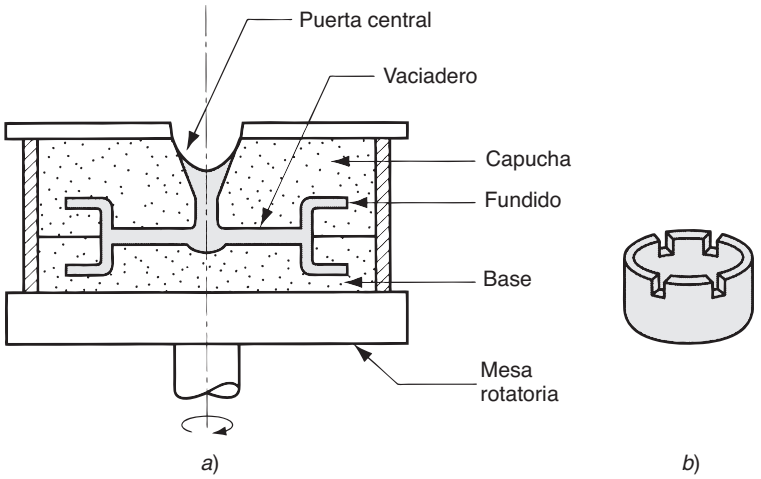


FIGURA 11.17 *a*) Fundición centrífugada, la fuerza centrífuga ocasiona que el metal fluya a las cavidades del molde, a partir del eje de rotación y *b*) el fundido.

velocidad de rotación en la fundición semicentrífuga, por lo general se establece de modo que se obtengan factores G de alrededor de 15 [2], y los moldes se diseñan con mazarotas en el centro a fin de suministrar metal. La densidad del metal en el fundido final es mayor en las secciones exteriores que en el centro de la rotación. El proceso se emplea con frecuencia para piezas en las que el centro de la fundición se maquina, lo que elimina la porción donde la calidad es más baja. Ejemplos de fundidos elaborados con este proceso son las ruedas y las poleas. Para la fundición semicentrífuga es frecuente emplear moldes desechables, como lo sugiere la ilustración del proceso.

Fundición centrífugada En la fundición centrífugada, véase la figura 11.17, el molde está diseñado con las cavidades de la pieza localizada hacia afuera del eje de rotación, de modo que el metal vertido en el molde se distribuya hacia ellas por medio de la fuerza centrífuga. El proceso se emplea para piezas pequeñas y no es un requerimiento la simetría radial de la pieza, como sí lo es para los otros dos métodos de fundición centrífuga.

11.4 LA PRÁCTICA DE LA FUNDICIÓN

En todos los procesos de fundido, debe calentarse el metal hasta alcanzar el estado líquido para verterlo o forzarlo de algún modo a que pase al molde. El calentamiento y la fusión se llevan a cabo en un horno. Esta sección se ocupa de los diversos tipos de hornos que se emplean en las fundidoras, así como de las prácticas de vertido para llevar el metal derretido del horno al molde.

11.4.1 Hornos

Los tipos de hornos más comunes que se emplean en las fundidoras son: 1) cubilotes, 2) hornos de combustible directo, 3) crisoles, 4) hornos de arco eléctrico y 5) hornos de inducción. La selección del tipo más apropiado de horno depende de factores tales como: aleación por fundir; sus temperaturas de fusión y vertido; requerimientos de capacidad del horno; costos de la inversión, la operación y el mantenimiento; y las consideraciones sobre contaminación ambiental.

Cubilotes Un cubilote es un horno cilíndrico vertical equipado con un canal de paso (o bebedero de sangrado) cerca de su base. Los cubilotes sólo se usan para hierros colados, y aunque también se emplean otros hornos, el mayor peso en toneladas de hierro colado se obtiene en cubilotes. En la figura 11.18 se ilustra la construcción general y características

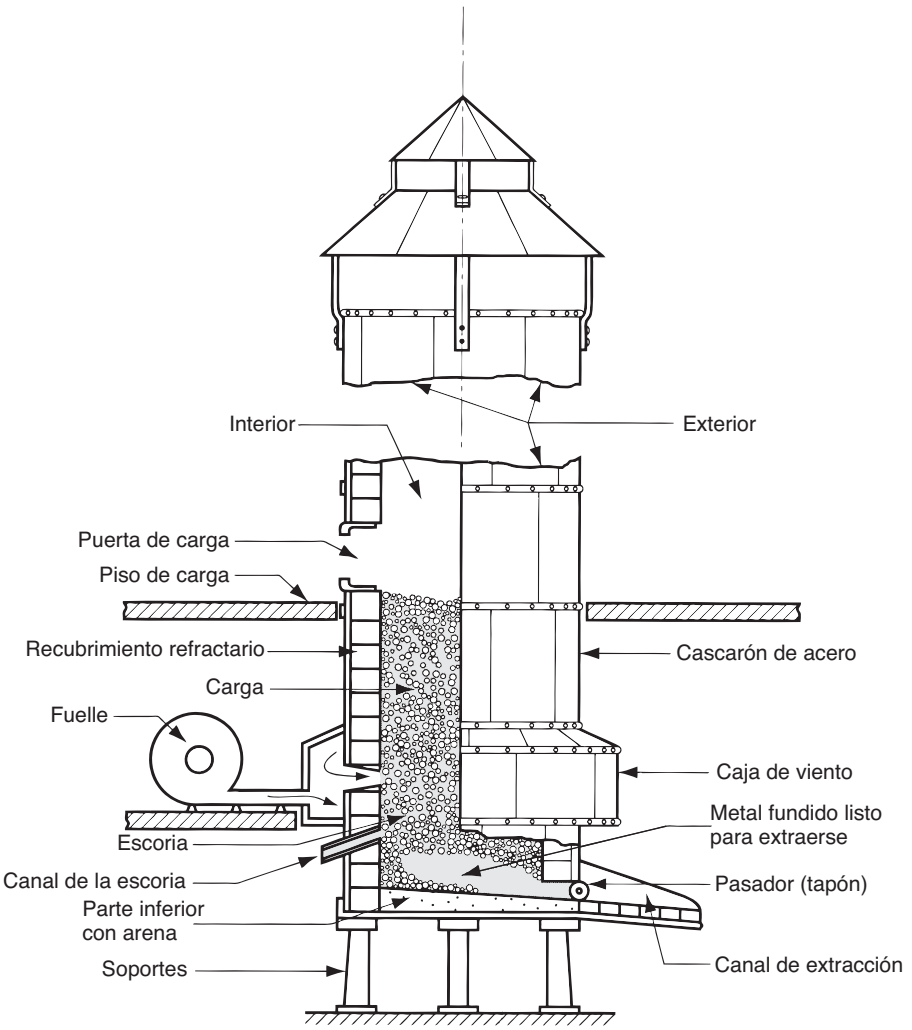


FIGURA 11.18 Cubilote que se usa para obtener hierro colado. El horno que se muestra es común para una fundidora pequeña y se omiten los detalles del sistema de control de emisiones que se requiere para un cubilote moderno.

de operación. Consiste en un cascarón grande de placa de acero recubierta con material refractario. La "carga" consiste en hierro, coque, fundente y tal vez elementos de aleación, y se introduce a través de una puerta que se localiza a menos de la mitad de la altura del cubilote. Por lo general, el hierro es una mezcla del tipo de primera fundición (arrabio) y chatarra (incluidos mazarotas, vaciaderos y bebederos solidificados, procedentes de fundidos anteriores). El coque es el combustible que se usa para calentar el horno. Se introduce aire forzado a través de las aberturas cerca de la base del cascarón para la combustión del coque. El fundente es un compuesto básico como la caliza, que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas para formar la escoria. Ésta sirve para cubrir el fundido, e impide que reaccione con el ambiente dentro del cubilote, y también reduce la pérdida de calor. Conforme la mezcla se calienta y ocurre la fundición del hierro, se desaloja periódicamente el horno para verter metal líquido.

Hornos de combustible directo Un horno de combustible directo contiene un hogar abierto pequeño en el que se calienta la carga de metal por medio de quemadores de combustible ubicados en uno de sus lados. El techo del horno ayuda a la acción de calentar por medio de reflejar la flama hacia abajo contra la carga. El combustible común es gas natural, y los productos de la combustión salen del horno a través de un cañón. En la parte inferior del hogar hay un agujero de salida para extraer el metal fundido. Los hornos de combustible directo por lo general se emplean en el fundido de metales no ferrosos tales como aleaciones a base de cobre y aluminio.

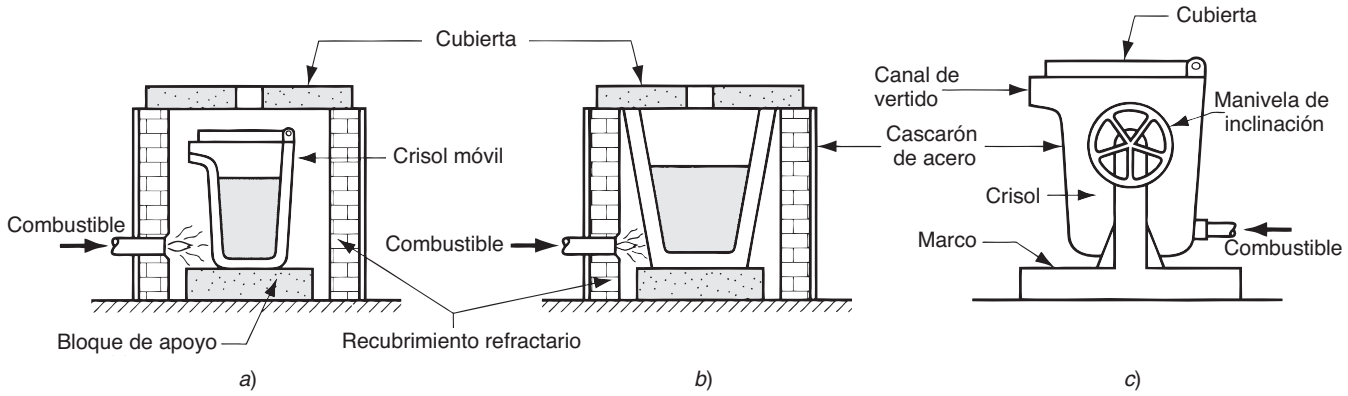


FIGURA 11.19 Tres tipos de crisoles: *a*) crisol móvil, *b*) crisol estacionario y *c*) crisol de volteo.

Crisoles Estos hornos funden el metal sin que tenga contacto directo con una mezcla combustible. Por esta razón, en ocasiones se les llama ***hornos de combustible indirecto***. En las fundidoras se utilizan tres tipos de crisoles: *a*) móvil, *b*) estacionario y *c*) de volteo, los cuales se ilustran en la figura 11.19. Todos emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (por ejemplo, una mezcla de arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura, para contener la carga. En el ***crisol móvil***, éste se coloca en un horno y se calienta lo suficiente para derretir la carga de metal. Los combustibles comunes para estos hornos son petróleo, gas o carbón en polvo. Cuando el metal se derrite, el crisol se eleva fuera del horno y se usa como cuenco de vertido. Los otros dos tipos, que en ocasiones reciben el nombre de ***hornos de vasija***, tienen el horno para calentar y el contenedor como unidad integrada. En el ***horno de crisol estacionario***, el horno es estacionario y el metal fundido se extrae del contenedor con un cucharón. En el ***horno de crisol de volteo***, todo el conjunto se inclina para hacer el vertido. Los crisoles se emplean para metales no ferrosos tales como bronce, latón y aleaciones de zinc y aluminio. Las capacidades de los hornos por lo general están limitadas a varios cientos de libras.

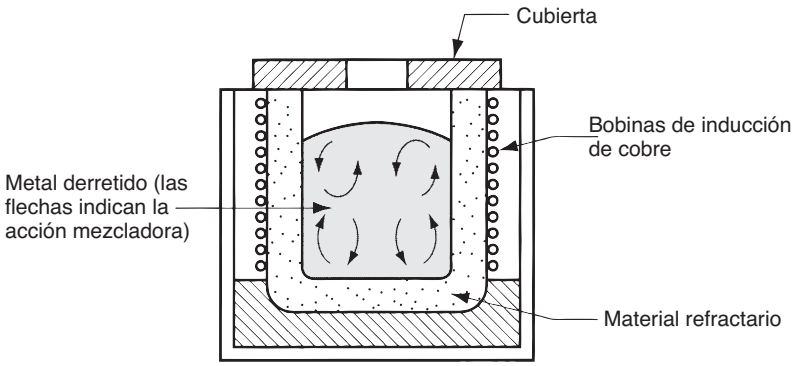
Hornos de arco eléctrico En este tipo de horno, la carga se funde debido al calor generado por un arco eléctrico. Existen varias configuraciones, con dos o tres electrodos (véase la figura 6.9). El consumo de energía es alto, pero los hornos eléctricos se diseñan para que tengan capacidad alta de fundición (23 000 a 45 000 kg/h, o 25 a 50 ton/h), y se usan sobre todo para fundir acero.

Hornos de inducción Un horno de inducción emplea corriente alterna que pasa a través de una bobina para desarrollar un campo magnético en el metal, y la corriente inducida que resulta ocasiona el calentamiento rápido y la fundición del metal. En la figura 11.20 se ilustran las características de un horno de inducción para las operaciones de fundición. El campo de fuerza electromagnética hace que ocurra una acción mezcladora en el metal líquido. Asimismo, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente en que tiene lugar se puede controlar de cerca. Todo esto da como resultado metales fundidos de calidad y pureza altas, y los hornos de inducción se emplean para casi cualquier aleación cuando esos requerimientos son importantes. En el trabajo de fundición son comunes las aplicaciones de fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio.

11.4.2 Vertido, limpieza y tratamiento térmico

En ocasiones se lleva el metal derretido del horno de fundición al molde por medio de crisoles. Con más frecuencia, la transferencia se lleva a cabo por medio de ***cuencos*** de varias

FIGURA 11.20 Horno de inducción.



clases. Estos cuencos reciben el metal del horno y permiten que se vierta de manera conveniente en los moldes. En la figura 11.21 se ilustran dos cuencos comunes, uno es para manejar volúmenes grandes de metal derretido por medio de una grúa elevada y el otro es un "cuenco para dos hombres", para moverlo en forma manual y verter cantidades pequeñas.

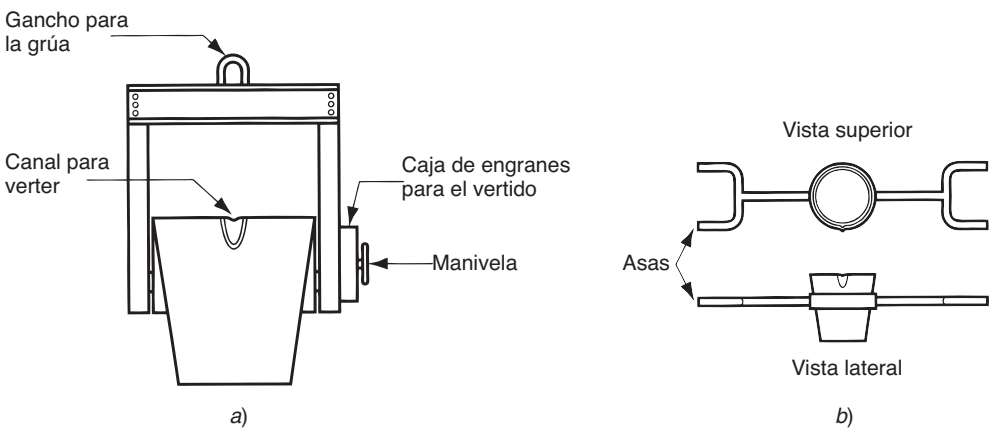
Uno de los problemas del vertido es que podría introducirse metal fundido oxidado al molde. Los óxidos de metal reducen la calidad del producto y quizás hagan que el fundido sea defectuoso, por lo que se toman medidas para minimizar la entrada de estos óxidos en el molde durante el vertido. En ocasiones se emplean filtros para capturar los óxidos y otras impurezas conforme se vierte el metal desde el canal, y se emplean fundentes para cubrir el metal derretido a fin de retardar la oxidación. Además, se han creado cuencos para verter el metal líquido desde el fondo, ya que los óxidos se acumulan en la superficie de arriba.

Después de que el fundido se ha solidificado y retirado del molde, por lo general se requiere cierto número de etapas adicionales. Estas operaciones incluyen 1) recortar, 2) retirar el núcleo, 3) limpiar las superficies, 4) inspeccionar, 5) reparar, si se requiriera, y 6) dar tratamiento térmico. En las fundidoras, se conoce al conjunto de las etapas 1 a 5 como "limpieza". El grado en que se requieren estas operaciones adicionales varía según los procesos de fundido y los metales. Cuando se necesitan, por lo general son intensivas en mano de obra y costosas.

El ***recorte*** involucra la remoción de los bebederos, vaciaderos, mazarotas, rebabas en la línea de separación, coronas y cualquier exceso de metal de la pieza fundida. En el caso de aleaciones fundidas frágiles y cuando las secciones transversales sean relativamente pequeñas, es posible romper estos apéndices del fundido. De otro modo, hay que martillar, cortar, cortar con sierra, esmerilar o usar varios métodos de corte con soplete.

Si se usan núcleos para fundir la pieza , hay que retirarlos. La mayor parte de núcleos están unidos por medio químico o con arena y aceite, y es frecuente que caigan del fundido

FIGURA 11.21 Dos tipos comunes de cuencos: *a*) cuento de grúa y *b*) cuenco para dos hombres.



si el aglutinante se deteriora. En ciertos casos se retiran por medio del golpeo al fundido, ya sea en forma manual o mecánica. En instancias raras los núcleos se retiran en forma química con la disolución del agente aglutinante que se usó en el núcleo de arena. Los núcleos sólidos deben martillarse o presionarse.

La limpieza de las superficies es lo más importante en el caso de la fundición con arena. En muchos de los otros métodos de fundición, en especial en los procesos con molde permanente, puede evitarse este paso. La ***limpieza de las superficies*** involucra la remoción de la arena de la superficie del fundido y otras maneras de mejorar su apariencia. Los métodos que se usan para limpiar superficies incluyen la agitación, el soplo de aire con granos de arena gruesa o balines de metal, uso de cepillos de alambre, pulido y limpieza con baño químico (véase el capítulo 28).

Es posible que el fundido tenga defectos, por lo que se necesita inspección para detectar su presencia. En la sección siguiente se estudian esos temas de la calidad.

Es frecuente que los fundidos reciban tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades, ya sea con operaciones subsecuentes tales como maquinar o resaltar las propiedades que se desean para la aplicación de la pieza en el servicio.

11.5 CALIDAD DEL FUNDIDO

Hay muchas formas de que las cosas salgan mal en una operación de fundición, lo que da como resultado defectos de calidad del producto. En esta sección se recopila una lista de los defectos comunes que ocurren durante el fundido y se indican los procedimientos de inspección para detectarlos.

Defectos de fundición Algunos defectos son comunes a todos los procesos de fundición; se ilustran en la figura 11.22 y se describen brevemente a continuación:

a) ***Vacíos*** son fundidos que se solidifican antes de llenar por completo la cavidad del molde. Las causas comunes incluyen: 1) insuficiente fluidez del metal derretido, 2) temperatura de vertido muy baja, 3) vertido muy despacio y 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

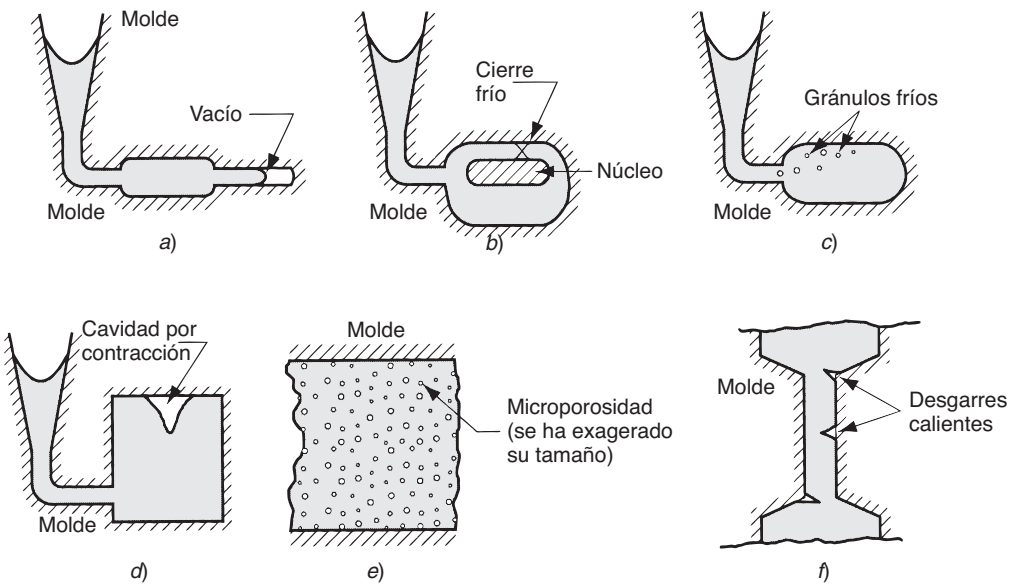


FIGURA 11.22 Algunos defectos comunes de los fundidos: *a*) vacíos, *b*) cierre frío, *c*) gránulos fríos, *d*) cavidad por contracción *e*) microporosidad y *f*) desgarre caliente.

b) ***Cierres fríos*** ocurren cuando dos porciones del metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura. Sus causas son similares a las de los vacíos.

c) ***Gránulos fríos*** resultan de las salpicaduras durante el vertido, lo que ocasiona la formación de glóbulos sólidos de metal que quedan atrapados en el fundido. Este defecto puede evitarse con procedimientos de vertido y diseños del sistema de paso que eviten las salpicaduras.

d) ***Cavidad de fuga*** es una depresión en la superficie o un vacío interno en el fundido, ocasionado por fugas en la solidificación que restringen la cantidad de metal derretido disponible en la última región que se solidifica. Es frecuente que ocurra cerca de la parte superior del fundido, en cuyo caso se conoce como "rechupe" [véase la figura 10.8(3)]. Con frecuencia, el problema se resuelve con el diseño apropiado de la mazarota.

e) ***Microporosidad*** consiste en una red de vacíos pequeños distribuidos en el fundido, ocasionados por la falta de solidificación localizada del metal derretido final en la estructura dendrítica. Este defecto se asocia por lo general con aleaciones, debido a la manera fraccionada en que ocurre la solidificación en esos metales.

f) ***Desgarre caliente*** también llamado ***agrietamiento caliente***, ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación, o en las primeras del enfriamiento después de solidificarse. El defecto se manifiesta como la separación del metal (de ahí los términos ***desgarre*** y ***agrietamiento***) en un punto de esfuerzo grande a la tensión ocasionado por la incapacidad del metal de contraerse en forma natural. En la fundición con arena y otros procesos con moldes desechables, se evita haciendo que el molde sea colapsable. En los procesos con molde permanente, el desgarre caliente disminuye si se retira la pieza del molde inmediatamente después de la solidificación.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena, y por ello ocurren sólo en los fundidos con arena. En menor grado, otros procesos con moldes desechables también son susceptibles de provocar estos problemas. En la figura 11.23 se ilustran los defectos que ocurren sobre todo en la fundición con arena, y se describen en seguida:

a) ***Sopladura*** es un defecto que consiste en una cavidad de gas en forma de globo, ocasionada por la liberación de gases del molde durante el vertido. Ocurre en o cerca de la

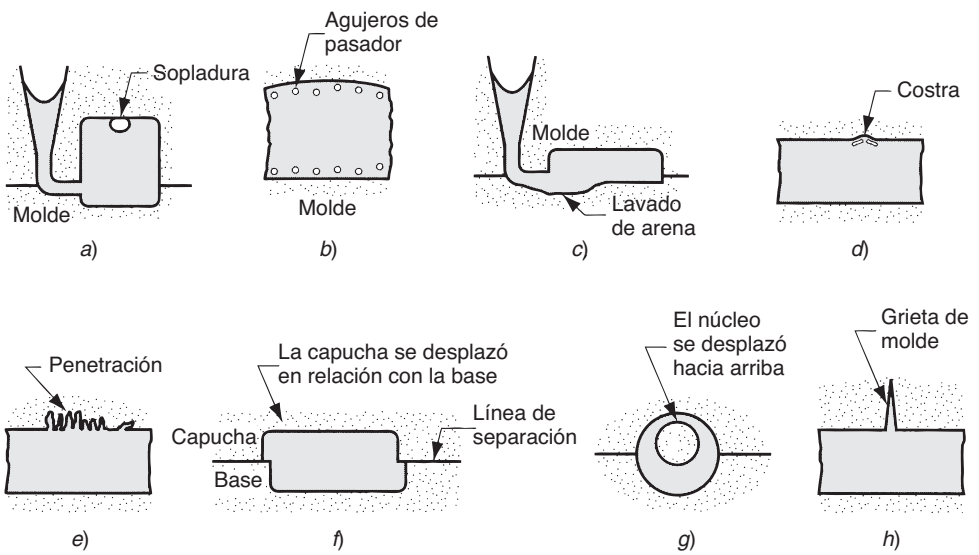


FIGURA 11.23 Defectos comunes en los fundidos con arena: *a*) sopladura, *b*) agujeros de pasador, *c*) lavado de arena, *d*) costras, *e*) penetración, *f*) desplazamiento del molde, *g*) desplazamiento del núcleo y *h*) agrietamiento del molde.

superficie del fundido, cerca de la parte superior de éste. Las causas habituales son baja permeabilidad, mala ventilación y contenido de humedad alto del molde de arena.

b) ***Agujeros de pasador*** también los ocasiona la liberación de gases durante el vertido y consisten en muchas cavidades pequeñas por gases formadas en o ligeramente debajo de la superficie del fundido.

c) ***Lavado de arena*** es una irregularidad en la superficie del fundido que se genera por la erosión del molde de arena durante el vertido; el contorno de la erosión se forma en la superficie de la pieza fundida final.

d) ***Costras*** son áreas rugosas en la superficie del fundido debido a incrustaciones de arena y metal. Las ocasionan porciones de la superficie del molde que se desprenden durante la solidificación y quedan incrustadas en la superficie del fundido.

e) ***Penetración*** se refiere a un defecto de la superficie que ocurre cuando la fluidez del metal líquido es alta y penetra en el molde de arena o núcleo de arena. Una vez solidificado, la superficie del fundido consiste en una mezcla de granos de arena y metal. La compactación estrecha del molde de arena ayuda a disminuir esta condición.

f) ***Desplazamiento del molde*** se refiere a un defecto ocasionado por el movimiento lateral de la capucha del molde en relación con la base, lo que da por resultado un escalón en el producto fundido, en la línea de separación.

g) ***Desplazamiento del núcleo*** es similar al del molde, pero es el núcleo el que se mueve, y por lo general su desplazamiento es vertical. El desplazamiento del núcleo y molde es ocasionado por la flotación del metal fundido (véase la sección 11.1.3).

h) ***Agrietamiento del molde*** ocurre cuando la resistencia del molde es insuficiente y se presenta una grieta, en la que entra metal líquido y forma una "rebaba" en el fundido final.

Métodos de inspección Los procedimientos de inspección en una fundidora incluyen los siguientes: 1) inspección visual para detectar defectos obvios tales como vacíos, cierres fríos y defectos superficiales severos; 2) mediciones dimensionales para garantizar que se cumple con las tolerancias, y 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y de otro tipo, relacionadas con la calidad inherente del metal que se funde [5]. Las pruebas de la categoría 3 incluyen: *a*) pruebas de presión, para localizar fugas en el fundido; *b*) métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de penetradores fluorescentes y pruebas supersónicas, para detectar defectos superficiales o internos en el fundido; y *c*) pruebas mecánicas para determinar propiedades tales como resistencia a la tensión y dureza. Si los defectos que se descubren no son demasiado serios, con frecuencia es posible salvar el fundido por medio de soldadura, esmerilado u otros métodos de rescate con los que el cliente esté de acuerdo.

11.6 LOS METALES PARA FUNDICIÓN

La mayoría de fundidos comerciales están hechos con aleaciones y no con metales puros. Por lo general, las aleaciones son más fáciles de fundir y las propiedades del producto resultante son mejores. Las aleaciones de fundición se clasifican así: 1) ferrosas o 2) no ferrosas. La categoría de las ferrosas se subdivide en hierro colado y acero fundido.

Aleaciones ferrosas de fundición: hierro colado El hierro fundido es el más importante de todas las aleaciones para fundición (véase la nota histórica: 11.3). El peso en toneladas de las fundiciones hechas con hierro es varias veces el de todos los demás metales combinados. Hay varios tipos de hierro colado: 1) hierro colado gris, 2) hierro nodular, 3) hierro colado blanco, 4) hierro maleable y 5) hierros colados de aleación (véase la sección 6.2.4). Las temperaturas comunes de vertido para el hierro colado son alrededor de 1 400 ºC (2 500 ºF), lo que depende de su composición.

Nota histórica 11.3 *Primeros productos de hierro fundido.*

Durante los primeros siglos que se practicó la fundición, se prefería al bronce y al latón por sobre el hierro como metales para fundir. El hierro era más difícil de fundir, debido a sus temperaturas de fusión más elevadas y a la falta de conocimiento de su metalurgia. Asimismo, había poca demanda de productos de hierro fundido. Todo esto cambió al comenzar los siglos XVI y XVII.

El arte de fundir con arena al hierro llegó a Europa procedente de China, donde se fundía en moldes de arena hacía más de 2 500 años. En 1550, se fundieron en Europa los primeros cañones de hierro. Las balas para estas armas se fabricaron de hierro colado alrededor de 1568. Las armas y sus proyectiles crearon una demanda grande de hierro colado. Pero estos artículos eran para uso militar, no civil. Dos productos de hierro colado que fueron significativos para el público general fueron la estufa y el tubo de agua.

Un producto tan poco espectacular como pueda parecer hoy, la estufa de hierro colado, trajo confort, salud y mejora de las condiciones de vida para mucha gente en Europa y el continente americano. Durante el siglo XVIII, la manufactura de estufas de hierro colado era una de las industrias más grandes y rentables en ambos continentes. El éxito comercial de la fabricación de estufas se debió a la gran demanda del producto, y al arte y tecnología de la fundición de hierro que se habían desarrollado para producirlo.

El tubo de agua de hierro colado fue otro producto que disparó el crecimiento de esa industria. Hasta el advenimiento de los tubos de hierro colado, se habían probado diferentes métodos para llevar agua en forma directa a los hogares y talleres. Incluso tubos de madera huecos (que se rompían rápido), de plomo (demasiado caros) y trincheras abiertas (susceptibles de contaminarse). El desarrollo del proceso de fundir hierro proveyó la capacidad de fabricar secciones de tubo para agua a un costo relativamente bajo, en Francia, al comenzar 1664, y después en otras partes de Europa. Al iniciar el siglo XIX, en Inglaterra se instalaban muchas líneas de tubo de hierro colado para conducir agua y gas. La primera instalación significativa de tubos de agua en Estados Unidos ocurrió en Filadelfia, en 1817, con el empleo de tubería importada de Inglaterra.

Aleaciones ferrosas de fundición: acero Las propiedades mecánicas del acero lo hacen un material atractivo para la ingeniería (véase la sección 6.2.3), y la capacidad de crear formas complejas hace que la fundición sea un proceso llamativo. Sin embargo, las fundidoras que se especializan en acero enfrentan dificultades grandes. En primer lugar, el punto de fusión del acero es considerablemente más alto que el de la mayoría de metales que es común fundir. El rango de solidificación para aceros al bajo carbono (véase la figura 6.4) comienza apenas por debajo de 1 540 °C (2 800 °F). Esto significa que la temperatura que se requiere para verter acero es muy alta, cerca de 1 650 °C (3 000 °F). A esas temperaturas tan elevadas el acero tiene una química muy reactiva. Se oxida con rapidez, por lo que deben emplearse procedimientos especiales durante la fundición y vertido a fin de aislar al metal derretido del aire. Asimismo, el acero fundido tiene relativamente poca fluidez, y esto limita el diseño de secciones delgadas en componentes fundidos de acero.

Son varias las características de los fundidos de acero que hacen benéfico el esfuerzo de resolver estos problemas. La resistencia a la tensión es mayor que la de la mayoría de metales para fundición, y es de 410 MPa (60 000 lb/in^2), aproximadamente [7]. Los fundidos de acero tienen mejor tenacidad que la mayor parte de otras aleaciones fundidas. Las propiedades de los fundidos de acero son isotrópicas; su resistencia es virtualmente la misma en todas direcciones. Por el contrario, las piezas conformadas mecánicamente (por ejemplo, rolado, forjado) presentan propiedades que varían con la dirección. En función de los requerimientos del producto, puede ser deseable que el comportamiento de un material sea isotrópico. Otra ventaja de los fundidos de acero es la facilidad con que se sueldan. Se sueldan sin que haya pérdida significativa de su resistencia, para reparar el fundido o para fabricar estructuras con otros componentes de acero.

Aleaciones no ferrosas de fundición Los metales no ferrosos para fundición incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, zinc, níquel y titanio (véase la sección 6.3). Las ***aleaciones de aluminio*** por lo general se consideran muy susceptibles de fundirse. El punto de fusión del aluminio puro es de 660 °C (1 220 °F), por lo que las temperaturas de vertido de las aleaciones fundidas de aluminio son bajas en comparación con el hierro colado y el acero. Sus propiedades las hacen atractivas para los fundidos: poco peso, rango amplio de propiedades de resistencia que se logran por medio de tratamiento térmico y facilidad de maquinado. Las ***aleaciones de magnesio*** son las más ligeras de todos los

metales para fundición. Otras propiedades incluyen resistencia a la corrosión, así como buenas resistencias a peso y rigidez a peso.

Las ***aleaciones de cobre*** incluyen bronce, latón y aluminio-bronce. Las propiedades que los hacen atractivos son la resistencia a la corrosión, apariencia atractiva y buenas cualidades para servir como boquillas. El costo elevado del cobre es una limitación en el uso de sus aleaciones. Las aplicaciones incluyen juntas para tubos, aspas de propelas marinas, componentes de bombas y joyería.

El estaño tiene el punto de fusión más bajo de los metales para fundición. Las ***aleaciones basadas en estaño*** por lo general son fáciles de fundir. Tiene buena resistencia a la corrosión pero mala resistencia mecánica, lo que limita sus aplicaciones a jarras de peltre y productos similares que no requieren mucha resistencia. Las ***aleaciones de zinc*** se emplean comúnmente en la fundición con troquel. El zinc tiene un punto de fusión bajo y buena fluidez, lo que lo hace muy susceptible de ser fundido. Su principal desventaja es que tiene poca resistencia al agrietamiento, por lo que sus fundidos no pueden sujetarse a esfuerzos grandes prolongados.

Las ***aleaciones de níquel*** tienen buena resistencia al calor y a la corrosión, lo que las hace apropiadas para aplicaciones de temperaturas altas tales como motores a chorro y componentes de cohetes, escudos de calor y otros productos similares. Las aleaciones de níquel también tienen un punto de fusión alto y no son fáciles de fundir. Las ***aleaciones de titanio*** para fundición son resistentes a la corrosión y poseen razones elevadas de resistencia a peso. Sin embargo, el titanio tiene un punto de fusión alto, poca fluidez y propensión a oxidarse a temperaturas elevadas. Estas propiedades hacen difícil fundirlo, a él y a sus aleaciones.

11.7 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Si el diseñador del producto elige a la fundición como el proceso de manufactura principal de cierto componente, entonces deben seguirse ciertos lineamientos para facilitar la producción de la pieza y evitar muchos de los defectos que se enumeran en la sección 11.5. A continuación se presentan algunos de los lineamientos importantes y consideraciones para la fundición.

- ***Sencillez geométrica.*** Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir piezas de forma compleja, la simplificación del diseño de ésta mejorará su facilidad para fundirse. Evitar complejidades innecesarias simplifica la fabricación del molde, reduce la necesidad de núcleos y mejora la resistencia del fundido.
- ***Esquinas.*** Deben evitarse las esquinas y ángulos agudos, porque son fuentes de concentración de esfuerzos y ocasionan agrietamientos calientes y fisuras en el fundido. Deben diseñarse biseles generosos para las esquinas internas, y las aristas agudas deben suavizarse.
- ***Espesores de sección.*** Los espesores de la sección deben ser uniformes a fin de evitar cavidades por fugas. Las secciones gruesas crean ***puntos calientes*** en el fundido, debido a que un volumen mayor requiere más tiempo para solidificarse y enfriarse. Éstas son ubicaciones probables de las cavidades por fuga. La figura 11.24 ilustra el problema y ofrece algunas soluciones posibles.
- ***Inclinación.*** Las secciones de la pieza que se proyectan en el interior del molde deben tener una inclinación o desviación, como se define en la figura 11.25. En la fundición con moldes desechables, el propósito de esa inclinación es ayudar a extraer del molde la pieza. Debe permitirse desviaciones similares si se emplean núcleos sólidos en el

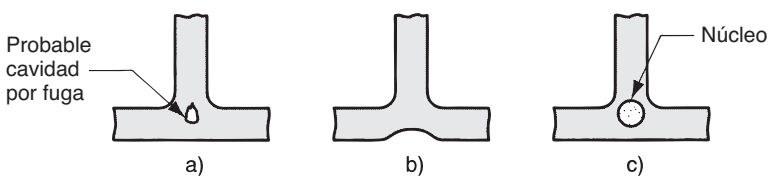


FIGURA 11.24 *a*) Una sección gruesa en la intersección puede dar como resultado una cavidad por fuga. Las soluciones incluyen *b*) el rediseño para disminuir el espesor y *c*) usar un núcleo.

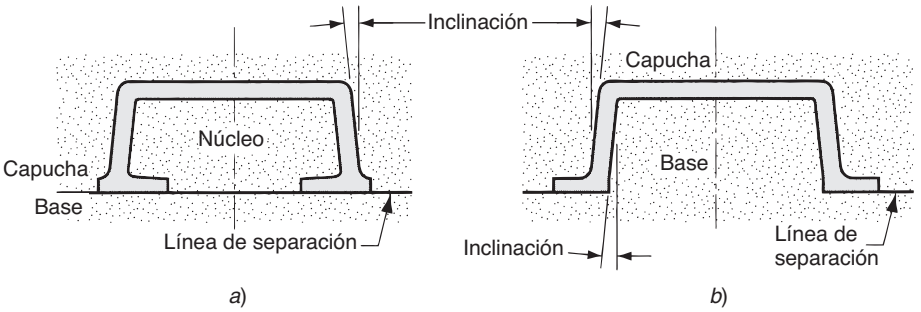


FIGURA 11.25 Cambio del diseño para eliminar la necesidad de utilizar un núcleo; *a*) diseño original y *b*) rediseño.

proceso de fundido. Para la fundición con moldes de arena la inclinación que se requiere necesita ser de sólo 1º, y de 2º a 3º para procesos con moldes permanentes.

- ***Uso de núcleos.*** Ciertos cambios pequeños en el diseño de la pieza reducen la necesidad de utilizar núcleos, como se ilustra en la figura 11.25.
- ***Tolerancias dimensionales.*** Hay diferencias significativas en la exactitud dimensional que puede alcanzarse en los fundidos, lo que depende del proceso que se utilice. En la tabla 11.2 se presenta una recopilación de tolerancias comunes para piezas con diferentes procesos y metales de fundición.
- ***Acabado de las superficies.*** La rugosidad superficial común que se logra en la fundición con arena es de alrededor de 6 μm (250 μ-in). De manera similar, con los moldes de cascarón se obtiene malos acabados, en tanto que los moldes de yeso y la fundición por revestimiento producen valores mucho mejores de rugosidad: 0.75 μm (30 μ-in). Entre los procesos con molde permanente es notable la fundición con troquel debido a los buenos acabados de superficie que produce, alrededor de 1 μm (40 μ-in).
- ***Tolerancias de maquinado.*** En muchos procesos de fundición las tolerancias que pueden alcanzarse son insuficientes para satisfacer las necesidades de funcionamiento en muchas aplicaciones. La fundición con arena es el ejemplo más notable de esta deficiencia. En estos casos, deben maquinarse piezas del fundido para darles las dimensiones requeridas. Casi todos los fundidos con arena deben maquinarse hasta cierto grado a fin de que la pieza sea funcional. Por tanto, en ésta se deja material adicional, llamado ***tolerancia de maquinado***, para maquinar esas superficies donde sea necesario. Las tolerancias comunes de maquinado para fundidos con arena varían entre 1.5 mm y 3 mm (1/16 in y ¼ in).

TABLA 11.2. Tolerancias dimensionales comunes para los diferentes procesos de fundición y metales.

Proceso de fundido	Tamaño de la pieza	Tolerancia mm	Tolerancia in
Fundición con arena			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.5	± 0.020
Hierro colado	Pequeño	± 1.0	± 0.040
	Grande	± 1.5	± 0.060
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015
Acero	Pequeño	± 1.3	± 0.050
	Grande	± 2.0	± 0.080
Moldes en cascarón			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.25	± 0.010
Hierro colado	Pequeño	± 0.5	± 0.020
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015
Acero	Pequeño	± 0.8	± 0.030
Molde de yeso	Pequeño	± 0.12	± 0.005
	Grande	± 0.4	± 0.015
Molde permanente			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.25	± 0.010
Hierro colado	Pequeño	± 0.8	± 0.030
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.4	± 0.015
Acero	Pequeño	± 0.5	± 0.020
Fundición con troquel			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Revestimiento			
Aluminio[a]	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Hierro colado	Pequeño	± 0.25	± 0.010
Aleaciones de cobre	Pequeño	± 0.12	± 0.005
Acero	Pequeño	± 0.25	± 0.010

Recopilada de las referencias [5], [12] y otras.

[a] Los valores para el aluminio también se aplican para el magnesio.

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L. ***Manufacturing Processes.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.

[2] Beeley, P. R. ***Foundry Technology.*** Newnes-Butterworths, Londres, 1972.

[3] Datsko, J. ***Material Properties and Manufacturing Processes.*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.

[4] Flinn, R. A. ***Fundamentals of Metal Casting.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaine, Ill., 1987.

[5] Heine, R. W., Loper, Jr., C R. y Rosenthal, C. ***Principles of Metal Casting.*** 2a. ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1967.

[6] Kotzin, E. L., ***Metalcasting & Molding Processes.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1981.

[7] ***Metals Handbook.*** 9a. ed., vol. 15: ***Casting.*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.

[8] Mikelonis, P. J. (ed.). ***Foundry Technology.*** American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.

[9] Mueller, B. "Investment Casting Trends," ***Advanced Materials & Processes,*** marzo de 2005, pp. 30-32.

[10] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A. ***Modern Manufacturing Processes Engineering.*** McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.

[11] Simpson, B. L. ***History of the Metalcasting Industry.*** American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1997.

[12] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed. Vol. II: ***Forming.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984, Ch. 16.

PREGUNTAS DE REPASO

11.1. Mencione las dos categorías básicas de los procesos de fundición.

11.2. Existen varios tipos de modelos que se usan en el moldeo con arena. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo deslizante y otro de placa ajustada?

11.3. ¿Qué es una corona?

11.4. ¿Qué propiedades determinan la calidad de un molde con arena para la fundición con ésta?

11.5. ¿Cuál es el proceso de Antioquia?

11.6. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición con un molde permanente al vacío y el moldeo al vacío?

11.7. ¿Cuáles son los metales más comunes que se emplean en la fundición con troquel?

11.8. ¿Cuáles máquinas de fundición con troquel tienen por lo general una tasa de producción más elevada, las de cámara fría o las de cámara caliente, y por qué?

11.9. ¿Qué es la rebaba, en la fundición con troquel?

11.10. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición centrífuga real y la semicentrífuga?

11.11. ¿Qué es una cubilote?

11.12. ¿Cuáles son algunas de las operaciones que se requieren en la fundición con arena, después de que el fundido se retira del molde?

11.13. ¿Cuáles son algunos de los defectos generales que se encuentran en los procesos de fundición? Mencione y describa tres, en forma breve.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 27 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

11.1. ¿Cuál de los procesos de fundición siguientes es el que se usa más?: *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) fundición por revestimiento, *d*) fundición con arena o *e*) fundición en cascarón.

11.2. En la fundición con arena, ¿el tamaño volumétrico del modelo es *a*) mayor que, *b*) del mismo tamaño que o *c*) más pequeño que, la pieza fundida?

11.3. ¿Cuál de las siguientes composiciones tiene la arena de sílice?: *a*) Al_2O_3, *b*) SiO, *c*) SiO_2 o *d*) $SiSO_4$.

11.4. ¿Por cuál de las razones siguientes recibe su nombre un molde verde? *a*) el molde es de color verde, *b*) la humedad que contiene el molde, *c*) el molde está curado o *d*) el molde está seco.

11.5. Dado que W_m = peso del metal fundido desplazado por un núcleo, y W_c = peso del núcleo, cuál de las siguientes es la fuerza de flotación: *a*) fuerza hacia abajo = $W_m + W_c$, *b*) fuerza hacia abajo = $W_m - W_c$, *c*) fuerza hacia arriba = $W_m + W_c$, *d*) fuerza hacia arriba = $W_m - W_c$.

11.6. ¿Cuáles de los siguientes procesos de fundición son operaciones con moldes desechables? (hay cuatro respuestas correctas): *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) fundición por revestimiento, *d*) fundición a baja presión, *e*) fundición con arena, *f*) moldeo en cascarón, *g*) fundición en hueco y *h*) moldeo al vacío.

11.7. ¿Cuál de los siguientes describe mejor al moldeo en cascarón?: *a*) operación de fundición en la que el metal derretido

se vierte después de que se ha solidificado una concha delgada en el molde, *b*) proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado de arena aglutinada por una resina termofija, *c*) operación de fundición con arena en la que el modelo es un cascarón en vez de una forma sólida o *d*) operación de fundición que se emplea para fabricar conchas marinas artificiales.

11.8. ¿Con cuál de los nombres siguientes se conoce también a la fundición por revestimiento?: *a*) moldeo de recuperación rápida, *b*) proceso de molde completo, *c*) proceso de espuma perdida, *d*) proceso de modelo perdido o *e*) proceso de cera perdida.

11.9. En la fundición con moldes de yeso, ¿con cuál de los materiales siguientes está hecho el molde?: *a*) Al_2O_3, *b*) $CaSO_4$–H_2O, *c*) SiC, *d*) SiO_2.

11.10. ¿Cuál de los siguientes califica como un proceso de fundición de precisión? (dos respuestas correctas): *a*) fundición de lingote, *b*) fundición por revestimiento, *c*) fundición con molde de yeso, *d*) fundición en arena y *e*) moldeo en cascarón.

11.11. ¿Cuáles de los procesos de fundición siguientes son operaciones con molde permanente? (tres respuestas correctas): *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) proceso de poliestireno expandido, *d*) fundición con arena, *e*) moldeo con concha, *f*) fundición en hueco y *g*) moldeo al vacío.

11.12. ¿Cuál de los metales siguientes sería común emplear en la fundición con troquel? (tres respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero, *d*) estaño, *e*) tungsteno y *f*) zinc.

11.13. ¿Cuáles de las siguientes son ventajas que tiene la fundición con troquel sobre la fundición con arena? (cuatro respuestas mejores): *a*) mejor acabado de la superficie, *b*) tolerancias más estrechas, *c*) metales con temperatura de fusión más elevada, *d*) tasas de producción más altas, *e*) es posible fundir piezas más grandes y *f*) el molde puede volver a usarse.

11.14. ¿Los cubilotes son hornos que se emplean para fundir a cuál de los metales siguientes? (una respuesta es la mejor): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero o *d*) zinc.

11.15. ¿Cuál de los defectos siguientes de la fundición corresponde a un vacío, *a*) quedan atrapados en el fundido glóbulos de metal, *b*) el metal no se vierte en forma apropiada en el bebedero, *c*) el metal se solidifica antes de llenar la cavidad, *d*) microporosidad y *e*) formación de un "rechupe"?

11.16. ¿Cuál de los siguientes metales de fundición es el de mayor importancia comercial?: *a*) el aluminio y sus aleaciones, *b*) bronce, *c*) hierro colado, *d*) acero fundido o *e*) aleaciones de zinc.

PROBLEMAS

Fuerza de flotación

11.1. Un fundido de aleación de aluminio-cobre se fabrica con un molde de arena que emplea un núcleo de arena que pesa 20 kg. Determine la fuerza de flotación, en newtons, que tiende a elevar al núcleo durante el vertido.

11.2. Un núcleo de arena se localiza dentro de una cavidad de un molde que tiene un volumen de 157.0 in^3. Se emplea para fundir la carcasa de hierro de una bomba. Calcule la fuerza de flotación que tenderá a levantar al núcleo durante el vertido.

11.3. Se emplean comprimidos para dar apoyo a un núcleo de arena que está en la cavidad de un molde del mismo material. El diseño de los comprimidos y la manera en que se colocan en la superficie de la cavidad del molde permite que cada uno de ellos soporte una fuerza de 10 libras. Se colocan varios comprimidos debajo del núcleo para darle apoyo antes de verter; y varios se sitúan arriba de él para oponerse a la fuerza de flotación durante el vertido. Si el volumen del núcleo es de 325 in^3, y el metal que se vierte es latón, determine el número mínimo de comprimidos que debe colocarse *a*) abajo del núcleo, *b*) arriba del núcleo.

11.4. Un núcleo de arena que se usa para conformar las superficies internas de un fundido de acero experimenta una fuerza de flotación de 23 kg. El volumen de la cavidad del molde que forma la superficie exterior del fundido es de 5 000 cm^3. ¿Cuál es el peso del fundido final? Ignore las consideraciones acerca de las contracciones.

Fundición centrífuga

11.5. Una operación de fundición centrífuga real horizontal va a emplearse para fabricar tubería de cobre. Las longitudes serán de 1.5 m, con diámetro exterior de 15.0 cm y con diámetro interior de 12.5 cm. Si la velocidad rotacional del tubo es de 1 000 rev/min, determine el factor G.

11.6. Una operación de fundición centrífuga real se llevará a cabo con una configuración horizontal, para fabricar secciones de tubos de hierro. Las secciones tendrán una longitud de 42.0 in, el diámetro exterior es de 8.0 in y el espesor de la pared es de 0.50 in. Si la velocidad rotacional del tubo es de 500 rev/min, determine el factor G. ¿Es probable que la operación vaya a tener éxito?

11.7. Un proceso de fundición centrífuga real horizontal se emplea para fabricar boquillas de latón de las dimensiones siguientes: longitud de 10 cm, diámetro exterior de 15 cm y diámetro interior de 12 cm. *a*) Determine la velocidad rotacional que se requiere a fin de obtener un factor G de 70. *b*) Cuando opera a esta velocidad, ¿cuál es la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) que el metal fundido impone sobre la pared interior del molde?

11.8. Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal para fabricar secciones de tubo de cobre de diámetro grande. Los tubos tienen una longitud de 1.0 m, diámetro de 0.25 m y espesor de pared de 15 mm. *a*) Si la velocidad de rotación del tubo es de 700 rev/min, determine el factor G sobre el metal derretido. *b*) ¿La velocidad de rotación es suficiente para evitar la "lluvia"?

c) ¿Qué volumen de metal fundido debe verterse en el molde para hacer el fundido, si se toman en cuenta las pérdidas por solidificación y la contracción después de la solidificación?

11.9. Si se realizara una operación de fundición centrífuga real en una estación espacial que circula alrededor de la Tierra, ¿cómo afectaría al proceso la falta de peso?

11.10 Se emplea un proceso de fundición centrífuga real horizontal para hacer anillos de aluminio con las dimensiones siguientes: longitud de 5 cm, diámetro exterior de 65 cm y diámetro interior de 60 cm. *a*) Determine la velocidad rotacional que dará un factor G de 60. *b*) Suponga que el anillo estuviera hecho de acero en vez de aluminio. Si en la operación de fundido del acero se empleara la velocidad rotacional que se calculó en el inciso *a*), determine el factor G y *c*) la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) sobre la pared del molde. *d*) ¿Esta velocidad rotacional daría como resultado una operación exitosa?

11.11. Para el anillo de acero del problema anterior, 11.10b), determine el volumen de metal fundido que debe verterse al molde, dado que la pérdida de líquido es de 0.5% y las de solidificación y contracción sólida después de la solidificación pueden determinarse con la tabla 10.1.

11.12. Se usa un proceso de fundición centrífuga real horizontal para fabricar tubo de plomo para plantas químicas. El tubo tiene una longitud de 0.5 m, diámetro exterior de 70 mm y espesor de pared de 6.0 mm. Determine la velocidad de rotación que dará un factor G de 60.

11.13. Se emplea un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer secciones de tubo con longitud de 10.0 in y diámetro exterior de 6.0 in. El diámetro interior del tubo es de 5.5 in en la parte superior y 5.0 in en la inferior. ¿A qué velocidad debe girar el tubo durante la operación a fin de que se cumplan las especificaciones.

11.14. Un proceso de fundición centrífuga real vertical se emplea para producir boquillas que miden 200 mm de largo y 200 mm de diámetro exterior. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 500 rpm, determine el diámetro interior en la parte superior de la boquilla si el diámetro interior en la base es de 150 mm.

11.15. Se usa un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer tubos de latón que miden 15.0 in de largo y cuyo diámetro exterior es de 8.0 in. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 1 000 rpm, determine los diámetros interiores en las partes superior e inferior del tubo si el peso total del fundido final es de 75.0 libras.

Defectos y consideraciones de diseño

11.16. La carcasa de cierto producto de maquinaria está hecho con dos componentes, ambos fundidos de aluminio. El componente más grande tiene la forma de lavabo y el segundo es una cubierta plana que se adjunta al primero para crear un espacio cerrado para las piezas de la maquinaria. Se utiliza fundición con arena para producir los dos fundidos, los cuales están llenos de defectos en forma de vacíos y cierres fríos. El supervisor se queja de que las piezas son demasiado delgadas y afirma que ésta es la razón de los defectos. Sin embargo, se sabe que en otras fundidoras se elaboran con éxito los mismos componentes. ¿Qué otra explicación podría haber para los defectos?

11.17. Un fundido en arena, de acero, grande, presenta los signos característicos del defecto de penetración, superficie que consiste en una mezcla de arena y metal. *a*) ¿Qué medidas pueden tomarse para corregir el defecto? *b*) ¿Qué otros defectos posibles podrían resultar si se implantara cada una de esas medidas?

12 TRABAJO DEL VIDRIO

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

12.1 Preparación y fundición de las materias primas
12.2 Los procesos de conformación en el trabajo del vidrio
  12.2.1 Conformación de artículos de vidrio
  12.2.2 Conformación de vidrio plano y tubular
  12.2.3 Formación de fibras de vidrio
12.3 Tratamiento térmico y acabado
  12.3.1 Tratamiento térmico
  12.3.2 Acabado
12.4 Consideraciones sobre el diseño del producto

Los productos de vidrio se manufacturan comercialmente en una variedad casi ilimitada de formas. Muchos se producen en cantidades muy grandes, como los focos, botellas para bebidas y vidrio para ventanas. Otros, como los lentes de los telescopios gigantes, se fabrican en forma individual.

El vidrio es uno de tres tipos básicos de materiales cerámicos (véase el capítulo 7). Lo distingue su estructura no cristalina (vítrea), mientras que los demás materiales cerámicos la tienen cristalina. Los métodos por los que el vidrio es convertido en productos útiles son muy distintos de aquellos que se emplean para los otros tipos. En el trabajo del vidrio el material principal de inicio es el sílice (SiO_2); por lo general, éste se combina con otros óxidos cerámicos que forman vidrios. El material inicial se calienta para transformarlo de un sólido duro en un líquido viscoso; luego se le conforma a la forma que se desea mientras se encuentra en esa condición fluida. Cuando se enfría y endurece, el material permanece en el estado vítreo en lugar de cristalizarse.

La secuencia común del proceso de trabajar el vidrio consiste en las etapas que se ilustran en la figura 12.1. La conformación se lleva a cabo con varios procesos, que incluyen la fundición, prensado y soplado (para producir botellas y otros contenedores), y el rolado (para hacer vidrio plano). Para ciertos productos se requiere una etapa de acabado.

12.1 PREPARACIÓN Y FUNDICIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

El componente principal de casi todos los vidrios es el sílice (SiO_2), cuya fuente principal es el cuarzo de la arena natural. La arena debe lavarse y clasificarse. El lavado quita las

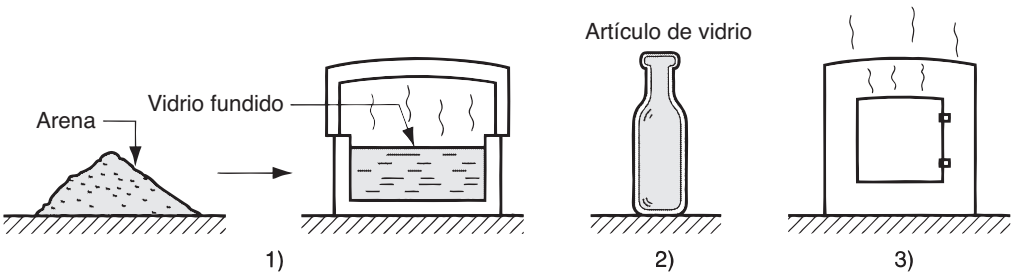


FIGURA 12.1 Secuencia común del proceso de trabajar el vidrio: 1) preparación y fundición de la materia prima, 2) conformación y 3) tratamiento térmico.

impurezas tales como la arcilla y ciertos materiales que teñirían al vidrio con un color indeseable. ***Clasificar*** la arena significa agrupar los granos de acuerdo con su tamaño. El tamaño más preferible de las partículas para hacer vidrio está en el rango de 0.1 a 0.6 mm (0.004 a 0.025 in) [3]. Los otros varios componentes, tales como ceniza de sodio (fuente del Na_2O), caliza (fuente del CaO), óxido de aluminio, potasa (fuente del K_2O) y otros minerales, se agregan en proporciones adecuadas para obtener la composición deseada. Generalmente, la mezcla se hace por lotes, en cantidades compatibles con las capacidades de los hornos de fundición de que se disponga.

En la práctica moderna, por lo general se agrega vidrio reciclado a la mezcla. Además de proteger el ambiente, el vidrio reciclado facilita la fundición. En función de la cantidad de desperdicios de vidrio disponibles y las especificaciones de la composición final, la proporción de vidrio reciclado puede alcanzar hasta 100%.

El lote de los materiales de inicio por fundir se conocen como ***carga*** y el procedimiento de cargarlo en el horno de fundición se denomina ***cargado*** del horno. Los hornos para fundir vidrio se dividen en los tipos siguientes [3]: 1) ***hornos de vasija***, vasijas de cerámica de capacidad limitada en la que ocurre la fundición calentando sus paredes; 2) ***tanques superficiales***, recipientes cerámicos de capacidad más grande para la producción de lotes, en los que el calentamiento se realiza con la quema de combustibles sobre la carga; 3) ***hornos de tanque continuo***, hornos de tanque largo en los que los materiales se alimentan por un extremo y se funden conforme se mueven hacia el otro, donde se extrae el vidrio fundido para producciones elevadas; y 4) ***hornos eléctricos*** de diseños varios para un rango amplio de tasas de producción.

La fundición de vidrio por lo general implica temperaturas alrededor de 1 500 ºC a 1 600 ºC (2 700 ºF a 2 900 ºF). El ciclo de fundición para una carga común requiere de 24 a 48 horas. Éste es el tiempo necesario para que todos los granos de arena se conviertan en un líquido claro a fin de que se refine el vidrio fundido y se enfríe a la temperatura adecuada para el trabajo. El vidrio fundido es un líquido viscoso, su viscosidad se relaciona en forma inversa con la temperatura. Debido a que la operación de darle forma sigue de inmediato al ciclo de fundición, la temperatura a la que el vidrio se extrae del horno depende de la viscosidad que se requiera para el proceso que sigue.

12.2 LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN EN EL TRABAJO DEL VIDRIO

Las categorías principales de productos de vidrio se identificaron (véase la sección 7.4.2) como vidrio de ventanas, contenedores, focos, vidrio para laboratorios, fibras de vidrio y vidrio óptico. A pesar de la variedad de esta lista, los procesos de conformación para fabricar estos productos se agrupan sólo en tres categorías: 1) procesos discretos para artículos de vidrio, que incluye botellas, focos y otros productos individuales; 2) procesos continuos par fabricar vidrio plano (hojas y placas de vidrio para ventanas) y tubería (para artículos de laboratorio y lámparas fluorescentes); y 3) procesos para la producción de fibras para aislantes, materiales compuestos de fibra de vidrio y fibra óptica.

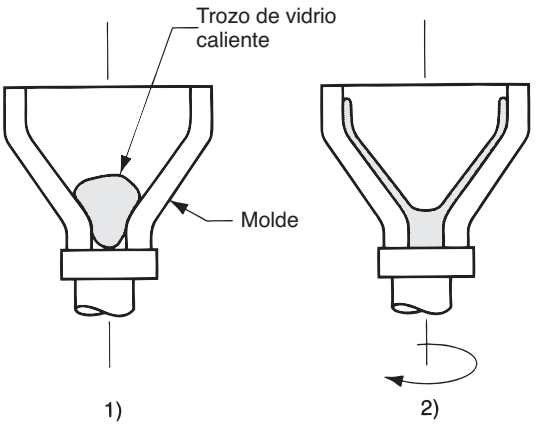


FIGURA 12.2 Giro de piezas de vidrio en forma de embudo: 1) Trozo de vidrio que se coloca en el molde y 2) rotación del molde para hacer que el vidrio fundido se distribuya sobre su superficie.

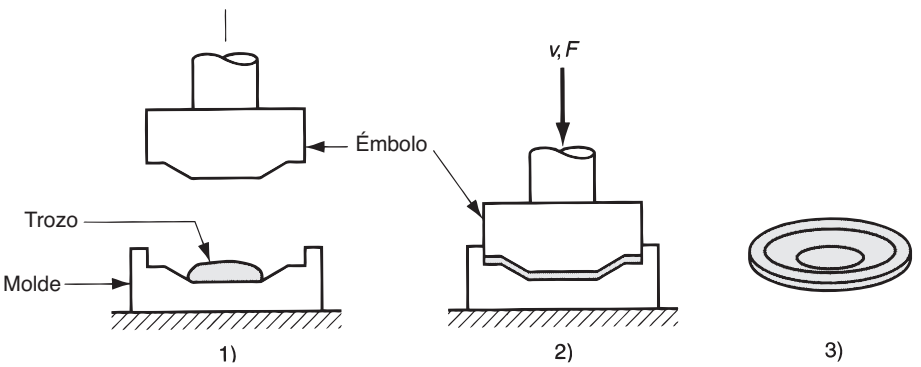
12.2.1 Conformación de artículos de vidrio

Los métodos antiguos de trabajar el vidrio a mano, tales como el soplado, están descritos en forma breve en la nota histórica 7.3. Los métodos artesanales aún se emplean para fabricar cantidades pequeñas de artículos de vidrio de mucho valor. La mayoría de procesos estudiados en esta sección son tecnologías muy mecanizadas para producir cantidades grandes de piezas discretas tales como frascos, botellas y focos.

Girado El girado del vidrio es similar a la ***fundición centrífuga*** de los metales, y también se conoce con ese nombre en el contexto del trabajo del vidrio. Se usa para producir componentes en forma de embudo tales como las secciones posteriores de los tubos de rayos catódicos para televisiones y monitores de computadora. En la figura 12.2 se ilustra el arreglo. Se coloca un trozo de vidrio fundido en un molde cónico hecho de acero. Se hace girar el molde de modo que la fuerza centrífuga haga que el vidrio fluya hacia arriba y se distribuya sobre la superficie del molde. Después se ensambla la placa frontal (es decir, la pantalla frontal) con el embudo por medio del empleo de un vidrio sellador de punto de fusión bajo.

Prensado Éste es un proceso muy utilizado para la producción en masa de piezas de vidrio tales como trastos, moldes de pastelería, lentes de lámparas, pantallas de tubos de televisión y artículos similares que son relativamente planos. El proceso se ilustra y describe en la figura 12.3. En esta secuencia de producción, las cantidades grandes de la mayoría de productos prensados justifican un nivel alto de automatización.

FIGURA 12.3 Prensado de una pieza plana de vidrio: 1) se pone en el molde un trozo procedente del horno, 2) un émbolo presiona para darle forma y 3) se retira el émbolo y el producto terminado se extrae. Los símbolos v y f significan el movimiento (v = velocidad) y la fuerza aplicada, respectivamente.



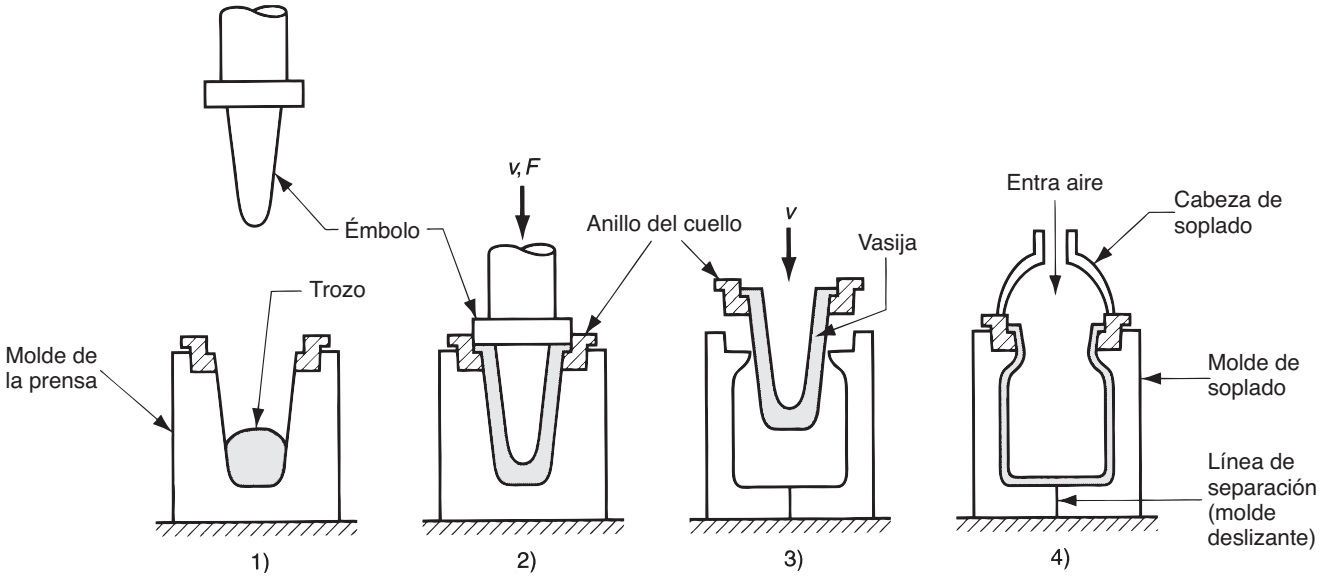


FIGURA 12.4 Secuencia de formado de prensado y soplado: 1) se coloca un trozo fundido en la cavidad del molde, 2) se presiona para formar una ***vasija***, 3) la vasija formada parcialmente se transfiere sostenida del cuello por un anillo hacia el molde de soplado y 4) se sopla para que adquiera su forma final. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (*v* = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

Soplado Varias secuencias de formado incluyen una o más etapas de soplado. En lugar de ser una operación manual, el soplado se ejecuta en equipo muy automatizado. Las dos secuencias aquí descritas son para los métodos de prensar y soplar, y de soplar y soplar.

Como el nombre lo indica, el método de ***prensar y soplar*** es una operación de prensado seguida de otra de soplado, como se ilustra en la figura 12.4. El proceso se adapta a la producción de contenedores de boca ancha. En la operación de soplado se emplea un molde deslizante para la etapa de retiro.

El método de ***soplar y soplar*** se utiliza para producir botellas de boca estrecha. La secuencia es similar a la precedente, excepto que se usan dos (o más) operaciones de soplado en vez de sólo prensar y soplar. Hay variantes de este proceso, lo que depende de la forma del producto, y una de las secuencias posibles se muestra en la figura 12.5. En ocasiones se requiere volver a calentar entre las etapas de soplado. A veces se emplean moldes duplicados y triplicados junto con sus respectivos alimentadores de trozos para incrementar las tasas de producción. Los métodos de prensar y soplar, y de soplar y soplar se usan para fabricar frascos, botellas para bebidas, focos, recipientes y otros productos con formas parecidas.

Fundición Si el vidrio fundido tiene fluidez suficiente, puede verterse en un molde. Con este método se fabrican objetos relativamente macizos, tales como lentes y espejos astronómicos. Estas piezas deben enfriarse muy despacio para evitar tensiones internas y un posible agrietamiento debido a los gradientes de temperatura que se induciría en el vidrio si no se hiciera así. Después de enfriarse y solidificarse, la pieza debe terminarse por medio de bruñir y pulir. La fundición no se usa en el trabajo del vidrio, excepto para estas clases especiales de trabajos. El enfriamiento y agrietamiento no son los únicos problemas, sino que también el vidrio fundido es relativamente viscoso a las temperaturas normales de trabajo, y no fluye tan bien como los metales fundidos o los termoplásticos calientes a través de orificios pequeños o en secciones delgadas. Los lentes pequeños se hacen generalmente por medio de prensado, como se acaba de estudiar.

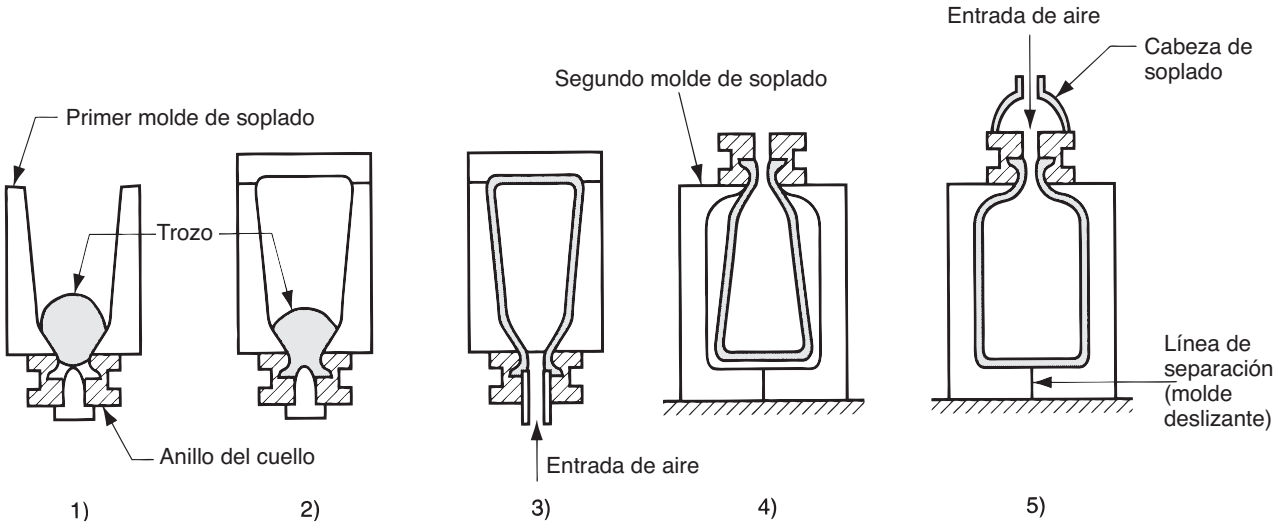


FIGURA 12.5 Secuencia de conformación por medio de soplar y soplar: 1) se introduce un trozo en la cavidad del molde invertido, 2) se cubre el molde, 3) primera etapa del soplado, 4) la pieza formada parcialmente se reorienta y transfiere a un segundo molde de soplado y 5) se sopla para dar la forma final.

12.2.2 Conformación de vidrio plano y tubular

Aquí se describen dos métodos para fabricar vidrio plano y uno para producir tubos. Se trata de procesos continuos, con los que se elaboran secciones largas de vidrio plano para ventana o tubos de vidrio, que después se cortan al tamaño y longitudes apropiados. Se trata de tecnologías modernas, en comparación con el método antiguo que se describe en la nota histórica 12.1.

Nota histórica 12.1 *Métodos antiguos de fabricación de vidrio plano* [7].

Durante muchos siglos se ha empleado el vidrio en las ventanas de los edificios. El proceso más antiguo para fabricar vidrio plano para ventanas es el soplado a mano. El procedimiento consistía en lo siguiente: 1) se soplaba un globo de vidrio con un tubo; 2) una parte del globo estaba construida para adherirse al extremo de un "puntero", barra de metal empleada por los sopladores, y luego se separaba; y 3) después de volver a calentar el vidrio, se hacía girar el puntero con velocidad suficiente para que la fuerza centrífuga transformara al globo abierto en un disco plano. El disco, cuyo tamaño máximo posible era de sólo 1 m (3 ft), se cortaba posteriormente en piezas pequeñas para usarlas en las ventanas.

En el centro del disco, donde el vidrio estaba adherido con el puntero durante la tercera etapa del proceso, tendía a formarse un bulto con apariencia de corona. De aquí se derivó el nombre de "vidrio crown" (vidrio corona). Con este método se obtenían lentes para espectáculos. Hoy día, aún se emplea dicho nombre para ciertos tipos de vidrio óptico y oftálmico, aun cuando el método antiguo ha sido remplazado por la tecnología moderna de producción.

Rolado de placas planas Como se aprecia en la figura 12.6, es posible producir vidrio de placas planas por medio de rolado. El vidrio de inicio, en la condición plástica apropiada que tiene al salir del horno, se comprime con rodillos opuestos cuya separación determina el espesor de la hoja. La operación de rolado por lo general se lleva a cabo de modo que el vidrio plano se mueve directamente hacia un horno de templado. La hoja de vidrio rolada debe tallarse y pulirse en forma posterior, para darle paralelismo y lisura.

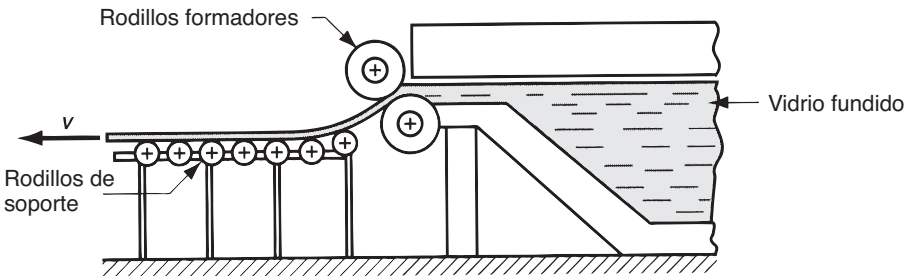


FIGURA 12.6 Rolado de vidrio plano.

Proceso de flotación Este proceso, creado a finales de la década de 1950, tiene la ventaja sobre métodos tales como el rolado, de que con él se obtienen superficies más lisas que no necesitan de un acabado posterior. En el ***proceso de flotación***, que se ilustra en la figura 12.7, el vidrio fluye directamente desde el horno de fundición a la superficie de un baño de estaño derretido. El vidrio muy fluido se distribuye en forma pareja por la superficie, lo que le da un espesor y suavidad uniformes. Después de avanzar hacia una región más fría del baño, el vidrio se endurece y se mueve hacia un horno de templado, después de lo cual se corta al tamaño necesario.

Estirado de tubos de vidrio La tubería de vidrio se manufactura medianre un proceso de estirado conocido como ***proceso Danner***, que se ilustra en la figura 12.8. El vidrio fundido fluye alrededor de un mandril hueco rotatorio por el que se sopla aire mientras el vidrio pasa. La temperatura del aire y su gasto volumétrico, así como la velocidad de paso, determinan el diámetro y espesor de la pared de la sección transversal tubular. Durante el endurecimiento, el tubo de vidrio recibe apoyo de una serie de rodillos que se extienden por 30 m (100 ft) más allá del mandril. Luego, el tubo continuo se corta a longitudes estándar. Los productos de vidrio tubular incluyen equipo para laboratorios, lámparas fluorescentes y termómetros.

12.2.3 Formación de fibras de vidrio

Las fibras de vidrio se utilizan en aplicaciones que van desde lana aislante a líneas de comunicación de fibra óptica (véase la sección 7.4.2). Los productos de fibra de vidrio se dividen en dos categorías [6]: 1) vidrio fibroso para aislamientos térmico y acústico, y filtración de aire, en el que las fibras se encuentran en la condición aleatoria parecida a la de la lana; y 2) filamentos continuos, largos, apropiados para plásticos reforzados con fibras, hilos y telas, y fibras ópticas. Para ambas categorías se emplean métodos de producción distintos; a continuación se describen los dos métodos, que representan cada categoría de productos, respectivamente.

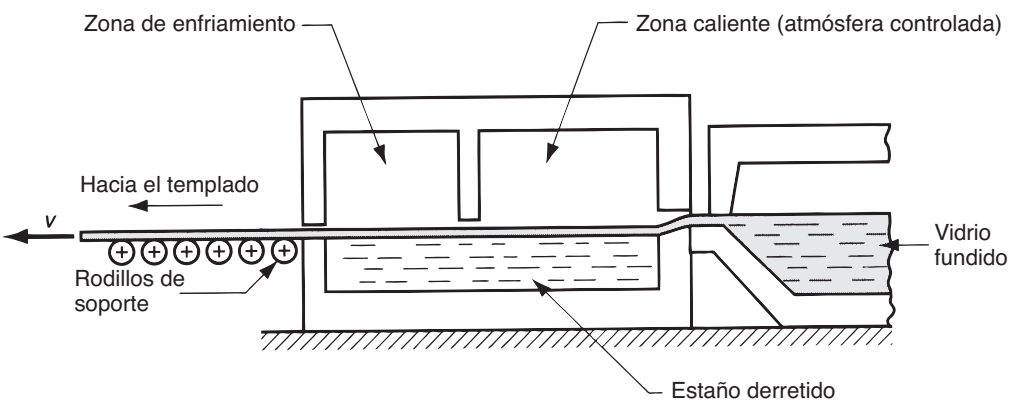


FIGURA 12.7 Proceso de flotación para producir hojas de vidrio.

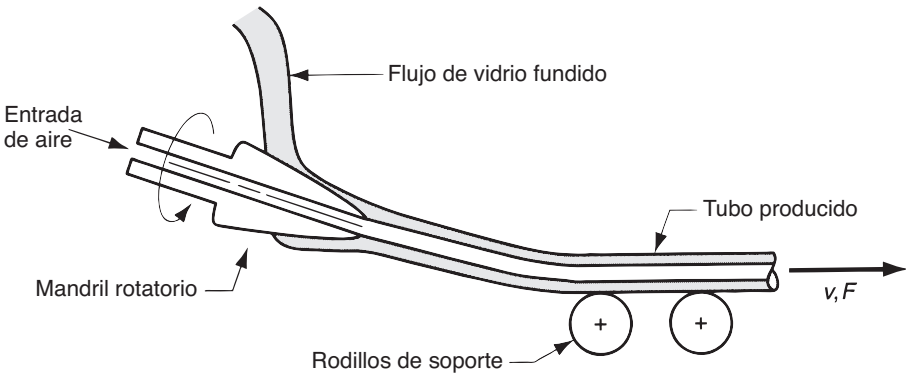


FIGURA 12.8 Estirado de tubos de vidrio con el proceso Danner. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (*v* = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

Rocío centrífugo En un proceso común para elaborar lana de vidrio, el vidrio fluye en estado fundido hacia un contenedor rotatorio con muchos orificios pequeños alrededor de su periferia. La fuerza centrífuga ocasiona que el vidrio pase a través de los agujeros para convertirse en una masa fibrosa apropiada para el aislamiento térmico y acústico.

Obtención de filamentos continuos Con este proceso, que se ilustra en la figura 12.9, se producen fibras de vidrio continuas de diámetro pequeño (el límite inferior del tamaño es alrededor de 0.0025 mm, 0.0001 in) estirándolas (empujándolas) en bandas de vidrio fundido a través de hoyos pequeños en una placa caliente de aleación de platino. La placa tiene varios cientos de agujeros y cada uno origina una fibra. Las fibras individuales se reúnen en una banda enrollándoseles en un carrete. Antes de enrollar las fibras, se recubren con diversos productos químicos para lubricarlas y protegerlas. No son raras las velocidades de estirado con alrededor de 50 m/s (10 000 ft/min) o más.

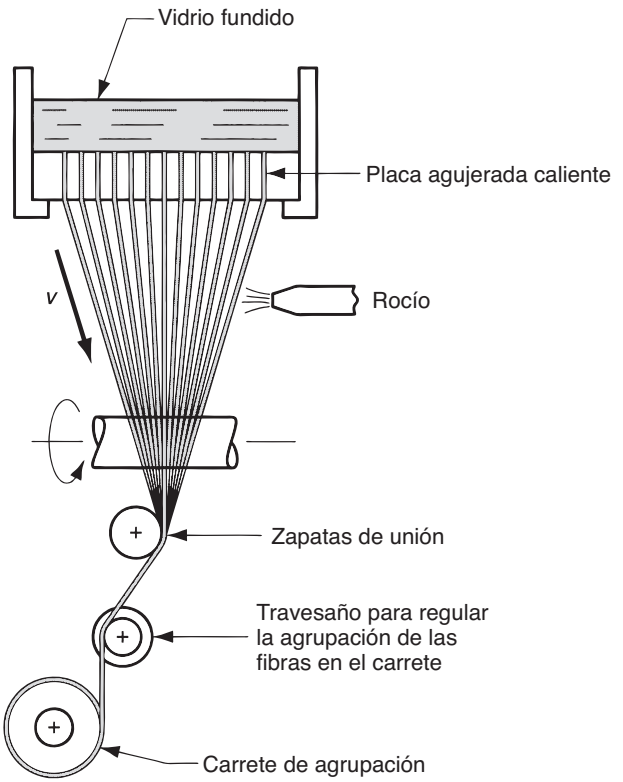


FIGURA 12.9 Obtención de fibras de vidrio continuas.

12.3 TRATAMIENTO TÉRMICO Y ACABADO

El tratamiento térmico del producto de vidrio es la tercera etapa de la secuencia del trabajo del vidrio. Para ciertos productos, se llevan a cabo operaciones adicionales de acabado.

12.3.1 Tratamiento térmico

En la sección 7.4.3 se estudiaron los vidrios cerámicos. Este material único se fabrica con un tratamiento especial a base de calor que transforma la mayor parte del estado vítreo en un cerámico policristalino. Otros tratamientos térmicos que se le practican al vidrio generan cambios menos notables en lo tecnológico, pero quizá más importantes desde un punto de vista comercial; ejemplos de lo anterior son el recocido y el templado.

Recocido Una vez formados, los productos de vidrio por lo general tienen esfuerzos internos perjudiciales, que disminuyen su resistencia. El recocido se lleva a cabo para liberar dichos esfuerzos; por tanto, en el trabajo del vidrio el tratamiento tiene la misma función que en el del metal. El ***recocido*** involucra calentar el vidrio a temperatura elevada y mantenerlo así durante cierto periodo para eliminar los esfuerzos y gradientes de temperatura, para luego enfriarlo despacio a fin de eliminar la formación de esfuerzos, y seguir con un enfriamiento más rápido a temperatura ambiente. Las temperaturas comunes del recocido son alrededor de 500 °C (900 °F). El lapso que se mantiene el producto a esa temperatura, así como las tasas de calentamiento y enfriamiento del ciclo, dependen del espesor del vidrio; la regla habitual es que el tiempo requerido para el recocido varía con el cuadrado del espesor.

El recocido en las fábricas modernas de vidrio se lleva a cabo en hornos parecidos a túneles, llamados ***lehrs***, en los que los productos fluyen con lentitud a través de la cámara caliente sobre bandas. Los quemadores se ubican sólo en el extremo frontal de la cámara, de modo que el vidrio experimente el ciclo de calentamiento y enfriamiento que se requiere.

Vidrio templado y productos relacionados En los productos de vidrio es posible poner en práctica un patrón de esfuerzos internos benéfico, por medio de un tratamiento térmico que se conoce como ***templado***, y el material que resulta recibe el nombre de ***vidrio templado***. Igual que en el tratamiento del acero endurecido, el templado incrementa la tenacidad del vidrio. El proceso consiste en el calentamiento del vidrio a una temperatura algo superior de la del recocido, y en el rango plástico, seguido del enfriamiento rápido de las superficies, por lo general con chorros de aire. Cuando las superficies se enfrían, se contraen y endurecen mientras que el interior aún está en estado plástico y es moldeable. Conforme el vidrio interno se enfría con lentitud, se contrae, lo que sujeta a compresión las superficies duras. Como otros cerámicos, el vidrio es mucho más fuerte cuando se le sujeta a esfuerzos de compresión que a los de tensión. En consecuencia, el vidrio templado es mucho más resistente a las ralladuras y roturas debido a los esfuerzos de compresión sobre sus superficies. Las aplicaciones de esto incluyen vidrios para ventanas de edificios altos, puertas hechas por completo de vidrio, vidrios de seguridad y otros productos que requieren vidrio tenaz.

Cuando el vidrio templado falla, lo hace rompiéndose en fragmentos pequeños muy numerosos que hacen menos probable que alguien se corte con ellos que con vidrio de ventanas convencional (recocido). Es interesante que los parabrisas de automóviles no estén hechos de vidrio templado, debido al peligro que entraña esa fragmentación para el conductor. En vez de ello se utiliza vidrio convencional; sin embargo, se fabrica con dos piezas de vidrio a ambos lados de una hoja de polímero duro. Debido a esto se fractura como ***vidrio laminado***, las esquirlas de vidrio quedan retenidas por la hoja de polímero y el parabrisas permanece relativamente transparente.

12.3.2 Acabado

En ocasiones se requieren operaciones de acabado para los productos de vidrio. Estas operaciones secundarias incluyen esmerilado, pulido y corte. Cuando se producen hojas

de vidrio por medio de extracción y rolado, los lados opuestos no son necesariamente paralelos, y las superficies contienen defectos y ralladuras ocasionadas por el uso de herramientas duras sobre el vidrio suave. Las hojas de vidrio deben lijarse y pulirse para la mayoría de aplicaciones comerciales. En las operaciones de prensar y soplar, en las que se emplean troqueles deslizantes, es frecuente que se requiera quitar las marcas de costura del producto contenedor.

En procesos continuos del trabajo del vidrio, tales como la producción de placas y tubos, las secciones continuas deben cortarse en elementos más pequeños. Esto se lleva a cabo por medio de marcar el vidrio con una rueda cortadora o diamante cortador para después romper la sección a lo largo de la línea de marca. El corte se hace por lo general conforme el vidrio sale recocido del lehr.

Hay procesos decorativos y superficiales que se realizan sobre ciertos productos de vidrio. Estos procesos incluyen el cortado mecánico y operaciones de pulimentado: limpieza por chorro de arena (sand blast), ataque químico (con ácido hidrofluorídico frecuentemente en combinación con otros compuestos químicos) y recubrimiento (por ejemplo, recubrir una placa de vidrio con aluminio o plata para producir espejos).

12.4 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

El vidrio posee propiedades especiales que lo hacen deseable para ciertas aplicaciones. Se han compilado las recomendaciones que siguen para el diseño de Bralla [1] y otras fuentes.

- El vidrio es transparente y tiene ciertas propiedades ópticas que son inusuales, si no es que únicas, para los materiales de la ingeniería. Para aplicaciones que requieren transparencia, transmisión de la luz, magnificación y propiedades ópticas similares, es probable que el material elegido sea el vidrio. Ciertos polímeros son transparentes y competitivos, lo que depende de los requerimientos de diseño.
- El vidrio es varias veces más fuerte a la compresión que a la tensión: los componentes deben diseñarse para quedar sujetos a fuerzas compresivas, no de tensión.
- Los cerámicos, incluido el vidrio, son frágiles. No deben usarse partes de vidrio en aplicaciones que involucren impactos de cargas o fuerzas grandes que lo podrían fracturar.
- Ciertas composiciones de vidrio tienen un coeficiente de expansión térmica muy bajo, por lo que toleran el choque térmico. Estos vidrios se seleccionan para aplicaciones en las que esta característica es importante.
- Las aristas y esquinas exteriores del vidrio deben tener radios o biseles grandes; de igual manera, las esquinas interiores deben tener un radio grande. Las esquinas tanto exteriores como interiores son puntos de concentración de los esfuerzos.
- A diferencia de las partes elaboradas con cerámicos tradicionales y nuevos, deben incluirse hebras en el diseño de piezas de vidrio; son factibles en lo técnico con los procesos de conformación de prensar y soplar. Sin embargo, las hebras deben ser gruesas.

REFERENCIAS

[1] Bralla, J. G. (editor en jefe). ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[2] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. ***Engineering Materials and Their Applications,*** 4a. ed. Houghton Mifflin Publishing Company, Boston, Massachusetts, 1990.

[3] Hlavac, J. ***The Technology of Glass and Ceramics,*** Elsevier Scientific Publishing Company, Nueva York, 1983.

[4] McLellan, G. y Shand, E. B. ***Glass Engineering Handbook,*** 3a, ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1984.

[5] McColm, I. J. ***Ceramic Science for Materials Technologists,*** Chapman and Hall, Nueva York, 1983.

[6] Mohr, J. G. y Rowe, W. P. ***Fiber Glass,*** Krieger Publishing Company, Nueva York, 1990.

[7] Scholes, S. R. y Greene, C. H. ***Modern Glass Practice,*** 7a. ed. TechBooks, Marietta, Georgia, 1993.

PREGUNTAS DE REPASO

12.1. El vidrio se ha clasificado como un material cerámico, aunque es distinto de los cerámicos tradicionales y nuevos. ¿Cuál es la diferencia?
12.2. ¿Cuál es el compuesto químico predominante en casi todos los productos de vidrio?
12.3. ¿Cuáles son las tres etapas básicas de la secuencia del trabajo del vidrio?
12.4. Los hornos de fundición para trabajar el vidrio se dividen en cuatro tipos. Mencione tres de éstos.
12.5. Describa el proceso de girado en el trabajo del vidrio.
12.6. ¿Cuál es la diferencia principal entre los procesos de prensar y soplar, y de soplar y soplar al trabajar el vidrio?
12.7. Existen varias maneras de conformar láminas u hojas de vidrio. Mencione y describa en forma breve una de ellas.
12.8. Describa el proceso Danner.
12.9. En el texto se estudian dos procesos para formar fibras de vidrio. Mencione y describa brevemente una de ellas.
12.10. ¿Cuál es el propósito del recocido en el trabajo del vidrio?
12.11. Describa cómo se trata térmicamente una pieza de vidrio para producir vidrio templado.
12.12. Describa el tipo de material que es común utilizar para fabricar parabrisas de automóvil.
12.13. ¿Cuáles son algunas de las recomendaciones de diseño para piezas de vidrio?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 10 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

12.1. ¿Cuál de los términos siguientes se refiere al estado vítreo de un material?: *a*) cristalino, *b*) desvitrificado, *c*) policristalino, *d*) viciado *e*) vítreo.
12.2. Además de ayudar a proteger el ambiente, el uso de vidrio reciclado en la fabricación de vidrio, como ingrediente del material de inicio, ¿qué otro propósito útil tiene? (una respuesta): *a*) ayuda a dar variaciones de color al vidrio, con valor estético, *b*) hace que el vidrio sea más fácil de fundir, *c*) hace al vidrio más fuerte o *d*) reduce los olores en la planta.
12.3. ¿Cuál de las siguientes es la carga, en el trabajo del vidrio?: *a*) duración del ciclo de fundido, *b*) energía eléctrica que se requiere para fundir el vidrio, *c*) nombre que se da al horno de fundición, o *d*) materiales de inicio de la fundición.
12.4. Las temperaturas comunes de fundición del vidrio, ¿en cuál de los siguientes rangos están?: *a*) 400 ºC a 500 ºC, *b*) 900 ºC a 1 000 ºC, *c*) 1 500 ºC a 1 600 ºC, *d*) 2 000 ºC a 2 200 ºC.
12.5. La fundición es un proceso del trabajo del vidrio que se utiliza para *a*) producción elevada, *b*) producción baja o *c*) producción media.
12.6. ¿Cuál de los procesos siguientes o etapas de procesamiento no son aplicables al trabajo del vidrio?: *a*) recocido, *b*) prensado, *c*)enfriado, *d*) sinterizado y *e*) girado.
12.7. El proceso de prensar y soplar se adapta mejor a la producción de botellas (de boca estrecha) para bebidas, mientras que el proceso de soplar y soplar es más apropiado para producir frascos (de boca ancha): ¿*a*) verdadero o *b*) falso?
12.8. ¿Cuál de los procesos siguientes se usa para producir tubería de vidrio?: *a*) proceso Danner, *b*) prensado, *c*) rolado o *d*) girado.
12.9. Si una pieza de vidrio con espesor de pared de 5 mm (0.20 in) requiere de 10 min para recocerse, ¿cuánto tiempo requerirá una pieza de forma similar pero con espesor de pared de 7.5 mm (0.30 in)?, elija la respuesta más cercana: *a*) 10 min, *b*) 15 min, *c*) 20 min, *d*) 30 min.
12.10. ¿Cuál de los siguientes es un lehr?: *a*) una guarida de león, *b*) un horno de fundición, *c*) un horno de sinterizado, *d*) un horno de recocido o *e*) ninguno de los anteriores.

13 PROCESOS DE CONFORMADO PARA PLÁSTICOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

13.1 Propiedades de los polímeros fundidos
13.2 Extrusión
13.2.1 Proceso y equipo
13.2.2 Análisis de la extrusión
13.2.3 Configuraciones del troquel y productos extruidos
13.2.4 Defectos de la extrusión
13.3 Producción de hojas y película
13.4 Producción de fibras y filamentos (hilado)
13.5 Procesos de recubrimiento
13.6 Moldeo por inyección
13.6.1 Proceso y equipo
13.6.2 El molde
13.6.3 Máquinas de moldeo por inyección
13.6.4 Contracción
13.6.5 Defectos en el moldeo por inyección
13.6.6 Otros procesos del moldeo por inyección
13.7 Moldeo por compresión y transferencia
13.7.1 Moldeo por compresión
13.7.2 Moldeo por transferencia
13.8 Moldeo por soplado y moldeo rotacional
13.8.1 Moldeo por soplado
13.8.2 Moldeo rotacional
13.9 Termoformado
13.10 Fundición
13.11 Procesamiento y formado de espuma de polímero
13.11.1 Procesos de espumado
13.11.2 Procesos de conformado
13.12 Consideraciones sobre el diseño del producto
13.12.1 Consideraciones generales
13.12.2 Plásticos extruidos
13.12.3 Piezas moldeadas

Los plásticos pueden conformarse en una variedad amplia de productos, tales como piezas moldeadas, secciones extruidas, películas y hojas, recubrimientos para aislar alambres eléctricos y fibras para textiles. Además, es frecuente que los plásticos sean el ingrediente principal de otros materiales, como pinturas y barnices, adhesivos y varios compuestos de matriz de polímero. En este capítulo se estudian las tecnologías por las que estos productos reciben su forma, y se deja para capítulos posteriores el análisis de pinturas y barnices, adhesivos y compuestos. Muchos procesos para darles forma a los plásticos se adaptan a los cauchos (capítulo 14) y a los compuestos de matriz de polímero (capítulo 15).

La relevancia comercial y tecnológica de estos procesos para dar forma se deriva de la creciente importancia de los materiales que se procesan. Durante los últimos 50 años, las aplicaciones de los plásticos se han incrementado a una tasa mucho más rápida que la de los metales o los cerámicos. La realidad es que muchas piezas que antes se hacían de metales, hoy se elaboran con plásticos y compuestos de plástico. Lo mismo ha ocurrido con el vidrio; los contenedores de plástico han sustituido ampliamente a las botellas de vidrio y jarras en el empaque de productos. El volumen total de los polímeros (plásticos y cauchos) excede hoy día el de los metales. Es posible identificar varias razones por las que los procesos para dar forma a los plásticos son importantes:

- La variedad de los procesos de formado y la facilidad con que se procesan los polímeros permiten una diversidad casi ilimitada de formas geométricas de las piezas por formar.
- Muchas piezas de plástico se forman por moldeo, que es un proceso de ***forma neta***; por lo general no se necesita una conformación adicional.
- Aunque generalmente se requiere calentamiento para conformar los plásticos, se necesita ***menos energía*** que para los metales porque las temperaturas de procesamiento son mucho menores.
- Debido a que en el procesamiento se emplean temperaturas menores, el manejo del producto se simplifica durante la producción. Debido a que muchos métodos para procesar plástico son operaciones de un solo paso (por ejemplo, moldeo), la cantidad de manejo del producto que se requiere se reduce de manera sustancial en comparación con los metales.
- No se requiere dar a los plásticos acabados con pintura o recubrimientos (excepto en circunstancias inusuales).

Como se estudió en el capítulo 8, los dos tipos de plásticos son los ***termoplásticos*** y los ***termofijos***. La diferencia está en que los termofijos pasan por un proceso de cura durante el calentamiento y la conformación, lo que ocasiona un cambio químico permanente (***enlazamiento cruzado***) en su estructura molecular. Una vez curados, no pueden fundirse si se vuelven a calentar. Por el contrario, los termoplásticos no se curan, y su estructura química permanece en lo básico sin cambios si se recalientan, aun cuando se transformen de sólido a fluido. De los dos tipos, los termoplásticos son, por mucho, el tipo de mayor importancia comercial, y comprenden más de 80% del peso total de los plásticos.

Los procesos para dar forma a los plásticos se clasifican de acuerdo con la forma geométrica del producto resultante: 1) productos extruidos continuos con sección transversal constante distinta de las hojas, películas y filamentos; 2) hojas y películas continuas; 3) filamentos continuos (fibras); 4) piezas moldeadas que son, sobre todo, sólidas; 5) piezas moldeadas huecas con paredes relativamente delgadas; 6) piezas discretas hechas de hojas y películas formadas; 7) fundidos y 8) productos de espuma. En este capítulo se estudiará cada una de estas categorías. Los procesos más importantes en el comercio son aquéllos asociados con los termoplásticos; los dos procesos de moldeo de mayor significancia son por extrusión y por inyección. En la nota histórica 13.1 se presenta una historia breve de los procesos para dar forma a los plásticos.

Se comienza el estudio de los procesos de dar forma a los plásticos por medio del análisis de las propiedades de los polímeros fundidos, porque casi todos los procesos para dar forma a los termoplásticos comparten la etapa común de calentar el plástico de modo que fluya.

Nota histórica 13.1 *Procesos para dar forma a los plásticos.*

El equipamiento para dar forma a los plásticos evolucionó en gran parte a partir de la tecnología de procesamiento del caucho. Entre los primeros que hicieron aportes destacó Edwin Chaffee, estadounidense que inventó un molino de dos rodillos calentados para mezclar aditivos con el caucho, alrededor de 1835 (sección 14.1.3). También fue el autor de un dispositivo similar llamado calandria, que consiste en una serie de rodillos calentados para recubrir tela con caucho (sección 13.3). Ambas máquinas siguen en uso para procesar tanto plásticos como cauchos.

Los primeros extrusores, que datan de alrededor de 1845, en Inglaterra, eran máquinas movidas por un martinete para extruir caucho y recubrir con éste alambres eléctricos. El problema con los extrusores de martinete es que operan en forma intermitente. Era muy deseable un extrusor que operara de modo continuo, en especial para hacer recubrimientos de alambres y cable. Aunque varias personas trabajaron con distintos grados de éxito en un extrusor tipo tornillo (sección 13.2.1), se da al crédito por este invento a Mathew Gray, de Inglaterra; su patente data de 1879. Después se desarrollaron los termoplásticos y se adaptaron a estos extrusores de tornillo, que habían sido diseñados originalmente para caucho. En 1935 se introdujo una máquina de extrusión diseñada en específico para termoplásticos.

Las máquinas de moldeo por inyección para plásticos fueron adaptaciones de equipo diseñado para fundición de metales con troquel (nota histórica 11.2). Alrededor de 1872, John Hyatt, figura importante en el desarrollo de los plásticos (nota histórica 8.1), patentó una máquina moldeadora especial para plásticos. Era una de tipo émbolo (sección 13.6.3). La forma moderna de la máquina de moldeo por inyección se introdujo en 1921, con controles semiautomáticos que se agregaron en 1937. Las máquinas de tipo martinete fueron el estándar en la industria del moldeo de plástico durante muchas décadas, hasta que se hizo evidente la superioridad de la de tipo tornillo reciprocante, inventada por William Willert en Estados Unidos, en 1952.

13.1 PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS FUNDIDOS

Para dar forma a un polímero termoplástico éste debe calentarse de modo que se suavice hasta adquirir la consistencia de un líquido. Esta forma se denomina ***polímero fundido***, que tiene varias propiedades y características únicas, que se estudian en esta sección.

Viscosidad Debido a su alto peso molecular, un polímero fundido es un fluido espeso con viscosidad elevada. Tal como se definió el término en la sección 3.4, la ***viscosidad*** es una propiedad de los fluidos que relaciona la fuerza cortante que se experimenta durante el movimiento del fluido con la tasa de deformación. La viscosidad es importante en el procesamiento de polímeros porque la mayoría de métodos para dar forma involucran el flujo del polímero fundido a través de canales pequeños o aberturas de troqueles. Es frecuente que los gastos o caudales sean elevados, lo que genera tasas elevadas de corte; y las fuerzas de corte se incrementan con la velocidad de corte, por lo que se requieren presiones significativas para efectuar los procesos.

En la figura 13.1 se muestra la viscosidad como función de la velocidad de corte para dos tipos de fluidos. Para un ***fluido newtoniano*** (que incluye la mayor parte de fluidos simples, como agua y aceite) la viscosidad es constante a una temperatura dada; no cambia

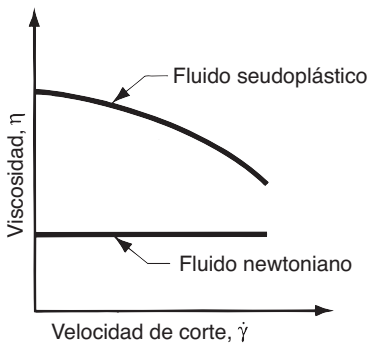


FIGURA 13.1 Relaciones de la viscosidad para un fluido newtoniano y un polímero fundido común.

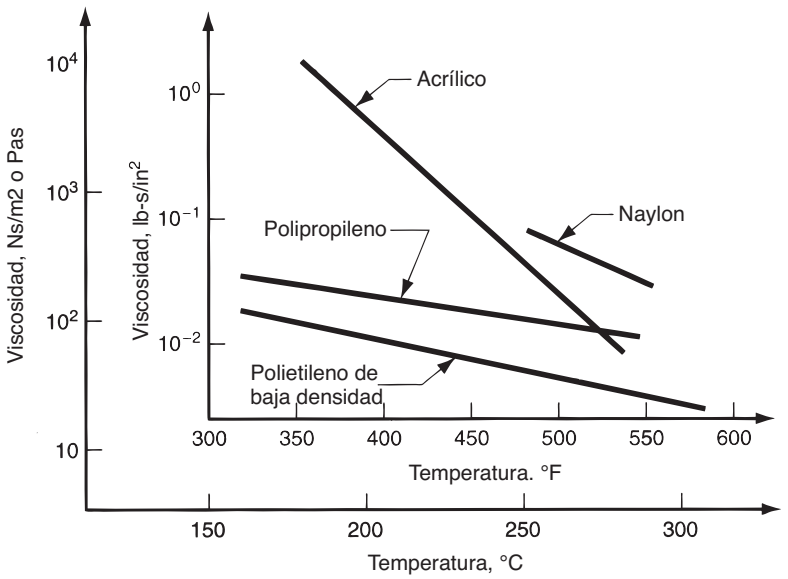


FIGURA 13.2 La viscosidad como función de las temperaturas para polímeros seleccionados a una velocidad de corte de $10^3 s^{-1}$. (Datos recopilados de la referencia [12]).

con la velocidad de corte. La relación entre la fuerza cortante y la deformación cortante es proporcional, con la viscosidad como constante de proporcionalidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \text{o bien} \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{13.1}$$

donde τ = fuerza cortante, Pa (lb/in^2); η = coeficiente de viscosidad cortante, Ns/m^2, o Pas (lb-s/in^2); y $\dot{\gamma}$ = velocidad de corte, 1/s (1/s). Sin embargo, para un polímero fundido, la viscosidad decrece con la velocidad de corte, lo que indica que el fluido se vuelve más delgado a tasas más elevadas de corte. Este comportamiento se llama ***seudoplasticidad***, y lo modela la expresión siguiente con una aproximación razonable:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \tag{13.2}$$

donde k = constante que corresponde al coeficiente de viscosidad, y n = índice de comportamiento del flujo. Para $n = 1$, la ecuación se reduce a la (13.1) para un fluido newtoniano, y la k se convierte en η. Para un polímero fundido, los valores de n son menores que 1.

Además del efecto de la velocidad de corte (gasto del fluido), la viscosidad de un polímero fundido también se ve afectada por la temperatura. Como ocurre con la mayoría de los fluidos, el valor disminuye con el aumento de la temperatura. Esto se ilustra en la figura 13.2 para varios polímeros comunes a la misma velocidad de corte de 10^3 s^{-1}. Esta velocidad de corte se aproxima a aquélla encontrada en el moldeo por inyección y en operaciones de extrusión de alta velocidad.

Así, se observa que la viscosidad de un polímero fundido disminuye con valores crecientes de velocidad de corte y de temperatura. Puede aplicarse la ecuación (13.2), excepto que k depende de la temperatura, como se muestra en la figura 13.2.

Viscoelasticidad Otra propiedad que poseen los polímeros fundidos es la ***viscoelasticidad***. Esta propiedad se estudió en el contexto de polímeros sólidos, en la sección 3.5. Sin embargo, también la tienen los polímeros líquidos. Un buen ejemplo es la ***expansión del troquel*** en la extrusión, en la que el plástico caliente se expande conforme sale de la abertura del troquel. El fenómeno, que se ilustra en la figura 13.3, se explica si se observa que el polímero estaba contenido en una sección transversal mucho más grande antes de ingresar al canal angosto del troquel. En efecto, el material extruido "recuerda" su forma y trata de regresar a ella después de dejar el orificio del troquel. En palabras más técnicas,

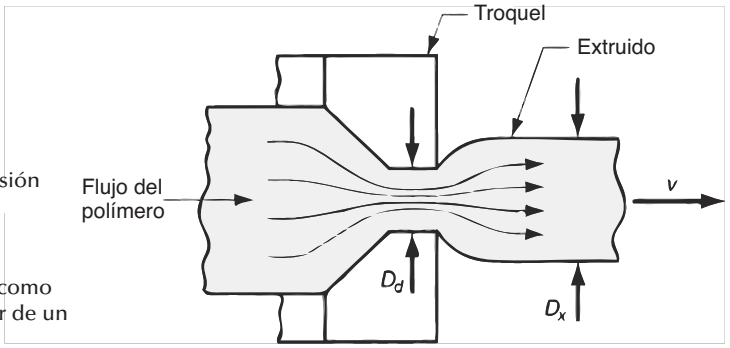


FIGURA 13.3 Expansión del troquel, una manifestación de la viscoelasticidad en polímeros fundidos, como se aprecia aquí al salir de un troquel de extrusión.

los esfuerzos de compresión que actúan sobre el material conforme ingresa a la abertura pequeña del troquel no se relajan de inmediato. Cuando el material sale después del orificio y la restricción desaparece, los esfuerzos no liberados hacen que la sección transversal se expanda.

La expansión del troquel se mide con más facilidad para una sección transversal circular, por medio de la ***razón de expansión***, que se define como

$$r_s = \frac{D_x}{D_d} \tag{13.3}$$

donde r_s = razón de expansión; D_x = diámetro de la sección transversal extruida, mm (in); y D_d = diámetro del orificio del troquel, mm (in). La cantidad de expansión del troquel depende del tiempo que el polímero fundido pasa en el canal de éste. Al incrementarse el tiempo en el canal, por medio de uno de mayor longitud, se reduce la expansión del troquel.

13.2 EXTRUSIÓN

La extrusión es uno de los procesos fundamentales para dar forma a los metales y cerámicos, así como a los polímeros. La ***extrusión*** es un proceso de compresión en el que se fuerza al material a fluir a través de un orificio practicado en un troquel a fin de obtener un producto largo y continuo, cuya sección transversal adquiere la forma determinada por la del orificio. Como proceso para dar forma a polímeros, se emplea mucho para termoplásticos y elastómeros (rara vez para termofijos) para producir en masa artículos tales como tubería, ductos, mangueras y formas estructurales (tales como molduras para ventanas y puertas), hojas y película, filamentos continuos, así como recubrimientos para alambres y cables eléctricos. Para estos tipos de productos, la extrusión se lleva a cabo como proceso continuo; el ***extruido*** (producto extruido) se corta después con las longitudes deseadas. En esta sección se estudia el proceso básico de extrusión, y en varias de las posteriores se examinan procesos que se basan en ésta.

13.2.1 Proceso y equipo

En la extrusión de polímeros, se alimenta material en forma de ***pellets*** o polvo hacia dentro de un barril de extrusión, donde se calienta y funde y se le fuerza para que fluya a través de la abertura de un troquel por medio de un tornillo rotatorio, como se ilustra en la figura 13.4. Los dos componentes principales del extrusor son el barril y el tornillo. El troquel no es un componente del extrusor; es una herramienta especial que debe fabricarse para el perfil particular que se va a producir.

Es común que el diámetro interno del barril del extrusor varíe entre 25 y 150 mm (1.0 a 6.0 in). El barril es largo en relación con su diámetro, con razones L/D que, por lo general, están entre 10 y 30. Para mayor claridad del dibujo, en la figura 13.4 está reducida la razón L/D. Las razones más altas se emplean para materiales termoplásticos, en tanto que los valores L/D más bajos son para los elastómeros.

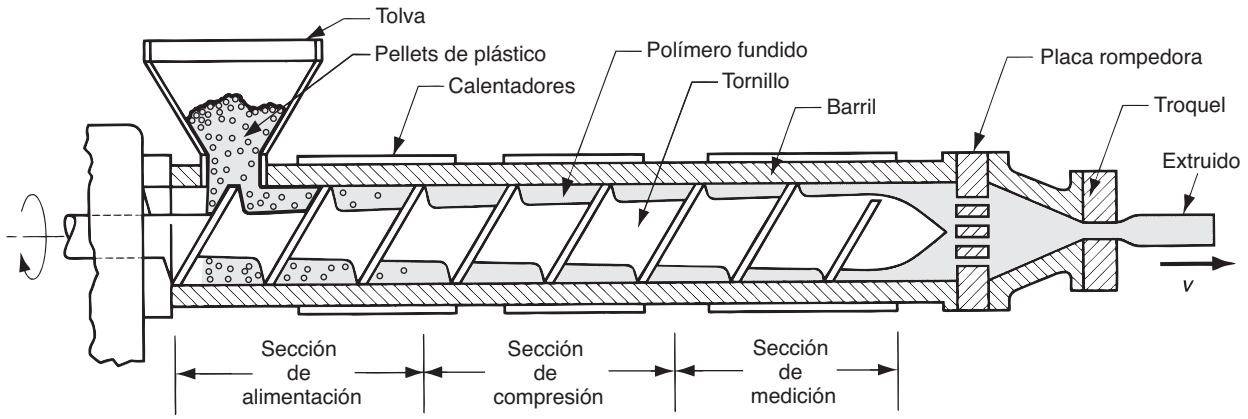


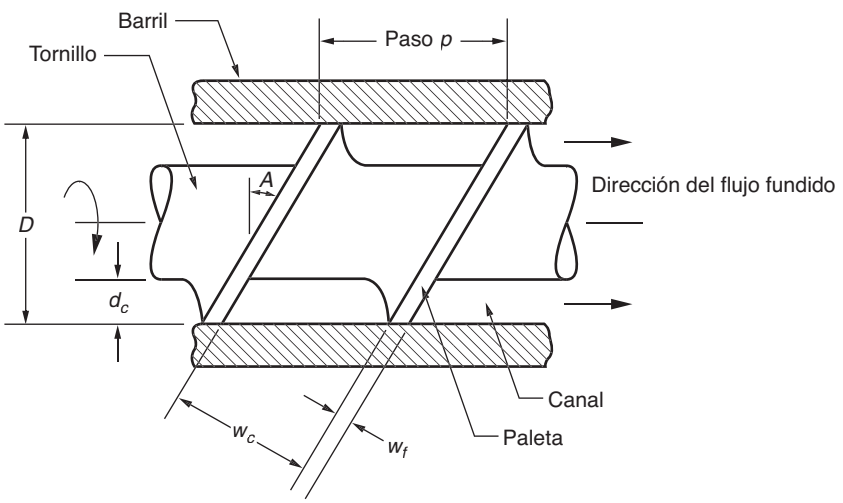
FIGURA 13.4 Componentes y características de un extrusor (de un solo tornillo) para plásticos y elastómeros.

En el extremo del barril opuesto al troquel se localiza una tolva que contiene el material que se alimenta. Los pellets se alimentan por gravedad al tornillo rotatorio, cuya rosca mueve al material a lo largo del barril. Se utilizan calentadores eléctricos para fundir al inicio los pellets sólidos; después, la mezcla y el trabajo mecánico del material generará calor adicional, lo que mantiene fundido al material. En ciertos casos, se suministra calor suficiente a través de la mezcla y acción cortante de modo que no se requiere calor externo. En realidad, en ciertos casos el barril debe enfriarse desde el exterior a fin de impedir el sobrecalentamiento del polímero.

El material se hace avanzar a lo largo del barril hacia la abertura del troquel, por medio de la acción del tornillo extrusor, que gira a unas 60 rev/min. El tornillo tiene varias funciones y se divide en secciones que son: 1) ***sección de alimentación***, en la que el material se mueve del puerto de la tolva y recibe precalentamiento; 2) ***sección de compresión***, en la que el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida, se extrae del fundido el aire atrapado entre los pellets y se comprime el material; y 3) ***sección de medición***, en la que se homogeniza al fundido y se genera presión suficiente para bombearlo a través de la abertura del troquel.

La operación del tornillo está determinada por su forma geométrica y velocidad de rotación. En la figura 13.5 se ilustra la forma común de un tornillo extrusor. El tornillo consiste en "paletas" (cuerdas) en forma de espiral, con canales entre ellas por los que

FIGURA 13.5 Detalles de un tornillo extrusor dentro del barril.



avanza el polímero fundido. El canal tiene un ancho w_c y profundidad d_c. Conforme el tornillo gira, las cuerdas empujan al material hacia delante a través del canal, del extremo de la tolva del barril al troquel. Aunque en el diagrama no se distingue, el diámetro de la cuerda es menor que el del barril, D, por un claro muy pequeño, alrededor de 0.05 mm (0.002 in). La función del claro es limitar la fuga del fundido posterior por la parte trasera del canal. La cuerda tiene un ancho w_f y está hecha de acero endurecido a fin de que resista el uso cuando gira y presiona contra el interior del barril. El tornillo tiene un paso cuyo valor, por lo general, se acerca al del diámetro D. El ángulo de las cuerdas, A, es el de la hélice del tornillo, y se determina con la relación

$$\tan A = \frac{p}{\pi D} \tag{13.4}$$

donde p = ancho del tornillo.[1]

El incremento de la presión aplicada al polímero fundido en las tres secciones del barril está determinado en mucho por la profundidad del canal, d_c. En la figura 13.4, d_c es relativamente grande en la sección de alimentación para permitir la entrada de cantidades importantes de polímero granular al barril. En la sección de compresión, d_c se reduce en forma gradual, con lo que se aplica presión mayor sobre el polímero conforme se funde. En la sección de medición, d_c se reduce y la presión alcanza un máximo según se restringe el flujo por la pantalla y la placa posterior. Las tres secciones del tornillo se ilustran en la figura 13.4 como si tuvieran longitud igual; esto es apropiado para un polímero que se funde gradualmente, como un polietileno de baja densidad. Para otros polímeros, las longitudes óptimas son diferentes. Para polímeros cristalinos tales como el naylon, la fusión ocurre en forma abrupta en su punto específico de fusión, y por ello es apropiado que la sección de compresión sea corta. Los polímeros amorfos, como el cloruro de polivinilo, se funden con mayor lentitud que el LDPE, y la zona de compresión para dichos materiales debe cubrir casi toda la longitud del tornillo. Aunque el diseño óptimo del tornillo es distinto para cada tipo de material, es práctica común usar tornillos de propósito general. Estos diseños representan un compromiso entre los materiales diferentes, y evitan la necesidad de hacer cambios frecuentes de tornillo, lo que resultaría en una pérdida costosa del tiempo del equipo.

El avance del polímero a lo largo del barril lo hace llegar en última instancia a la zona muerta. Antes de llegar al troquel, el fundido pasa a través del paquete de la pantalla, una serie de mallas de alambre sostenidas por una placa rígida (llamada ***placa rompedora***) que contiene agujeros axiales pequeños. El paquete de la pantalla sirve para 1) filtrar los contaminantes y grumos duros del fundido, 2) generar presión en la sección de medición y 3) forzar al flujo del polímero fundido y borrar de su "memoria" el movimiento circular impuesto por el tornillo. Esta última función tiene que ver con la propiedad viscoelástica del polímero; si el flujo no se forzara, el polímero repetiría su historia de girar dentro de la cámara de extrusión, y tendería a rotar y distorsionar el extruido.

Lo que se ha descrito aquí es la ***máquina de extrusión de un solo tornillo.*** También debe mencionarse los ***extrusores de tornillos gemelos***, ya que ocupan un lugar importante en la industria. En estas máquinas, los tornillos son paralelos y se encuentran lado a lado dentro del barril. Los extrusores de tornillos gemelos parecen adaptarse en especial al PVC rígido, el cual es un polímero difícil de extruir, y a materiales que requieren una mezcla mayor.

13.2.2 Análisis de la extrusión

En esta sección se desarrollan modelos matemáticos para describir, en forma simplificada, varios aspectos de la extrusión de polímeros.

[1] Desafortunadamente, p es el símbolo natural que se usa en este capítulo para dos variables. Representa el paso del tornillo, aquí y en otros capítulos. Más adelante, en este capítulo, se usa el mismo símbolo, p, para la presión.

Flujo fundido en el extrusor Conforme el tornillo gira dentro del barril, el polímero fundido se ve forzado a moverse hacia delante, en dirección del troquel; el sistema opera en forma muy parecida a un tornillo de Arquímedes. El mecanismo principal de transporte es el ***flujo por arrastre,*** que resulta de la fricción entre el líquido viscoso y las dos superficies opuestas que se mueven una respecto de la otra; 1) el barril estacionario y 2) el canal del tornillo giratorio. El arreglo se asemeja al movimiento de fluido que ocurre entre una placa estacionaria y una móvil, a las que separa un líquido viscoso, como se ilustra en la figura 3.17. Dado que la placa móvil tiene una velocidad v, se puede pensar que la velocidad promedio del fluido es $v/2$, lo que da por resultado un gasto volumétrico de

$$Q_d = 0.5\upsilon\, d\, w \tag{13.5}$$

donde Q_d = gasto volumétrico por arrastre, m^3/s (in^3/s); v = velocidad de la placa móvil, m/s (in/s); d = distancia que separa las dos placas, m (in); y w = el ancho de las placas perpendicular a la dirección de la velocidad, m (in). Estos parámetros se comparan con aquéllos en el canal definidos por el tornillo de extrusión rotatorio y la superficie del barril estacionario.

$$\upsilon = \pi DN \cos A \tag{13.6}$$

$$d = d_c \tag{13.7}$$

$$\text{y} \quad w = w_c = (\pi D \tan A - w_f)\cos A \tag{13.8}$$

donde D = diámetro de la cuerda del tornillo, m (in); N = velocidad rotacional del tornillo, rev/s; d_c = profundidad del canal del tornillo, m (in); w_c = ancho del canal del tornillo, m (in); A = ángulo de la cuerda; y w_f = ancho del filo de la cuerda, m (in). Si se supone que el ancho del filo de la cuerda es tan pequeño que es despreciable, entonces la última ecuación se reduce a

$$w_c = \pi\ D \tan A \cos A = \pi\ D\ \text{sen A} \tag{13.9}$$

Al sustituir las ecuaciones (13.6), (13.7) y la (13.9) en la ecuación (13.5), y con el empleo de varias identidades trigonométricas, se obtiene

$$Q_d = 0.5\pi^2 D^2 N d_c\ \text{sen A}\ \cos A \tag{13.10}$$

Si no hay fuerzas presentes que resistan el movimiento hacia delante del fluido, esta ecuación proveería una descripción razonable del gasto fundido dentro del extrusor. Sin embargo, al comprimir el polímero fundido a través del troquel corriente abajo, se crea una ***contrapresión*** en el barril que reduce el material que se mueve por flujo de arrastre en la ecuación (13-10). Esta reducción del flujo, que se llama ***flujo a contrapresión***, depende de las dimensiones del tornillo, la viscosidad del polímero fundido y el gradiente de presión a lo largo del barril. Estas dependencias se resumen en la siguiente ecuación [12]:

$$Q_b = \frac{\pi\ D d_c^3\ \text{sen}^2 A}{12\eta}\left(\frac{dp}{dl}\right) \tag{13.11}$$

donde Q_b = flujo a contrapresión, m^3/s (in^3/s); η = viscosidad, N-s/m^2 (lb-s-in^2); dp/dl = gradiente de presión, MPa/m (lb/in^2/in); los demás términos ya se definieron antes. El gradiente de presión real en el barril es función de la forma del tornillo a lo largo de su longitud; en la figura 13.6 se da un perfil común de la presión. Si como aproximación se supone que el perfil es una línea recta, que en la figura se indica con una línea de rayas, entonces el gradiente de presión se vuelve constante p/L y la ecuación anterior se reduce a

$$Q_b = \frac{p\pi\ D d_c^3\ \text{sen}^2 A}{12\eta L} \tag{13.12}$$

donde p = presión piezométrica en el barril, MPa (lb/in^2); y L = longitud del barril, m (in). Hay que recordar que este flujo a contrapresión en realidad no es un flujo real por sí mismo;

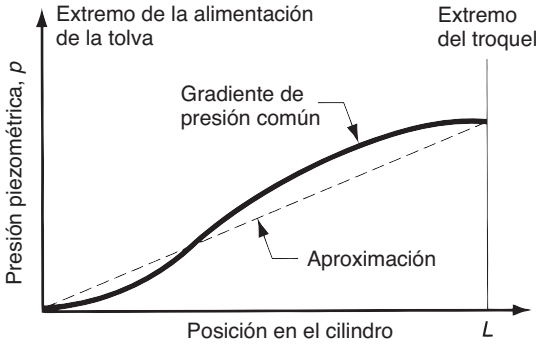


FIGURA 13.6 Gradiente de presión común en un extrusor; la línea de rayas indica una aproximación lineal recta para facilitar los cálculos.

es una reducción en el flujo por arrastre. Así, la magnitud del flujo fundido en un extrusor se calcula como la diferencia entre el flujo por arrastre y el flujo a contrapresión:

$$\begin{aligned} Q_x &= Q_d - Q_b \\ Q_x &= 0.5\pi^2 D^2 N d_c \operatorname{sen} A \cos A - \frac{p\pi D d_c^3 \operatorname{sen}^2 A}{12\eta L} \end{aligned} \tag{13.13}$$

donde Q_x = gasto resultante del polímero fundido en el extrusor. La ecuación (13.13) supone que hay una ***fuga de flujo*** mínima a través del claro entre las cuerdas y el barril. La fuga de flujo de líquido será pequeña en comparación con el flujo por presión de arrastre y retrocesos, excepto en extrusores mal utilizados.

La ecuación (13.13) contiene muchos parámetros, que pueden dividirse en dos tipos: 1) de diseño y 2) de operación. Los parámetros de diseño son aquellos que definen la configuración geométrica del tornillo y del barril: diámetro D, profundidad del canal d_c, y ángulo de la hélice A. Para una operación de extrusor dado, estos factores no pueden cambiar durante el proceso. Los parámetros de operación son aquéllos susceptibles de cambiar durante el proceso, para afectar el flujo de salida; incluyen la velocidad rotacional N, presión piezométrica p y viscosidad del fundido η. Por supuesto, la viscosidad del fundido es controlable sólo hasta el grado en que la temperatura y la velocidad de corte se pueden manipular para afectar dicha propiedad. Ahora, en el ejemplo que sigue, se verá la manera como los parámetros juegan sus papeles.

Ejemplo 13.1
Gastos de extrusión

Un barril extrusor tiene un diámetro D = 75 mm. El tornillo gira a N = 1 rev/s. La profundidad del canal es d_c = 6.0 mm y el ángulo de la cuerda A = 20º. La presión piezométrica en el extremo del barril $p = 7.0 \times 10^6$ Pa, la longitud del barril L = 1.9 m, y la viscosidad del polímero fundido se supone de η = 100 Pa. Determine el gasto volumétrico del plástico en el barril Q_s.

Solución: Con la ecuación (13.13) puede calcularse el flujo de arrastre y oponerse al flujo de contrapresión en el barril.

$$Q_d = 0.5\pi^2 (75\times10^{-3})^2 (1.0)(6\times10^{-3})(\operatorname{sen} 20)(\cos 20) = 53\ 525(10^{-9})\,\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_d = \frac{\pi(7\times10^6)(75\times10^{-3})(6\times10^{-3})^3(\operatorname{sen} 20)^2}{12(100)(1.9)} = 18\ 276(10^{-6})18\ 276(10^{-9})\,\text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_x = Q_d - Q_b = (53\ 525\times18\ 276)(10^{-9}) = \mathbf{35\ 249(10^{-9})\,m^3/s}$$

Características del extrusor y del troquel Si la contrapresión es igual a cero, de modo que el flujo fundido no tenga restricción en el extrusor, entonces el flujo sería igual al flujo por arrastre Q_d dado por la ecuación (13.10). Dados los parámetros de diseño y operación

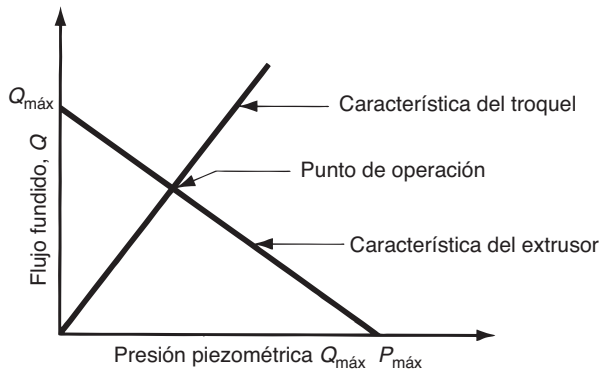


FIGURA 13.7 Característica del extrusor (también llamada característica del tornillo) y característica del troquel. El punto de operación del extrusor está en la intersección de las dos líneas.

(*D*, *A*, *N*, etc.), ésta es la capacidad de flujo máximo posible del extrusor. Se denotará como $Q_{máx}$:

$$Q_{máx} = 0.5\pi^2 D^2 N\, d_c\ \text{sen}\, A\ \cos A \tag{13.14}$$

Por otro lado, si la contrapresión fuera tan grande que ocasionara un flujo igual a cero, entonces el flujo a contrapresión sería igual al flujo por arrastre; es decir,

$$Q_x = Q_d - Q_b = 0, \quad \text{por lo tanto,} \quad Q_d = Q_b$$

Con el uso de las expresiones para Q_d y Q_b en la ecuación (13.13), se puede resolver para p a fin de determinar cuál tendría que ser la presión piezométrica máxima $p_{máx}$ para hacer que no hubiera flujo en el extrusor:

$$p_{máx} = \frac{6\pi DNL_\eta \cot A}{d_c^2} \tag{13.15}$$

Los dos valores $Q_{máx}$ y $p_{máx}$ son puntos a lo largo de los ejes del diagrama conocido como ***característica del extrusor*** (o bien ***característica del tornillo***), como se ve en la figura 13.7. Define la relación entre la presión piezométrica y el gasto en una máquina de extrusión con parámetros de operación dados.

Con un troquel en la máquina y el proceso de extrusión en marcha, los valores reales de Q_x y p estarán en algún punto entre los valores extremos, la ubicación determinada por las características del troquel. El gasto a través de éste depende del tamaño y la forma de la abertura y de la presión que se aplique para forzar al fundido a pasar por aquélla. Esto se expresa así:

$$Q_x = K_s p \tag{13.16}$$

donde Q_x es el gasto, en m^3/s (in^3/s); p = presión piezométrica, Pa (lb/in^2); y K_s = factor de forma para el troquel, m^5/Ns ($in^5/lb\text{-}s$). Para una abertura circular en el troquel, con una longitud de canal dada, el factor de forma se calcula [12] como:

$$k_s = \frac{\pi D_d^4}{128\eta L_d} \tag{13.17}$$

donde D_d = diámetro de la abertura del troquel, m (in); η = viscosidad del fundido, $N\text{-}s/m^2$ ($lb\text{-}s/in^2$); y L_d = longitud de la abertura del troquel, m (in). Para formas distintas de la circular, el factor de forma del troquel es menor que para uno redondo con la misma superficie de su sección transversal, lo que significa que se requiere una presión mayor para obtener el mismo gasto.

La relación entre Q_x y p en la ecuación (13.16) se denomina ***característica del troquel***. En la figura 13.7 aparece como una línea recta, que se intersecta con la característica del extrusor anterior. El punto de intersección identifica los valores de Q_x y p que se conocen como ***punto de operación*** para el proceso de extrusión.

Ejemplo 13.2 Características del extrusor y del troquel

Considere el extrusor del ejemplo 13.1, en el que $D = 75$ mm, $L = 1.9$ m, $N = 1$ rev/s, $d_c = 6$ mm y $A = 20°$. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante $\eta = 100$ Pa. Determine: *a*) $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, *b*) el factor de forma K_s para una abertura circular de troquel en el que $D_d = 6.5$ mm y $L_d = 20$ mm y c) los valores de Q_x y p en el punto de operación.

Solución: *a*) $Q_{máx}$ está dado por la ecuación (13.14).

$$Q_{máx} = 0.5\pi^2 D^2\, Nd_c\, \text{sen}\, A \cos A = 0.5\pi^2 (75\times10^{-3})^2 (1.0)(6\times10^{-3})(\text{sen}20)(\cos 20)$$
$$= \mathbf{53\,525(10^{-9})\,m^3/s}$$

$p_{máx}$ está dado por la ecuación (13.15).

$$p_{máx} = \frac{6\pi DNL_\eta \cot A}{d_c^2} = \frac{6\pi(75\times10^{-3})(1.9)(1.0)(100)\cot 20}{(6\times10^{-3})^2} = \mathbf{20\ 499\ 874\ Pa}$$

Estos dos valores definen la intersección con la ordenada y la abscisa para la característica del extrusor.

b) El factor de forma para una abertura circular de troquel con $D_d = 6.5$ mm y $L_d = 20$ mm se puede determinar a partir de la ecuación (13.17).

$$K_s = \frac{\pi(6.5\times10^{-3})^4}{128(100)(20\times10^{-3})} = \mathbf{21.9(10^{-12})\,m^5/Ns}$$

Este factor de forma define la pendiente de la característica del troquel.

c) El punto de operación está definido por los valores de Q_x y p, en los que la característica del tornillo se intersecta con la del troquel. La característica del tornillo se expresa como la ecuación de la línea recta entre $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, que es

$$Q_x = Q_{máx} - (Q_{máx}/p_{máx})p$$
$$= 53\,525(10^{-9}) - (53\,525(10^{-9})/20\,499\,874)p = 53\,525(10^{-9}) - 2.611(10^{-12})p \tag{13.18}$$

La característica del troquel está dada por la ecuación (13.16), con el uso del valor de K_s, que se calculó en el inciso *b*).

$$Q_x = 21.9(10^{-12})p$$

Al igualar las dos ecuaciones, se tiene

$$53\,525(10^{-9}) - 2.611(10^{-12})p = 21.9(10^{-12})p$$
$$p = \mathbf{2.184(10^{-6})Pa}$$

Al resolver para Q_x, con el empleo de una de las ecuaciones iniciales, se obtiene

$$Q_x = 53.525(10^{-6}) - 2.611(10^{-12})(2.184)(10^6) = \mathbf{47.822(10^{-6})\,m^3/s}$$

Al revisar esta ecuación con la otra para comprobar,

$$Q_x = 21.9(10^{-12})(2.184)(10^6) = 47.82(10^{-6})\,\text{m}^3/\text{s}$$

13.2.3 Configuraciones del troquel y productos extruidos

La forma del orificio del troquel determina la forma de la sección transversal del extruido. Se puede enumerar los perfiles de troquel comunes y las formas extruidas correspondientes, como sigue: 1) perfiles sólidos, 2) perfiles huecos, como tubos, 3) recubrimientos de alambre y cable, 4) hoja y película y 5) filamentos. Las tres primeras categorías se estudian en la

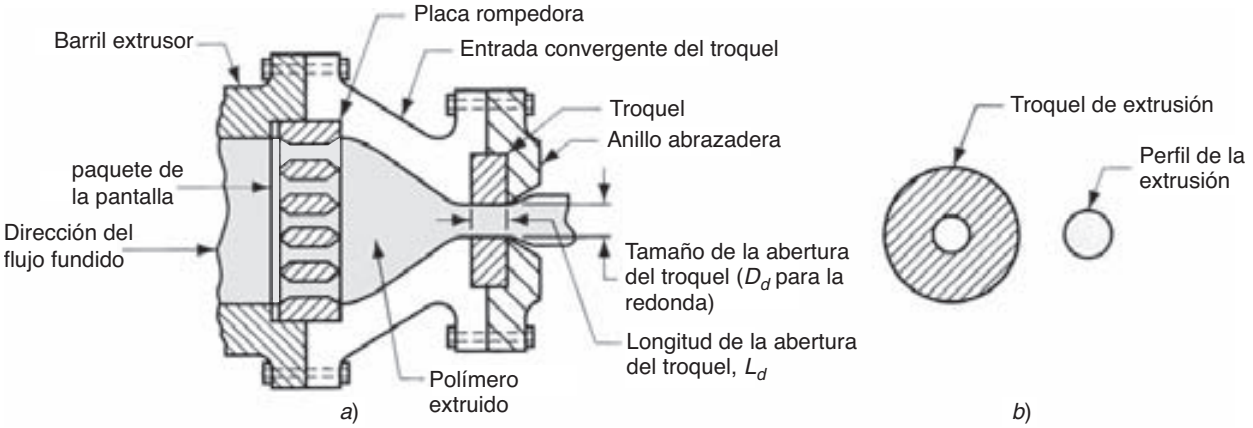


FIGURA 13.8 *a*) Vista lateral de la sección transversal de un troquel de extrusión para formas sólidas regulares, como cilindros; *b*) vista frontal del troquel, con el perfil del extruido. En ambas vistas es evidente la expansión del troquel. (Por claridad, se omiten o simplifican algunos detalles de construcción del troquel.)

presente sección. Los métodos para producir lámina y película se examinan en la sección 13.3; y la producción de filamento, en la 13.4. En ocasiones, estas últimas formas involucran procesos de formado adicionales a la extrusión.

Perfiles sólidos Éstos incluyen formas regulares: círculos, cuadrados y secciones transversales tales como formas estructurales, molduras para puertas y ventanas, y accesorios para automóviles y viviendas. La sección trasversal de la vista lateral de un troquel para estas formas sólidas se ilustra en la figura 13.8. Justo más allá del extremo del tornillo y antes del troquel, el polímero fundido pasa a través del paquete de la pantalla y la placa rompedora para fortalecer las líneas de flujo. Después fluye hacia la entrada (por lo general) convergente del troquel; la forma está diseñada para mantener un flujo laminar y evitar puntos muertos en las esquinas que de otro modo estarían presentes cerca del orificio. Después, el fundido avanza a través de la abertura misma del troquel.

Cuando el material sale del troquel, todavía está suave. Los polímeros con viscosidades de fundido altas son los mejores candidatos para la extrusión, ya que adoptan su mejor forma durante el enfriamiento. Éste se lleva a cabo por medio de soplar aire, rociar agua o pasar el extruido a través de un conducto de agua. Para compensar la expansión del troquel, la abertura de éste se hace suficientemente larga para eliminar algo de la memoria del polímero fundido. Además, es frecuente que se haga que el extruido se extraiga (estire) para evitar la expansión del troquel.

Para distintas formas de la redonda, la abertura del troquel se diseña con una sección transversal que es ligeramente distinta del perfil que se desea, por lo que el efecto de la expansión del troquel es proveer una corrección de la forma. En la figura 13.9 se ilustra dicha corrección para una sección transversal cuadrada. Debido a que polímeros diferentes

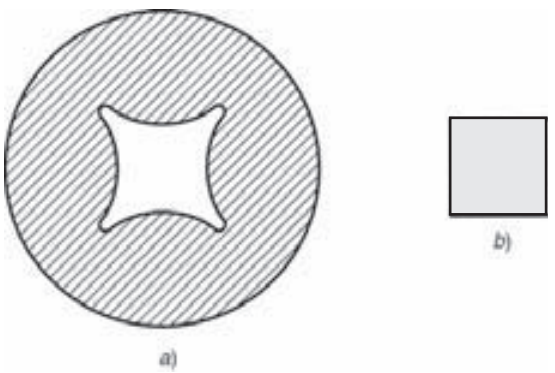


FIGURA 13.9 *a*) Sección transversal del troquel que muestra el perfil del orificio requerido para obtener *b*) un perfil cuadrado para el extruido.

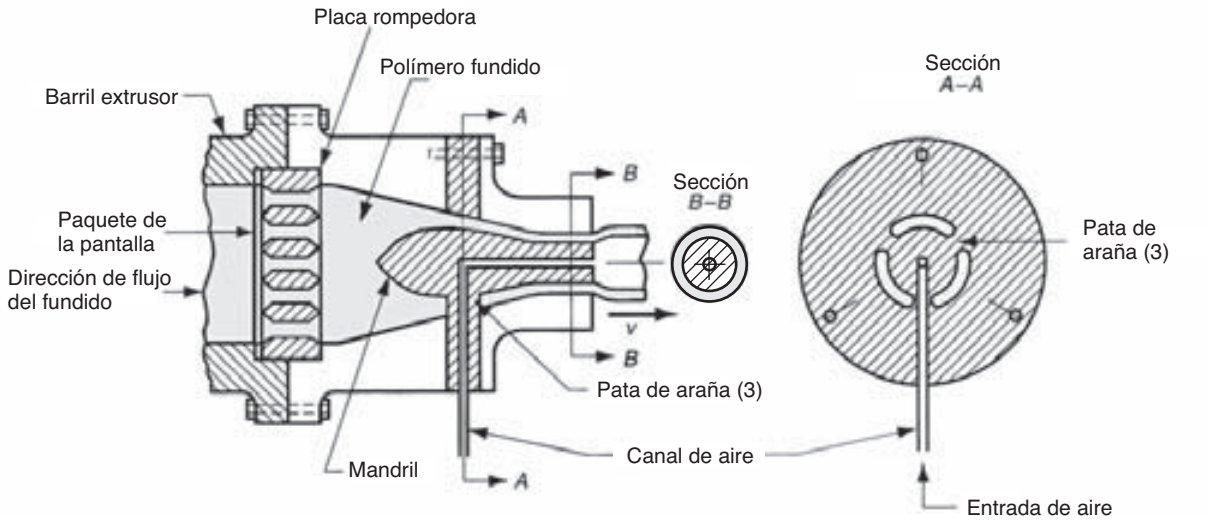


FIGURA 13.10 Sección transversal de la vista lateral de un troquel de extrusión para dar forma a secciones transversales huecas, como tubos y tuberías; la sección A-A es una sección transversal de la vista frontal que muestra la forma en que el difusor permanece en su sitio; La sección B-B muestra la sección transversal tubular justo antes de salir del troquel; la expansión del troquel ocasiona un agrandamiento del diámetro. (Se ha simplificado algunos detalles de la construcción del troquel.)

presentan grados distintos de expansión del troquel, la forma de éste depende del material por extruir. Se requieren habilidad y criterio considerables por parte del diseñador de troqueles para obtener secciones transversales complejas.

Perfiles huecos La extrusión de perfiles huecos, tales como tubos, tuberías, mangueras y otras secciones transversales que incluyen agujeros, requiere un mandril para obtener la forma hueca. En la figura 13.10 se presenta una configuración común del troquel. El mandril es mantenido en su lugar con el empleo de una araña, que se aprecia en la sección A-A de la figura. El polímero fundido fluye alrededor de las patas dando soporte al mandril para reunirse en una pared de tubo monolítica. Es frecuente que el mandril incluya un canal a través del cual se inyecta aire para mantener la forma hueca del extruido mientras se endurece. Las tuberías y los tubos se enfrían por medio de canales de agua abiertas o haciendo pasar el extruido suave a través de un tanque lleno de agua con el ajuste de tuberías que limitan el diámetro exterior del tubo mientras se mantiene la presión del aire en el interior.

Recubrimiento de alambre y cable El recubrimiento de alambre y cable para aislarlos es uno de los procesos de extrusión de polímeros más importantes. Como se aprecia en la figura 13.11, para recubrir alambre se aplica el polímero a éste conforme se tira de él a alta velocidad a través de un troquel. Se crea un vacío ligero entre el alambre y el polímero para facilitar la adhesión del recubrimiento. El alambre tenso provee rigidez durante el enfriamiento, a lo que, por lo general, se contribuye haciendo pasar el alambre recubierto a través de un canal de agua. El producto se enrolla en carretes grandes a velocidades de hasta 50 m/s (10 000 ft/min).

13.2.4 Defectos de la extrusión

Los productos extruidos presentan cierto número de defectos. Uno de los peores es la ***fractura del fundido***, en la que las tensiones que actúan sobre el fundido inmediatamente antes y durante su paso a través del troquel son tan grandes que ocasionan una falla, que se manifiesta en forma de la superficie muy irregular del extruido. Como se sugiere en la

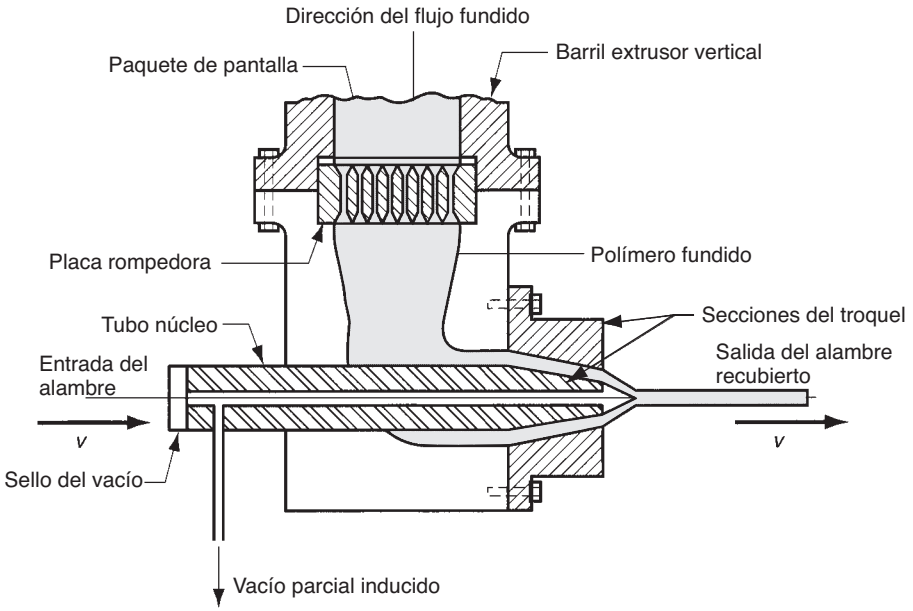


FIGURA 13.11 Sección transversal de la vista lateral del troquel para recubrir conductores eléctricos por medio de extrusión. (Se simplificaron algunos detalles de construcción del troquel.)

figura 13.12, la fractura del fundido puede ser ocasionada por una reducción brusca de la entrada del troquel, lo que provoca un flujo turbulento que rompe el fundido. Esto contrasta con las líneas de corriente del flujo laminar en el troquel que converge en forma gradual de la figura 13.8.

Un defecto más común de la extrusión es la ***piel de tiburón***, en la que la superficie del producto se arruga al salir del troquel. Conforme el fundido fluye a través de la abertura del troquel, la fricción en la interfaz ocasiona un perfil de velocidad a través de la sección transversal, como se ve en la figura 13.13. Los esfuerzos de tensión aparecen en la superficie al estirarse este material para estar a la par con el núcleo central que se mueve más rápido. Estos esfuerzos ocasionan rupturas menores que arrugan la superficie. Si el gradiente de velocidad se vuelve extremo, aparecen marcas prominentes en la superficie, lo que le da el aspecto de un tronco de bambú; de ahí el nombre de ***bambú*** para este defecto más severo.

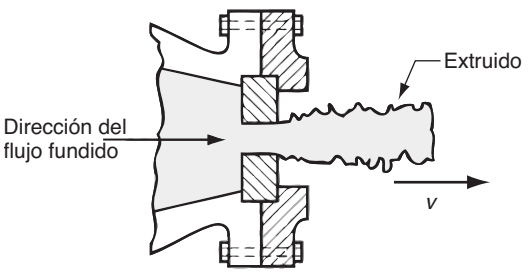


FIGURA 13.12 Fractura del fundido ocasionada por el flujo turbulento del líquido a través de una entrada del troquel que se reduce en forma abrupta.

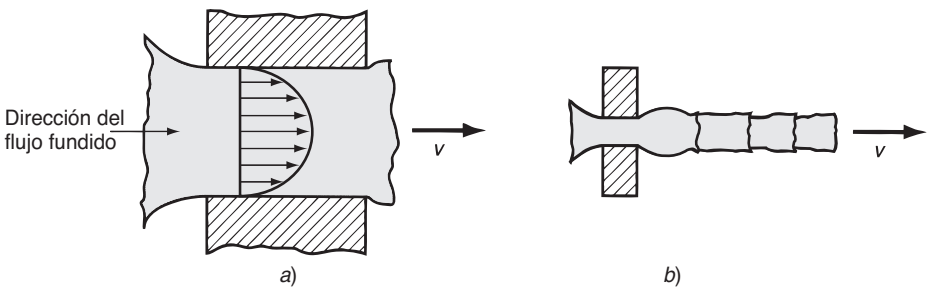


FIGURA 13.13 *a*) Perfil de velocidad del fundido conforme pasa a través de la abertura del troquel, lo que lleva a defectos llamados piel de tiburón y *b*) bambú.

13.3 PRODUCCIÓN DE HOJAS Y PELÍCULA

Las hojas (láminas) y películas de termoplástico se producen por medio de varios procesos; los más importantes son dos métodos que se basan en la extrusión. El término ***hoja*** se refiere a material cuyo espesor es de 0.5 mm (0.020 in) de alrededor de 12.5 mm (0.5 in), y se usa para productos como recubrimientos para ventanas y materiales para termoformados (sección 13.9). El término ***película*** se refiere a espesores por debajo de 0.5 mm (0.020 in). Las películas delgadas se usan para empacar (material para envolver productos) bolsas para abarrotes y basura); las aplicaciones de película más gruesa incluyen cubiertas y forros (cubiertas para albercas y para canales de irrigación).

Todos los procesos que se estudian en esta sección son operaciones continuas de producción elevada. Más de la mitad de las películas que se producen hoy día son de polietileno, la mayor parte PE de baja densidad. Los demás materiales principales son el polipropileno, cloruro de polivinilo y celulosa regenerada (celofán). Todos éstos son polímeros termoplásticos.

Extrusión de hoja y película con troquel de rendija Se producen hojas y películas de espesores diversos por medio de extrusión convencional, con el uso de una rendija angosta como abertura del troquel. Ésta puede medir hasta 3 m (10 ft) de ancho y ser tan angosta como 0.4 mm (0.015 in). En la figura 13.14 se ilustra una configuración posible del troquel. Éste incluye un colector que distribuye el polímero en forma lateral antes de que fluya a través de la rendija (el orificio del troquel). Una de las dificultades de este método de extrusión es la uniformidad del espesor a todo lo ancho del material. Esto se debe al cambio drástico de forma que experimenta el polímero fundido durante su flujo a través del troquel, y a las variaciones de la temperatura y presión en éste. Por lo general, las aristas de la película deben recortarse debido al engrosamiento que ahí ocurre. Para ayudar a compensar estas variaciones, los troqueles incluyen bordes ajustables (que no se muestran en el diagrama) que permiten que el ancho de la rendija se modifique.

Para lograr tasas altas de producción, debe integrarse al proceso de extrusión un método eficiente de enfriamiento y captura de la película. Por lo general, esto se hace dirigiendo de inmediato el material extruido hacia una tina de agua o hacia rodillos gélidos, como se muestra en la figura 13.15. El método de los rodillos helados parece tener más importancia comercial. En contacto con los rodillos fríos, el extruido se enfría y solidifica con rapidez; en efecto, el extrusor sirve como dispositivo alimentador para los rodillos fríos que en realidad dan forma a la película. El proceso es notable por sus velocidades muy altas de producción: 5 m/s (1 000 ft/min). Además, es posible alcanzar tolerancias estrechas para el espesor de la película. Debido al método de enfriamiento que se usa en este proceso, se le conoce como ***extrusión con rodillo frío.***

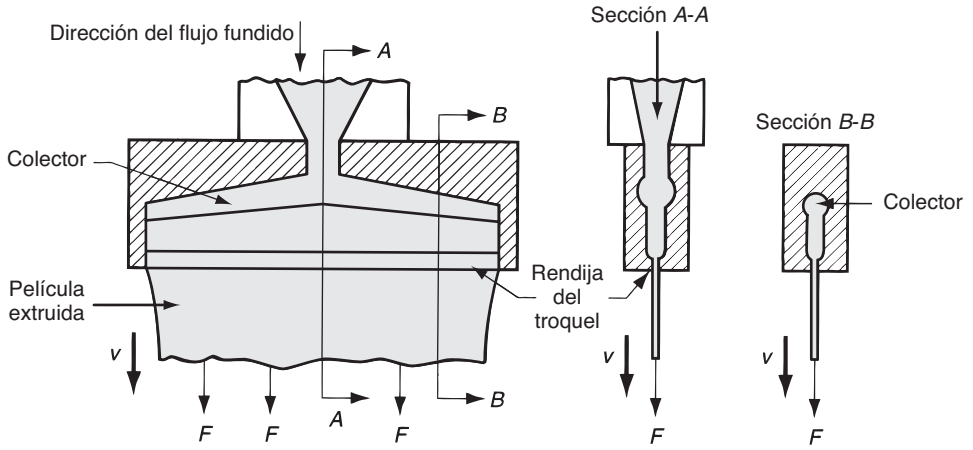


FIGURA 13.14 Una de varias configuraciones de troquel para extruir hojas y películas.

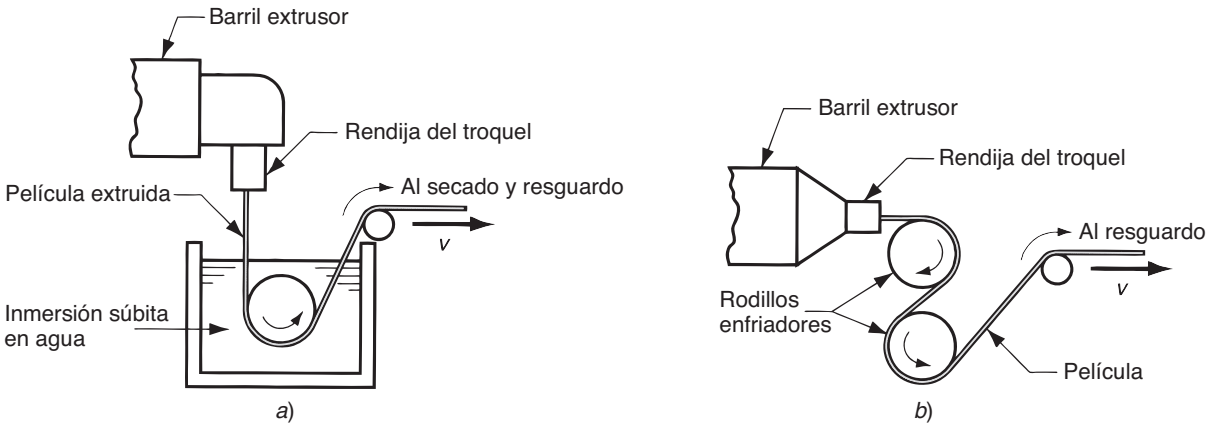
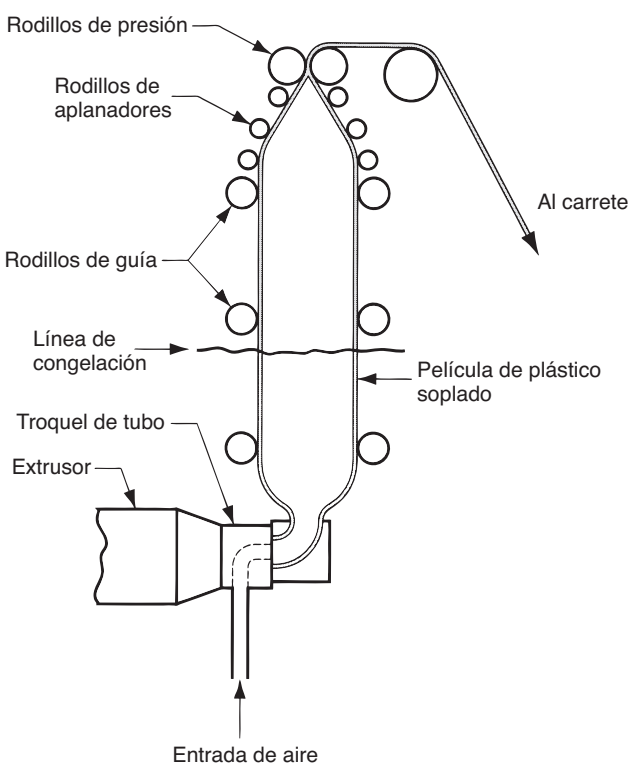


FIGURA 13.15 Uso de *a*) inmersión súbita en agua o *b*) rodillos fríos, para lograr la solidificación rápida de la película fundida después de la extrusión.

Proceso de extrusión de película soplada Éste es el otro proceso muy usado para hacer película delgada de polietileno para empaque. Es un proceso complejo que combina la extrusión y el soplado para producir un tubo de película delgada; se explica mejor con referencia al diagrama de la figura 13.16. El proceso comienza con la extrusión de un tubo que se jala de inmediato hacia arriba mientras aún está fundido, y se expande en forma simultánea por medio de aire que entra a su interior a través del mandril del troquel. Una "línea de congelación" marca la posición en que ocurre la solidificación del polímero de la burbuja que asciende. La presión del aire en la burbuja debe permanecer constante para mantener uniforme el espesor de la película y el diámetro del tubo. El aire es contenido en el tubo por medio de rodillos de presión que lo exprimen una vez que se ha enfriado. Los rodillos de guía y los de aplanado también se utilizan para fijar el tubo soplado y dirigirlo hacia los rodillos de presión. Luego se colecta el tubo plano en un carrete.

FIGURA 13.16 Proceso de película soplada para la producción a gran escala de película tubular delgada.



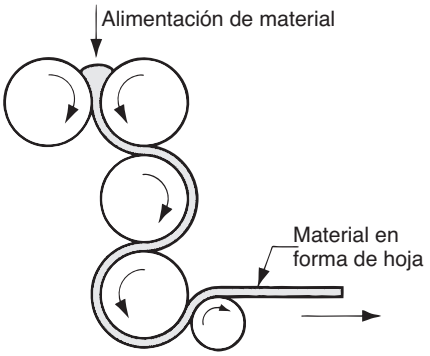


FIGURA 13.17 Configuración común de rodillos en el calandrado.

El efecto del inflado por aire es estirar la película en ambas direcciones conforme se enfría desde su estado fundido. Esto da como resultado propiedades isotrópicas de resistencia, lo que es una ventaja sobre otros procesos en los que el material primero se estira en una dirección. Otras ventajas incluyen la facilidad con la que pueden cambiarse la tasa de extrusión y la presión del aire para controlar el ancho y espesor del material. Si se compara este proceso con la extrusión por troquel de rendija, el método de la película soplada produce una película más resistente (de modo que puede usarse una película más delgada para empacar un producto), pero el control del espesor y las tasas de producción son menores. La película soplada final puede almacenarse en forma tubular (por ejemplo para bolsas de basura) o cortarse después por las orillas a fin de obtener dos películas delgadas paralelas.

Calandrado Éste es un proceso para producir hojas y películas a partir de caucho (sección 14.14) o termoplásticos tipo caucho tales como el PVC plastificado. En el proceso, el material inicial pasa por una serie de rodillos que lo trabajan y que reducen su espesor a la medida deseada. En la figura 13.17 se presenta un arreglo común. El equipo es caro, pero la tasa de producción es alta; es posible alcanzar velocidades que se acercan a 2.5 m/s (500 ft/min). Se requieren controles cercanos de las temperaturas, presiones y velocidad rotacional de los rodillos. El proceso es notable por el buen acabado de las superficies y por la exactitud alta de las medidas de la película. Los productos de plástico elaborados con el proceso de calandrado incluyen cubiertas de PVC para pisos, cortinas para baño, manteles de vinilo, cubiertas para albercas, lanchas y juguetes inflables.

13.4 PRODUCCIÓN DE FIBRAS Y FILAMENTOS (HILADO O HILANDERÍA)

La aplicación más importante de las fibras y filamentos se da en los textiles. Su uso como materiales de refuerzo de los plásticos (compuestos) es una aplicación que va en aumento, pero aún es pequeña en comparación con los textiles. Una ***fibra*** se define como una banda larga y delgada de material cuya longitud es al menos 100 veces mayor que la dimensión de su sección transversal. Un ***filamento*** es una fibra de longitud continua.

Las fibras son naturales o sintéticas. Las sintéticas constituyen alrededor de 75% del mercado de fibras actual, de las que el poliéster es la más importante, seguido por naylon, acrílico y rayón. Las fibras naturales constituyen cerca de 25% del total producido, con el algodón en el lugar más importante, por mucho (la producción de lana es significativamente menor que la de algodón).

El término ***hilado*** agrupa los métodos que se emplean para obtener y tejer las fibras naturales en hilos o hebras. En la producción de fibras sintéticas, el término se refiere al proceso de extruir un polímero fundido o solución a través de una ***hilera*** (troquel con muchos agujeros pequeños) para hacer los filamentos, los que luego se extraen y enrollan en una ***bobina***. Hay tres principales variantes en la torsión de fibras sintéticas, dependiendo del polímero que se procese: 1) hilado fundido, 2) hilado seco y 3) hilado húmedo.

El ***hilado fundido*** se emplea cuando el polímero de inicio se procesa mejor si se calienta hasta fundirlo y se bombea a través de la hilera, en forma muy parecida a la extrusión convencional. Una hilera común mide 6 mm (0.25 in) de espesor y contiene aproximadamente 50 agujeros con diámetro de 0.25 mm (0.010 in); los agujeros están abocardados, de modo que la abertura resultante tiene una razón *L/D* de sólo 5/1 o menos. Los filamentos que salen del troquel se jalan y en forma simultánea se enfrían con aire antes de ponerlos juntos y enrollarlos en la bobina, como se ilustra en la figura 13.18. Mientras el polímero aún se encuentra fundido, tiene lugar una extensión y adelgazamiento significativos del filamento, de modo que el diámetro final del que se enrolla en la bobina puede ser de sólo 1/10 del tamaño que se extruye. El hilado fundido se utiliza para el poliéster y naylon; toda vez que éstas son las fibras sintéticas más importantes; el hilado fundido es el más importante de los tres procesos para elaborar fibras sintéticas.

En el ***hilado seco***, el polímero de inicio está en solución, y el solvente se separa por evaporación. El extruido se jala a través de una cámara caliente que elimina el solvente; por otro lado, la secuencia es similar a la anterior. Las fibras de acetato de celulosa y acrílico se producen con este proceso. En el ***hilado húmedo***, el polímero también está en solución, sólo que el solvente no es volátil. Para separar al polímero, debe pasarse al extruido a través de un producto químico líquido que coagula o precipita al polímero en bandas coherentes que luego se colocan en bobinas. Este método se emplea para producir rayón (fibras de celulosa regeneradas).

Los filamentos producidos con cualquiera de los tres procesos por lo general están sujetos a un estirado adicional en frío para alinear la estructura cristalina a lo largo de la dirección del eje del filamento. Son extensiones comunes de 2 a 8 [13]. Esto tiene el efecto

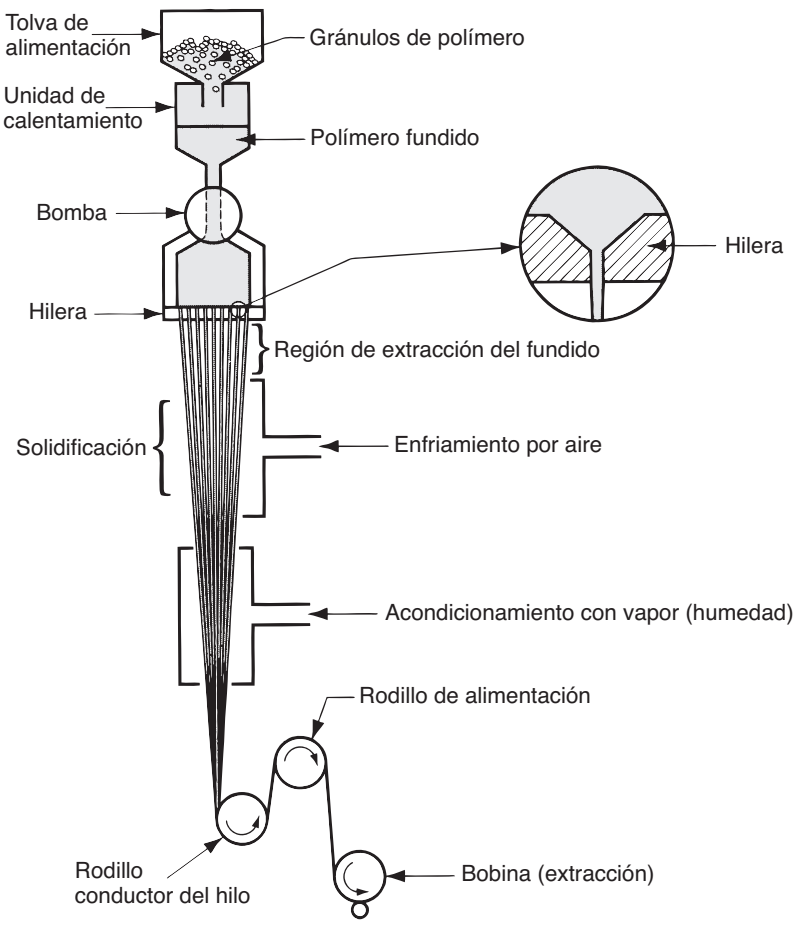


FIGURA 13.18 Hilado fundido de filamentos continuos.

de incrementar en forma significativa la resistencia a la tensión de las fibras. La extracción se lleva a cabo tirando del hilo entre dos carretes, de los que el que enrolla se mueve a velocidad mayor que el que se desenrolla.

13.5 PROCESOS DE RECUBRIMIENTO

El recubrimiento con plástico (o caucho) involucra la aplicación de una capa del polímero dado sobre un material que es el sustrato. Se observan tres categorías [6]: 1) recubrimiento de alambre y cable; 2) recubrimiento plano, que involucra recubrir una película plana; y 3) recubrimiento de contorno, que cubre un objeto tridimensional. Ya se estudió el recubrimiento de alambre y cable (sección 13.2.3); se trata en lo básico de un proceso de extrusión. Las otras dos categorías se analizan en los párrafos que siguen. Además, se encuentra la tecnología para aplicar pinturas, barnices, lacas y otros recubrimientos similares (sección 29.5).

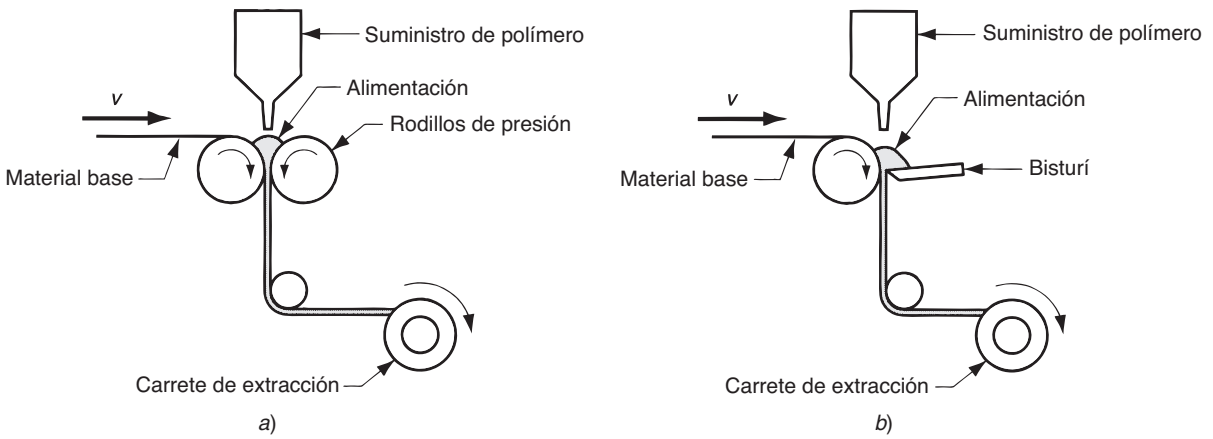
El ***recubrimiento plano*** se emplea para cubrir telas, papel, tableros y hojas de metal; estos artículos son productos principales para ciertos plásticos. Los polímeros importantes incluyen polietileno y polipropileno, con aplicaciones menores para el naylon, PVC y poliéster. En la mayoría de casos, el recubrimiento mide sólo de 0.01 a 0.05 mm (0.0005 a 0.002 in) de espesor. En la figura 13.19 se ilustran las dos técnicas principales de recubrimiento plano. En el ***método del rodillo,*** se exprime el material de polímero para recubrir, contra el sustrato, por medio de rodillos opuestos. Con el ***método del bisturí***, un cuchillo afilado controla la cantidad de polímero fundido con que se recubre al sustrato. En ambos casos, el material de recubrimiento se suministra ya sea con un proceso de extrusión con troquel de rendija o por calandrado.

El ***recubrimiento de contorno*** de objetos tridimensionales se lleva a cabo por inmersión o rociado. La ***inmersión*** consiste en sumergir el objeto en un baño apropiado de polímero o solución fundidos, seguido de enfriamiento o secado. El ***rociado*** (como la pintura en rocío) es un método alternativo para aplicar recubrimiento de polímero a un objeto sólido.

13.6 MOLDEO POR INYECCIÓN

El ***moldeo por inyección*** es un proceso con el que se calienta un polímero hasta que alcanza un estado muy plástico y se le fuerza a que fluya a alta presión hacia la cavidad de

FIGURA 13.19 Procesos de recubrimiento plano: *a*) método del rodillo y *b*) método del bisturí.



un molde, donde se solidifica. Entonces, la pieza moldeada, llamada ***moldeo***, se retira de la cavidad. El proceso produce componentes discretos que casi siempre son de forma neta. Es común que el ciclo de producción dure de 10 a 30 segundos, aunque no son raros ciclos de un minuto o más. Asimismo, el molde puede contener más de una cavidad, de modo que en cada ciclo se producen molduras múltiples. En el video clip se ilustran muchos aspectos del moldeo por inyección.

Es posible obtener formas complejas e intrincadas con el moldeo por inyección. El reto en esos casos es fabricar un molde cuya cavidad tenga la misma forma que la pieza, y que también permita el retiro de ésta. El tamaño de la pieza varía de alrededor de 50 g (2 oz) hasta 25 kg (más de 50 libras); el límite superior está representado por componentes tales como puertas de refrigerador y defensas de autos. El molde determina la forma y el tamaño de la pieza, y es la herramienta especial en el moldeo por inyección. Para piezas complejas y grandes, el molde llega a costar cientos de miles de dólares. Para piezas pequeñas, el molde se puede construir para que contenga cavidades múltiples, lo que también hace que sea caro. Así, el moldeo por inyección es económico sólo para cantidades grandes de producción.

El moldeo por inyección es el proceso que más se usa para los termoplásticos. Algunos termofijos y elastómeros se moldean por inyección, con modificaciones en el equipo y parámetros de operación, a fin de permitir el entrecruzamiento de estos materiales. En la sección 13.6.6 se estudian éstas y otras variaciones del moldeo por inyección.

13.6.1 Proceso y equipo

El equipo para moldeo por inyección evolucionó a partir de la fundición con troquel (Nota histórica 13.1). En la figura 13.20 se presenta una máquina grande de moldeo por inyección. Como se ilustra en el esquema de la figura 13.21, una máquina de moldeo por inyección consta de dos componentes principales: 1) la unidad de inyección de plástico y 2) la unidad de sujeción del molde. La ***unidad de inyección*** es muy parecida a un extrusor. Consiste en un barril al que se alimenta desde un extremo por una tolva que contiene un suministro de pellets de plástico. Dentro del barril hay un tornillo cuya operación sobrepasa la del tornillo extrusor en el siguiente aspecto: además de girar para mezclar y calentar el polímero, también actúa como martinete que se mueve con rapidez hacia delante para inyectar plástico fundido al molde. Una válvula sin retorno montada cerca de la punta del tornillo impide que el fundido fluya hacia atrás a lo largo de las cuerdas de aquél. En una etapa posterior del ciclo de moldeo, el martinete vuelve a su posición original. Debido a su acción dual, se denomina ***tornillo reciprocante***, nombre que también identifica el tipo de máquina. Las máquinas antiguas de moldeo por inyección usaban un martinete simple (sin cuerdas de tornillo), pero la superioridad del diseño del tornillo recíproco ha llevado a que se adopte con amplitud en las plantas de moldeo de hoy día. En resumen, las funciones de la unidad de inyección son fundir y homogeneizar el polímero, y luego se inyecta en la cavidad del molde.

La ***unidad de sujeción*** se relaciona con la operación del molde. Sus funciones son 1) mantener las dos mitades del molde alineadas en forma correcta una con otra, 2) mantener cerrado al molde durante la inyección, por medio de la aplicación de una fuerza que lo sujeta lo suficiente para resistir la fuerza de inyección y 3) abrir y cerrar el molde en los momentos apropiados del ciclo de inyección. La unidad de abrazadera consiste en dos placas, una fija y otra móvil, y un mecanismo para mover ésta. El mecanismo básicamente es una prensa de potencia que funciona por medio de un pistón hidráulico o dispositivos de palanca mecánica de varios tipos. Las máquinas grandes disponen de fuerzas de abrazadera de varios miles de toneladas.

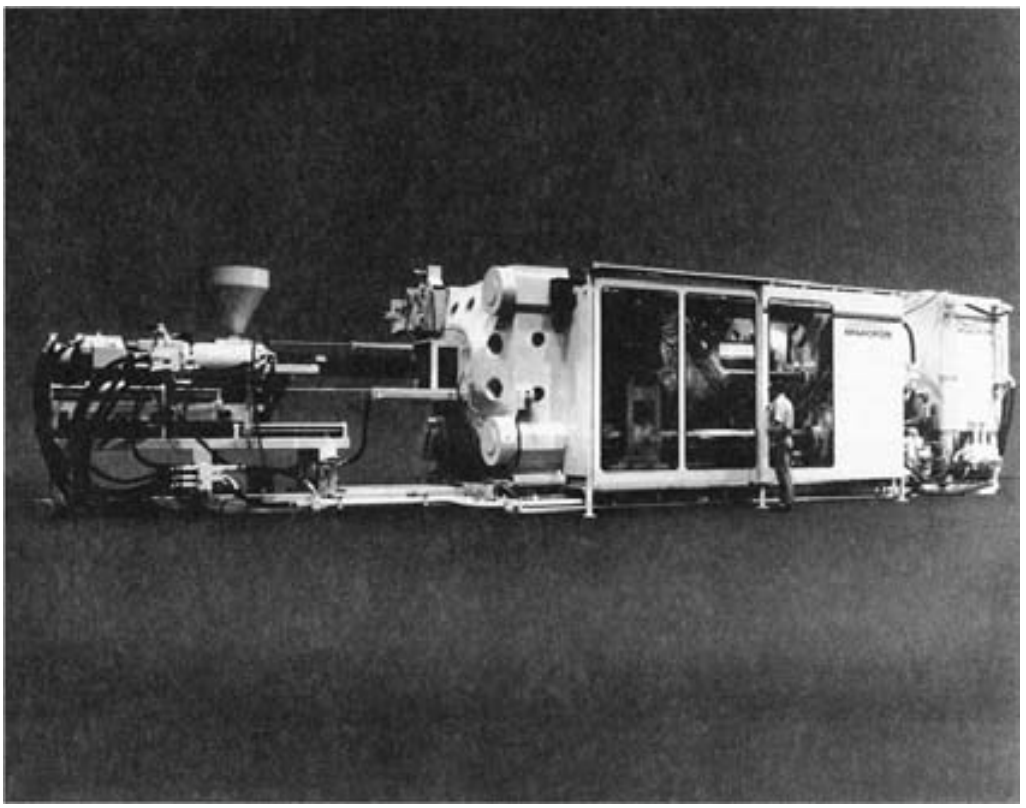
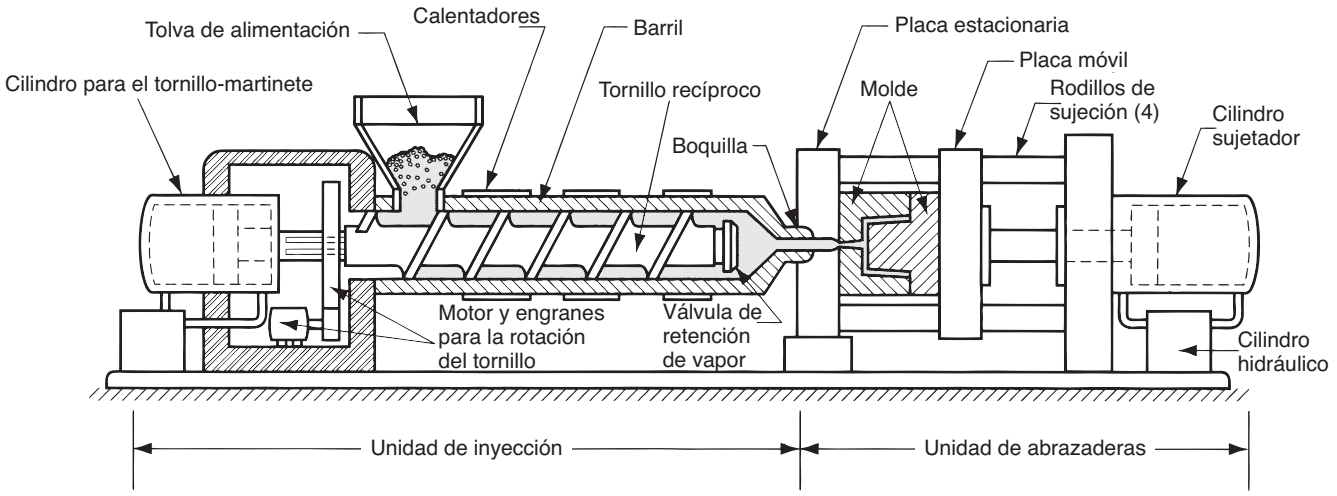


FIGURA 13.20 Máquina grande (capacidad de 3 000 toneladas) de moldeo por inyección. (Cortesía de Cincinnati Milacron.)

El ciclo para el moldeo por inyección de un polímero termoplástico procede en la siguiente secuencia, como se ilustra en la figura 13.22. La acción comienza con el molde abierto y la máquina lista para comenzar un nuevo moldeo: 1) el molde se cierra y se sujeta. 2) Se inyecta un ***disparo*** de fundido a alta presión hacia la cavidad del molde, el cual se ha puesto a la temperatura y viscosidad correctas por medio de calor y trabajo mecánico del tornillo. El plástico se enfría y comienza a solidificarse cuando se encuentra con la superficie fría del molde. Se mantiene la presión del martinete a fin de comprimir

FIGURA 13.21 Diagrama de una máquina de moldeo por inyección, del tipo de tornillo recíproco (se han simplificado algunos detalles mecánicos).



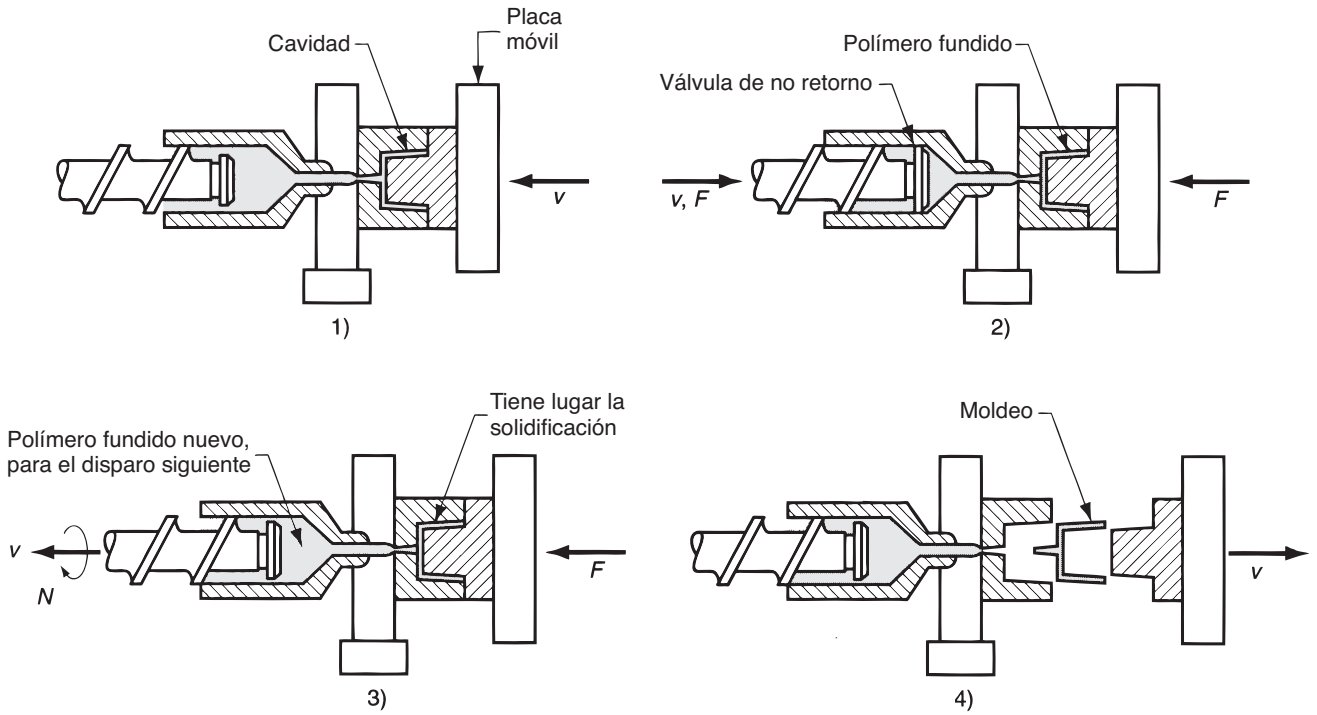


FIGURA 13.22 Ciclo común de moldeo: 1) molde cerrado, 2) se inyecta fluido a la cavidad, 3) se retrae el tornillo y 4) se abre el molde, y la pieza se expulsa.

más fundido en la cavidad para compensar la contracción durante el enfriamiento. 3) El tornillo gira y se retrae con la válvula de retención de vapor abierta para permitir que polímero nuevo fluya hacia la parte delantera del barril. Entre tanto, el polímero en el molde se ha solidificado por completo. 4) El molde se abre, y la pieza se expulsa y retira.

13.6.2 El molde

Es la herramienta especial en el moldeo por inyección; está diseñado sobre medida y se fabrica para la pieza específica que se ha de producir. Cuando termina la corrida de producción de esa pieza, el molde se reemplaza por otro para la pieza siguiente. En esta sección se estudian varios tipos de molde para inyección.

Molde de dos placas En la figura 13.23 se ilustra el ***molde de dos placas*** convencional, que consiste en dos mitades unidas a las dos placas de la unidad de abrazaderas de la máquina moldeadora. Cuando la unidad de abrazaderas se abre, también lo hacen las dos mitades del molde, como se ilustra en *b*). El rasgo más notorio del molde es la ***cavidad***, que por lo general se forma con la extracción de metal de las superficies que se corresponden de las dos mitades. Los moldes pueden tener una cavidad o varias, a fin de producir más de una pieza en un solo disparo. La figura muestra un molde con dos cavidades. Las ***superficies de separación*** (o ***línea de separación***, en la vista transversal del molde) son aquéllas donde el molde se abre para retirar la(s) pieza(s).

Además de la cavidad, hay otros rasgos del molde que desempeñan funciones indispensables durante el ciclo del moldeo. Un molde debe tener canal de distribución por el que fluya el polímero fundido, de la boquilla del barril de inyección a la cavidad del

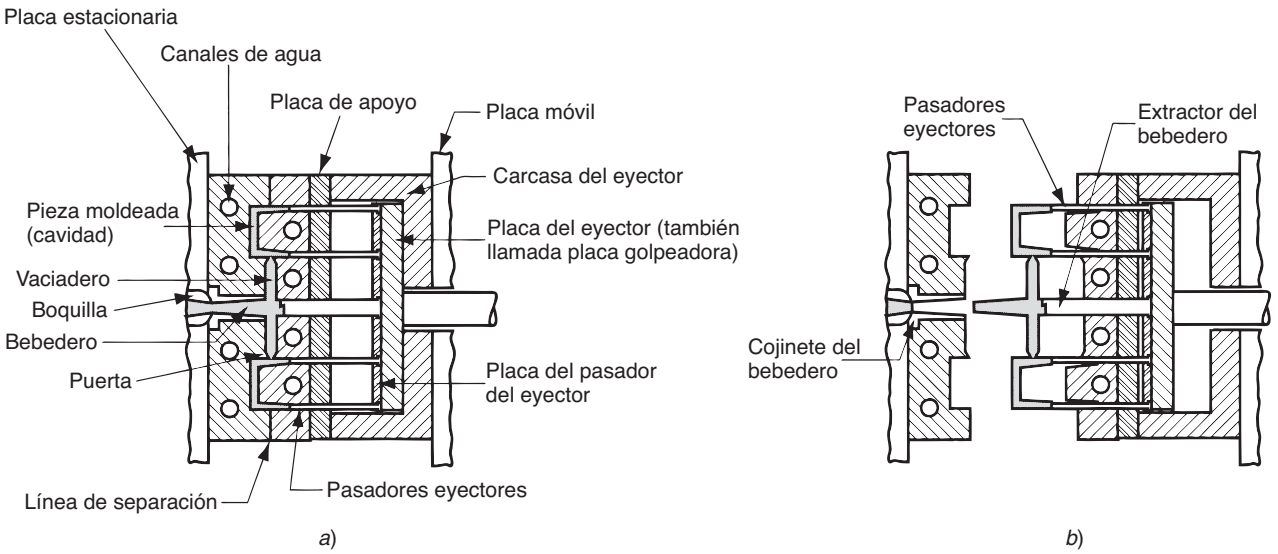


FIGURA 13.23 Detalles de un molde de dos placas para molde por inyección de termoplásticos: *a*) cerrado y *b*) abierto. El molde tiene dos cavidades para producir dos piezas en forma de copa (se muestra la sección transversal) con cada disparo de inyección.

molde. El canal distribuidor consiste en 1) un ***bebedero***, que va de la boquilla al molde; 2) ***vaciadores***, que van de la toma a la cavidad (o cavidades); y 3) ***puertas***, que restringen el flujo del plástico hacia la cavidad. Hay una o más puertas para cada cavidad del molde.

Es necesario un ***sistema de eyección*** para expulsar la pieza moldeada de la cavidad en el extremo del ciclo de moldeo. Por lo general, son los ***pasadores eyectores*** construidos en la mitad móvil del molde los que llevan a cabo esta función. La cavidad está dividida entre las dos mitades del molde de tal forma que la contracción natural del moldeo ocasiona que la pieza se adhiera a la mitad móvil. Cuando el molde se abre, los pasadores eyectores empujan la pieza fuera de la cavidad del molde.

Se requiere un ***sistema de enfriamiento*** para el molde. Éste consiste en una bomba externa conectada a pasajes en el molde, a través de los cuales circula agua para eliminar calor del plástico caliente. Debe evacuarse aire de la cavidad del molde conforme el polímero avanza. A través de los claros pequeños de los pasadores eyectores del molde pasa gran cantidad de aire. Además, es frecuente que se maquinen ***conductos de aire*** estrechos en la superficie de separación; de alrededor de 0.03 mm (0.001 in) de profundidad y 12 a 25 mm (0.5 a 1.0 in) de ancho, estos canales permiten que el aire escape hacia el exterior, pero son demasiado pequeños para que el polímero fundido viscoso fluya a través de ellos.

En resumen, un molde consiste en 1) una o más cavidades que determinan la forma de la pieza, 2) canales de distribución a través de los cuales el polímero fundido fluye a las cavidades, 3) un sistema de eyección para la remoción de la pieza, 4) un sistema de enfriamiento y 5) conductos para permitir la evacuación del aire de las cavidades.

Otros tipos de molde El de dos placas es el molde más común en el moldeo por inyección. Uno alternativo es el ***molde de tres placas***, que se ilustra en la figura 13.24, para la misma configuración geométrica de la pieza que antes. Este diseño de molde tiene ventajas. En primer lugar, el flujo de plástico fundido ocurre a través de una puerta ubicada en la base de la pieza con forma de taza, en vez de en un lado. Esto permite una distribución más pareja de fundido en los lados de la taza. En el diseño de puerta lateral del molde de dos placas de la figura 13.23, el plástico debe fluir alrededor del núcleo y unirse en el lado opuesto, posiblemente con la creación de una debilidad en la línea de soldadura. En segundo lugar, el molde de tres placas permite una operación más automática de la máquina moldeadora.

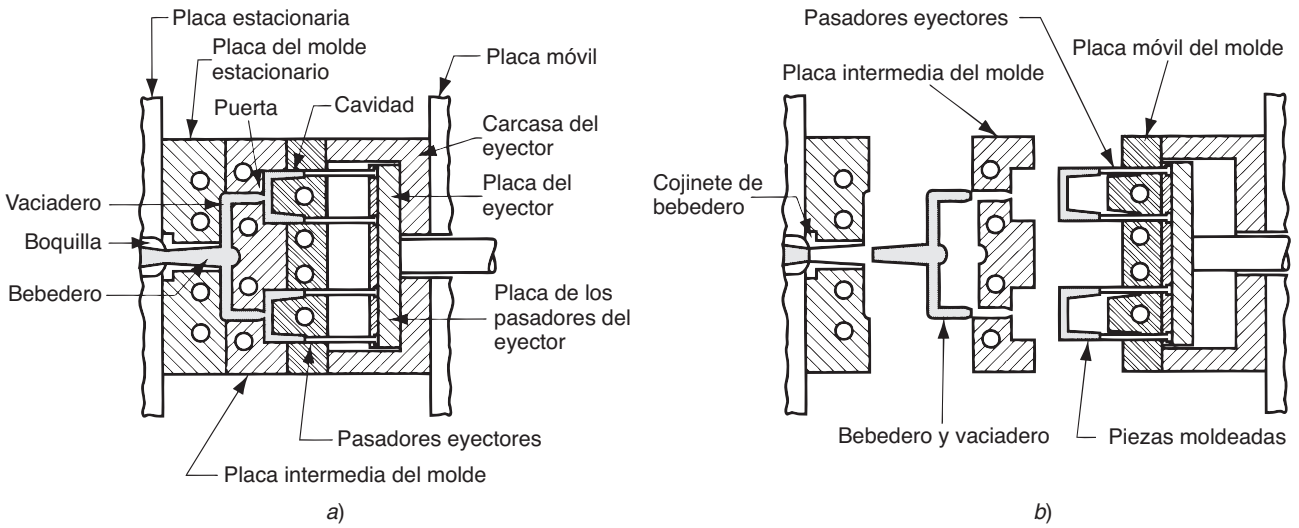


FIGURA 13.24 Molde de tres placas: *a*) cerrado y *b*) abierto.

Cuando el molde se abre, se divide en tres placas con dos aberturas entre ellas. Esto fuerza la desconexión de los vaciaderos y las piezas, que caen por gravedad (con la asistencia posible de aire soplado o un brazo robotizado) a diferentes contenedores por debajo del molde.

El bebedero y el vaciador de un molde convencional de dos o tres placas representan un desperdicio de material. En muchos casos se desechan y vuelven a usar; sin embargo, en otros, el producto debe hacerse de plástico "virgen" (aquel que no ha sido moldeado antes). El ***molde de vaciadero caliente*** elimina la solidificación del bebedero y del vaciadero por medio de la colocación de calentadores alrededor de los canales correspondientes del vaciadero. Mientras que el plástico en la cavidad del molde se solidifica, el material en el bebedero y canales del vaciadero permanece fundido, listo para inyectarse en la cavidad en el siguiente ciclo.

13.6.3 Máquinas de moldeo por inyección

Las máquinas de moldeo por inyección difieren tanto en la unidad de inyección como en la de sujeción. En esta sección se estudia los tipos importantes de máquinas de hoy día. El nombre de la máquina de moldeo por inyección por lo general se basa en el tipo de unidad inyectora que se emplea.

Unidades de inyección En la actualidad son dos tipos de unidades de inyección los que más se utilizan. La ***máquina de tornillo reciprocante*** (sección 13.6.1, figuras 13.21 y 13.22) es la más común. Este diseño emplea el mismo barril para la fundición e inyección del plástico. La unidad alternativa incluye el uso de barriles separados para plastificar e inyectar el polímero, como se aprecia en la figura 13.25*a*). Este tipo se denomina ***máquina preplastificadora de tornillo*** o ***máquina de dos etapas***. Desde la tolva se alimentan pellets de plástico hacia la primera etapa, que usa un tornillo para dirigir el polímero hacia delante y fundirlo. Este barril alimenta a otro que usa un pistón para inyectar el material fundido en el molde. Las máquinas más antiguas usaban un barril impulsado por pistón para fundir e inyectar el plástico. Estas máquinas se conocen como ***máquinas moldeadoras de inyección de tipo pistón***; véase la figura 13.25*b*).

Unidades de sujeción Los diseños de sujeción son de tres tipos [11]: de palanca, hidráulica e hidromecánica. La ***sujeción de palanca*** incluye varios diseños, uno de los cuales se ilustra en la figura 13.26*a*). Un actuador mueve la cruceta hacia delante, el que extiende

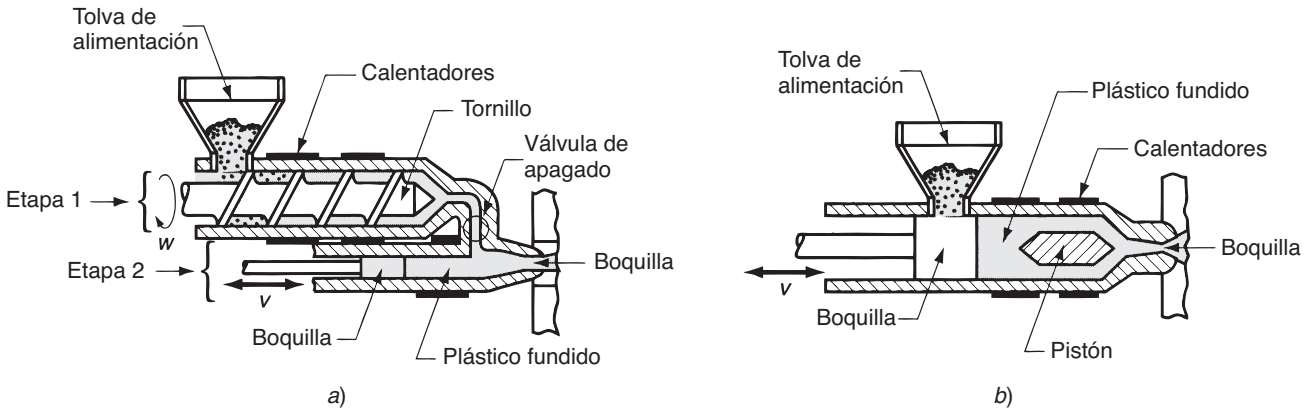


FIGURA 13.25 Dos sistemas de inyección alternativos al de tornillo recíproco que se presenta en la figura 13.21: *a*) preplastificador de tornillo y *b*) tipo pistón.

los eslabones de palanca para empujar las placas móviles en dirección de la posición cerrada. Al comenzar el movimiento, la ventaja mecánica es poca y la velocidad alta; pero cerca del extremo de la carrera, sucede lo contrario. Así, las abrazaderas de palanca proporcionan tanto gran velocidad como mucha fuerza en diferentes puntos del ciclo cuando se necesitan. Las proporcionan cilindros hidráulicos o tornillos impulsados por motores eléctricos. Las unidades de abrazaderas de palanca parecen más apropiadas a máquinas de tonelaje relativamente bajo. Las ***abrazaderas hidráulicas***, que se ilustran en la figura 13.26*b*), se emplean en máquinas moldeadoras de inyección de tonelaje elevado, por lo

FIGURA 13.26 Dos diseños de sujeción: *a*) un diseño posible de sujeción de palanca: 1) abierta y 2) cerrada y *b*) sujeción hidráulica: 1) abierta y 2) cerrada. No se muestran los rodillos de sujeción que guían la placa móvil.

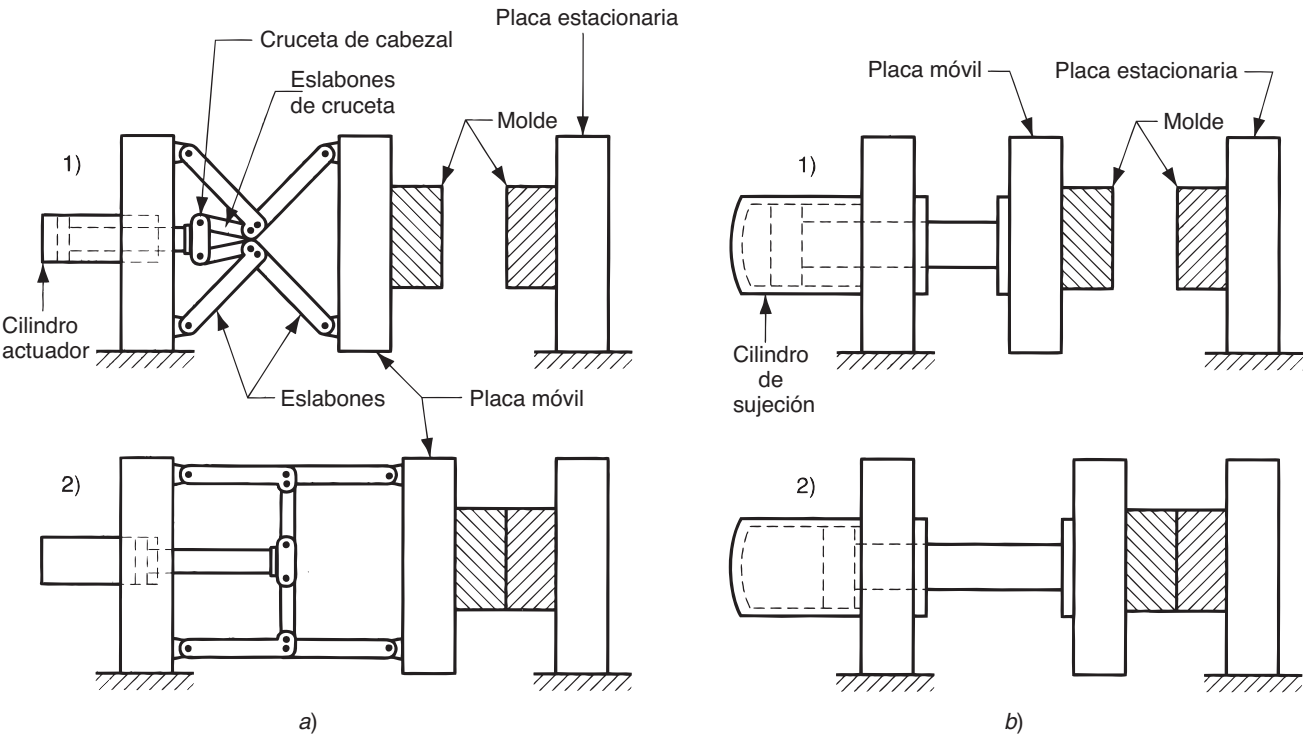


TABLA 13.1 Valores comunes de contracción para moldes de termoplásticos seleccionados.

Plástico	Contracción, mm/mm (in/in)
ABS	0.006
Nylon-6,6	0.020
Policarbonato	0.007
Polietileno	0.025
Poliestireno	0.004
PVC	0.005

Compilado de la referencia [14].

común en el rango de 1 300 a 8 900 kN (150 a 1 000 ton). Estas unidades también son más flexibles que las abrazaderas de palanca, en términos de fijar el tonelaje en posiciones dadas durante la carrera. Las ***abrazaderas hidrodinámicas*** están diseñadas para tonelajes grandes, por lo general por arriba de 8 900 kN (1 000 ton); operan con 1) el uso de cilindros hidráulicos para mover con rapidez el molde hacia la posición de cerrado, 2) el cierre de la posición por medios mecánicos y 3) el empleo de cilindros hidráulicos de presión alta para, finalmente, cerrar el molde y almacenar el tonelaje.

13.6.4 Contracción

Los polímeros tienen coeficientes de expansión térmica elevados, y durante el enfriamiento del plástico en el molde ocurre una contracción significativa. Algunos termoplásticos sufren una contracción volumétrica de alrededor de 10% después de la inyección en el molde. La contracción de plásticos cristalinos tiende a ser mayor que para los polímeros amorfos. La contracción se expresa por lo general como la reducción en el tamaño lineal que ocurre durante el enfriamiento a temperatura ambiente a partir de la temperatura del molde para el polímero dado. Por ello, las unidades apropiadas son mm/mm (in/in) de la dimensión en estudio. En la tabla 13.1 se dan valores comunes para polímeros seleccionados.

Los rellenos en el plástico tienden a reducir la contracción. En la práctica comercial del moldeo, antes de hacer el molde debe obtenerse del productor los valores de la contracción para el compuesto específico por moldear. Con el fin de compensar la contracción, las dimensiones de la cavidad del molde deben hacerse más grandes que las de la pieza especificada. Puede usarse la fórmula siguiente [14]:

$$D_c = D_p + D_p S + D_p S^2 \tag{13.19}$$

donde D_c = dimensiones de la cavidad, mm (in); D_p = dimensión de la pieza moldeada, mm (in); y S = valores de la contracción obtenidos de la tabla 13.1. El tercer término del lado derecho de la ecuación hace la corrección en la contracción.

Ejemplo 13.3 Contracción en el moldeo por inyección

La longitud nominal de una pieza hecha de polietileno ha de ser de 80 mm. Determine la dimensión correspondiente de la cavidad del molde que compensará la contracción.

Solución: De la tabla 13.1, la contracción para el polietileno es $S = 0.025$. Con el uso de la ecuación (13.19), el diámetro de la cavidad del molde debe ser:

$$\begin{aligned} D_c &= 80.0 + 80.0(0.025) + 80.0(0.025)^2 \\ &= 80.0 + 2.0 + 0.05 = \mathbf{82.05\ mm} \end{aligned}$$

Queda claro que deben determinarse las dimensiones del molde para el polímero en particular que habrá de moldearse. El mismo molde producirá tamaños de pieza diferentes para distintos tipos de polímero.

Los valores de la tabla 13.1 representan una simplificación grande del tema de la contracción. En realidad, ésta se ve afectada por cierto número de factores, cualquiera de los cuales altera la cantidad de contracción que experimenta un polímero dado. Los factores más importantes son la presión de la inyección, tiempo de compactación, temperatura del moldeo y espesor de la pieza. Conforme se incrementa la presión de la inyección y se fuerza a que entre más material en la cavidad del molde, la contracción se reduce. El incremento del tiempo de compactación tiene un efecto similar, si se supone que el polímero en la puerta no se solidifica ni sella la cavidad; el mantener la presión fuerza a que más material entre a la cavidad mientras ocurre la contracción. Por tanto, la contracción neta disminuye.

La temperatura de moldeo se refiere a la que tiene el polímero en el cilindro, inmediatamente antes de la inyección. Se esperaría que una temperatura más alta del polímero incrementaría la contracción, con el razonamiento de que la diferencia entre las temperaturas de moldeo y ambiental es mayor. Sin embargo, la contracción en realidad es menor con temperaturas de moldeo más elevadas. La explicación es que las temperaturas más altas disminuyen de manera significativa la viscosidad del polímero fundido, lo que permite que se compacte más material dentro del molde; el efecto es el mismo para presiones de inyección más grandes. Así, el efecto sobre la viscosidad más que compensa la mayor diferencia de temperaturas.

Por último, las piezas más gruesas presentan más contracción. Un molde se solidifica a partir del exterior; el polímero en contacto con la superficie del molde forma una capa que crece hacia el centro de la pieza. En cierto punto de la solidificación, la puerta se solidifica, lo que aísla al material de la cavidad del sistema del vaciadero y de la presión de compactación. Cuando esto ocurre, el polímero fundido dentro de la cáscara representa la mayor parte de la contracción restante que ocurre en la pieza. Una sección más gruesa de ésta experimenta una contracción mayor, debido a que contiene una proporción más grande de material fundido.

13.6.5 Defectos en el moldeo por inyección

El moldeo por inyección es un proceso complicado, y son muchas las cosas que pueden salir mal. A continuación se mencionan defectos comunes de las piezas moldeadas por inyección:

- ***Disparos cortos:*** Igual que en el fundido, un disparo corto es un moldeo que se solidifica antes de que la cavidad se llene por completo. El defecto se corrige si se incrementa la temperatura y/o la presión. El defecto también surge por el uso de una máquina con capacidad de disparo insuficiente, caso en el que es necesario un aparato más grande.
- ***Rebabas:*** Las salpicaduras ocurren cuando el polímero fundido se escurre por la superficie de separación, entre las placas del molde; también sucede alrededor de los pasadores de inyección. Por lo general, el defecto lo ocasionan 1) conductos y claros demasiado grandes en el molde, 2) presión de inyección demasiado alta en comparación con la fuerza de sujeción, 3) temperatura de fusión demasiado elevada o 4) tamaño excesivo del disparo.
- ***Marcas de hundimiento y vacíos:*** Éstos son defectos que por lo general se relacionan con secciones moldeadas gruesas. Una ***marca de hundimiento*** ocurre cuando la superficie exterior del molde se solidifica, pero la contracción del material del interior hace que la capa se reduzca por debajo del perfil que se planeaba. Un ***vacío*** es ocasionado por el mismo fenómeno básico; sin embargo, el material de la superficie conserva su forma y la contracción se manifiesta como un vacío interno debido a fuerzas de tensión grandes sobre el polímero que aún está fundido. Estos defectos se eliminan con el incremento de la presión de compactación posterior a la inyección. Una mejor solución consiste en diseñar la pieza para tener espesor uniforme de la sección, y utilizar secciones más delgadas.
- ***Líneas de soldadura:*** Las líneas de soldadura ocurren cuando el polímero fundido fluye alrededor de un núcleo o de otro detalle convexo en la cavidad del molde, y se encuentra desde direcciones opuestas; la frontera así formada se denomina línea de soldadura, y tiene propiedades mecánicas inferiores a las del resto de la pieza. Las formas de eliminar

este defecto son las temperaturas de fundición más altas, presiones de inyección mayores, ubicaciones alternativas de la puerta de la pieza y mejores conductos.

13.6.6 Otros procesos del moldeo por inyección

La mayoría de las aplicaciones del moldeo por inyección involucran a los termoplásticos. En esta sección se describen algunas variaciones del proceso.

Moldeo por inyección de espuma termoplástica Las espumas de plástico tienen varias aplicaciones, y en la sección 13.11 se estudian dichos materiales y su procesamiento. Uno de los procesos, en ocasiones llamado ***moldeo de espuma estructural***, es apropiado que se estudie aquí porque se trata de moldeo por inyección. Involucra el moldeo de piezas de termoplástico que poseen una capa exterior densa que rodea a un centro de espuma ligera. Dichas piezas tienen razones de rigidez a peso apropiadas para las aplicaciones estructurales.

Una pieza de espuma estructural se produce ya sea con la introducción de gas en el plástico fundido en la unidad de inyección o con la mezcla de un ingrediente que produzca gas con los pellets de inicio. Durante la inyección, se fuerza dentro de la cavidad del molde una cantidad insuficiente de material fundido, donde se expande (espuma) y lo llena. Las celdas de la espuma en contacto con la superficie fría del molde se colapsan y forman una capa densa, en tanto que el material en el núcleo retiene su estructura celular. Los artículos hechos con espuma estructural incluyen estuches para electrónica, carcasas de máquinas para negocios, componentes de muebles y tanques para lavadoras. Las ventajas citadas del moldeo de espuma estructural incluyen presiones de inyección y fuerzas de sujeción más bajas, con lo que se está en capacidad de producir componentes grandes, como lo sugiere la lista anterior. Una desventaja del proceso es que las superficies resultantes de la pieza tienden a ser rugosas, con vacíos ocasionales. Si la aplicación necesitara un buen acabado de la superficie, entonces se requeriría procesamiento adicional, como lanzamiento de arena, pintura y la adhesión de un revestimiento.

Procesos de moldeo por inyección múltiple Es posible obtener efectos poco usuales por medio de la inyección múltiple de polímeros diferentes para moldear una pieza. Los polímeros se inyectan en forma simultánea o secuencial, y puede haber más de una cavidad de molde involucrada. Varios procesos caen en este rubro, todos caracterizados por dos o más unidades de inyección; así, el equipamiento para estos procesos es caro.

El ***moldeo en sándwich*** incluye la inyección de dos polímeros separados; uno constituye la capa externa de la pieza y la otra el núcleo interno, que es el caso común de una espuma de polímero. Una boquilla de diseño especial controla la secuencia de flujo de los dos polímeros dentro del molde. La secuencia está diseñada de modo que el polímero del núcleo quede rodeado por completo por el material de la capa exterior dentro de la cavidad del molde. La estructura final es similar a la de una espuma estructural. Sin embargo, la moldura posee una superficie suave, con lo que se evita una de las desventajas principales del proceso anterior. Además, consiste en dos plásticos distintos, cada uno de los cuales tiene características propias adecuadas para la aplicación.

Otro proceso de moldeo por inyección múltiple involucra la inyección secuencial de dos polímeros en un molde de dos posiciones. Con el molde en la primera posición, se inyecta el primer polímero en la cavidad. Después se abre el molde en la segunda posición y se inyecta el segundo en la cavidad agrandada. La pieza que resulta consiste en dos plásticos conectados en forma integral. El ***moldeo por inyección doble*** se utiliza para combinar plásticos de dos colores distintos (por ejemplo, cubiertas de las luces traseras de los automóviles) o para obtener propiedades diferentes en secciones distintas de la misma pieza.

Moldeo por inyección de termofijos Éste se emplea para plásticos termofijos (TS), con ciertas modificaciones del equipo y procedimiento de operación, a fin de permitir el entrecruzamiento. Éstas máquinas son similares a las que se emplean para termoplásticos. Utilizan una unidad de inyección de tornillo recíproco, pero la longitud del barril es más

corta para evitar la cura y solidificación prematuras del polímero TS. Por la misma razón, las temperaturas en el barril se mantienen a niveles relativamente bajos, por lo general de 50 °C a 125 °C (120 °F a 260 °F), lo que depende del polímero. El plástico, por lo general en forma de pellets o gránulos, se alimenta por medio de una tolva. La plastificación ocurre por la acción del tornillo rotatorio conforme el material se mueve hacia delante en dirección de la boquilla. Cuando se ha acumulado suficiente material fundido por delante del tornillo, se inyecta a un molde que se calienta entre 150 °C y 230 °C (300 °F a 450 °F), donde ocurre el entrecruzamiento para endurecer el plástico. Entonces se abre el molde y la pieza se eyecta y retira. Es común que los tiempos del ciclo de moldeo varíen en el rango de 20 segundos a 2 minutos, lo que depende del tipo de polímero y tamaño de la pieza.

La cura es la etapa del ciclo que más tiempo consume. En muchos casos, la pieza se retira del molde antes de que finalice la cura, de modo que el endurecimiento final sucede debido al calor conservado durante un minuto o dos después de retirarla. Un enfoque alternativo consiste en usar una máquina de molde múltiple, en el que se adjuntan dos o más moldes a una cabeza indizadora atendida por una sola unidad de inyección.

Los termofijos principales para el moldeo por inyección son los fenoles, poliésteres insaturados, melaminas, epóxicos y formaldehídos de urea. También los elastómeros se moldean por inyección (sección 14.1.4). Más de 50% de los moldeos de fenólicos que se producen en Estados Unidos se lleva a cabo con este proceso [11], lo que representa un abandono del moldeo por compresión y transferencia, procesos tradicionales que se utilizan para los termofijos (sección 13.7). La mayoría de los materiales del moldeo TS contienen grandes proporciones de rellenadores (hasta 70% de su peso), incluso fibras de vidrio, arcilla, fibras de madera y negro de humo. En efecto, éstos son materiales compuestos que se moldean por inyección.

Moldeo por inyección de reacción El ***moldeo por inyección de reacción*** (RIM, por sus siglas en inglés) involucra la mezcla de dos ingredientes líquidos muy reactivos, con la inyección inmediata de ésta en la cavidad de un molde, donde reacciones químicas hacen que ocurra la solidificación. Los dos ingredientes forman los componentes empleados en sistemas activados por catalizadores o por mezcla (sección 8.3.1). Los uretanos, epóxicos y formaldehídos de urea son ejemplos de estos sistemas. El RIM se desarrolló con el poliuretano para producir grandes componentes automotrices tales como defensas, alerones y salpicaderas. Esta clase de piezas constituye la aplicación principal del proceso. Es común que las piezas de poliuretano obtenidas con RIM posean una estructura interna de espuma rodeada por una capa exterior densa.

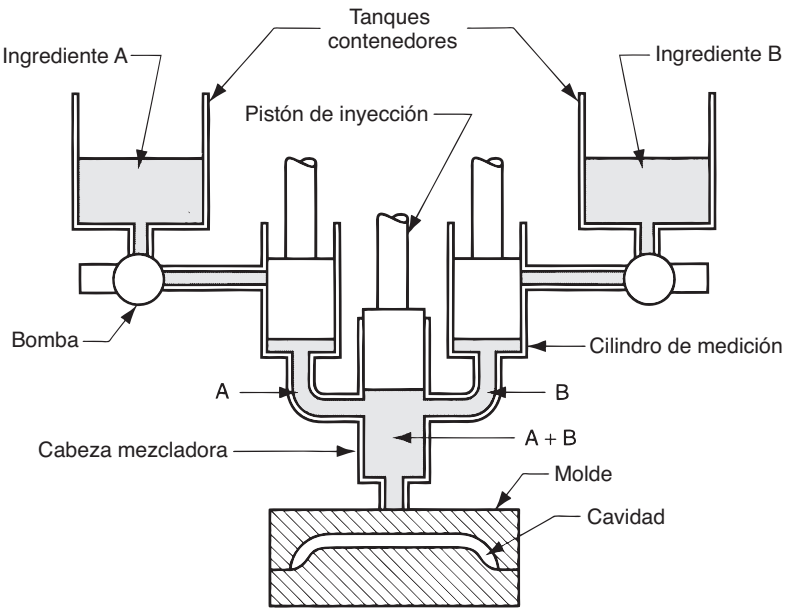


FIGURA 13.27 Sistema de moldeo por inyección de reacción (RIM), mostrado inmediatamente después de que los ingredientes A y B se han bombeado hacia la cabeza mezcladora, antes de inyectarlos a la cavidad del molde (se han omitido algunos detalles del equipo de procesamiento).

Como se aprecia en la figura 13.27, los ingredientes líquidos se bombean en cantidades medidas con precisión, desde tanques separados hacia una cabeza mezcladora. Los ingredientes se mezclan con rapidez y luego se inyectan a la cavidad del molde con una presión relativamente baja, donde ocurre la polimerización y cura. El tiempo normal de un ciclo es de alrededor de 2 minutos. Para cavidades relativamente grandes, los moldes para RIM son mucho menos costosos que los correspondientes al moldeo por inyección convencional. Esto se debe a las fuerzas pequeñas de las abrazaderas que se requieren en el RIM y a la oportunidad de utilizar componentes ligeros en los moldes.

Entre las ventajas del RIM están que 1) se requiere poca energía para el proceso, 2) los costos del equipo y molde son menores que los del moldeo por inyección, 3) se dispone de una variedad de sistemas químicos que permiten obtener propiedades específicas del producto moldeado y 4) el equipo de producción es confiable, los sistemas químicos y las relaciones de la máquina se comprenden bien [16].

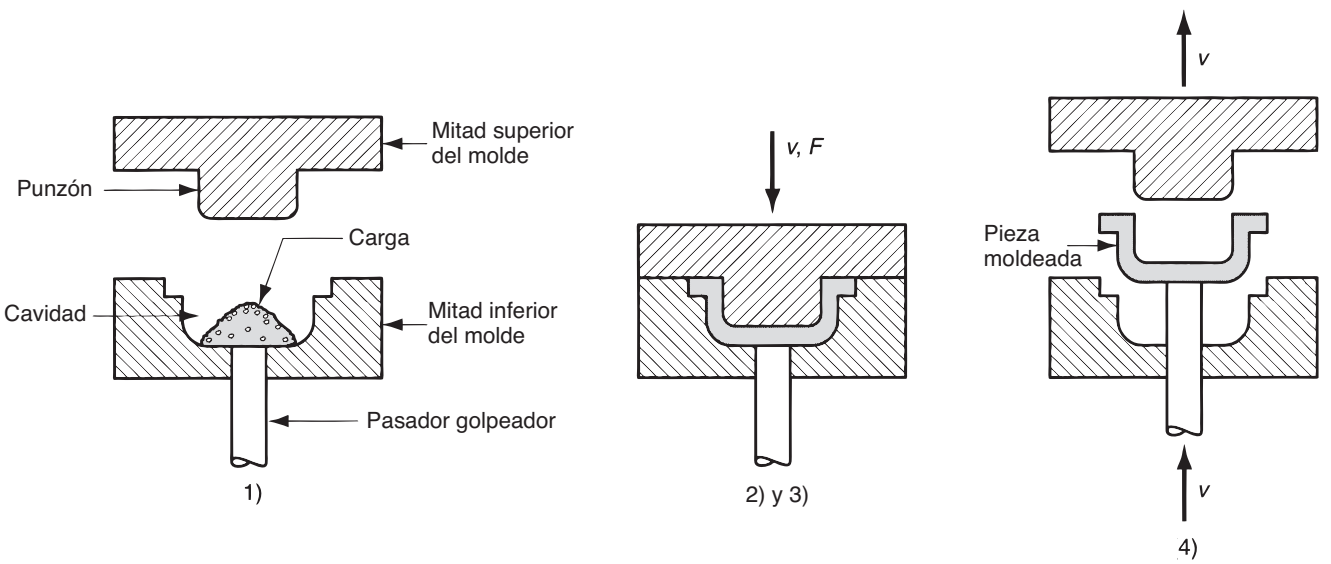
13.7 MOLDEO POR COMPRESIÓN Y TRANSFERENCIA

En esta sección se estudian dos técnicas que se emplean mucho para polímeros termofijos y elastómeros. Para los termoplásticos, estas técnicas no alcanzan la eficiencia del moldeo por inyección, excepto para aplicaciones muy especiales.

13.7.1 Moldeo por compresión

Es un proceso antiguo y muy utilizado para plásticos termofijos. Sus aplicaciones también incluyen discos de fonógrafo termoplásticos, llantas de caucho y varias piezas compuestas de matriz de polímero. El proceso, que se ilustra en la figura 13.28 para un plástico TS, consiste en 1) cargar la cantidad precisa del compuesto de moldeo, llamada ***carga***, en la mitad inferior de un molde calentado; 2) juntar las mitades del molde para comprimir la carga, forzarla a que fluya y adopte la forma de la cavidad; 3) calentar la carga por medio del molde caliente para polimerizar y curar el material en una pieza solidificada; y 4) abrir las mitades del molde y retirar la pieza de la cavidad.

FIGURA 13.28 Moldeo por compresión de plásticos termofijos: 1) se introduce la carga; 2) y 3) la carga se comprime y cura; y 4) la pieza se eyecta y retira (se han omitido algunos detalles).



La carga inicial del compuesto para el moldeo puede estar en varias formas, incluso polvo o pellets, líquida o preformada. La cantidad de polímero debe controlarse con precisión para obtener consistencia repetible en el producto moldeado. Se ha vuelto práctica común precalentar la carga antes de colocarla en el molde; esto suaviza al polímero y acorta la duración del ciclo de producción. Los métodos de precalentamiento incluyen calentadores infrarrojos, convección en un horno y uso de tornillo rotatorio caliente en un barril. La última técnica (tomada del moldeo por inyección) también se usa para medir la cantidad de la carga.

Las prensas para moldeo por compresión se orientan en forma vertical y contienen dos placas a las que se sujetan las mitades del molde. Las prensas involucran dos tipos de actuación: 1) ascenso de la placa inferior o 2) descenso de la placa superior; la primera es la configuración más común de la máquina. Por lo general, son movidas por un cilindro hidráulico diseñado para proporcionar capacidades de sujeción de varios cientos de toneladas.

Los moldes para moldeo por compresión generalmente son más sencillos que sus contrapartes para inyección. En un molde para compresión no hay sistema de bebedero y vaciadero y el proceso en sí, por lo general, está limitado a formas sencillas de la pieza, debido a las capacidades menores de flujo de los materiales termofijos con los que se inicia. Sin embargo, deben tomarse medidas para calentar el molde, que, por lo general, se lleva a cabo con resistencia eléctrica, vapor o circulación de aceite caliente. Los moldes para compresión se clasifican en ***moldes manuales***, que se emplean para hacer ensayos; ***semiautomáticos***, en los que la prensa sigue un ciclo programado, pero es el operador quien la carga y descarga en forma manual; y ***automáticos***, que operan con un ciclo de prensa totalmente automático (incluso para la carga y descarga).

Los materiales para moldeo por compresión incluyen fenoles, melamina, formaldehído de urea, epóxicos, uretanos y elastómeros. Las molduras comunes de plásticos TS incluyen conexiones eléctricas, sóckets y carcasas; manijas de trastos y vajillas. Las ventajas más notables del moldeo por compresión en dichas aplicaciones incluyen las siguientes: los moldes son más sencillos, menos caros y requieren poco mantenimiento; menor desperdicio y esfuerzos residuales bajos en las piezas moldeadas (lo que favorece el empleo de este proceso para piezas delgadas planas, como discos de fonógrafo). Una desventaja frecuente son las duraciones mayores del ciclo y, por tanto, tasas de producción menores que las del moldeo por inyección.

13.7.2 Moldeo por transferencia

En este proceso se introduce una carga termofija (preformada) a una cámara inmediatamente delante de la cavidad del molde, donde se calienta; después se aplica presión para forzar al polímero suavizado a fluir hacia el molde caliente en el que ocurre la cura. Hay dos variantes del proceso, que se ilustra en la figura 13.29: *a*) ***moldeo por transferencia de vasija***, en el que la carga se inyecta desde una "vasija" a través de un canal de mazarota vertical en la cavidad; y *b*) ***moldeo por transferencia de pistón***, en el que la carga se inyecta por medio de un pistón desde un depósito caliente a través de canales laterales hacia la cavidad del molde. En ambos casos, en cada ciclo se generan desperdicios en forma de material sobrante en la base del depósito y los canales laterales, llamado ***desecho***. Además, en la transferencia de vasija el bebedero constituye material que se desperdicia. Debido a que los polímeros son termofijos, los desechos no pueden recuperarse.

El moldeo por transferencia se relaciona de cerca con el de compresión, porque se utiliza con los mismos tipos de polímero (termofijos y elastómeros). También se observan similitudes con el moldeo por inyección, en la forma en que la carga se precalienta en una cámara separada y después se inyecta en el molde. El moldeo por transferencia es capaz de moldear formas de pieza que son más intrincadas que en el moldeo por compresión, pero no tan complejas como con el moldeo por inyección. El moldeo por transferencia también llega a moldear con inserciones, para lo que se coloca un inserto de metal o cerámica dentro de la cavidad, antes de la inyección, y el plástico calentado se adhiere a aquél durante el moldeo.

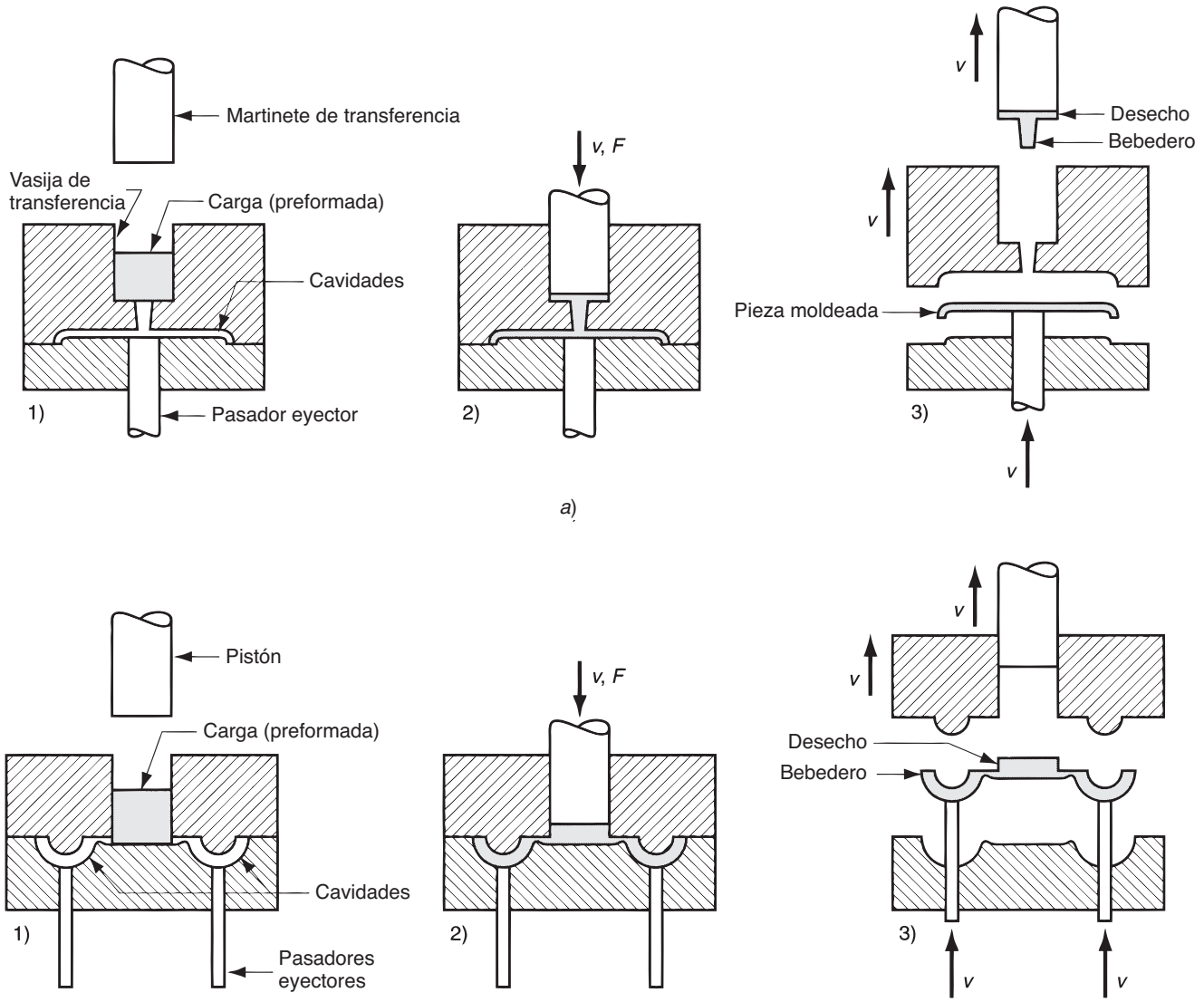


FIGURA 13.29 *a*) Moldeo por transferencia de vasija y *b*) moldeo por transferencia de pistón. El ciclo en ambos procesos es el siguiente: 1) se introduce la carga a la vasija, 2) el polímero suavizado se prensa y cura en la cavidad del molde y 3) se expulsa la pieza.

13.8 MOLDEO POR SOPLADO Y MOLDEO ROTACIONAL

Estos dos procesos se emplean para fabricar piezas huecas y sin costura de polímeros termoplásticos. El moldeo rotacional también se utiliza para termofijos. El tamaño de las piezas varía desde botellas de plástico pequeñas de sólo 5 ml (0.15 oz) a tambos de almacenamiento grandes, de 38 000 litros (10 000 gal) de capacidad. Aunque en ciertos casos los dos procesos compiten, por lo general tienen sus nichos propios. El moldeo por soplado es más apropiado para la producción en masa de contenedores desechables pequeños, en tanto que el rotacional es propio para formas más grandes y huecas.

13.8.1 Moldeo por soplado

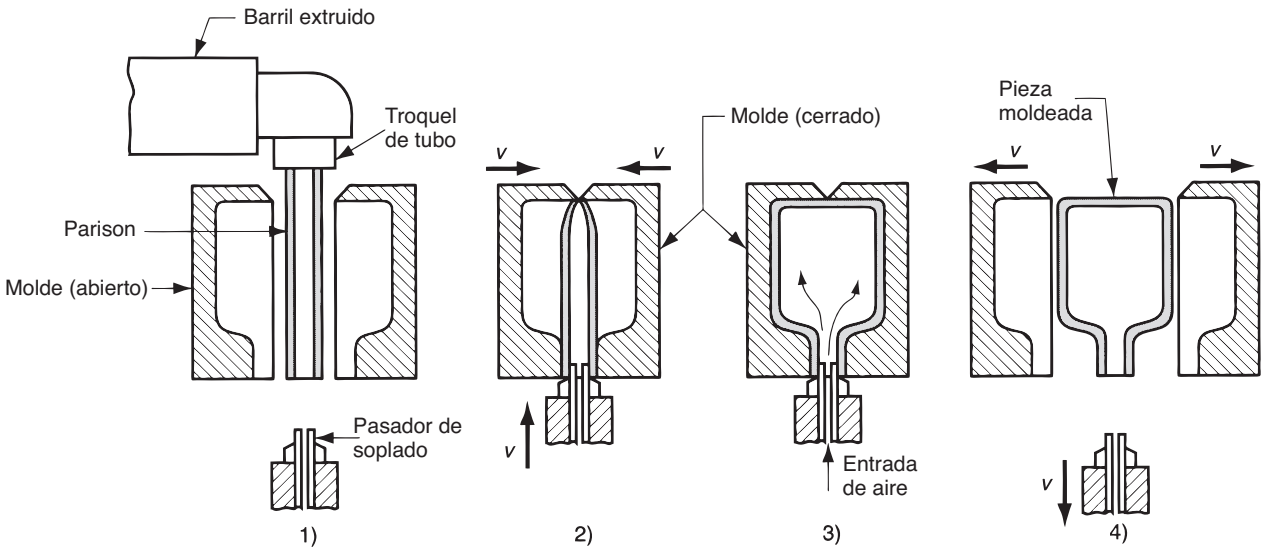
El ***moldeo por soplado*** es un proceso en el que se utiliza presión del aire para inflar plástico suave dentro de la cavidad de un molde. Es un proceso industrial importante para fabricar piezas de plástico huecas, de una sola pieza y con paredes delgadas, como botellas y contenedores similares. Debido a que muchos de esos artículos se utilizan para bebidas para el consumidor destinadas a mercados masivos, su producción está organizada para cantidades muy grandes. La tecnología proviene de la industria del vidrio (sección 12.2.1), con la que los plásticos compiten en el mercado de las botellas desechables y reciclables.

El moldeo por soplado se lleva a cabo en dos etapas: 1) fabricación de un tubo de inicio de plástico fundido, llamado ***parison*** (igual que en el soplado del vidrio), y 2) inflación del tubo hasta que adquiere la forma final que se desea. El formado del parison se lleva a cabo por cualquiera de dos procesos: 1) extrusión o 2) moldeo por inyección.

Moldeo por soplado y extrusión Esta forma de moldear consiste en el ciclo que se ilustra en la figura 13.30. En la mayoría de casos el proceso se organiza como operación de producción elevada para fabricar botellas de plástico. La secuencia es automática y, por lo general, se integra con operaciones posteriores tales como el llenado y etiquetado de las botellas.

Por lo general, se requiere que el contenedor soplado sea rígido, y la rigidez depende del espesor de la pared, entre otros factores. El espesor de la pared del contenedor soplado se relaciona con el parison de extruido inicial [12], lo que supone una forma cilíndrica del producto final. El efecto de la expansión del troquel sobre el parison se presenta en la figura 13.31. El diámetro medio del tubo conforme sale del troquel se determina con la media del diámetro del troquel D_d. La expansión del troquel ocasiona la expansión hasta un diámetro medio del parison D_p. Al mismo tiempo, el espesor

FIGURA 13.30 Moldeo soplado por extrusión: 1) extrusión de parison; 2) se pincha la parte superior del parison y se sella en la inferior alrededor de un pasador metálico de soplado, conforme las dos mitades del molde se juntan; 3) el tubo se infla de modo que adopta la forma de la cavidad del molde; y 4) el molde se abre para retirar la pieza solidificada.



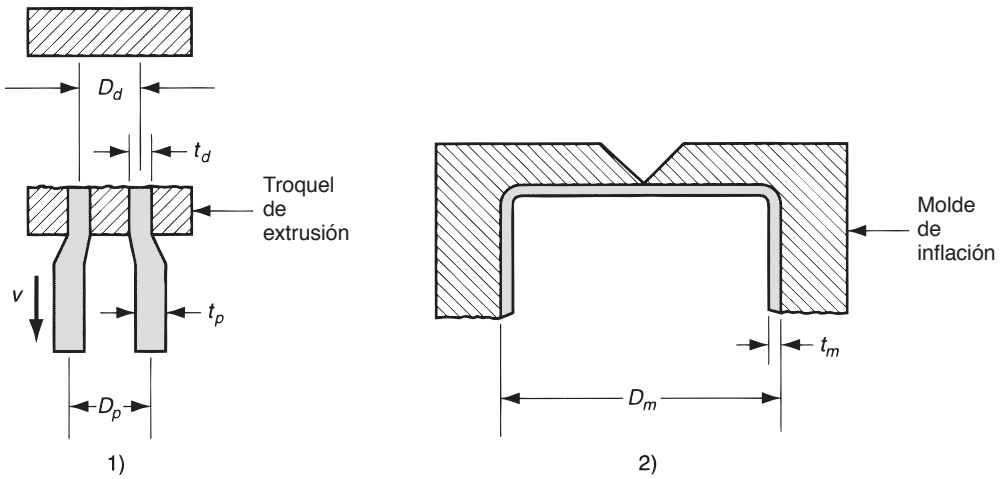


FIGURA 13.31 1) Dimensiones del troquel de extrusión, mostrando el parison después de la expansión del troquel, y 2) contenedor moldeado por soplado, en el moldeo soplado por extrusión.

de la pared se expande de t_d a t_p. La razón de expansión del diámetro del parison está dada por

$$r_{sd} = \frac{D_p}{D_d} \tag{13.20}$$

mientras que la razón de expansión del espesor de pared es

$$r_{st} = \frac{t_p}{t_d} \tag{13.21}$$

La expansión del espesor de pared es proporcional al cuadrado del diámetro de la expansión; es decir,

$$r_{st} = r_{sd}^2 \tag{13.22}$$

y por tanto,

$$t_p = r_{sd}^2 t_d \tag{13.23}$$

Cuando el parison se infla hasta el diámetro del molde de inflación D_m, con la reducción correspondiente del espesor de pared a t_m, y si se supone un volumen constante de la sección transversal, se tiene

$$\pi D_p t_p = \pi D_m t_m \tag{13.24}$$

Al resolver t_m se obtiene

$$t_m = \frac{D_p t_p}{D_m}$$

Se sustituyen las ecuaciones (13.20) y (13.23) en esta ecuación y queda

$$t_m = \frac{r_{sd}^3 t_d D_d}{D_m} \tag{13.25}$$

La cantidad de expansión del troquel en el proceso inicial de extrusión se mide por observación directa; y las dimensiones del troquel son conocidas. Así, es posible determinar el espesor de pared del contenedor moldeado por soplado.

Dado el espesor de pared del contenedor moldeado, se puede obtener una expresión para la presión de aire máxima que evita que el parison se queme durante el inflado [12].

Una ecuación que proviene de la resistencia de materiales relaciona el esfuerzo con la presión interna p en un tubo, dado su diámetro D y espesor de pared t:

$$\sigma = \frac{pD}{2t} \tag{13.26}$$

Con el razonamiento de que el esfuerzo máximo ocurrirá justo antes de que el parison se expanda al tamaño del diámetro del molde soplado (esto es, cuando D sea máximo y t mínimo), y al reacomodar la ecuación (13.26) para resolver p, se obtiene

$$p = \frac{2\sigma t_m}{D_m} \tag{13.27}$$

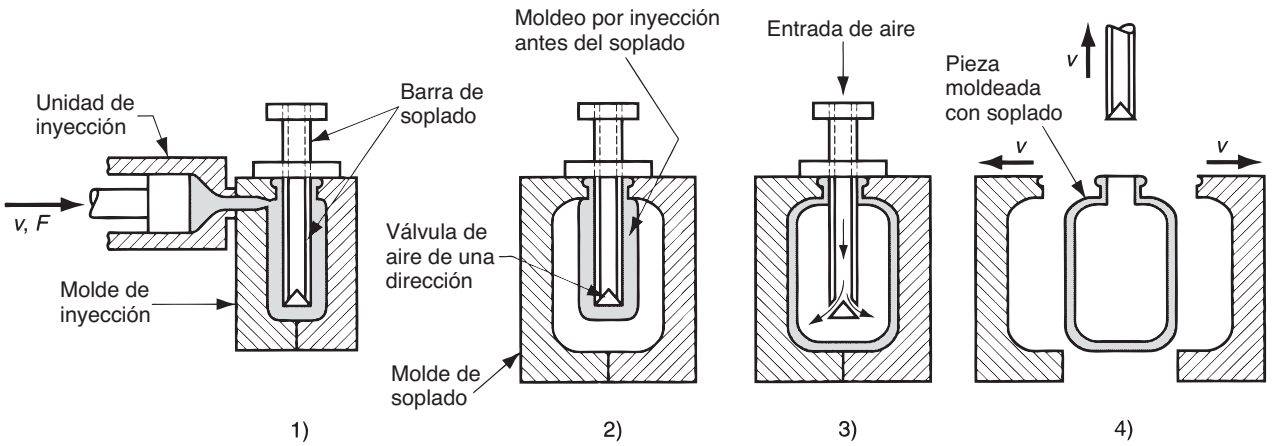
donde p es la presión del aire usada durante el moldeo soplado, en Pa (lb/in^2); σ = esfuerzo de la tensión máxima permisible en el polímero durante la inflación, Pa (lb/in^2); y t_m y D_m son el espesor y diámetro de pared, respectivamente, del molde, m (in). La dificultad para utilizar la fórmula es la determinación del esfuerzo permisible porque el polímero se encuentra en una condición de calentamiento y muy plástica. En una operación industrial, los parámetros del proceso se estiman por ensayo y error.

Moldeo soplado por inyección En este proceso, el parison de inicio se moldea por inyección en vez de extrusión. En la figura 13.32 se presenta una secuencia simplificada. En comparación con su proceso competidor basado en la extrusión, el de soplado por inyección tiene una tasa de producción menor, lo que explica por qué se usa menos.

En una variante del moldeo con soplado por inyección, llamada ***moldeo soplado por estiramiento*** (figura 13.33), la barra de soplado se extiende hacia abajo dentro del parison moldeado por inyección durante la etapa 2, lo que estira el plástico suave y crea un esfuerzo más favorable del polímero que el moldeo por inyección convencional o soplado por extrusión. La estructura resultante es más rígida, con más transparencia y resistencia mayor al impacto. El material más utilizado para el moldeo soplado por estiramiento es el tereftalato de polietileno (PET), un poliéster que tiene permeabilidad muy baja y adquiere resistencia por medio del proceso de moldeo soplado por estiramiento. La combinación de propiedades lo hace ideal como contenedor de bebidas carbonatadas.

Materiales y productos El moldeo soplado se limita a los termoplásticos. El polietileno es el polímero de uso más común para este proceso, en particular, el de alta densidad y peso molecular elevado (HDPE y HMWPE). Si se comparan sus propiedades con las del PE de

FIGURA 13.32 Moldeo soplado por inyección: 1) se inyecta al parison moldeado alrededor de una barra de soplado, 2) se abre el molde de inyección y el parison se transfiere a un molde de soplado, 3) se infla el polímero suave para conformarlo al molde de soplado y 4) se abre el molde de soplado, y se retira el producto.



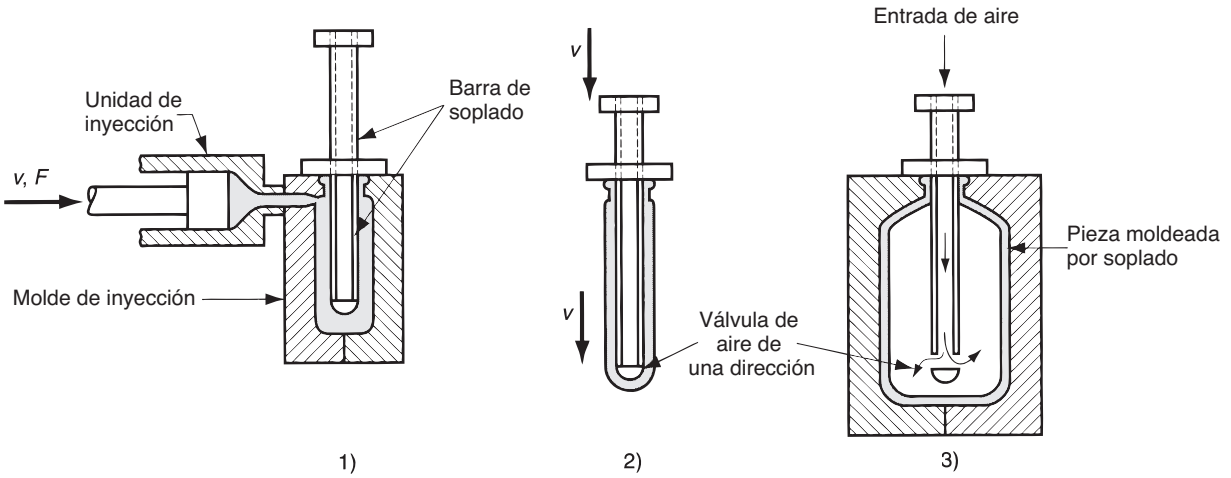


FIGURA 13.33 Moldeo soplado por estiramiento: 1) moldeo con inyección del parison, 2) estiramiento y 3) soplado.

baja densidad dados los requerimientos de rigidez del producto final, es más económico usar estos materiales más caros debido a que las paredes del contenedor pueden fabricarse más delgadas. Otras molduras por soplado están hechas de polipropileno (PP), cloruro de polivinilo (PVC) y tereftalato de polietileno.

Los contenedores desechables para empacar bienes de consumo líquidos constituyen la mayor parte de productos que se fabrican con moldeo por soplado, pero no son los únicos. Otros incluyen tambos grandes (55 gal) para embarcar líquidos y polvos, grandes tanques de almacenamiento (2 000 gal), tanques para gasolina de automóviles, juguetes y cascos para veleros y botes pequeños. En el último caso, se fabrican dos cascos en un moldeo único por soplado y se cortan posteriormente para formar dos cascos abiertos.

13.8.2 Moldeo rotacional

El moldeo rotacional utiliza la gravedad en lugar de un molde rotatorio, a fin de lograr una forma hueca. El también llamado ***rotomoldeo*** es una alternativa al moldeo por soplado a fin de fabricar formas grandes y huecas. Se emplea principalmente para polímeros termoplásticos, pero cada vez son más comunes las aplicaciones para termofijos y elastómeros. El rotomoldeo tiende a favorecer configuraciones geométricas externas más complejas, piezas más grandes y cantidades de producción pequeñas, más que el moldeo por soplado. El proceso consiste en las siguientes etapas: 1) se carga una cantidad predeterminada de polvo de polímero en la cavidad de un molde deslizante. 2) Después se calienta el molde y se gira en forma simultánea sobre dos ejes perpendiculares, de modo que el polvo impregna todas las superficies interiores del molde, y forma gradualmente una capa fundida de espesor uniforme. 3) Mientras aún gira, el molde se enfría de modo que la capa exterior de plástico se solidifica. 4) Se abre el molde y se descarga la pieza. Las velocidades rotacionales que se emplean en el proceso son relativamente bajas. Es la gravedad, no la fuerza centrífuga, la que genera el recubrimiento uniforme de las superficies del molde.

En el moldeo rotacional, los moldes son simples y baratos, en comparación con el moldeo por inyección o por soplado, pero el ciclo de producción es mucho más largo, y dura 10 minutos o más. Para balancear estas ventajas y desventajas en la producción, es frecuente que el moldeo rotacional se lleve a cabo en una máquina de cavidades múltiples, como la de tres estaciones que se ilustra en la figura 13.34. La máquina está diseñada para indizar tres moldes en secuencia a través de las tres estaciones de trabajo. Así, se trabaja con los tres moldes en forma simultánea. La primera estación de trabajo es de carga y descarga, en la que la pieza terminada se retira del molde; y se carga el polvo en la cavidad, para la

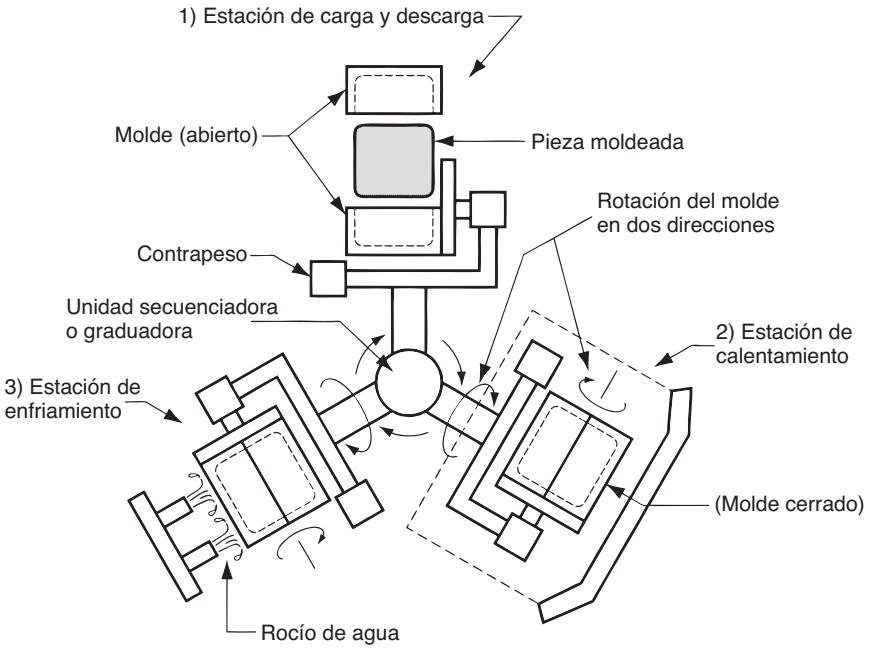


FIGURA 13.34 Ciclo de moldeo rotacional ejecutado sobre una máquina indizadora de tres estaciones: 1) estación de carga y descarga; 2) el molde se calienta y gira; 3) enfriamiento del molde.

pieza siguiente. La segunda estación consiste en una cámara de calentamiento en la que aire a temperatura alta calienta el molde por convección al mismo tiempo que éste gira. Las temperaturas dentro de la cámara son de alrededor de 375 °C (700 °F), lo que depende del polímero y el artículo que se moldea. La tercera estación enfría el molde, con el uso de aire frío forzado o rocío de agua, para enfriar y solidificar el plástico interior del molde.

Con moldeo rotacional se elabora una variedad fascinante de artículos. La lista incluye juguetes huecos tales como caballitos y pelotas; cascos de lanchas y canoas, cajas de arena, alberquitas; boyas y otros dispositivos de flotación; elementos de cajas de tráiler, tableros automotrices, tanques de combustible; piezas de equipaje, mobiliario, botes para basura; maniquíes; barriles industriales de gran tamaño, contenedores y tanques de almacenamiento; excusados portátiles, y tanques sépticos. El material más utilizado para moldear es el polietileno, en especial el HDPE. Otros plásticos incluyen el polipropileno, ABS y poliestireno de alto impacto.

13.9 TERMOFORMADO

El ***termoformado*** es un proceso en el que se calienta y deforma una hoja plana termoplástica para hacer que adquiera la forma deseada. El proceso se utiliza mucho para empacar productos de consumo y para fabricar artículos grandes como tinas de baño, reflectores de contorno y forros interiores de puertas para refrigeradores.

El termoformado consiste en dos etapas principales: 1) calentamiento y 2) formado. Por lo general, el calentamiento se realiza con el empleo de calentadores eléctricos radiantes, localizados a ambos lados de la hoja de plástico inicial, a una distancia aproximada de 125 mm (5 in). La duración del ciclo de calentamiento necesario para suavizar lo suficiente la hoja depende del polímero, de su espesor y color. Los métodos por los que se lleva a cabo la etapa de formado se clasifican en tres categorías básicas: 1) termoformado al vacío, 2) termoformado de presión y 3) termoformado mecánico. En el estudio de dichos métodos se describió el formado de materiales en forma de hoja; en la industria del empaque, la mayor parte de operaciones de termoformado se ejecutan sobre películas delgadas.

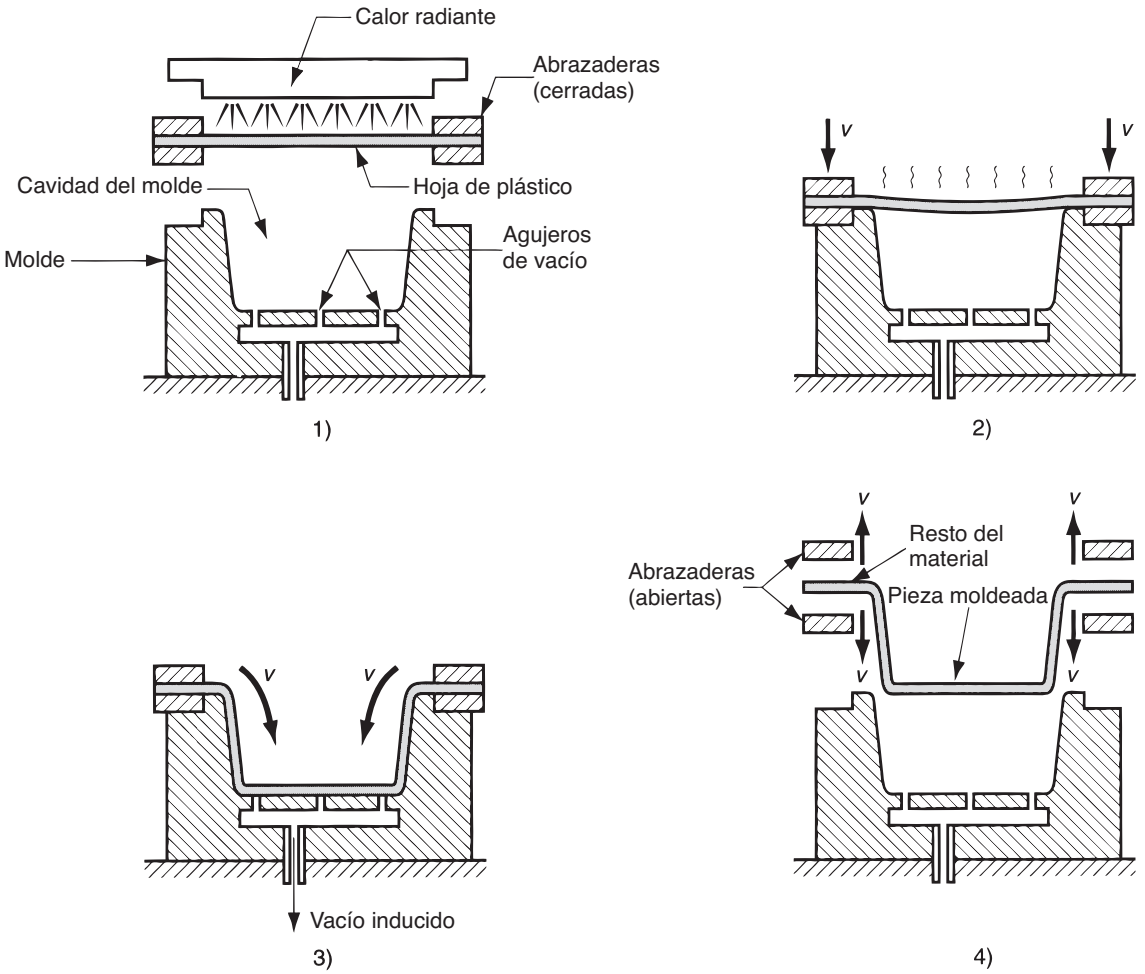


FIGURA 13.35 Termoformado al vacío: 1) una hoja de plástico se suaviza con calentamiento; 2) la hoja suavizada se coloca sobre una cavidad de molde cóncava; 3) un vacío empuja la hoja hacia la cavidad; y 4) el plástico se endurece al contacto con la superficie fría del molde, y posteriormente la pieza se elimina y recorta del resto del material.

Termoformado al vacío El primer método fue el ***termoformado al vacío*** (llamado tan sólo ***formado al vacío***, cuando se creó en la década de 1950) en el que se utiliza una presión negativa para empujar una hoja precalentada contra la cavidad de un molde. El proceso se explica en la figura 13.35, en su forma más básica. Los agujeros para inducir el vacío en el molde son del orden de 0.8 mm (0.031 in) de diámetro, por lo que su efecto sobre la superficie del plástico es menor.

Termoformado de presión Una alternativa para formar al vacío involucra a una presión positiva que fuerza al plástico calentado hacia la cavidad del molde. Ésta se llama ***termoformado de presión***, o ***formado por soplado***; su ventaja sobre el formado al vacío es que es posible generar presiones más grandes, ya que esta última se limita a un máximo teórico de 1 atm. En el formado por soplado son comunes las presiones de 3 a 4 atm. La secuencia del proceso es similar a la anterior; la diferencia estriba en que la hoja se presuriza desde arriba de la cavidad del molde. En el molde hay agujeros de conducción para expulsar el aire atrapado. En la figura 13.36 se ilustra la porción formadora de la secuencia (etapas 2 y 3).

En este punto, es útil distinguir entre los moldes positivo y negativo. Los moldes que se muestran en las figuras 13.35 y 13.36 son ***moldes negativos*** debido a que tienen cavidades

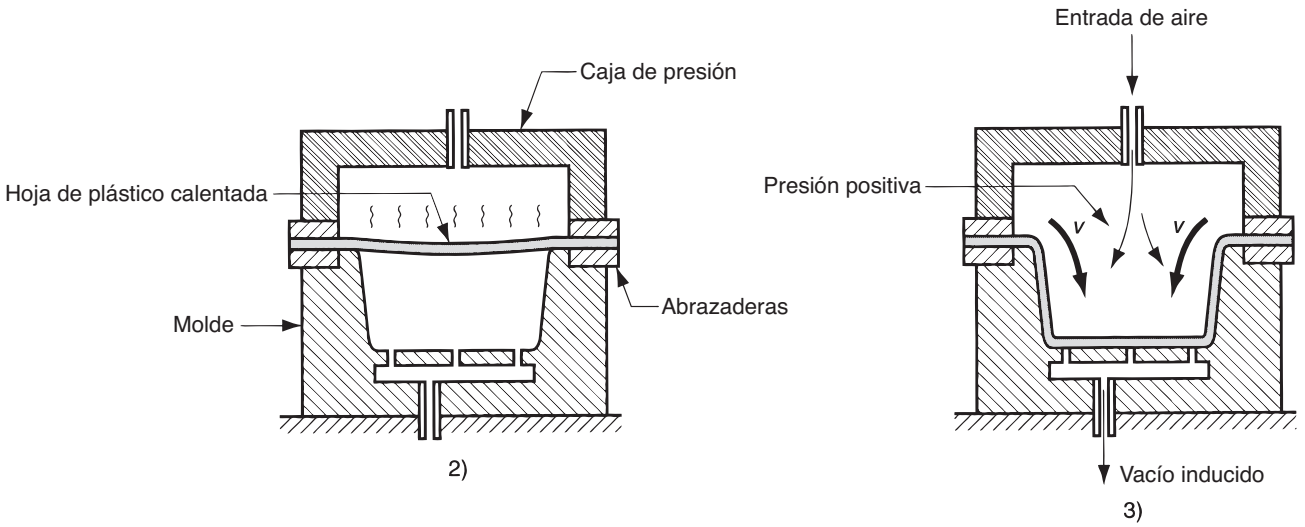


FIGURA 13.36 Termoformado a presión. La secuencia es similar a la de la figura anterior; la diferencia está en que: 2) la hoja se coloca sobre la cavidad de un molde y 3) una presión positiva fuerza la hoja hacia la cavidad.

cóncavas. Un ***molde positivo*** tiene forma convexa. En el termoformado se utilizan ambos tipos. En el caso del molde positivo, la hoja calentada se oprime sobre la forma convexa y se utiliza presión negativa o positiva para forzar al plástico contra la superficie del molde. En la figura 13.37 se muestra el molde positivo para el caso de formado al vacío.

Podría parecer que la diferencia entre los moldes positivo y negativo carece de importancia, porque las formas de la pieza son idénticas, como se aprecia en los diagramas. Sin embargo, si la pieza se presiona contra un molde negativo, entonces su superficie exterior tendrá el mismo aspecto que la de la cavidad del molde. La superficie interior será una aproximación del contorno y poseerá un acabado correspondiente al de la hoja de inicio. Por el contrario, si la hoja se presiona sobre un molde positivo, entonces su superficie interior será igual a la del molde convexo y su superficie exterior seguirá aproximadamente igual. En función de los requerimientos del producto, esta diferencia puede ser importante.

Otra diferencia está en el adelgazamiento de la hoja de plástico, que es uno de los problemas del termoformado. A menos que el contorno del molde sea muy somero, habrá un adelgazamiento significativo de la hoja según se estire para conformarse al contorno del molde. Los moldes positivo y negativo producen patrones de adelgazamiento diferentes en una pieza dada. Considere el lector la pieza en forma de tina que se da como ejemplo. En el molde positivo, conforme la hoja se presiona sobre la forma convexa, la porción en

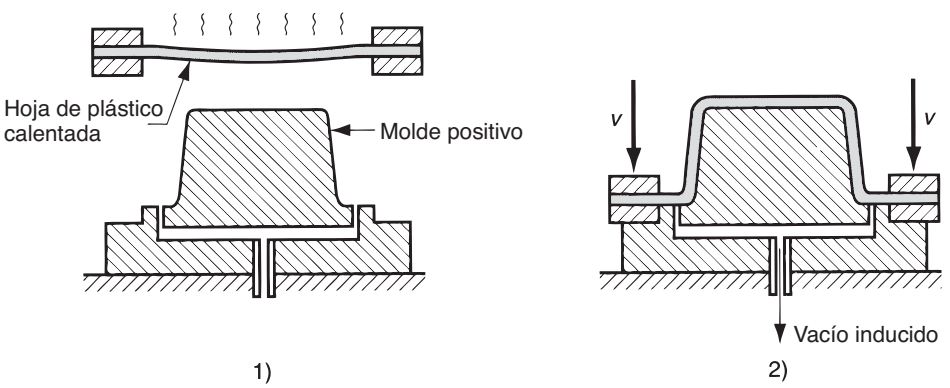


FIGURA 13.37 Uso de un molde positivo en el termoformado al vacío: 1) la hoja de plástico calentada se coloca sobre el molde convexo y 2) la abrazadera baja hacia esa posición y presiona la hoja sobre el molde conforme el vacío la fuerza contra la superficie de este.

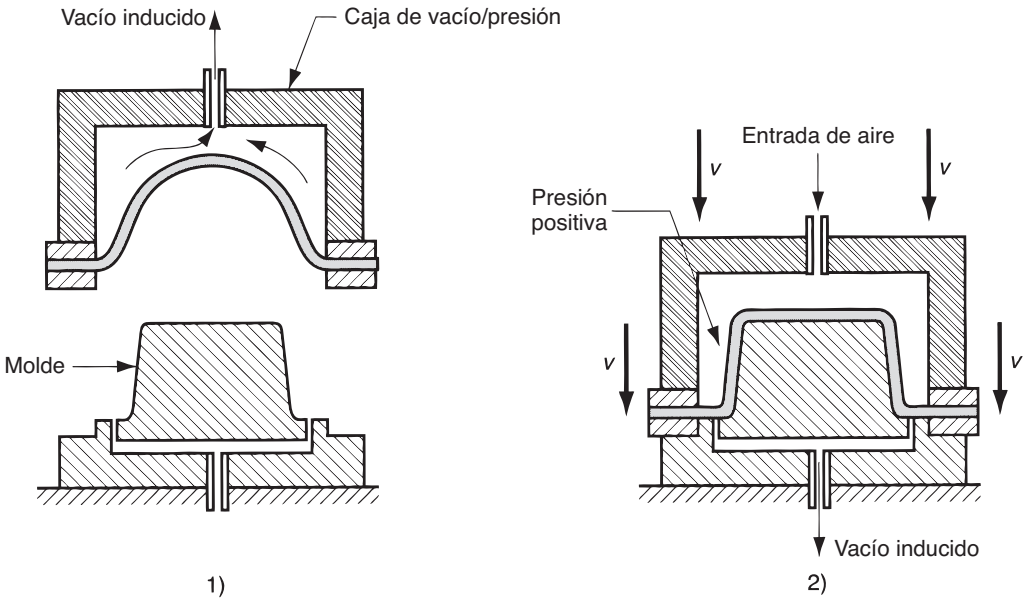


FIGURA 13.38 Preestirado de la hoja en 1) antes de plegarla y vaciarla sobre un molde positivo en 2).

contacto con la superficie superior (que corresponde a la base de la tina) se solidifica con rapidez y no experimenta virtualmente ningún estiramiento. Esto da como resultado una base gruesa pero un adelgazamiento significativo de las paredes de la tina. Por el contrario, un molde negativo genera una distribución más pareja del estiramiento y adelgazamiento de la hoja antes de que haga contacto con la superficie fría.

Una forma de mejorar la distribución del adelgazamiento con un molde positivo es preestirar la hoja antes de plegarla sobre la forma convexa. Como se ve en la figura 13.38, la hoja de plástico calentada se estira de modo uniforme por la presión del vacío hacia una forma esférica antes de empujarla sobre el molde.

La primera etapa que se ilustra en el recuadro 1) de la figura 13.38 puede utilizarse por sí sola como un método para producir piezas en forma de globo, tales como tragaluces y domos transparentes. En el proceso se aplica aire a presión muy controlada para inflar la hoja suave. La presión se mantiene hasta que la forma soplada se ha solidificado.

Termoformado mecánico El tercer método, llamado ***termoformado mecánico***, utiliza moldes positivos y negativos que se juntan contra la hoja de plástico calentada, lo que la fuerza a adoptar la forma de ellos. En el método de formado mecánico puro no se utiliza en absoluto la presión del aire (positiva o negativa). En la figura 13.39 se ilustra el proceso. Sus ventajas son que se tiene un control dimensional mejor y la oportunidad de detallar la superficie de la pieza por ambas caras. La desventaja es que se requieren dos mitades de molde; por esa razón, los moldes para los otros dos métodos son menos costosos.

Aplicaciones El termoformado es un proceso de conformación secundario; el proceso primario es que produce la hoja o película (sección 13.3). Sólo los termoplásticos pueden termoformarse, ya que las hojas extruidas de polímeros termofijos o elastoméricos ya tienen entrecruzamiento y no es posible suavizarlas volviéndolas a calentar. Los plásticos comunes para el termoformado son el poliestireno, acetato de celulosa y butirato acetato de celulosa, ABS, PVC, acrílico (polimetilacrilato), polietileno y polipropileno.

En la industria del empaque se llevan a cabo operaciones de termoformado para producción en masa. La hoja o película inicial se alimenta con rapidez a través de la cámara de calentamiento y luego se le da mecánicamente la forma que se desea. Es frecuente que las operaciones se diseñen para producir piezas múltiples a cada paso de la prensa con el empleo de moldes con muchas hormas y cavidades. En ciertos casos, la máquina de

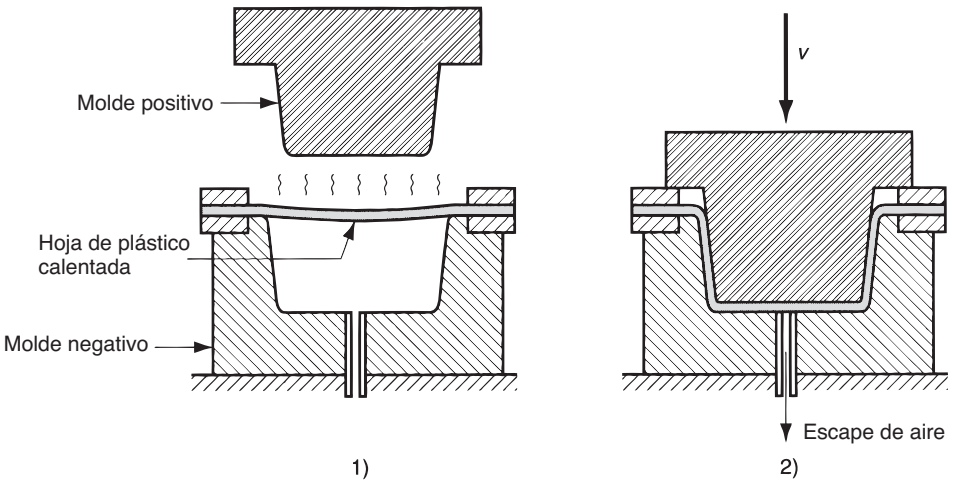


FIGURA 13.39
Termoformado mecánico: 1) hoja calentada sobre un molde negativo y 2) molde cerrado para dar forma a la hoja.

extrusión que produce la hoja o película se localiza inmediatamente antes del proceso de termoformado, con lo que se elimina la necesidad de recalentar el plástico. Y para tener una eficiencia mayor, el proceso de llenado que coloca el artículo alimenticio consumible dentro del contenedor se sitúa de inmediato después del termoformado.

Los artículos de película delgada para empaque que se producen en masa con termoformado incluyen paquetes de ampolletas y envolturas. Ofrecen una manera atractiva de presentar ciertos productos de consumo tales como cosméticos, artículos para baño, herramientas pequeñas y sujetadores (grapas, tornillos, etc). Las aplicaciones del termoformado incluyen piezas grandes que pueden producirse a partir de hojas más gruesas. Algunos ejemplos incluyen cubiertas para máquinas de oficina, cascos de lancha, regaderas, difusores de luz, anuncios de publicidad y señalamientos, tinas para baño y ciertos juguetes. Ya se mencionaron tragaluces y forros interiores de las puertas de los refrigeradores. Éstos se harían, respectivamente, de acrílico (por su transparencia) y ABS (debido a la facilidad de formarlo y su resistencia a los aceites y grasas que hay en los refrigeradores).

13.10 FUNDICIÓN

En la conformación de polímeros, la ***fundición*** involucra verter una resina líquida a un molde, con el uso de la gravedad para llenar la cavidad, y dejar que el polímero se endurezca. Tanto los termoplásticos como los termofijos se funden. Algunos ejemplos de los primeros incluyen los acrílicos, poliestireno, poliamidas (nylon) y vinilos (PVC). La conversión de la resina líquida en un termoplástico endurecido se lleva a cabo de varias maneras, que incluyen 1) calentar la resina termoplástica a un estado muy fluido de modo que se vierta y llene la cavidad del molde con facilidad, y después se le deja enfriar y solidificar en el molde; 2) usar un prepolímero (o monómero) de peso molecular bajo y polimerizarlo en el molde para que forme un termoplástico de peso molecular elevado; y 3) verter un plastisol (suspensión líquida de partículas finas de una resina termoplástica como el PVC, en un plastificador) en un molde calentado para que forme un gel y se solidifique.

Los polímeros termofijos a los que se da forma por medio de fundición incluyen el poliuretano, poliésteres insaturados, fenoles y epóxicos. El proceso involucra verter los ingredientes del líquido que forman el termofijo en un molde para que ocurra la polimerización y el entrecruzamiento. Quizá se requiera calor y/o un catalizador en función del sistema de resina. Las reacciones deben ser suficientemente lentas para permitir que el molde se vierta por completo. Los sistemas termofijos que reaccionan rápido, tales como los de ciertos poliuretanos, requieren procesos de conformación alternativos como el moldeo por inyección de reacción (sección 13.6.6).

Las ventajas de la fundición sobre procesos alternativos como el moldeo por inyección incluyen las siguientes: 1) el molde es más sencillo y menos costoso, 2) el artículo fundido está relativamente libre de esfuerzos residuales y memoria viscoelástica y 3) el proceso es apropiado para cantidades pequeñas de producción. Al centrarnos en la segunda ventaja, las hojas de acrílico (plexiglás, Lucite), por lo general, se funden entre dos placas de vidrio muy pulidas. El proceso de fundición permite un grado alto de aplanamiento y que se logren las cualidades ópticas que son deseables en las hojas de plástico transparente. Dicho aplanamiento y transparencia no pueden obtenerse con la extrusión de hojas planas. Una desventaja de ciertas aplicaciones es la contracción significativa de la pieza fundida durante la solidificación. Por ejemplo, las hojas de acrílico pasan por una contracción volumétrica de alrededor de 20% cuando se funden. Esto es mucho más que en el moldeo por inyección, en el que se emplean presiones elevadas para comprimir la cavidad del molde a fin de reducir la contracción.

La fundición en hueco es una alternativa a la fundición convencional; se deriva de la tecnología de fundición de metal. En la ***fundición en hueco***, se vierte un plastisol líquido en la cavidad de un molde de deslizamiento caliente, por lo que se forma una capa en la superficie del molde. Después de una duración que depende del espesor que se desea tenga la capa, se extrae el exceso de líquido del molde; luego se abre este para retirar la pieza. El proceso también se denomina ***fundición con concha*** [6].

Una aplicación de la fundición que tiene importancia en la electrónica es el ***encapsulamiento***, en el que artículos tales como transformadores, bobinas, conectores y otros componentes eléctricos se encierran en plástico por medio de la fundición.

13.11 PROCESAMIENTO Y FORMADO DE ESPUMA DE POLÍMERO

Una ***espuma de polímero*** es una mezcla de polímero y gas, lo que da al material una estructura porosa o celular. Otros términos que se emplean para las espumas de polímero incluyen ***polímero celular, polímero soplado*** y ***polímero expandido***. Las espumas de polímero más comunes son el poliestireno (Styrofoam, marca registrada) y poliuretano. Otros polímeros que se utilizan para fabricar espumas incluyen cauchos naturales ("caucho espumado") y cloruro de polivinilo (PVC).

Las propiedades características de un polímero espumado incluyen: 1) baja densidad, 2) alta resistencia por unidad de peso, 3) buen aislamiento térmico y 4) buenas cualidades de absorción de energía. La elasticidad del polímero base determina la propiedad correspondiente de la espuma. Las espumas de polímero se clasifican [6] como 1) ***elastoméricas***, en las que la matriz de polímero es un caucho, capaz de una gran deformación elástica; 2) ***flexible***, en el que la matriz es un polímero muy plástico tal como el PVC suave y 3) ***rígido***, en el que el polímero es un termoplástico rígido tal como el poliestireno o un plástico termofijo como un fenólico. En función de la formulación química y grado de entrecruzamiento, el poliuretano varía entre las tres categorías.

Las propiedades características de las espumas de polímero, así como la capacidad para controlar su comportamiento elástico a través de la selección del polímero base, hacen a estos materiales muy apropiados para ciertos tipos de aplicaciones, incluso tazas para bebidas calientes, materiales estructurales para aislamiento de calor y núcleos de paneles estructurales, materiales de empaque, materiales acojinados para muebles y almohadas, acojinamiento de tableros de automóvil y productos que requieren flotación.

13.11.1 Procesos de espumado

Los gases comunes que se usan en las espumas de polímero son aire, nitrógeno y dióxido de carbono. La proporción del gas varía hasta 90% o más. Éste se introduce en el polímero con varios métodos, llamados procesos de espumado. Éstos incluyen: 1) mezclar una resina

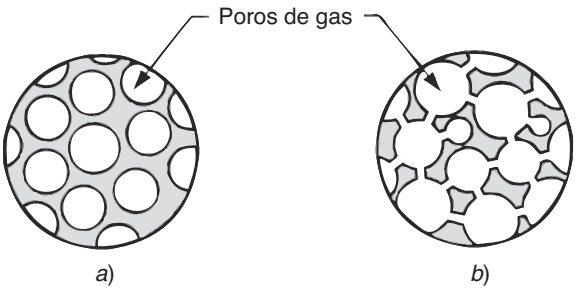


FIGURA 13.40 Dos estructuras de espuma de polímero: *a*) celda cerrada y *b*) celda abierta.

líquida con aire por ***agitación mecánica***, después se endurece el polímero por medio de calor o reacción química; 2) mezclar un ***agente de soplado físico*** con el polímero, un gas como el nitrógeno (N_2) o el pentano (C_5H_{12}), que se disuelve en el polímero fundido sujeto a presión, de modo que el gas sale de la solución y se expande cuando después se reduce la presión; y 3) se mezcla el polímero con componentes químicos, llamados ***agentes de soplado químicos*** que se descomponen a temperaturas altas y liberan gases tales como el CO_2 o el N_2 dentro de la mezcla.

La forma en que se distribuye el gas a través de la matriz de polímero permite distinguir dos estructuras de espuma básicas, que se ilustran en la figura 13.40: *a*) ***celda cerrada***, en la que los poros del gas son aproximadamente esféricos y están separados por completo unos de otros por la matriz de polímero, y *b*) ***celda abierta***, en la que los poros están interconectados hasta cierto punto, lo que permite el paso de un fluido a través de la espuma. Una estructura de celda cerrada constituye un chaleco salvavidas satisfactorio; una de celda abierta se llenaría de agua. Otros atributos que caracterizan la estructura incluyen las proporciones relativas del polímero y el gas (ya mencionadas) y la densidad de celdas (número de celdas por unidad de volumen), que es inversamente proporcional al tamaño de las celdas de aire individuales en la espuma.

13.11.2 Procesos de conformado

Hay muchos procesos para dar forma a los productos de espuma de polímero. Como las dos espumas más importantes son el poliestireno y el poliuretano, el presente análisis se limita a los procesos de conformación de estos dos materiales. Debido a que el poliestireno es un termoplástico y el poliuretano puede ser un termofijo o bien un elastómero (también un termoplástico, pero es menos importante en esta forma), los procesos que se estudian aquí para dichos materiales son representativos de los que se emplean en otras espumas de polímero.

Espumas de poliestireno Las espumas de poliestireno reciben su forma por extrusión y moldeo. En la ***extrusión***, se alimenta un agente de soplado químico o físico dentro del polímero fundido, cerca del extremo del troquel del barril extruidor; así, el extruido consiste en el polímero expandido. De esta manera se fabrican hojas y tableros grandes, que después se cortan al tamaño para hacer paneles y secciones aislantes del calor.

Para la espuma de poliestireno existen varios procesos de moldeo. Ya se analizó el ***moldeo de espuma estructural*** y el ***moldeo por sándwich*** (sección 13.6.6). Un proceso que se emplea más es el ***moldeo de espuma expansible***, en el que el material que se moldea por lo general consiste en cuentas de poliestireno preespumadas. Éstas se producen a partir de pellets de poliestireno sólido que han sido impregnadas de un agente soplador físico. El preespumado se lleva a cabo en un tanque grande por medio de la aplicación de vapor caliente para expandir parcialmente los pellets, que en forma simultánea se agitan para impedir su fusión. Después, en el proceso de moldeo, las cuentas preespumadas se introducen a la cavidad del molde, donde se expanden aún más y se funden entre sí para

formar el producto moldeado. De este modo se producen tazas para bebidas calientes, hechas de espuma de poliestireno. En ciertos procesos, se omite la etapa de preespumado, y las cuentas impregnadas se introducen directamente a la cavidad del molde, donde se calientan, expanden y funden. En otras operaciones, la espuma expansible primero se conforma como hoja plana con el ***proceso de extrusión de película soplada*** (sección 13.3) y luego se le da forma con ***termoformado*** (sección 13.9) en contenedores para empaque, tales como cajas para huevos.

Espumas de poliuretano Los productos de espuma de poliuretano están hechos en un proceso de una etapa en el que dos ingredientes líquidos (poliol e isocianato) se mezclan e introducen de inmediato a un molde u otra forma, de modo que el polímero se sintetiza y al mismo tiempo se crea la forma de la pieza. Los procesos de conformación de la espuma de poliuretano se dividen en dos tipos básicos [11]: rocío y vertido. El ***rocío*** involucra el empleo de una pistola de rocío en el que los dos ingredientes se introducen de manera continua, se mezclan y luego se rocían sobre una superficie objetivo. Las reacciones que llevan a la polimerización y espumado ocurren después de la aplicación sobre la superficie. Este método se utiliza para aplicar espumas rígidas de aislamiento a paneles para la construcción, vagones y objetos grandes similares. El ***vertido*** involucra la aplicación de los ingredientes desde una cabeza mezcladora hacia un molde abierto o cerrado en el que tienen lugar las reacciones. Un molde abierto puede ser un contenedor con el contorno requerido (por ejemplo, para un asiento acojinado de automóvil) o un canal largo que se mueve con lentitud una vez pasado el embudo de vertido para fabricar secciones de espuma continuas y largas. El molde cerrado es una cavidad cerrada por completo en la que se introduce cierta cantidad de la mezcla. La expansión de los reactivos llena por completo la cavidad para formar la pieza. Para poliuretanos de reacción rápida, la mezcla debe inyectarse de prisa a la cavidad del molde con el empleo de ***moldeo por inyección de reacción*** (sección 13.6.6). El grado de entrecruzamiento, controlado por los ingredientes de arranque determina la rigidez relativa de la espuma resultante.

13.12 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Los plásticos son un material importante de diseño, pero el diseñador debe estar alerta a sus limitaciones. En esta sección se enlistan algunos lineamientos de diseño para componentes de plástico, se comienza con las que se aplican en general y siguen las aplicables a la extrusión y moldeo (moldeo por inyección, por compresión y transferencia).

13.12.1 Consideraciones generales

Estos lineamientos generales se aplican sin importar el proceso de formado. Sobre todo son limitaciones de los materiales plásticos que el diseñador debe tomar en consideración.

- ***Resistencia y rigidez:*** Los plásticos no son tan fuertes o rígidos como los metales. No deben usarse en aplicaciones en las que se vayan a encontrar esfuerzos grandes. La resistencia al escurrimiento plástico también es una limitante. Las propiedades de resistencia varían en forma significativa entre los plásticos, y en ciertas aplicaciones las razones resistencia a peso de algunos de ellos son competitivas con las de los metales.
- ***Resistencia al impacto:*** La capacidad que tienen los plásticos de absorber impactos por lo general es buena; se comparan de modo favorable con la mayoría de metales.
- ***Temperaturas de servicio:*** Con respecto de las de los metales y cerámicos, las de los plásticos son limitadas.
- ***Expansión térmica:*** Es mayor para los plásticos que para los metales, por lo que los cambios dimensionales debidos a las variaciones de temperatura son mucho más significativos que para los metales.
- Muchos tipos de plásticos están sujetos a ***degradación*** por la luz solar y otras formas de radiación. Asimismo, algunos se degradan en atmósferas de oxígeno y ozono. Por

último, los plásticos son solubles en muchos solventes comunes. Por el lado positivo, son resistentes a los mecanismos convencionales de corrosión que afectan a muchos metales. La debilidad de plásticos específicos debe ser tomada en cuenta por el diseñador.

13.12.2 Plásticos extruidos

La extrusión es uno de los procesos de conformado de plásticos que se utiliza más. A continuación se presentan varias recomendaciones de diseño para el proceso convencional (recopiladas sobre todo de la referencia [3]).

- ***Espesor de pared:*** En la sección transversal extruida es deseable un espesor uniforme de la pared. Las variaciones de éste darán como resultado un flujo no uniforme del plástico y enfriamiento irregular que tenderá a pandear el extruido.
- ***Secciones huecas:*** Éstas complican el diseño del troquel y el flujo del plástico. Es deseable utilizar secciones transversales extruidas que no sean huecas, pero que satisfagan los requerimientos funcionales.
- ***Esquinas:*** En la sección transversal deben evitarse las esquinas agudas, dentro y fuera, porque dan como resultado un flujo irregular durante el procesamiento, y concentraciones de esfuerzos en el producto final.

13.12.3 Piezas moldeadas

Hay muchos procesos para moldear plásticos. En este artículo se dan lineamientos que se aplican al moldeo por inyección (el proceso más popular para moldear), por compresión y transferencia (recopilados de Bralla [3], McCrum [10] y otras fuentes).

- ***Cantidades económicas de producción:*** Cada pieza moldeada requiere un molde único, el cual para cualquiera de estos procesos es costoso, en particular para el moldeo por inyección. Las cantidades mínimas de producción para este proceso son de alrededor de 10 000 piezas; para el moldeo por compresión, 1000 piezas es lo mínimo, debido a los diseños más sencillos del molde que se necesita. El moldeo por transferencia se ubica entre las dos cifras anteriores.
- ***Complejidad de la pieza:*** Si bien las configuraciones geométricas más complejas de la pieza significan moldes más costosos, puede ser económico diseñar un molde complejo si la alternativa involucra muchos componentes individuales que se ensamblen juntos. Una ventaja del moldeo de plástico es que permite características funcionales múltiples para combinarse en una pieza.
- ***Espesor de pared:*** Las secciones transversales gruesas por lo general son indeseables; con ellas se desperdicia material, es más probable que se causen pandeos por la contracción y les toma más tiempo endurecer.
- ***Costillas de refuerzo:*** Se emplean en las piezas de plástico moldeado para obtener mayor rigidez sin un espesor de pared excesivo. Las costillas deben ser más delgadas que las paredes que refuerzan, a fin de minimizar las marcas de hundimiento en la pared exterior.
- ***Radios de las esquinas y biseles:*** Las esquinas agudas, tanto externas como internas, son indeseables en las piezas moldeadas; interrumpen el flujo suave del material fundido, tienden a crear defectos superficiales y ocasionan la concentración de los esfuerzos en la pieza terminada.
- ***Agujeros:*** Es muy factible que ocurran en los moldeos de plástico, pero complican el diseño del molde y la remoción de la pieza. También generan interrupciones en el flujo del material fundido.
- ***Ahusado:*** Una pieza moldeada debe diseñarse con un ahusado en sus lados para facilitar la remoción del molde. Esto tiene importancia especial en la pared interior de una pieza en forma de taza, porque el plástico moldeado se contrae contra la forma positiva del molde. El ahusado recomendable para los termofijos es alrededor de 1/2° a 1°; para

los termoplásticos, por lo general varía entre 1/8º y 1/2º. Los proveedores de compuestos de plástico para moldeo proporcionan valores recomendados del ahusado para sus productos.

➢ ***Tolerancias:*** Especifican las variaciones permisibles de la manufactura de una pieza. Aunque la contracción es predecible en condiciones muy controladas, son deseables tolerancias generosas para los moldeos por inyección debido a la variación de los parámetros del proceso que afectan la contracción, y a la diversidad de formas geométricas que existen para las piezas. En la tabla 13.2 se listan las tolerancias comunes para las dimensiones de piezas moldeadas con plásticos seleccionados.

TABLA 13.2 Tolerancias comunes para las piezas moldeadas para plásticos seleccionados.

	Tolerancias para [a]	
Plástico	Dimensión de 50 mm (2.0 in)	Agujero de 10 mm (3/8 de in)
Termoplástico:		
ABS	± 0.2 mm (± 0.007 in)	± 0.08 mm (± 0.003 in)
Polietileno	± 0.3 mm (± 0.010 in)	± 0.13 mm (± 0.005 in)
Poliestireno	± 0.15 mm (± 0.006 in)	± 0.1 mm (± 0.004 in)
Termofijo:		
Epóxicos	± 0.15 mm (± 0.006 in)	± 0.05 mm (± 0.002 in)
Fenoles	± 0.2 mm (± 0.008 in)	± 0.08 mm (± 0.003 in)

Los valores representan la práctica comercial del moldeo. Recopilados de las referencias [3], [7], [14] y [18].

[a]Para tamaños pequeños, las tolerancias pueden reducirse. Para tamaños más grandes, se requieren tolerancias más generosas.

REFERENCIAS

[1] Baird, D. G. y Collias, D. I., ***Polymer Processing Principles and Design,*** John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1998.

[2] Billmeyer, Fred, W., Jr. ***Textbook of Polymer Science,*** 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Bralla, J. G. (editor en jefe), ***Design for Manufacturability Handbook,*** 2a ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[4] Briston, J. H., ***Plastic Films,*** 3a ed., Longman Group U.K., Ltd., Essex, Inglaterra, 1989.

[5] Chanda, M. y Roy, S. K., ***Plastics Technology Handbook,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1998.

[6] Charrier, J-M, ***Polymeric Materials and Processing,*** Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[7] ***Engineering Materials Handbook, Vol. 2, Engineering Plastics,*** ASM International, Metals Park, Ohio, 1988.

[8] Hall, C., ***Polymer Materials,*** 2a ed., John Wiley & Sons. Nueva York, 1989.

[9] Hensen, F. (ed.), ***Plastic Extrusion Technology,*** Hanser Publishers, Munich, FRG, 1988. (Distribuido en Estados Unidos por Oxford University Press, Nueva York).

[10] McCrum, N. G., Buckley, C. P., y Bucknall, C. B., ***Principles of Polymer Engineering,*** 2a ed., Oxford University Press, Oxford, U.K., 1997.

[11] ***Modern Plastics Encyclopedia,*** Modern Plastics, McGraw-Hill, Inc., Hightstown, Nueva Jersey, 1991.

[12] Morton-Jones, D. H., ***Polymer Processing,*** Chapman and Hall, Londres, U.K., 1989.

[13] Pearson, J. R. A., ***Mechanics of Polymer Processing,*** Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 1985.

[14] Rubin, I. I., ***Injection Molding: Theory and Practice,*** John Wiley & Sons, Nueva York, 1973.

[15] Rudin, A., ***The Elements of Polymer Science and Engineering,*** 2a. ed., Academic Press, Inc., Orlando, Florida, 1999.

[16] Sweeney, F. M., ***Reaction Injection Molding Machinery and Processes,*** Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1987.

[17] Tadmor, Z. y Gogos, C. G., ***Principles of Polymer Processing,*** John Wiley & Sons, Nueva York, 1979.

[18] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F., ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol II: ***Forming***. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984, capítulo 18.

PREGUNTAS DE REPASO

13.1. ¿Cuáles son algunas de las razones por las que son importantes los procesos de conformado de plásticos?

13.2. Identifique las categorías principales de los procesos para conformar plásticos, según se clasifican por la configuración geométrica del producto resultante.

13.3. En los procesos de conformación de plásticos, la viscosidad es una propiedad importante de un polímero fundido. ¿De qué parámetros depende la viscosidad?

13.4. ¿En qué difiere la viscosidad de un polímero fundido de la mayor parte de fluidos newtonianos?

13.5. ¿Qué significa viscoelasticidad, si se aplica a un polímero fundido?
13.6. Defina la expansión del troquel en el proceso de la extrusión.
13.7. Describa brevemente el proceso de extrusión de plástico.
13.8. El barril y tornillo de un extrusor por lo general se dividen en tres secciones; identifique cada una de ellas.
13.9. ¿Cuáles son las funciones del paquete de la pantalla y placa rompedora en el extremo del troquel del barril extruidor?
13.10. ¿Cuáles son las diversas formas extruidas y los troqueles correspondientes?
13.11. ¿Cuál es la diferencia entre hoja y película de plástico?
13.12. ¿Cuál es el proceso de soplar película para producir ésta?
13.13. Describa el proceso de calandrado.
13.14. Las fibras y filamentos de polímero se utilizan en varias aplicaciones; ¿cuál de éstas es la de mayor importancia comercial?
13.15. Técnicamente, ¿cuál es la diferencia entre una fibra y un filamento?
13.16. Entre los materiales de fibra sintéticos, ¿cuáles son los más importantes?
13.17. Describa brevemente el proceso de moldeo por inyección.
13.18. Una máquina de moldeo por inyección se divide en dos componentes principales; identifíquelas.
13.19. ¿Cuáles son los dos tipos básicos de unidades de sujeción?
13.20. ¿Cuáles son las funciones de las puertas en los moldes de inyección?
13.21. ¿Cuáles son las ventajas de un molde de tres placas sobre uno de dos, en el moldeo por inyección?
13.22. Analice algunos de los defectos que ocurren en el moldeo por inyección de plástico.
13.23. Describa el moldeo de espuma estructural.
13.24. ¿Cuáles son las diferencias significativas en el equipo y procedimientos de operación entre el moldeo por inyección de termoplásticos y el moldeo por inyección de termofijos?
13.25. ¿Qué es moldeo por inyección de reacción?
13.26. ¿Qué clase de artículos se producen por medio del moldeo soplado?
13.27. ¿Cuál es la forma del material de inicio en el termoformado?
13.28. En el termoformado, ¿cuál es la diferencia entre un molde positivo y uno negativo?
13.29. ¿Por qué los moldes del termoformado mecánico por lo general son más costosos que en el de presión o vacío?
13.30. ¿Cuáles son los procesos con los que se producen las espumas de polímero?
13.31. ¿Cuáles son algunas de las consideraciones generales que los diseñadores de productos deben tener en cuenta al diseñar componentes hechos de plástico?
13.32. (**Video**) De acuerdo con el video sobre moldeo por inyección, ¿cuáles son los cuatro elementos principales que influyen en dicho proceso?
13.33. (**Video**) Según el video de moldeo por inyección, mencione los cuatro tipos más comunes en la industria del diseño de moldes.
13.34. (**Video**) En relación con el video de moldeo por inyección, ¿cuál es el tipo más común de máquina que se usa en la industria para dicho proceso?
13.35. (**Video**) De acuerdo con el video de moldeo por soplado, ¿qué materiales se utilizan en ese proceso? Mencione tres.
13.36. (**Video**) Liste los cuatro procesos más comunes de moldeo por soplado, según el video respectivo.
13.37. (**Video**) Liste las etapas del moldeo con soplado por extrusión, de acuerdo con el video correspondiente.
13.38. (**Video**) Mencione los cuatro tipos de operaciones de acabado de los plásticos, de acuerdo con el video sobre ese tema.
13.39. (**Video**) ¿Cuáles son los diferentes procesos que se emplean para aplicar decoraciones a las piezas de plástico, según el video sobre el tema?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 29 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

13.1. Al movimiento hacia delante de un polímero fundido en un barril extrusor le opone resistencia el flujo por arrastre, que es ocasionado por la resistencia a pasar por el orificio del troquel: ¿es *a*) verdadero o *b*) falso?
13.2. ¿Cuáles de las siguientes son secciones de un barril extrusor convencional para termoplásticos? (tres respuestas son las mejores): *a*) sección de compresión, *b*) sección del troquel, *c*) sección de alimentación, *d*) sección de calentamiento, *e*) sección de medición y *f*) sección de conformado.
13.3. ¿Cuáles de los procesos siguientes se asocian con la producción de hoja y película de plástico? (hay tres respuestas correctas): *a*) proceso de extrusión de película soplada, *b*) calandrado, *c*) extrusión por rodillo frío, *d*) método del bisturí, *e*) hilado, *f*) termoformado o *g*) moldeo por transferencia.
13.4. ¿Cuáles de los siguiente son los dos componentes principales de una máquina de moldeo por inyección?: *a*) unidad de sujeción, *b*) tolva, *c*) unidad de inyección, *d*) molde y *e*) unidad de eyección de la pieza.

13.5. ¿Cuál de las siguientes es la línea de separación en el moldeo por inyección?: *a*) líneas que se forman donde el polímero fundido se encuentra después de fluir alrededor de un núcleo en el molde, *b*) las secciones estrechas de la puerta donde las piezas se separan del vaciadero, *c*) donde la unidad de abrazaderas se une con la de inyección en la máquina moldeadora o *d*) donde se unen las dos mitades del molde.

13.6. ¿Cuál de las siguientes es la función del sistema de eyección?: *a*) mover el polímero fundido hacia la cavidad del molde, *b*) abrir las mitades del molde después de llenarse la cavidad, *c*) retirar las piezas moldeadas del sistema de vaciadero después del moldeo o *d*) separar la pieza de la cavidad después del moldeo.

13.7. ¿Cuáles de las ventajas siguientes ofrece un molde de tres placas, en comparación con uno de dos? (dos respuestas son las mejores): *a*) separación automática de las piezas de los vaciaderos, *b*) la puerta por lo general está en la base de la pieza para reducir las líneas de soldadura, *c*) el bebedero no se solidifica y *d*) piezas moldeadas más fuertes.

13.8. ¿Cuáles de los siguientes defectos o problemas se asocian con el moldeo por inyección? (tres respuestas son las correctas: *a*) bambú, *b*) expansión del troquel, *c*) flujo por arrastre, *d*) rebabas, *e*) fractura fundida, *f*) disparos cortos o *g*) marcas de hundimiento.

13.9. En el moldeo rotacional, la fuerza centrífuga se usa para forzar al polímero fundido contra las superficies de la cavidad del molde en que ocurre la solidificación: ¿es *a*) verdadero o *b*) falso?

13.10. ¿El uso de un parison se asocia con cuál de los siguientes procesos para dar forma a los plásticos?: *a*) moldeo por inyección doble, *b*) moldeo por soplado, *c*) moldeo por compresión, *d*) termoformado de presión o *e*) moldeo sándwich.

13.11. ¿Cuál de las denominaciones siguientes recibe el molde termoformado con forma convexa? (puede haber más de una): *a*) troquel, *b*) molde negativo, *c*) molde positivo o *d*) molde de tres placas.

13.12. El término encapsulamiento, ¿se refiere a cuál de los procesos siguientes para dar forma a los plásticos?: *a*) fundición, *b*) moldeo por compresión, *c*) extrusión de formas huecas, *d*) moldeo por inyección en el que un inserto de metal se introduce en la pieza moldeada o *e*) termoformado al vacío con molde positivo.

13.13. ¿Cuáles de las siguientes son las espumas de polímero más comunes?: *a*) poliacetato, *b*) polietileno, *c*) poliestireno, *d*) poliuretano y *e*) cloruro de polivinilo.

13.14. ¿En cuál de las categorías de propiedades que siguen es frecuente que las piezas de plástico se comparen en forma favorable con los metales? (dos respuestas son las mejores): *a*) resistencia al impacto, *b*) resistencia a la radiación ultravioleta, *c*) rigidez, *d*) resistencia, *e*) razón resistencia a peso o *f*) resistencia a la temperatura.

13.15. ¿Cuáles de los procesos siguientes por lo general se limitan a los polímeros termoplásticos? (dos respuestas son las mejores): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por inyección de reacción, *d*) termoformado, *e*) moldeo por transferencia, *f*) recubrimiento de alambres.

13.16. ¿Cuáles de los procesos siguientes son aplicables a la producción de cascos de botes pequeños? (tres respuestas son las mejores): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por inyección, *d*) moldeo rotacional o *e*) termoformado al vacío.

PROBLEMAS

Extrusión

13.1. El diámetro de un barril extrusor es de 65 mm, y su longitud es de 1.75 m. El tornillo gira a 55 rev/min. La profundidad del canal del tornillo es de 5.0 mm y el ángulo de las cuerdas es de 18º. La presión piezométrica en el troquel en el extremo del barril es de 5.0×10^6 Pa. La viscosidad del polímero fundido se da como de 100 Pas. Encuentre el gasto volumétrico del plástico en el barril.

13.2. Un extrusor tiene un diámetro de 5.0 in y una razón de longitud a diámetro de 26. El barril calienta el polipropileno a 450 ºF, lo que da una viscosidad al líquido fundido de 0.0025 lb-s/in^2. La separación de las cuerdas del tornillo es de 4.2 in, y la profundidad del canal es de 0.15 in. Durante la operación, el tornillo gira a 50 rev/min, y se genera una presión piezométrica de 450 lb/in^2. ¿Cuál es el gasto volumétrico del polipropileno desde el troquel en el extremo del barril?

13.3. Un barril extrusor tiene un diámetro de 110 mm y una longitud de 3.0 m. La profundidad del canal del tornillo es de 7.0 mm, y la separación entre sus cuerdas es de 95 mm. La viscosidad del polímero fundido es de 105 Pas, y la presión piezométrica en el barril es de 4.0 MPa. ¿Cuál es la velocidad rotacional del tornillo que se requiere para lograr un gasto volumétrico de 90 cm^3/s?

13.4. Un extrusor tiene un diámetro de barril de 2.5 in y longitud de 6.0 ft. El tornillo tiene una profundidad de canal de 0.25 in, un ángulo de cuerdas de 20º y gira a 55 rev/min. El material que se extruye es polipropileno. Con las especificaciones presentes, el gasto volumétrico del polímero fundido es de 1.50 in^3/s y la presión piezométrica es de 500 lb/in^2. *a*) Con estas características de operación, ¿cuál es la viscosidad del polipropileno? *b*) Con el uso de la figura 13.2, diga la temperatura aproximada en °F del polipropileno.

13.5. Un extrusor tiene un diámetro de 80 mm y longitud de 2.0 m. Su tornillo tiene una profundidad de canal de 5 mm, ángulo de cuerdas de 18 grados y gira a 1 rev/s. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 150 Pas. Determine la característica del extrusor con el cálculo de $Q_{máx}$ y $p_{máx}$, y luego encuentre la ecuación de la línea recta entre esos valores.

13.6. Determine el ángulo A de la hélice de modo que la separación entre las cuerdas del tornillo p sea igual al diámetro de este D. En la extrusión de plásticos, esto se llama el ángulo "cuadrado", aquel que provee un avance de las cuerdas igual a un diámetro por cada rotación del tornillo.

13.7. Un barril extrusor tiene un diámetro de 2.5 in. El tornillo gira a 60 rev/min, la profundidad de su canal es de 0.20 in y el ángulo de sus cuerdas de 17.5º. La presión piezométrica en el extremo del troquel del barril es de 800 lb/in^2 y la longitud de éste es de 50 in. La viscosidad del polímero fundido es de 122×10^{-4} lib-s/in^2. Determine el gasto volumétrico del plástico en el barril.

13.8. Un barril extrusor tiene un diámetro de 4.0 in y una razón L/D de 28. La profundidad del canal del tornillo es de 0.25 in y la separación de sus cuerdas es de 4.8 in. Gira a 60 rev/min. La viscosidad del polímero fundido es de 100×10^{-4} lb-s/in^2. ¿Cuál es la presión piezométrica que se requiere para obtener un gasto volumétrico de 150 in^3/min?

13.9. Una operación de extrusión produce tubería continua con diámetro exterior de 2.0 in e interior de 1.7 in. El barril extrusor tiene un diámetro de 4.0 in y longitud de 10 ft. El tornillo gira a 50 rev/min; tiene una profundidad de canal de 0.25 in y ángulo de cuerdas de 16º. La presión piezométrica tiene un valor de 350 lb/in^2 y la viscosidad del polímero es de 80×10^{-4} lb-s/in^2. En estas condiciones, ¿cuál es la tasa de producción en longitud de tubo/min si se supone que el extruido se empuja a una tasa que elimina el efecto de la expansión del troquel (es decir, el tubo tiene los mismos diámetros exterior e interior que el perfil del troquel)?

13.10. Un extrusor tiene un barril con diámetro y longitud de 100 mm y 2.8 m, respectivamente. La velocidad rotacional del tornillo es de 50 rev/min, profundidad de canal de 7.5 mm y ángulo de cuerdas de 17°. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 175 Pas. Determine: *a*) la característica del extrusor, *b*) el factor de forma K_s, para una abertura circular de troquel con diámetro de 3.0 mm y longitud de 12.0 mm y *c*) el punto de operación (Q y p).

13.11. Para el problema 13.10, suponga que el material es acrílico. *a*) Con el uso de la figura 13.2, determine la temperatura del polímero fundido, *b*) Si la temperatura baja a 20 ºC, estime la viscosidad resultante del polímero fundido. (*Orientación*: el eje y de la figura 13.2 está en escala logarítmica, no lineal).

13.12. Considere un extrusor en el que el diámetro del barril es de 4.5 in con longitud de 11 ft. El tornillo extrusor gira a 60 rev/min; tiene una profundidad de canal de 0.35 in y ángulo de cuerdas de 20º. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 125×10^{-4} lb-s/in^2. Determine: *a*) $Q_{máx}$ y $p_{máx}$; *b*) el factor de forma K_s para una abertura circular en el troquel, en la que $D_d = 0.312$ in y $L_d = 0.75$ in; y *c*) los valores de Q y p en el punto de operación.

13.13. Un extrusor tiene un diámetro de barril de 5.0 in y longitud de 12 ft. El tornillo extrusor gira a 50 rev/min; tiene profundidad de canal de 0.30 in y ángulo de cuerdas de 17.7º. El plástico fundido tiene una viscosidad cortante de 100×10^{-4} lb-s/in^2. Calcule: *a*) la característica del extrusor, *b*) los valores de Q y p en el punto de operación, dado que la característica del troquel es $Q_x = 0.00150\,p$.

13.14. Un extrusor tiene un barril con diámetro de 3.5 in y longitud de 5.0 ft. La profundidad del canal del tornillo es de 0.16 in y ángulo de cuerdas de 22º. El tornillo extrusor gira a 75 rev/min. El polímero fundido tiene una viscosidad cortante de 65×10^{-4} lb-s/in^2 a la temperatura de operación de 525 ºF. La gravedad específica del polímero es de 1.2, y su resistencia a la tensión es de 8 000 lb/in^2. Se extruye una sección transversal en forma de T a razón de 0.11 lb/s. La densidad del agua es de 62.5 lb/ft^3. *a*) Encuentre la ecuación para la característica del extrusor. *b*) Determine el punto de operación (Q y p), y *c*) la característica del troquel indicada por el punto de operación.

Moldeo por inyección

13.15. Calcule el porcentaje de contracción volumétrica de una pieza moldeada de polietileno, con base en el valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.16. La dimensión especificada para cierta pieza moldeada por inyección hecha de ABS es de 225.00 mm. Calcule la dimensión correspondiente a la que debe maquinarse la cavidad del molde, con el uso del valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.17. La dimensión de cierta pieza moldeada por inyección hecha de policarbonato se especifica como de 3.75 in. Calcule la dimensión correspondiente a la que debe maquinarse la cavidad del molde, con el uso del valor de contracción que se da en la tabla 13.1.

13.18. El supervisor en un departamento de moldeo por inyección dice que una de las piezas de polipropileno producida en una de las operaciones tiene una contracción mayor de la que los cálculos indican que debería tener. La dimensión importante de la pieza se especifica como de 112.5 ± 0.25 mm. Sin embargo, la pieza real moldeada mide 112.02 mm. *a*) Como primer paso, debe revisarse la dimensión correspondiente de la cavidad del molde. Calcule el valor correcto de la dimensión del molde, dado que el valor de contracción para el polietileno es de 0.025 (de la tabla 13.1), *b*) ¿Qué ajustes deben hacerse en los parámetros del proceso para reducir la cantidad de contracción?

13.19. Una pieza de polietileno moldeada por inyección tiene una dimensión de 2.500 in. En el mismo molde se usa un material nuevo de policarbonato. ¿Cuál es la dimensión esperada correspondiente del moldeo con policarbonato?

Otras operaciones de moldeo y termoformado

13.20. El troquel de extrusión para un parison de polietileno que se usa en el moldeo por soplado tiene un diámetro medio de 18.0 mm. El tamaño del anillo que abre el troquel es de 2.0 mm. Se observa que el diámetro medio del parison se expande a un tamaño de 21.5 mm después de salir del orificio del troquel. Si el diámetro del contenedor moldeado por soplado ha de ser de 150 mm, determine *a*) el espesor de pared correspondiente del contenedor y *b*) el espesor de pared del parison.

13.21. Una operación de moldeo por soplado produce una botella de 6.25 in de diámetro a partir de un parison que se extruye en un troquel cuyo diámetro exterior es de 1.25 in e interior de 1.0 in. La razón observada de expansión del diámetro es de 1.24. ¿Cuál es la presión máxima de aire que debe usarse si la fuerza al esfuerzo máximo permisible para el polímero es de 1 000 lb/in^2?

13.22. Un parison se extruye desde un troquel con diámetro exterior de 11.5 mm e interior de 7.5 mm. La expansión observada del troquel es de 1.25. El parison se usa para moldear por soplado el contenedor de una bebida cuyo diámetro exterior es de 112 mm (tamaño estándar de una botella de refresco de 2 litros). *a*) ¿Cuál es el espesor de pared correspondiente del contenedor? *b*) Obtenga una botella vacía de plástico de refresco de 2 litros y córtela (con cuidado) a través de su diámetro. Con el uso de un micrómetro mida el espesor de pared y compárelo con su respuesta para el inciso *a*).

13.23. Una operación de moldeo por soplado se utiliza para producir una botella con diámetro de 2.250 in y espesor de pared de 0.045. El parison tiene un espesor de 0.290 in. La presión que se usa para inflar el parison es de 38.0 lb/in^2. La razón observada de expansión del troquel es de 1.30. *a*) ¿Cuál es el diámetro requerido del parison? *b*) ¿Cuál es el diámetro del troquel? *c*) ¿Cuál es el esfuerzo a la tensión en la botella conforme alcanza su tamaño inflado?

13.24. Una operación de extrusión se utiliza para producir un parison cuyo diámetro medio es de 27 mm. Los diámetros interior y exterior del troquel que produce el parison son 18 mm y 22 mm, respectivamente. Si el espesor de pared mínimo del contenedor moldeado por soplado ha de ser de 0.40 mm, ¿cuál es el diámetro máximo posible del molde soplado?

13.25. Una operación de moldeo rotacional va a usarse para moldear una pelota hueca hecha de polipropileno. La pelota tendrá un diámetro de 1.25 ft y el espesor de su pared debe ser 3/32 in. ¿Cuál es el peso del polvo PE que debe cargarse en el molde a fin de cumplir esas especificaciones? La gravedad específica del grado PE es de 0.90 y la densidad del agua es de 62.4 lb/ft^3.

13.26. El problema en cierta operación de termoformado es que hay demasiado adelgazamiento de las paredes de una pieza grande en forma de taza. La operación es de termoformado a presión convencional que usa un molde positivo, y el plástico es una hoja ABS con espesor inicial de 3.2 mm. *a*) ¿Por qué ocurre el adelgazamiento en las paredes de la taza? *b*) ¿Qué cambios podrían hacerse en la operación, a fin de corregir el problema?

14 TECNOLOGÍA DE PROCESAMIENTO DEL CAUCHO (HULE)

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

14.1 Procesamiento y formado del caucho
- 14.1.1 Producción de caucho
- 14.1.2 Composición
- 14.1.3 Mezcla
- 14.1.4 Formación y procesos relacionados
- 14.1.5 Vulcanización

14.2 Manufactura de llantas y otros productos de caucho
- 14.2.1 Llantas
- 14.2.2 Otros productos de caucho
- 14.2.3 Procesamiento de elastómeros termoplásticos

14.3 Consideraciones sobre el diseño del producto

Muchos de los procesos que se usan para dar forma a los plásticos (capítulo 13) también son aplicables a los cauchos. Sin embargo, en ciertos aspectos la tecnología del procesamiento del caucho es diferente, y la industria de éste está muy separada de la del plástico. La industria del caucho y de los bienes elaborados con éste se encuentra dominada por un solo producto: las llantas (neumáticos). Éstas se emplean en gran número para automóviles, camiones, aeronaves y bicicletas. Aunque las llantas datan de finales de la década de 1880, la tecnología del caucho puede rastrearse hasta el descubrimiento de la vulcanización en 1839 (nota histórica 8.2), proceso por el que el caucho natural se transforma en un material útil por medio del entrecruzamiento de las moléculas del polímero. Durante su primer siglo, la industria del caucho sólo tenía que ver con el procesamiento de caucho natural. Durante la Segunda Guerra Mundial se inventaron los cauchos sintéticos (nota histórica 8.3); hoy día éstos constituyen la mayoría de la producción de caucho.

14.1 PROCESAMIENTO Y FORMADO DEL CAUCHO

La producción de artículos de caucho se divide en dos etapas básicas: 1) producción del caucho en sí, y 2) procesamiento de éste para obtener artículos terminados. La producción de caucho difiere, en función de si es natural o sintético. La diferencia se debe a la fuente

de las materias primas. El caucho natural (NR, por sus siglas en inglés) se produce como cultivo agrícola, en tanto que la mayoría de los sintéticos se fabrican a partir del petróleo.

A la producción de caucho sigue su procesamiento hacia los productos finales; éste consiste en 1) composición, 2) mezcla, 3) formación y 4) vulcanización. Las técnicas de procesamiento para cauchos naturales y sintéticos son virtualmente las mismas, las diferencias están en los productos químicos que se emplean para hacer la vulcanización (entrecruzamiento). Esta secuencia no se aplica a los elastómeros termoplásticos, cuyas técnicas de formado son las mismas que para los demás polímeros termoplásticos.

Hay varias industrias diferentes involucradas en la producción y procesamiento del caucho. La producción de caucho crudo natural puede clasificarse como industria agrícola, puesto que el látex, ingrediente de inicio del caucho natural, se cultiva en plantaciones extensas ubicadas en climas tropicales. Por el contrario, los cauchos sintéticos los produce la industria petroquímica. Por último, el procesamiento de estos materiales en forma de llantas, suelas de calzado y otros productos de caucho tiene lugar en plantas procesadoras (fábricas). Las procesadoras se conocen por lo común como industria del caucho. Algunos de los nombres principales en esta industria incluyen los de Goodyear, B. F. Goodrich y Michelin. La importancia de las llantas se ve reflejada en estos nombres.

14.1.1 Producción de caucho

En esta sección se estudia brevemente la producción de caucho antes de que pase al procesador. El análisis diferencia el caucho natural del sintético.

Caucho natural El caucho natural se obtiene de árboles (hules) de caucho (***Hevea brasiliensis***) en forma de látex. Los árboles se cultivan en plantaciones del sureste de Asia y otras partes del mundo. El látex es una dispersión coloidal de partículas sólidas del polímero poliisopreno (sección 8.4.2) en agua. El poliisopreno es la sustancia química que incluye al caucho, y la emulsión lo contiene en 30%. El látex se almacena en tanques grandes, donde se mezcla el producto de varios árboles.

El método preferido de obtención del caucho a partir del látex involucra la coagulación. Primero se diluye el látex con agua a cerca de la mitad de su concentración natural. Se agrega un ácido como el fórmico (HCOOH) o acético (CH_3COOH) para hacer que el látex se coagule al cabo de 12 horas. El coágulo, ahora en forma de trozos sólidos suaves, se exprime a través de una serie de rodillos que expulsan la mayor parte del agua y reducen el espesor a 3 mm (1/8 in). Los últimos rodillos tienen muescas que le dan un patrón cuadriculado a las hojas resultantes. Luego, éstas se comprimen sobre marcos de madera para secarlas en ahumaderos. El humo caliente contiene creosota, que impide la formación de moho y la oxidación del caucho. Normalmente se requieren varios días para terminar el proceso de secado. El caucho resultante, ahora en una forma llamada ***hoja ahumada acanalada***, se pliega en pacas grandes para su envío al procesador. Este caucho natural tiene un color café oscuro característico. En ciertos casos, las hojas se secan con aire caliente en vez de ahumadores por lo que se aplica el término ***hoja secada al aire***; se considera que éste es el mejor grado de caucho. Un grado aún mejor, denominado ***crespón o crepé pálido***, involucra dos etapas de coagulación; la primera retira los componentes indeseables del caucho, y el coágulo que resulta se sujeta luego a un lavado más intenso y a un procedimiento de trabajo mecánico, seguido por el secado con aire caliente. El color del crespón pálido de caucho se parece al del tostado claro.

Caucho sintético Los distintos tipos de caucho sintético se identifican en la sección 8.4.3. La mayor parte de sintéticos se producen a partir del petróleo con las mismas técnicas de polimerización que se emplean para sintetizar otros polímeros (sección 8.1.1). Sin embargo, a diferencia de los polímeros termoplásticos y termofijos, que se entregan al fabricante en su presentación normal de pellets o resinas líquidas, los cauchos sintéticos se le dan a los

procesadores en forma de pacas grandes. La industria ha implantado una larga tradición de manejar el caucho natural en estas unidades de carga.

14.1.2 Composición

El caucho se compone con aditivos. Es con la composición que el caucho específico se diseña para satisfacer la aplicación dada en términos de propiedades, costo y susceptibilidad de procesamiento. La composición agrega productos químicos para la vulcanización. El azufre se ha utilizado tradicionalmente para este propósito. El proceso de vulcanización y los productos químicos que se emplean para efectuarla se estudian en la sección 14.1.5.

Los aditivos incluyen productos de relleno que actúan tanto para mejorar las propiedades mecánicas del caucho (rellenos reforzadores) como para mezclarlo y reducir su costo (rellenos no reforzadores). El relleno simple más importante de los cauchos es el ***negro de humo***, forma coloidal del carbono, de color negro, que se obtiene por descomposición térmica de los hidrocarburos (hollín). Su efecto es incrementar la resistencia a la tensión, a la abrasión y a la separación del producto final. El negro de humo también da protección contra la radiación ultravioleta. Estas mejoras tienen especial importancia para las llantas. La mayoría de las piezas de caucho son de color negro debido a su contenido de negro de humo.

Aunque el negro de humo es el relleno más importante, también se usan otros. que incluyen arcillas chinas, silicatos hidratados de aluminio ($Al_2Si_2O_5(OH_4)$), que proporcionan menos refuerzo que el negro de humo pero se usan cuando el color negro no resulta aceptable; el carbonato de calcio ($CaCO_3$), que es un relleno no reforzador; y el sílice (SiO_2), que tiene funciones de reforzador o no reforzador, en función del tamaño de sus partículas; y otros polímeros como el estireno, PVC y fenoles. También se agrega caucho recuperado (reciclado) como relleno en ciertos productos, pero por lo general no excede la proporción de 10%.

Otros aditivos de la composición del caucho incluyen antioxidantes para retardar el envejecimiento por oxidación, productos químicos que dan protección contra la fatiga, y el ozono, pigmentos, aceites plastificadores y suavizantes, agentes de soplado para producir hule espuma y compuestos antiadherentes para liberarlo del molde.

Muchos productos requieren filamentos de refuerzo para reducir la extensibilidad y conservar otras propiedades deseables del caucho. Ejemplos notables de esto son las llantas y las bandas transportadoras. Los filamentos que se usan para este propósito incluyen celulosa, naylon y poliéster. La fibra de vidrio y acero también se emplean como refuerzo (por ejemplo, llantas radiales con cinturones de acero). Estos materiales de fibra continua deben agregarse como parte del proceso de dar forma; no se mezclan con los demás aditivos.

14.1.3 Mezcla

Los aditivos deben mezclarse por completo con el caucho base para obtener una dispersión uniforme de los ingredientes. Los cauchos sin curar tienen viscosidad elevada. El trabajo mecánico que experimenta el caucho llega a incrementar su temperatura hasta 150 ºC (300 ºF). Si los agentes de vulcanización estuvieran presentes desde que comienza la mezcla, ocurriría la vulcanización prematura, la pesadilla del procesador de caucho [6]. En consecuencia, por lo general se emplea un proceso de mezcla en dos etapas. En la primera de ellas, se combina negro de humo y otros aditivos no vulcanizadores con el caucho crudo. El término ***lote maestro*** se emplea para esta primera etapa de mezclado. Después de completada la mezcla, y habiéndose dado tiempo para que se enfríe, se efectúa la segunda etapa, en la que se agregan agentes vulcanizadores.

El equipo para mezclar incluye un molino de dos rodillos y mezcladores internos tales como el Banbury (figura 14.1). El ***molino de dos rodillos*** consiste en dos rodillos paralelos,

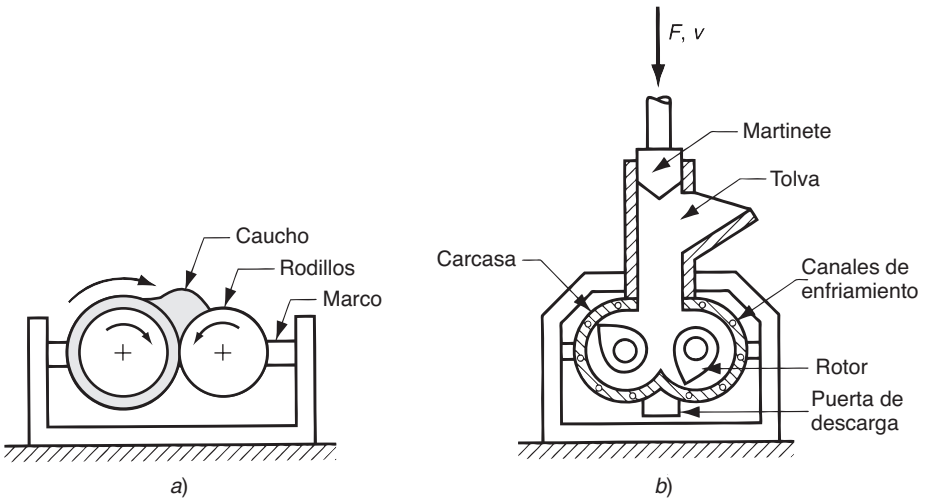


FIGURA 14.1 Mezcladores que se usan para procesar el caucho: *a*) molino de dos rodillos y *b*) mezclador interno tipo Banbury. Estas máquinas también se emplean para "masticar" el caucho natural.

apoyados en un marco de modo que pueden acercarse para obtener el "mordisco" (tamaño de la brecha) que se desea, y se hacen rotar con las mismas velocidades u otras ligeramente distintas. Un ***mezclador interno*** tiene dos rotores contenidos en una carcasa, como se aprecia en la figura 14.1*b*), para el mezclador interno tipo Banbury. Los rotores tienen navajas y giran en direcciones opuestas a velocidades diferentes, lo que ocasiona un patrón de flujo complejo de la mezcla que contiene.

14.1.4 Formación y procesos relacionados

Los procesos de formación de los productos de caucho se dividen en cuatro categorías básicas: 1) extrusión, 2) calandrado, 3) recubrimiento y 4) moldeo y fundición. La mayoría de estos procesos se estudió en el capítulo anterior. En éste se examinarán los temas especiales que surgen cuando se aplican al caucho. Ciertos productos requieren varios procesos básicos más un trabajo de ensamble en su manufactura; un ejemplo de lo anterior son las llantas.

Extrusión En el capítulo anterior se estudió la extrusión de polímeros. Para extruir el caucho, por lo general se emplean extrusores de tornillo. Igual que con la extrusión de plásticos termofijos, la razón *L/D* de los barriles extrusores es menor que la de los termoplásticos, y es común que esté en el rango de 10 a 15 para reducir el riesgo del entrecruzamiento prematuro. La dilatación del troquel ocurre con los extruidos de caucho, ya que el polímero se encuentra en una condición muy plástica y presenta la propiedad de memoria (original). Aún no ha sido vulcanizado.

Calandrado Este proceso implica pasar el material de caucho a través de una serie de espacios de tamaño decreciente entre un conjunto de rodillos rotatorios (sección 13.3). El proceso del caucho debe operarse a temperaturas más bajas que las de los polímeros termoplásticos para evitar la vulcanización prematura. Asimismo, el equipo que se emplea en la industria del caucho es más pesado que el que se usa para los termoplásticos, ya que aquél es más viscoso y difícil de conformar. La salida del proceso es una hoja de caucho de espesor determinado por el espacio final entre los rodillos; de nuevo, en la hoja se da la expansión, lo que hace que el espesor sea ligeramente mayor que el tamaño del espacio. También se emplea calandrado para recubrir o impregnar textiles para producir telas con caucho.

Hay problemas para producir hojas gruesas, sea por extrusión o calandrado. El control del espesor es difícil en el proceso original, y en el posterior ocurre un entrampamiento del aire. Estos problemas se resuelven en gran medida con la combinación de la extrusión y el calandrado en el proceso de ***troquel de rodillo*** (figura 14.2). El troquel extrusor es una rendija que alimenta a los rodillos de calandrado.

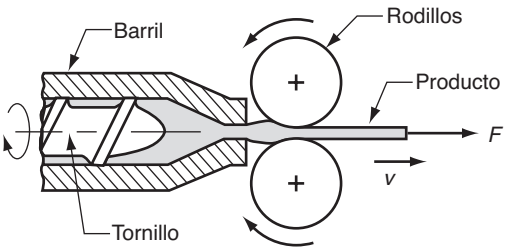


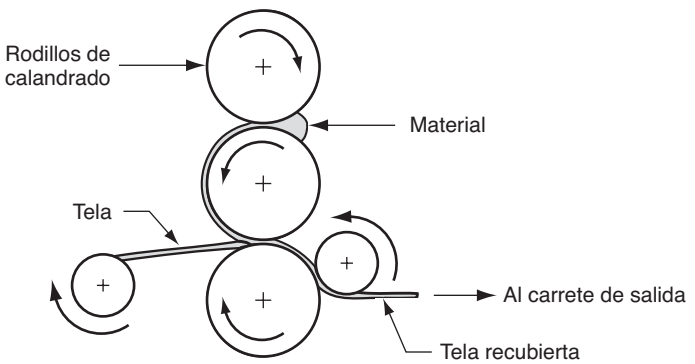
FIGURA 14.2 Proceso con troquel de rodillo para extruir caucho seguido de rolado.

Recubrimiento El recubrimiento o impregnación de telas con caucho es un proceso importante en la industria de éste. Estos materiales compuestos se emplean en las llantas para automóviles, bandas transportadoras, balsas inflables y telas impermeables para toldos, tiendas e impermeables. El ***recubrimiento*** de caucho sobre un sustrato de tela incluye varios procesos. Ya se vio que uno de los métodos para recubrir es el calandrado. La figura 14.3 ilustra una forma posible en la que se alimenta la tela a los rodillos del calandrado para obtener una hoja de caucho reforzado.

Las alternativas del calandrado incluyen desnatado, inmersión y rociado. En el proceso de ***desnatado***, se aplica una solución espesa de compuesto de caucho en un solvente orgánico a la tela conforme se desenrolla desde un carrete de abasto. La tela recubierta pasa por la herramienta de bisturí que desnata el solvente al espesor apropiado, y luego se lleva a una cámara de vapor en la que se quita el solvente por medio de calor. Como sugiere su nombre, la ***inmersión*** involucra inmersión temporal de la tela en una solución muy fluida de caucho, seguida por secado. De igual modo, en el ***rociado*** se utiliza una pistola para aplicar la solución de caucho.

Moldeo y fundición Los artículos moldeados incluyen suelas de zapato y tacones, juntas y sellos, copas de succión y tapas de botella. Muchas partes de caucho espumado (hule espuma) se producen con moldeo. Además, éste es un proceso importante en la producción de llantas. Los principales procesos de moldeo de caucho son: 1) por compresión, 2) por transferencia y 3) por inyección. El moldeo por compresión es la técnica más importante debido a su uso en la manufactura de llantas. La cura (vulcanización) se lleva a efecto en el molde con los tres procesos, lo que representa una diferencia de los métodos para dar forma que ya se estudiaron, y requiere de una etapa separada de vulcanización. Con el moldeo por inyección del caucho, hay riesgos de una cura prematura similar a la que se enfrenta en el mismo proceso cuando se aplica a plásticos termofijos. Las ventajas del moldeo por inyección sobre los métodos tradicionales para producir piezas de caucho incluyen un mejor control dimensional, y menor duración del ciclo. Además de su uso en el moldeo de cauchos convencionales, el moldeo por inyección también se aplica a elastómeros termoplásticos. Debido a los altos costos del molde, se requiere que el moldeo por inyección se justifique con grandes cantidades de producción.

FIGURA 14.3 Recubrimiento de tela con caucho, con el uso del proceso de calandrado.



Para producir guantes de caucho y zapatón de goma se utiliza una forma de fundición llamada ***fundición por inmersión***. Involucra la inmersión de un molde positivo en un polímero líquido (o una forma calentada en un plastisol) durante cierto tiempo (el proceso puede involucrar inmersiones repetidas) para formar el espesor deseado. Después se desmonta el recubrimiento de la forma y se cura para que haya entrecruzamiento del caucho.

14.1.5 Vulcanización

La ***vulcanización*** es el tratamiento que lleva a cabo el entrecruzamiento de las moléculas de elastómero, de modo que el caucho se vuelve más rígido y fuerte, pero mantiene su extensibilidad. La secuencia es de crucial importancia en el procesamiento del caucho. El proceso a escala submicroscópica se ilustra en la figura 14.4, en el que las moléculas de cadena larga del caucho se unen en ciertos puntos de enlace, el efecto de lo cual es reducir la capacidad que tiene el elastómero para fluir. Un caucho común suave tiene uno o dos entrecruzamientos por cada mil unidades (meros). Conforme el número de entrecruzamientos aumenta, el polímero se vuelve más rígido y se comporta más como plástico termofijo (caucho duro).

La vulcanización, inventada por Goodyear, involucra el uso de azufre (alrededor de ocho partes por peso de S mezcladas con 100 partes de caucho natural) a una temperatura de 140 ºC (280 ºF) durante unas cinco horas. En el proceso no entra ningún otro producto químico. Hoy día, la vulcanización con sólo azufre ya no se emplea más como tratamiento comercial, debido a los periodos largos de cura. Otros productos, incluso óxido de zinc (ZnO) y ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$), se combinan con dosis pequeñas de azufre a fin de acelerar y dar resistencia al tratamiento. El tiempo de cura resultante es de 15 a 20 minutos por llanta de un automóvil normal de pasajeros. Además, se han creado varios tratamientos de vulcanización sin azufre.

En los procesos de moldeo con caucho, la vulcanización se lleva a cabo en el molde; la temperatura de éste se mantiene en el nivel apropiado para la cura. En otros procesos de formado, la vulcanización se lleva a cabo después de que la pieza ha sido formada. Los tratamientos por lo general se dividen en procesos por lote y procesos continuos. Los métodos por lote incluyen el uso de un ***autoclave***, recipiente de presión calentado con vapor; y la ***cura con gas***, en el que un gas inerte como el nitrógeno cura al caucho. Muchos de los procesos básicos hacen un producto continuo, y si la salida no se corta en piezas discretas, es apropiado aplicar vulcanización continua. Los métodos continuos incluyen ***vapor a alta presión***, adecuado para curar el caucho que recubre alambre y cable; el ***túnel de aire caliente***, para extrusión celular y basamentos de carpeta [3]; y ***cura con tambor continuo***, en el que hojas continuas de caucho (por ejemplo, cinturones y materiales para pisos) pasan a través de uno o más rodillos calentados para efectuar la vulcanización.

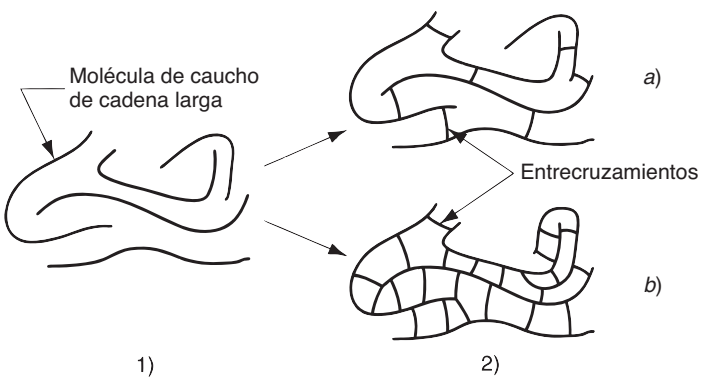


FIGURA 14.4 Efecto de la vulcanización sobre las moléculas de caucho: 1) caucho crudo; 2) caucho vulcanizado (entrecruzado). Las variantes de (2) incluyen: *a*) caucho suave, bajo grado de entrecruzamiento, y *b*) caucho duro, alto grado de entrecruzamiento.

14.2 MANUFACTURA DE LLANTAS Y OTROS PRODUCTOS DE CAUCHO

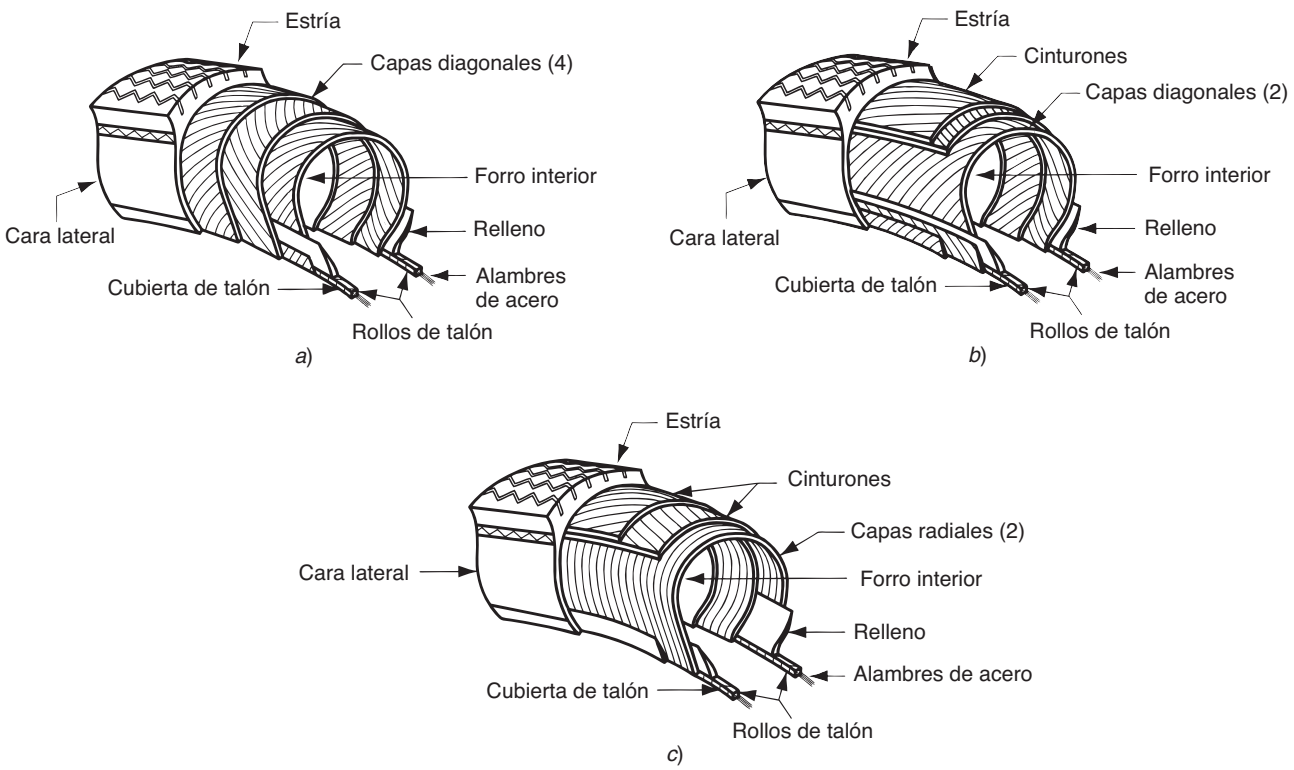
Las llantas son el producto principal de la industria del caucho, que contribuye con tres cuartas partes del tonelaje total. Otros productos importantes incluyen suelas, mangueras, bandas transportadoras, sellos, componentes para absorber choques, productos de caucho espumado y equipo deportivo.

14.2.1 Llantas

Las llantas neumáticas son componentes críticos de los vehículos en que se usan. Soportan el peso del carro y el de los pasajeros y carga a bordo; transmiten el par del motor para impulsar el vehículo y absorben las vibraciones del camino y los impactos para brindar un viaje confortable. Se utilizan llantas en automóviles, camiones, autobuses, tractores agrícolas, equipo para movimiento de tierras, vehículos militares, bicicletas, motocicletas y aviones.

Construcción de una llanta y secuencia de la producción Una llanta es el ensamble de muchas piezas, cuya manufactura es inesperadamente compleja. Una llanta de automóvil de pasajeros consiste en alrededor de 50 piezas individuales; la de un equipo grande para mover tierra puede llegar a tener 175. Para comenzar, hay tres construcciones básicas de llantas: *a*) de capas diagonales, *b*) diagonal con cinturones y *c*) de capas radiales, que se ilustran en la figura 14.5. En los tres casos, la estructura interna de la llanta, conocida como ***carcasa***, consiste en capas múltiples de cuerdas cubiertas de caucho, llamados ***capas***. Las cuerdas son tiras de varios materiales tales como naylon, poliéster, fibra de vidrio y acero, que quitan la elasticidad para reforzar al caucho en la carcasa. La ***llanta de capa diagonal*** tiene las cuerdas en forma diagonal, pero en direcciones perpendiculares en capas

FIGURA 14.5 Tres construcciones principales de llantas: *a*) de capas diagonales, *b*) diagonal con cinturones y *c*) de capas radiales.



adyacentes. Una llanta común en diagonal tiene cuatro pliegues. La ***llanta diagonal con cinturones*** está hecha de capas diagonales con sesgos opuestos, pero agrega varias capas alrededor de la periferia exterior de la carcasa. Estos ***cinturones*** incrementan la rigidez de la llanta en el área de estría y limitan su expansión diametral durante el inflado. Las cuerdas en el cinturón también corren en forma diagonal, como se indica en el esquema.

Una ***llanta radial*** tiene pliegues que corren en forma radial en vez de diagonal; también usa cinturones alrededor de la periferia para proveer apoyo. Una ***radial con cinturones de acero*** es una llanta en la que los cinturones de la circunferencia tienen cuerdas hechas de acero. La construcción radial proporciona una pared lateral más flexible que tiende a reducir el esfuerzo sobre los cinturones y estrías cuando se deforman de modo continuo o en contacto con la superficie plana del camino durante la rotación. Este efecto va acompañado de una vida más larga de las estrías, mejora la estabilidad al dar la vuelta y en el manejo, y da un agarre mejor a velocidades altas.

En cada tipo de construcción, la carcasa está cubierta de caucho sólido que alcanza un espesor máximo en el área de estrías; también está forrada por dentro con un recubrimiento de caucho. Para llantas con cámaras interiores, el forro interior es un recubrimiento delgado que se aplica a la capa más interna durante la fabricación. Para llantas sin cámaras, el forro interior debe tener permeabilidad baja, puesto que mantiene la presión del aire; por lo general se trata de un caucho laminado.

La producción de llantas se resume en tres etapas: 1) preformar los componentes, 2) construir la carcasa y agregar bandas de caucho para formar las paredes y superficies de estrías, y 3) moldear y curar los componentes en una pieza integral. Las descripciones de estas etapas que siguen son comunes; hay variantes en el proceso según la construcción, tamaño de llanta y tipo de vehículo en que se usará.

Preformar los componentes Como se muestra en la figura 14.5, la carcasa consiste en cierto número de componentes separados, la mayor parte de los cuales son caucho o caucho reforzado. Éstos, así como el caucho de la pared lateral y las estrías, se producen en procesos continuos y luego se cortan al tamaño y forma para el ensamble posterior. Los componentes, citados en la figura 14.5, y los procesos de preformado para fabricarlos son:

- ***Rollos de talón.*** Alambre de acero continuo recubierto de caucho, cortado, enrollado y con los extremos unidos.
- ***Capas.*** Tela continua (textil, naylon, fibra de vidrio, acero) cubierta de caucho en un proceso de calandrado y precortada al tamaño y forma.
- ***Forro interior.*** Para llantas con cámaras, el forro interior es con calandrado sobre la capa más interna. Para llantas sin cámara, el forro es calandrado como laminado de dos capas.
- ***Cinturones.*** Tela continua recubierta de caucho (como los pliegues, ya descritos), pero cortada en ángulos diferentes para tener mejor refuerzo; después se fabrica en cinturones multicapa.
- ***Estrías.*** Extruida como banda continua; después se corta y preensambla a los cinturones.
- ***Pared lateral.*** Se extruye como banda continua; luego se corta al tamaño y forma.

Construcción de la carcasa. La carcasa se ensambla por tradición con el uso de una máquina conocida como ***tambor de construcción***, cuyo elemento principal es un árbol cilíndrico que rota. Alrededor de éste se construyen bandas precortadas que forman la carcasa en un procedimiento paso a paso. Las capas sucesivas que forman la sección transversal de la llanta están fijados en los lados opuestos del aro por dos rollos doblados. Los ***rollos de talón*** consisten en filamentos múltiples de alambre de acero de alta resistencia. Su función es brindar un soporte rígido cuando la llanta se monta en el aro de la rueda. Con las capas y rollos de talón se combinan otros componentes. Éstos incluyen varias envolturas y piezas

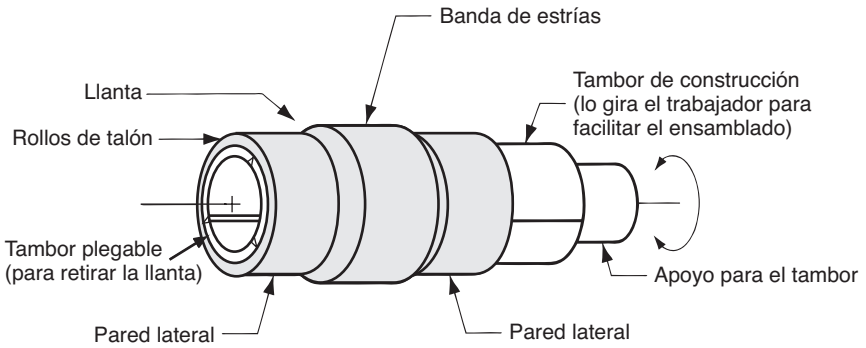


FIGURA 14.6 Llanta justo antes de retirarse del tambor de construcción, antes del moldeo y la cura.

de relleno para dar a la llanta la resistencia apropiada, resistencia al calor, retención de aire y ajuste al aro de la rueda. Después de que estas piezas han sido colocadas alrededor del árbol y se ha agregado el número apropiado de capas, se aplican los cinturones. A esto le sigue el caucho exterior, que se convertirá en la pared lateral y las estrías. En este punto del proceso, las estrías son bandas de caucho de sección transversal uniforme; el diseño de las estrías se agrega después, en el moldeo. El tambor de construcción es plegadizo, de modo que la llanta sin acabado puede retirarse una vez terminada. En esta etapa, la forma de la llanta es aproximadamente tubular, como se ilustra en la figura 14.6.

Moldeo y cura Los moldes de las llantas por lo general son elementos de dos piezas (moldes deslizantes) y contienen el patrón de estrías que ha de imprimirse en la llanta. El molde está remachado a una prensa, una mitad sujeta a la placa superior (la tapa) y la mitad inferior sujeta a la placa de abajo (la base). La llanta sin curar se coloca sobre el diafragma extensible y se inserta entre las mitades del molde, como se observa en la figura 14.7. Después, se cierra la prensa y el diagrama se expande, de modo que el caucho suave se comprime contra la cavidad del molde. Esto hace que se imprima el patrón de estrías al caucho. Al mismo tiempo, éste se calienta, tanto desde el exterior del molde y desde el interior del diafragma. Para calentar este último se emplea agua caliente o vapor en circulación. La duración de este paso de cura depende del espesor de la pared de la llanta. Una llanta de automóvil común de pasajeros se cura en alrededor de 15 minutos. Las llantas de bicicleta se curan en cuatro minutos, mientras que las llantas para equipos grandes para mover tierras requieren varias horas de cura. Una vez terminada ésta, la llanta se enfría y se quita de la prensa.

14.2.2 Otros productos de caucho

La mayoría de productos de caucho están hechos con procesos menos complejos. Las ***bandas de caucho*** se emplean mucho en transportadores y sistemas mecánicos de transmisión de potencia. Igual que con las llantas, el caucho es un material ideal para estos productos, pero la banda debe tener poca o ninguna elasticidad a fin de que funcione. En concordancia, se refuerza con fibras, por lo común poliéster o naylon. Las telas de estos polímeros por lo

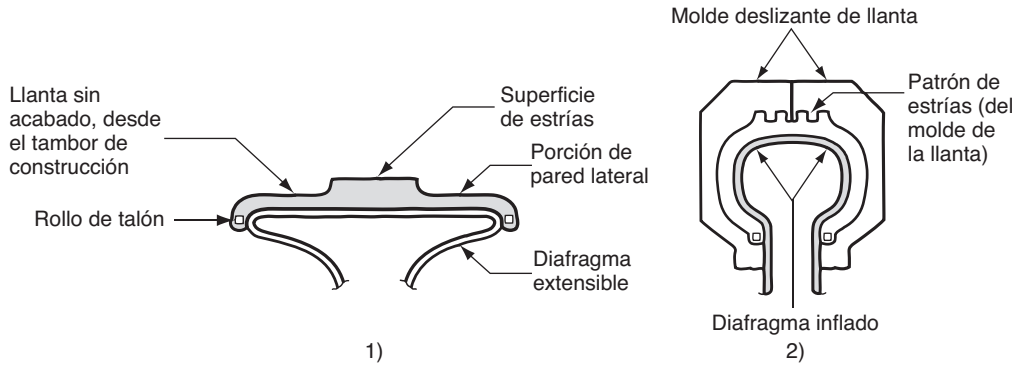


FIGURA 14.7 Moldeo de llantas (se muestra la sección transversal de una llanta): 1) se coloca la llanta sin curar sobre un diafragma extensible; 2) el molde se cierra y el diafragma se expande para forzar el caucho sin curar contra la cavidad del molde, lo que imprime el patrón de estrías al caucho; se calientan el molde y el diafragma para curar el caucho.

general se recubren en operaciones de calandrado, se ensamblan juntas para obtener el número de pliegues y espesor requeridos, y después se vulcaniza por medio de procesos continuos o de calentamiento por lotes.

Una ***manguera de caucho*** puede ser sencilla o reforzada. La manguera sencilla es un tubo extruido. El tubo de refuerzo consiste en un tubo interior, una capa de refuerzo (a veces denominada *carcasa*) y una cubierta. El tubo interno se extruye de un caucho compuesto para la sustancia particular que fluirá por él. La capa de refuerzo se aplica al tubo en forma de tela, espiral, tejida, trensada u otro método de aplicación. La capa exterior está compuesta para resistir las condiciones ambientales. Se aplica por extrusión, con el uso de rodillos o de otras técnicas.

Los componentes de ***calzado*** incluyen suelas, tacones, zapatones de goma y ciertas piezas superiores. Para fabricar componentes de calzado se usa una variedad de cauchos (sección 8.4). Las piezas moldeadas se producen por inyección, compresión y ciertas técnicas especiales de moldeo creadas por la industria del calzado; los cauchos incluyen variedades tanto sólida como espumada. En ciertos casos, para un volumen bajo de producción, se utilizan métodos manuales para cortar el caucho de un suministro sencillo.

El caucho se usa mucho en equipo y artículos deportivos, que incluyen superficies de paletas para ping pong, mangos de palos de golf, sacos de golpeo para futbol americano y pelotas deportivas de varias clases. Por ejemplo, las pelotas de tenis se fabrican en número significativo. La producción de estos artículos deportivos se hace con los procesos de formado distintos que se estudiaron en la sección 14.1.4, así como con técnicas especiales implantadas para objetos particulares.

14.2.3 Procesamiento de elastómeros termoplásticos

Un ***elastómero termoplástico*** (TPE, por sus siglas en inglés) es un polímero termoplástico que tiene las propiedades de un caucho (sección 8.4.3); también se emplea el término ***caucho termoplástico***. El TPE se procesa como los termoplásticos, pero sus aplicaciones son las de los elastómeros. Los procesos de conformación más comunes son el moldeo por inyección y la extrusión que, por lo general, son más económicos y rápidos que los procesos tradicionales que se emplean para los cauchos, que deben vulcanizarse. Los productos moldeados incluyen suelas, calzado deportivo y componentes automotrices, tales como extensiones de salpicaderas y paneles para las esquinas (pero no llantas; se ha descubierto que los TPE no son satisfactorios para esa aplicación). Los artículos extruidos incluyen recubrimiento para aislar alambres eléctricos, tubería para aplicaciones médicas, bandas transportadoras, y hojas y películas. Otras técnicas de formado de TPE incluyen el moldeo por soplado y termoformado (secciones 13.8 y 13.9); estos procesos no pueden utilizarse para cauchos vulcanizados.

14.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Muchos de los lineamientos que se usan para los plásticos se aplican a los productos de caucho. Hay diferencias, por las propiedades elastoméricas del caucho. Las siguientes se compilaron, sobre todo de Bralla [4]; se aplican al caucho suave convencional, no al duro.

- ***Cantidades económicas de producción.*** Las piezas producidas con moldeo por compresión (el proceso tradicional) con frecuencia se producen en cantidades de 1000 o menos. El costo del molde es relativamente bajo en comparación con otros métodos de moldeado. El moldeo por inyección, igual que con las piezas de plástico, requiere cantidades de producción más elevadas a fin de que se justifique el molde más caro.
- ***Ahusado.*** Por lo general, no es necesario hacer un ahusado en las piezas de caucho moldeadas. La flexibilidad del material permite que se deforme para quitarlo del molde.

Los cortes poco profundos, si bien indeseables, son posibles con piezas de caucho moldeadas por la misma razón. La rigidez baja y elasticidad grande del material permite su retiro del molde.

- ***Agujeros.*** Son difíciles de practicar en el caucho una vez formado, debido a la flexibilidad del material. Por lo general es deseable moldearlos en el caucho durante el proceso de formado primario.
- ***Cuerdas de tornillo.*** Generalmente no se incorporan en piezas de caucho moldeadas; la deformación elástica del caucho hace difícil ensamblar piezas por medio de cuerdas, y una vez insertado es un problema retirar un tornillo.

REFERENCIAS

[1] Alliger, G. y Sjothun, I. J. (eds.). ***Vulcanization of Elastomers.*** Krieger Publishing Company, Nueva York, 1978.

[2] Billmeyer, Fred, W., Jr. ***Textbook of Polymer Science.*** 3a. ed., John Wiley & Sons, Nueva York, 1984.

[3] Blow, C. M. y Hepburn, C. ***Rubber Technology and Manufacture.*** 2a. ed., Butterworth-Heinemann, Londres, 1982.

[4] Bralla, J. G. (ed.). ***Design for Manufacturability Handbook.*** 2a. ed., McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[5] Hofmann, W. ***Rubber Technology Handbook.*** Hanser-Gardner Publications, Cincinnati, Ohio, 1989.

[6] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing.*** Chapman and Hall, Londres, U. K. 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

14.1. ¿Cómo está organizada la industria del caucho?

14.2. ¿Cómo se obtiene el caucho crudo a partir del látex que produce el árbol del caucho?

14.3. ¿Cuál es la secuencia de pasos de procesamiento que se requiere para producir bienes terminados de caucho?

14.4. ¿Cuáles son algunos de los aditivos que se combinan con el caucho durante la composición?

14.5. Mencione las cuatro categorías básicas de procesos que se utilizan para dar forma al caucho.

14.6. ¿Qué le hace la vulcanización al caucho?

14.7. Mencione las tres construcciones básicas de llantas y señale brevemente las diferencias entre ellas.

14.8. ¿Cuáles son las tres etapas básicas de la manufactura de un neumático?

14.9. ¿Cuál es el propósito de los rollos de talón de un neumático?

14.10. ¿Qué es un TPE?

14.11. Muchos de los lineamientos de diseño aplicables a los plásticos también lo son para el caucho. Sin embargo, la flexibilidad extrema de éste genera ciertas diferencias. ¿Cuáles son algunos ejemplos de éstas?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 10 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

14.1. ¿Cuál de los siguientes es el producto de caucho más importante?: *a*) calzado, *b*) bandas transportadoras, *c*) neumáticos o *d*) pelotas de tenis.

14.2. ¿Cuál de los siguientes es el nombre químico de los ingredientes obtenidos del látex del árbol del caucho?: *a*) polibutadino, *b*) poliisobutileno, *c*) poliisopreno o *d*) poliestireno.

14.3. De los siguientes aditivos del caucho, ¿cuál calificaría como el más importante?: *a*) antioxidantes, *b*) negro de humo, *c*) arcillas y otros silicatos hidratados de aluminio, *d*) plastificadores y aceites suavizantes o *e*) caucho reciclado.

14.4. ¿Cuál de los siguientes procesos de moldeado es el más importante en la producción de artículos de caucho convencional?: *a*) moldeo por compresión, *b*) moldeo

por inyección, *c*) termoformado o *d*) moldeo por transferencia.

14.5. ¿Cuál de los ingredientes que siguen no contribuyen en el proceso de vulcanización? (dos respuestas correctas): *a*) carbonato de calcio, *b*) negro de humo, *c*) ácido esteárico, *d*) azufre y *e*) óxido de zinc.

14.6. ¿Cuántos minutos se requieren para curar (vulcanizar) una llanta moderna de automóvil de pasajeros?: *a*) 5, *b*) 15, *c*) 25, *d*) 45.

14.7. ¿Cuándo se imprime el patrón de estrías en la circunferencia de la llanta?: *a*) durante el preformado, *b*) mientras se construye la carcasa, *c*) durante el moldeo o *d*) durante la cura.

14.8. ¿Cuál de los siguientes normalmente no se utiliza en el procesamiento de los elastómeros termoplásticos? (dos respuestas correctas): *a*) moldeo por soplado, *b*) moldeo por compresión, *c*) extrusión, *d*) moldeo por inyección o *e*) vulcanización.

15 PROCESOS DE FORMADO PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

15.1 Materias primas para materiales compuestos con matriz polimérica (PMC)
- 15.1.1 Matriz polimérica
- 15.1.2 Agentes reforzadores
- 15.1.3 Combinación de la matriz y el refuerzo

15.2 Procesos con molde abierto
- 15.2.1 Aplicado manual
- 15.2.2 Aplicado por aspersión
- 15.2.3 Máquinas de aplicación automatizada con cinta
- 15.2.4 Curado

15.3 Procesos con molde cerrado
- 15.3.1 Procesos de moldeo por compresión para PMC
- 15.3.2 Procesos de moldeo por transferencia para PMC
- 15.3.3 Procesos de moldeo por inyección para PMC

15.4 Bobinado de filamentos

15.5 Procesos de pultrusión
- 15.5.1 Pultrusión
- 15.5.2 Pulformado

15.6 Otros procesos de formado para PMC

En este capítulo se tratan los procesos de manufactura para formar productos y componentes útiles a partir de compuestos con matriz polimérica. Un ***compuesto con matriz polimérica*** (PMC, por sus siglas en inglés para polymer matrix composite) es un material compuesto que consiste en un polímero incorporado a una fase de refuerzo como fibras o polvos. La importancia tecnológica y comercial de los procesos descritos en este capítulo deriva del uso creciente de esta clase de materiales, especialmente los ***polímeros reforzados con fibra*** (FRP, por sus siglas en inglés para fiber-reinforced polymers). Popularmente, los PMC se asocian en general a los polímeros reforzados con fibra. Los compuestos de FRP pueden diseñarse con relaciones muy altas de resistencia y rigidez a peso. Estas características los hacen atractivos para aviones, automóviles, camiones, barcos y equipo deportivo.

Algunos de los procesos de conformación descritos en este capítulo son lentos e intensivos en mano de obra. En general, las técnicas para formar compuestos son menos eficientes que los procesos de manufactura para otros materiales. Hay dos razones para esto: 1) los materiales compuestos son más complejos que otros materiales porque constan de dos o más fases, y en el caso de los plásticos reforzados con fibra, hay necesidad de orientar la fase de refuerzo; y 2) las tecnologías de procesamiento para los compuestos no han sido mejoradas y refinadas desde hace algunos años como los procesamientos para otros materiales.

La variedad de métodos de formado para polímeros reforzados con fibra es muchas veces abrumadora para estudiantes en su primera lectura. Un itinerario para el lector que entra a este nuevo territorio es el siguiente: los procesos de formación de compuestos de FRP pueden dividirse en cinco categorías, como se muestra en la figura 15.1: 1) procesos en molde abierto, 2) procesos en molde cerrado, 3) bobinado de filamentos, 4) procesos de pultrusión y 5) otros. ***Los procesos en molde abierto*** incluyen algunos de los procedimientos originales en los que se depositan manualmente resinas y fibras sobre una forma. ***Los procesos en molde cerrado*** son los mismos del moldeo de plásticos, el lector puede reconocer los nombres: moldeo por compresión, moldeo por transferencia, moldeo por inyección, aunque los nombres pueden cambiar algunas veces y se pueden hacer modificaciones para los PMC. En el ***bobinado de filamentos*** se enrollan filamentos continuos que han sido sumergidos en resina líquida alrededor de un mandril giratorio; cuando la resina es el agente de curado, se genera una forma cilíndrica rígida y hueca. La

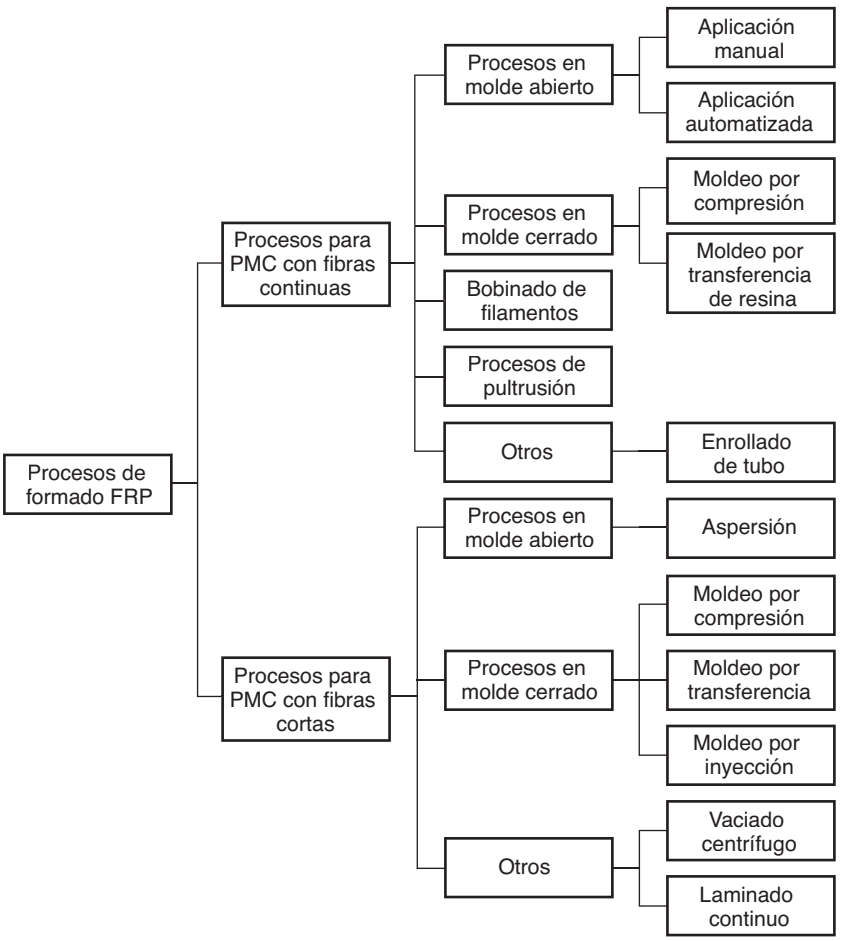


FIGURA 15.1 Clasificación de los procesos de manufactura para compuestos de polímeros reforzados con fibras.

pultrusión es un proceso de formado para producir secciones largas y rectilíneas de sección transversal constante; es similar a la extrusión, solamente que adaptada para incluir refuerzos de fibra continua. La categoría de "otros" incluye varias operaciones que no encajan en las categorías previas.

Algunos de estos procesos se usan para formar compuestos con fibras continuas, mientras que otros se usan para PMC de fibras cortas. La figura 15.1 ofrece un resumen de los procesos en cada división. El estudio inicia explorando cómo se producen las fases individuales en un PMC y cómo se combinan estas fases con las materias primas para formado. Para obtener una visión completa de los procesos PMC, se recomienda que el lector revise el video titulado Materiales compuestos y manufactura.

15.1 MATERIAS PRIMAS PARA MATERIALES COMPUESTOS CON MATRIZ POLIMÉRICA (PMC)

En un PMC, las materias primas son un polímero y una fase de refuerzo. Se procesan separadamente antes de convertirse en fases del compuesto. En esta sección consideraremos cómo se producen estos materiales, antes de combinarse para formar la parte compuesta.

15.1.1 Matriz polimérica

En los PMC se usan como matrices los tres tipos de polímeros básicos: termoplásticos, termofijos (o termoestables) y elastómeros. Los polímeros termofijos (en inglés, TS) son los materiales de las matrices más comunes. Los principales polímeros TS son los fenólicos, los poliésteres insaturados y los epóxicos. Los fenólicos se asocian con el uso de las fases de refuerzo particulado, en tanto que los poliésteres y los epóxicos se asocian más estrechamente con los FRP. Los polímeros termoplásticos (TP) se usan también en los PMC, y de hecho los compuestos de moldeo son materiales compuestos que incluyen rellenos o agentes de refuerzo. La mayoría de los elastómeros son materiales compuestos debido a que casi todos los cauchos se refuerzan con negro de humo. Los procesos de formación para caucho se cubren en el capítulo 14. Este capítulo se limita al procesamiento de PMC cuya matriz es un polímero termofijo o termoplástico. Muchos de los procesos de formado de polímeros revisados en el capítulo 13 se aplican a los compuestos en matriz polimérica. Sin embargo, la combinación del polímero con los agentes de refuerzo complica algunas veces las operaciones.

15.1.2 Agentes reforzadores

La fase de refuerzo puede tener varias formas (fibras, partículas, hojuelas) y diversos materiales (cerámicos, metales, otros polímeros, o elementos como carbono o boro). El papel de la fase de refuerzo y algunas de sus características técnicas se analizaron en la sección 9.1.2.

Fibras Los materiales más comunes de fibra utilizados en los FRP son el vidrio, el carbono y el polímero Kevlar. Las fibras de estos materiales se fabrican mediante varias técnicas, algunas de las cuales se estudian en otros capítulos. Las fibras de vidrio se fabrican por el

estiramiento a través de pequeños orificios (sección 12.2.3). En el caso del carbono, se lleva a cabo una serie de tratamientos térmicos para transformar el filamento precursor, que contiene un compuesto de carbono, en una forma más pura de ese elemento. El precursor puede estar fabricado de varias sustancias dentro de las que se incluyen el poliacrilonitrilo (PAN), pez (una resina negra de carbón formada en la destilación del alquitrán de carbón, alquitrán de madera, petróleo crudo, etc.) o rayón (celulosa). Las fibras de Kevlar se fabrican por medio de extrusión combinada con estirado a través de pequeños orificios en una hilera (sección 13.4).

En los filamentos continuos, las fibras se combinan con la matriz polimérica en varias formas, dependiendo de las propiedades que se desean en el material y de los métodos de procesamiento utilizados para formar el compuesto. En algunos procesos los filamentos son continuos, mientras que en otros se trozan en fibras cortas. En la forma continua, se dispone de filamentos individuales en forma de mechas. Una ***mecha*** es una colección no torcida de fibras continuas (paralelas); es una forma conveniente para manejar y procesar. Las mechas típicas contienen de 12 a 120 fibras individuales. Por el contrario, un ***hilo*** es una colección torcida de filamentos. Las mechas continuas se usan en varios procesos de PMC, incluidos el bobinado de filamentos y la pultrusión.

La forma más familiar de fibra continua es una ***tela*** o trama tejida de hilos. El ***tejido de mechas***, muy similar a una tela, pero distinguido en este contexto, consiste en filamentos no torcidos en lugar de hilos. Los tejidos de mechas se pueden producir con números desiguales de fibras en dos direcciones, de manera que su resistencia sea más grande en una dirección que en la otra. Dicho tejido unidireccional de mechas se prefiere muchas veces para los compuestos laminados de FRP.

Las fibras pueden prepararse también en forma de ***esteras***, un fieltro que consiste en fibras cortas orientadas aleatoriamente y aglomeradas holgadamente con un aglutinante, algunas veces en una tela portadora. Se dispone comercialmente de las esteras como mantas de varios pesos, espesores y anchos. Las esteras se pueden cortar y conformar para usarse como ***preformas*** en algunos procesos en molde cerrado. Durante el moldeado, las resinas impregnan la preforma y luego se las curan, produciendo así una parte moldeada con refuerzo de fibra.

Partículas y hojuelas Las partículas y las hojuelas caen realmente en una sola clase. Las hojuelas son partículas cuyo ancho y largo son mayores que su espesor. Se analizarán éstos y otros aspectos sobre la caracterización de los polvos de ingeniería en la sección 16.1. Los métodos de producción de polvos metálicos se estudiarán en la sección 16.2 y las técnicas para producir polvos cerámicos, en la sección 17.1.1.

15.1.3 Combinación de la matriz y el refuerzo

La incorporación del agente de refuerzo a la matriz polimérica ocurre durante el proceso de conformado o antes. En el primer caso, los materiales iniciales (materia prima) llegan a la operación de fabricación en entidades separadas y se combinan dentro del compuesto durante el formado. Ejemplos de este caso son el bobinado de filamentos y la pultrusión. El refuerzo inicial en este proceso consiste en fibras continuas. En el segundo caso, los dos materiales componentes se combinan en una forma preliminar que se usa convenientemente en el proceso de formado. Casi todos los termoplásticos y termofijos (termoestables) que se usan en los procesos de conformado de plástico son, de hecho, polímeros combinados con rellenos (sección 8.1.5). Los rellenos o rellenadores son fibras cortas o particulados (incluidas hojuelas).

Las formas iniciales que se usan en los procesos de formado, diseñados específicamente para compuestos de FRP, son los de mayor interés en este capítulo. Estas formas iniciales son compuestos prefabricados que llegan listos para usarse en los procesos de formado, son compuestos de moldeo y productos preimpregnados.

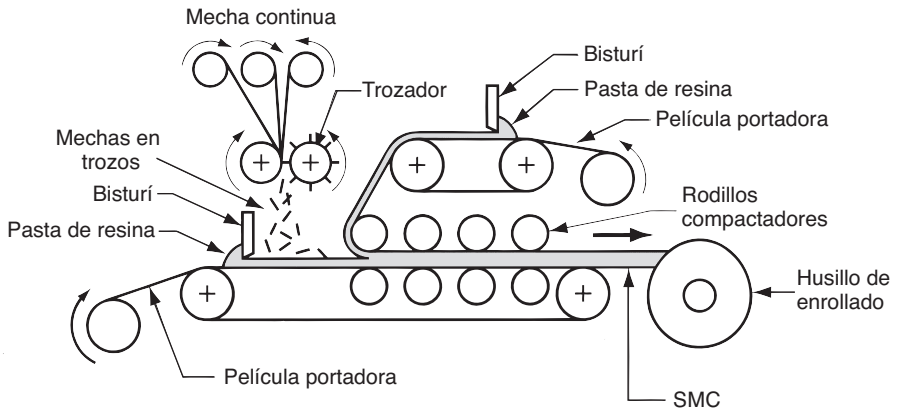


FIGURA 15.2 Proceso para producir el compuesto para el moldeo de lámina.

Compuestos de moldeo Los compuestos para moldeo son similares a los que se usan en el moldeo de plásticos. Se diseñan para usarse en operaciones de moldeo, de tal manera que puedan fluir, al menos hasta cierto grado. La mayoría de los compuestos de moldeo para el procesado de los compuestos son polímeros termofijos. Por consiguiente, no han sido curados; el curado se hace durante o después del formado final. Los compuestos de moldeo para compuestos de FRP consisten en matrices de resina con fibras cortas dispersadas al azar, y vienen en varias formas.

Los compuestos para el moldeo de láminas (SMC, por sus siglas en inglés) son una combinación de resina de polímero termofijo, rellenos, fibras de vidrio cortadas y otros aditivos (orientadas al azar), que se laminan a un espesor típico de 6.5 mm (0.250 in). La resina más común es el poliéster insaturado. Los rellenos son generalmente polvos minerales como talco, sílice y piedra caliza; y las fibras de vidrio tienen una longitud típica de 12 a 75 mm (0.5 a 3 in); esto representa cerca de 30% del SMC en volumen. Es muy conveniente manejar y cortar al tamaño adecuado los SMC como cargas de moldeo. Los compuestos de moldeo para láminas se producen y surten generalmente entre cargas delgadas de polietileno para limitar la evaporación de los ingredientes volátiles de la resina termofija. El recubrimiento protector mejora también el acabado de la superficie y por consiguiente de las piezas moldeadas. En la figura 15.2 se describe el proceso para la fabricación de los SMC continuos.

Los compuestos para moldeo volumétrico (BMC, por sus siglas en inglés) consisten en ingredientes similares a los de los SMC, pero el polímero compuesto se hace en forma de barra en lugar de lámina. Las fibras en los BMC son más cortas, típicamente de 2 a 12 mm (0.1 a 0.15 in), debido a la mayor fluidez requerida en las operaciones de moldeo para las cuales se diseñan estos materiales. El diámetro de las barras es generalmente de 25 a 50 mm (1 a 2 in). Los procesos para producir BMC son similares a los de SMC, excepto que se usa la extrusión para obtener la forma final de la barra. Los BMC se conocen también como ***compuestos para moldeo en pasta*** (DCM, por sus siglas en inglés) debido a su consistencia pastosa. Otros compuestos para moldeo de FRP son el ***compuesto para moldeo grueso*** (TMC, por sus siglas en inglés), que es similar al SMC pero más grueso, alcanza hasta 50 mm (2 in); y los ***compuestos para moldeo paletizado,*** que son básicamente compuestos para el moldeo convencional de plásticos que contienen fibras cortas.

Productos preimpregnados Otra forma prefabricada para operaciones de formado de FRP son los ***productos preimpregnados***, que consisten en fibras impregnadas con resinas termofijas parcialmente curadas para facilitar el proceso de formado. El curado completo debe realizarse durante o después del formado (o ambas). Los productos preimpregnados se disponen en forma de cintas, láminas o telas aplicadas transversalmente. La ventaja de los productos preimpregnados es que se fabrican con filamentos continuos más que con fibras recortadas aleatoriamente, incrementando así la resistencia y el módulo del producto final. Las cintas y láminas con productos preimpregnados se asocian con compuestos avanzados (reforzados con boro, carbono-grafito y Kevlar), así como con fibras de vidrio.

15.2 PROCESOS CON MOLDE ABIERTO

La característica distintiva de esta familia de procesos de formado de FRP es el uso de una sola superficie de molde positivo o negativo (véase la figura 15.3) para producir estructuras laminadas de FRP. El proceso en molde abierto también se conoce con otros nombres, como ***laminación por contacto*** y ***moldeo por contacto***. Los materiales iniciales (resinas, fibras, esteras y mechas tejidas) se aplican al molde en capas para constituir el espesor deseado. Después continúa el curado y el retiro de la pieza. Las resinas comunes para estos procesos son poliésteres insaturados y epóxicos, usando fibra de vidrio como refuerzo. Las piezas moldeadas generalmente son grandes (por ejemplo, cascos para lanchas). La ventaja de usar moldes abiertos es que el costo del molde es mucho menor que si se usaran moldes acoplados. La desventaja es que solamente la superficie de la pieza en contacto con el molde es una superficie acabada; el otro lado queda áspero. El molde en sí debe ser muy liso para un mejor acabado de la superficie de la pieza.

Hay varios procesos importantes de molde abierto para FRP. Las diferencias están en los métodos para aplicar las capas al molde, las técnicas de curado alternativo y otras modificaciones. En esta sección describimos la familia de procesos de molde abierto para dar forma a los plásticos reforzados con fibra: 1) aplicado manual, 2) aspersión, 3) máquinas de aplicación automatizada con cinta y 4) moldeo con bolsa. El aplicado manual es el proceso básico y los otros son modificaciones y refinamientos.

15.2.1 Aplicado manual

El aplicado manual es el método en molde abierto más antiguo para laminados de FRP; se remonta a la década de 1940, cuando se usó por primera vez para fabricar cascos de lanchas. Es también el método que tiene mayor intensidad de mano de obra. Como su nombre indica, el ***aplicado manual*** es un método en el cual se aplican manualmente capas sucesivas de resina y refuerzo en un molde abierto para construir la estructura compuesta del FRP laminado. El procedimiento básico consiste en cinco pasos, como se ilustra en la figura 15.4. La pieza terminada se debe recortar generalmente con una sierra mecánica para dimensionar los bordes exteriores. En general se requieren estos mismos cinco pasos en todos los procesos de molde abierto; las diferencias entre los diversos métodos ocurren en los pasos 3 y 4, como se verá a continuación.

Cada capa de refuerzo de fibra está seca en el paso 3, cuando se coloca sobre el molde. Se vacía entonces la resina líquida (no curada), o se aplica con brocha o por aspersión. El impregnado de la estera o tela de fibra se hace con rodillos de mano. A esta operación se le conoce como ***aplicación húmeda***. Un procedimiento alternativo se realiza mediante el uso de ***productos preimpregnados*** donde primero se preparan las capas impregnadas de refuerzo de fibra y luego se colocan en la superficie del molde. Las ventajas que se atribuyen a los productos preimpregnados son un control más estrecho sobre la mezcla de fibra y resina, y métodos más eficientes para agregar las capas [10].

Los moldes para laminar por contacto en molde abierto se pueden hacer de yeso, metal, plásticos reforzados con fibra de vidrio u otros materiales. La selección del material depende de la economía, la calidad de la superficie y otros factores técnicos. Para la fabricación de prototipos donde se produce solamente una pieza se usa moldes de yeso. Para cantidades medias, los moldes se pueden hacer de plástico reforzado con fibra de vidrio. La alta

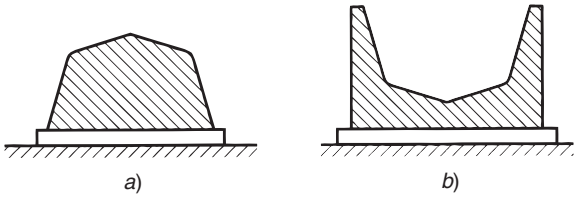


FIGURA 15.3 Tipos de molde abierto: *a*) positivo y *b*) negativo.

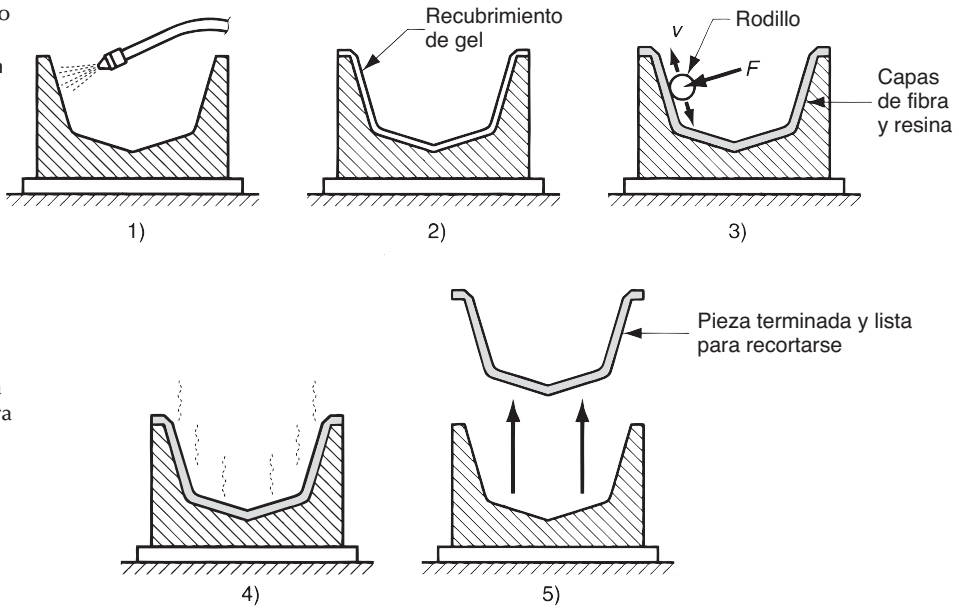


FIGURA 15.4 Procedimiento de aplicación manual: 1) se limpia el molde y se trata con un agente antiadherente; 2) se aplica un recubrimiento delgado de gel (resina, posiblemente pigmentada con color) que se convertirá en la superficie externa de la pieza; 3) después que el recubrimiento de gel ha cuajado parcialmente, se aplican capas sucesivas de fibra y resina en la fibra en forma de estera o tela; a cada capa se le pasa un rodillo para impregnar completamente la fibra con la resina y remover las burbujas de aire; 4) se cura la pieza y 5) se retira del molde la pieza completamente endurecida.

producción requiere generalmente moldes metálicos. Se usa algunas veces el aluminio, el acero y el níquel con las superficies de la cara del molde endurecidas, para resistir el desgaste. Una ventaja del metal, además de su durabilidad, es su alta conductividad térmica que permite instrumentar sistemas de curado por calor, o simplemente disipar el calor de la laminación mientras ésta se cura a temperatura ambiente.

La aplicación manual se presta generalmente para productos de gran tamaño fabricados en baja cantidad. Aparte de los cascos de lanchas, este procedimiento se usa para producir albercas, tanques grandes de almacenamiento, escenarios de utilería, cúpulas de antena de radar y otras formas laminadas. También se hacen piezas automotrices, pero el método no es económico para la alta producción. Las piezas moldeadas más grandes que se han hecho con este proceso fueron unos cascos de 85 m (280 ft) de largo para la British Royal Navy[1].

15.2.2 Aplicado por aspersión

La aspersión es un intento de mecanizar la aplicación de capas de resina y fibra, así como para reducir el tiempo de la operación. Es una alternativa para el paso 3 en el procedimiento manual. En el ***método por aspersión*** la resina líquida y las fibras cortadas se rocían sobre un molde abierto para construir capas sucesivas de FRP, como se muestra en la figura 15.5.

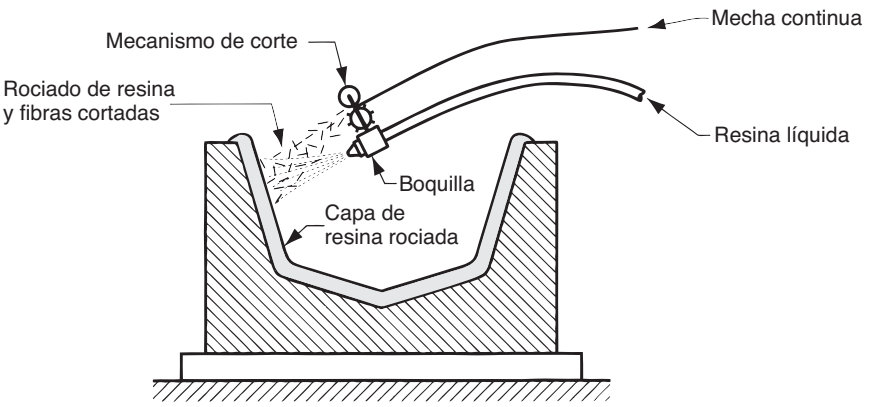


FIGURA 15.5 Método de aplicación por aspersión.

La pistola aspersora está equipada con un mecanismo de corte alimentado con una mecha de filamentos que corta en fibras cuyas longitudes van de 25 a 75 mm (1 a 3 in), los cuales se incorporan a la corriente de resina a la salida de la boquilla. La acción mezcladora genera una orientación aleatoria de las fibras en la capa, a diferencia de la aplicación manual en la cual los filamentos pueden orientarse como se quiera. Otra diferencia es que el contenido de fibra en la aspersión se limita a cerca de 35% (comparado con un máximo de cerca de 65% en el aplicado manual). Ésta es una deficiencia de los procesos de aspersión y mezclado.

La aspersión se puede realizar manualmente usando una pistola portátil o mediante una máquina automatizada, en la cual se programa y controla la ruta de la pistola aspersora por una computadora. El procedimiento automatizado es ventajoso para la eficiencia del trabajo y la protección ambiental. Las máquinas de ruta controlada pueden operar en áreas selladas sin la presencia de seres humanos, ya que algunas de las emisiones volátiles de las resinas líquidas son peligrosas. Sin embargo, generalmente se requiere el impregnado con rodillos para cada capa, como en el procedimiento manual.

Los productos hechos con el método de aspersión incluyen cascos para lanchas, tinas de baño, casetas para ducha, piezas para carrocerías de automóviles y camiones, componentes de vehículos recreativos, muebles, paneles estructurales grandes y contenedores. Las pantallas para cine y escenarios de utilería se hacen algunas veces con este método. Debido a que tienen fibras cortas orientadas aleatoriamente, los productos hechos por aspersión no son tan fuertes como los hechos por aplicación manual de capas cuyas fibras son continuas y dirigidas.

15.2.3 Máquinas de aplicación automatizada con cinta

Éste es otro intento de automatizar y acelerar el paso 3 en el procedimiento manual. Las máquinas de aplicación automatizada con cinta operan con un aplicador de cinta de productos preimpregnados sobre un molde abierto siguiendo una ruta programada. La máquina típica consiste en un pórtico transversal móvil al cual se le ha acoplado una cabeza surtidora como se muestra en la figura 15.6. El pórtico permite que la cabeza recorra la superficie del molde en las direcciones x-y-z para tomar posiciones y seguir una trayectoria continua definida. La cabeza tiene varios ejes de rotación, más un dispositivo de corte para cortar la cinta al final de cada ruta. El ancho de la cinta de productos preimpregnados es comúnmente de 75 mm (3 in), aunque se han reportado anchos de 300 mm (12 in), [9]; el espesor es cercano a 0.13 mm (0.005 in). Los rollos colocados en la cabeza surten la cinta que se va adhiriendo a la superficie a lo largo de la ruta definida. Cada capa se forma por una serie de recorridos hacia adelante y hacia atrás, a través de la superficie del molde hasta completar la capa de filas paralelas.



FIGURA 15.6 Máquina de aplicación automatizada de cinta. (Cortesía de Cincinnati Milacron).

Gran parte del trabajo para perfeccionar las máquinas de aplicación automatizada de cinta la ha realizado la industria de la aviación, en su afán de ahorrar costos de mano de obra y lograr al mismo tiempo la más alta uniformidad y calidad posibles en la manufactura de sus componentes. La desventaja de ésta y de otras máquinas controladas numéricamente por computadora es que necesitan ser programadas, y la programación toma tiempo.

15.2.4 Curado

Se requiere el curado (paso 4) para todas las resinas termofijas que se usan en los compuestos laminados de FRP. En el curado tiene lugar el encadenamiento transversal del polímero, que pasa de una condición líquida o altamente plástica a un producto endurecido. Hay tres parámetros principales en el proceso de curado: tiempo, temperatura y presión.

En los procedimientos de aplicación manual y aspersión donde se usan resinas TS, el curado ocurre normalmente a temperatura ambiente. Las piezas moldeadas hechas por estos procesos generalmente son grandes (por ejemplo, cascos de barcos) y el calentamiento suele dificultarse. En algunos casos se requieren días antes de que se complete el curado a temperatura ambiente para retirar la pieza. Cuando es posible, se puede suministrar calor para acelerar la reacción de curado.

El calentamiento se realiza de varias maneras. El curado por horno suministra calor a temperaturas estrechamente controladas; algunos hornos cuentan con equipos para practicar el vacío parcial. El calentamiento con rayos infrarrojos se puede aplicar donde es impráctico o inconveniente poner la pieza moldeada en un horno.

El curado en un autoclave provee control sobre la temperatura y la presión. Un ***autoclave*** es una cámara cerrada que está diseñada para aplicar calor y presión a niveles controlados. En el procesamiento de compuestos de FRP, usualmente es un cilindro grande horizontal con puertas en ambos extremos. Algunas veces se usa el término ***moldeo en autoclave*** para referirse al curado de un laminado con productos preimpregnados en autoclave. Este procedimiento se usa extensamente en la industria aeroespacial para producir componentes avanzados de muy alta calidad.

15.3 PROCESOS CON MOLDE CERRADO

Estas operaciones de moldeo se realizan en moldes que consisten en dos secciones que se abren y cierran durante cada ciclo de moldeo. El nombre ***moldeo en troqueles acoplados*** se usa para algunos de estos procesos. Se podría pensar que el costo de un molde cerrado es el doble de un molde abierto; sin embargo, el costo de las herramientas es aún más grande debido al equipo más complejo que se requiere en este proceso. A pesar de su alto costo, las ventajas del molde cerrado son: 1) buen acabado en todas las superficies de la pieza, 2) velocidades más altas de producción, 3) mayor control sobre las tolerancias y 4) posibilidad de formas tridimensionales más complejas.

Los procesos de molde cerrado se dividen en tres clases con base en sus equivalentes en el moldeo de plásticos convencional, a pesar de que la terminología puede diferir cuando se moldean compuestos en matriz polimérica: 1) moldeo por compresión, 2) moldeo por transferencia y 3) moldeo por inyección.

15.3.1 Procesos de moldeo por compresión para PMC

En el moldeo por compresión de los compuestos de moldeo convencionales (sección 13.7.1) se coloca una carga en la sección inferior del molde y las dos secciones se cierran bajo presión, para que la carga tome la forma de la cavidad. Las dos mitades del molde se calientan para efectuar el curado del polímero termofijo. Cuando la pieza moldeada se ha

curado lo suficiente, se abre el molde y se retira la pieza. Hay varios procesos de formado para PMC basados en el moldeo por compresión; la forma de los materiales iniciales es la diferencia principal. Los factores críticos durante el moldeo por compresión para compuestos de FRP son el flujo de la resina, las fibras y los otros ingredientes.

Moldeo de SMC, TMC y BMC Varios de los compuestos para moldeo de FRP, como son los compuestos para moldeo de láminas (SMC), los compuestos para moldeo volumétrico (BMC) y los compuestos para moldeo grueso (TMC), pueden cortarse al tamaño apropiado y usarse como carga inicial en moldeo por compresión. Frecuentemente se requiere refrigeración para almacenar estos materiales antes de su procesamiento. Los nombres de los procesos de moldeo se basan en el compuesto de moldeo inicial (es decir, el ***moldeo de SMC*** se refiere a una operación de moldeo donde la carga inicial es un compuesto de moldeo en lámina precortada, el ***moldeo BMC*** usa como carga un BMC cortado al tamaño y así sucesivamente).

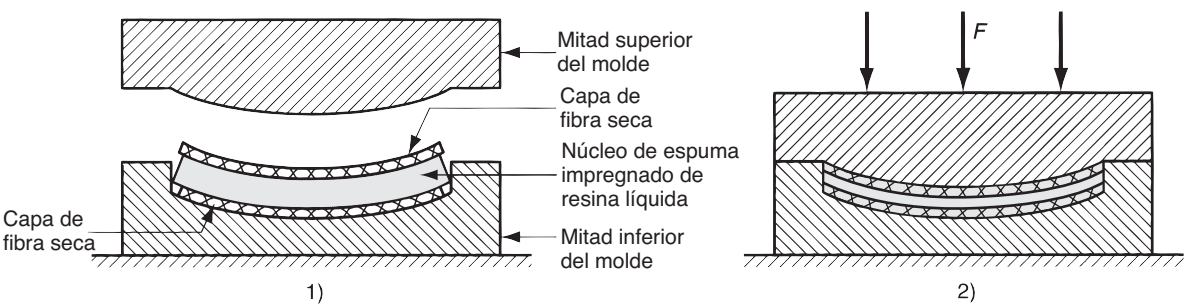
Moldeo preformado Otra forma de moldeo por compresión, llamada ***moldeo preformado*** [10], implica la colocación de una estera precortada en la parte inferior de la sección del molde junto con una carga de resina de polímero (por ejemplo, pelets o lámina). Los materiales se presionan entre las mitades calientes del molde, ocasionando que la resina fluya e impregne la fibra de la estera para producir un moldeado reforzado con fibras. Las variantes del proceso pueden usar polímeros termoplásticos o termofijos.

Moldeo con depósito elástico La carga inicial en el moldeo con depósito elástico (ERM) es un sándwich que consiste en un centro de espuma de polímero entre dos capas de fibra seca. El núcleo de espuma es comúnmente un poliuretano de celda abierta impregnada con resina líquida como un epóxico o poliéster, y las capas de fibras seca pueden ser tela, mecha tejida u otra forma de material fibroso. Como se muestra en la figura 15.7, el sándwich se coloca en la sección inferior del molde y se prensa a presión moderada, alrededor de 0.7 MPa (100 lb/in^2). Al comprimirse el núcleo, éste suelta la resina para mojar la superficie seca de las capas. El curado produce una parte de peso ligero que consiste en un núcleo de baja densidad y revestimientos delgados de FRP.

15.3.2 Procesos de moldeo por transferencia para PMC

En el moldeo convencional por transferencia (sección 13.7.2), se coloca una carga de resina termofija en un depósito o cámara, se calienta y se presiona por medio de un pisón dentro de una o más cavidades del molde. El molde se calienta para curar la resina. El proceso deriva su nombre de la transferencia del polímero fluido desde el depósito al molde. Se puede usar para moldear resinas TS cuyos rellenos incluyen fibras cortas para producir una pieza compuesta de FRP. Otra forma de moldeo por transferencia para PMC se llama ***moldeo por transferencia de resina*** (RTM, por sus siglas en inglés) [3], [10]; se refiere a un

FIGURA 15.7 Moldeo con depósito elástico: 1) se coloca espuma en el molde entre dos capas de fibra, 2) se cierra el molde, liberando la resina de la espuma hacia las capas de fibra.



proceso en molde cerrado en el cual se coloca una estera preformada en la parte inferior del molde, el molde se cierra y la resina termofija (por ejemplo, una resina de poliéster) se transfiere dentro de la cavidad a presión moderada para impregnar el preformado. Como causa de confusiones, algunas veces al RTM se le conoce como ***moldeo por inyección de resina*** [3], [11]; (no obstante, la distinción entre moldeo por transferencia y moldeo por inyección de cualquier manera es confusa, como ya el lector puede haberlo notado en el capítulo 13). El RTM ha sido utilizado para producir piezas como tinas de baño, cascarones de albercas, bancos, sillas y cascos para pequeños botes.

Se han creado varias mejoras al proceso básico de RTM [4]. Una de ellas, llamada ***RTM avanzado***, usa polímeros de alta resistencia, como resinas epóxicas y refuerzos de fibra continua, en lugar de esteras. Las aplicaciones incluyen componentes aeroespaciales, aletas de proyectiles y esquís para nieve. Dos procesos adicionales son el moldeo por transferencia de resina con expansión térmica y la inyección de resinas termofijas reforzadas al último. El ***moldeo por transferencia de resina con expansión térmica*** (TERTM, por sus siglas en inglés) es un proceso patentado por TERMT, Inc., que consiste en los siguientes pasos [4]: 1) se forma un preformado con espuma rígida de polímero (por ejemplo, poliuretano); 2) el preformado se envuelve en un esfuerzo de tela y se coloca en un molde cerrado; 3) una resina termofija (epoxi, por ejemplo) se inyecta en el molde para impregnar la tela y rodear la espuma y 4) el molde se calienta para expandir la espuma, llenar la cavidad del molde y curar la resina [4]. La ***inyección de resina termofija reforzada al último*** (URTRI, por sus siglas en inglés) es similar al proceso de TERTM, excepto que el núcleo de espuma inicial es un epóxico vaciado incorporado con esferas en miniatura de vidrio hueco.

15.3.3 Procesos de moldeo por inyección para PMC

El moldeo por inyección es notable por el bajo costo de producción de las piezas de plástico en cantidades grandes. Aunque se asocia más cercanamente con los termoplásticos, el proceso puede también adaptarse a los termofijos (sección 13.6.6).

Moldeo por inyección convencional En el proceso de formado de PMC, se usa el moldeo por inyección para ambos tipos de FRP, los TP (termoplásticos) y los TS (termofijos). Prácticamente todos los polímeros termoplásticos pueden reforzarse con fibras. Se debe usar fibras cortadas; si se usaran fibras continuas, éstas podrían de cualquier manera reducir su longitud por la acción del tornillo en el cilindro. Durante la inyección de la cámara a la cavidad del molde, las fibras tienden a quedar alineadas al pasar a través de la boquilla. Los diseñadores pueden algunas veces explotar esta característica optimizando las propiedades direccionales mediente el diseño de las piezas, la localización de las puertas y la orientación de la cavidad respecto a la puerta [7].

Si bien los compuestos de moldeo TP se calientan y luego se inyectan en un molde frío, los polímeros TS se inyectan en un molde caliente para curarse. El control del proceso con los termofijos es complicado debido al riesgo del encadenamiento transversal prematuro en la cámara de inyección. Sujeto al mismo riesgo, el moldeo por inyección puede aplicarse a plásticos TS reforzados con fibra en forma de compuestos para moldeo peletizado y en pasta.

Moldeo por inyección con reacción reforzada Algunos termofijos se curan por reacción química en lugar de calor; estas resinas se pueden moldear por inyección con reacción (RIM, por sus siglas en inglés) (sección 13.6.6). En el RIM se mezclan los dos ingredientes reactivos y se inyectan inmediatamente dentro de la cavidad de un molde donde se curan y ocurre rápidamente la solidificación de los componentes. Un proceso estrechamente relacionado incluye en la mezcla fibras de refuerzo, típicamente el vidrio. El proceso se llama en este caso, ***moldeo por inyección con reacción reforzada*** (RRIM, por sus siglas en inglés). Sus ventajas son similares a las del RIM, con el beneficio adicional del refuerzo con fibra. El RRIM se usa extensamente en aplicaciones en parachoques de carrocerías de autos y cabinas de camiones, defensas y otras partes de la carrocería.

15.4 BOBINADO DE FILAMENTOS

El ***bobinado de filamentos*** es un proceso en el cual se enrollan fibras continuas impregnadas con resina alrededor de un husillo giratorio, que tiene la forma interna del artículo de FRP que se quiere producir. La resina se cura después y el husillo se retira. Se producen componentes huecos de simetría axial (usualmente circular en sección transversal), así como formas irregulares. La forma más común del proceso se describe en la figura 15.8. Una banda de mecha de fibras se pasa a través de un baño de resina inmediatamente antes de ser enredada en forma helicoidal sobre un husillo cilíndrico. Continuando el patrón de bobinado se completa finalmente una capa superficial sobre el husillo de un filamento grueso. La operación se repite para formar capas adicionales, cada una de éstas con un patrón entrecruzado respecto a la anterior, hasta obtener el espesor adecuado.

Hay varios métodos para impregnar las fibras con resina: 1) ***bobinado húmedo***, en el cual el filamento pasa a través de la resina líquida solamente antes del bobinado, como en la figura; 2) ***bobinado con productos preimpregnados*** (también llamado ***bobinado seco***), en el cual los filamentos preimpregnados con resina parcialmente curada se enrollan alrededor de un husillo calentado; y 3) ***postimpregnación***, en el cual los filamentos se enrollan en el husillo y luego se impregnan con resina por medio de brocha o alguna otra técnica.

Se usan dos patrones básicos de bobinado del filamento: *a*) helicoidal y *b*) polar (figura 15.9). En el ***bobinado helicoidal***, la banda de filamentos se aplica en una forma espiral alrededor del husillo con un ángulo de hélice. Si la banda se bobina con un ángulo de hélice que se aproxima a los 90º, y el avance del bobinado es un ancho de banda por revolución, se denomina ***bobinado de aro***, ya que los filamentos forman aros casi circulares alrededor del husillo; es un caso especial de bobinado helicoidal. En el ***bobinado polar***, el filamento se enrolla alrededor del eje mayor del husillo, como en la figura 15.9b; después de cada revolución longitudinal, el husillo se corre (gira parcialmente) en un ancho de banda de manera que se va creando gradualmente una forma hueca. Los patrones polares y de aro se pueden combinar en bobinados sucesivos del husillo para producir capas adyacentes con direcciones del filamento aproximadamente perpendiculares; a esto se le llama ***bobinado biaxial*** [1].

Las máquinas de bobinado de filamentos tienen capacidades de movimiento similares a las de un torno corriente (sección 22.1.3). La máquina típica tiene un motor que acciona el husillo y un mecanismo de alimentación de potencia que mueve el carro. El movimiento relativo entre el husillo y el carro se controla para generar un patrón dado de bobinado.

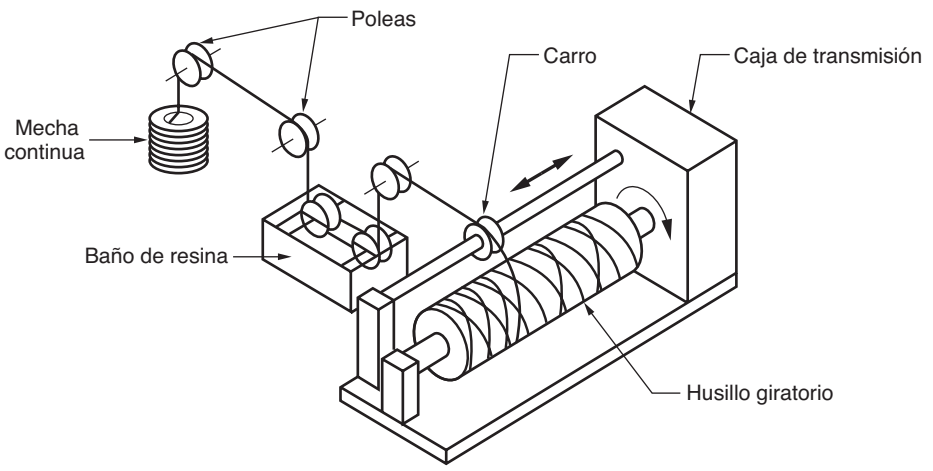


FIGURA 15.8 Bobinado de filamentos

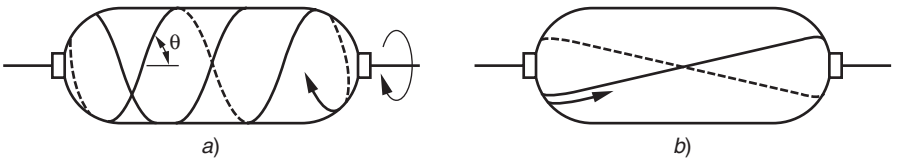


FIGURA 15.9 Dos patrones básicos de bobinado de filamentos. *a*) helicoidal y *b*) polar.

En un bobinado helicoidal, la relación entre el ángulo de la hélice y los parámetros de la máquina se pueden expresar como sigue:

$$\tan\theta = \frac{v_c}{\pi DN}$$

donde θ = ángulo de la hélice en el bobinado sobre el husillo, como se muestra en la figura 15.9a; v_c = velocidad a la cual corre el carro en la dirección axial, m/s (in/s); D = diámetro del husillo, m (in); y N = velocidad rotacional, 1/s (rev/s).

Se disponen de varios niveles de sofisticación de control en las máquinas de bobinado de filamentos. Los dos tipos predominantes son: 1) ***control mecánico***, que opera por medio del engranaje directo entre la transmisión del husillo y del carro; este tipo es el control más simple y menos costoso; y 2) ***control numérico computarizado*** (CNC), en el cual la rotación del husillo y la velocidad del carro se controlan independientemente para permitir mayores ajuste y flexibilidad de los movimientos relativos. El CNC es especialmente útil en bobinados helicoidales de formas contorneadas, como se muestra en la figura 15.10. La relación v_c/DN, como se indica en la ecuación (15.1), debe permanecer fija para mantener un ángulo constante de hélice. Entonces, ya sea v_c o N, deben ajustarse en línea para compensar los cambios en D.

El ***husillo*** es la herramienta especial que determina la geometría de la pieza bobinada con filamento. Éste debe ser capaz de plegarse después del bobinado y del curado de la pieza para poder retirarla. Son posibles varios diseños del husillo, incluido husillos inflables, husillos metálicos plegables y husillos hechos de yeso o de sales solubles.

Las aplicaciones del bobinado de filamentos se clasifican frecuentemente como aeroespaciales o comerciales [9], pero los requerimientos de ingeniería más exigentes son los de la primera categoría. Dentro de las aplicaciones aeroespaciales se incluyen las carcasas de motor de cohetes, cuerpos de proyectiles, aspas de helicópteros, secciones y estabilizadores

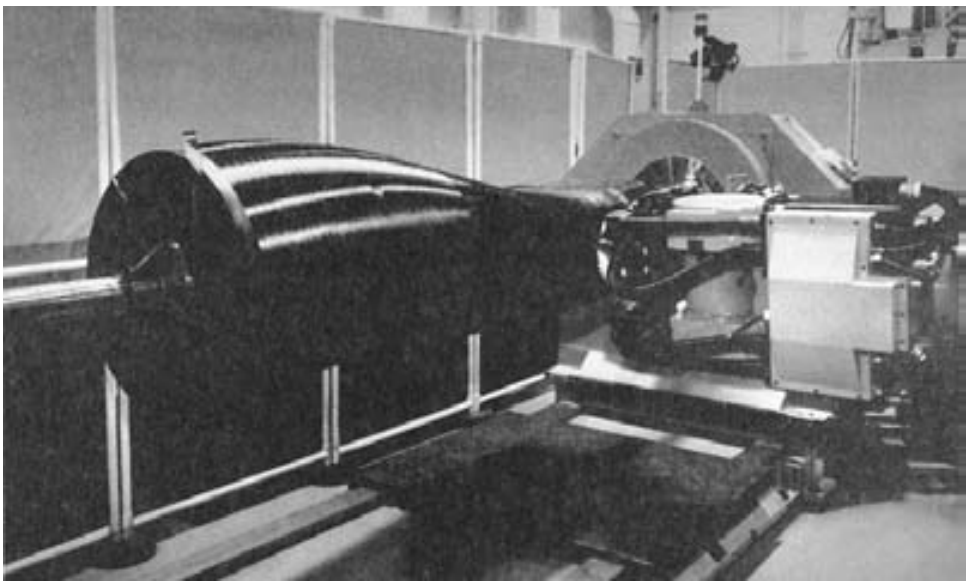


FIGURA 15.10 Máquina de bobinado de filamentos (Cortesía de Cincinnati Milacron).

de cola para aeroplanos. Estos componentes están fabricados con compuestos avanzados e híbridos (sección 9.4.1); los más comunes son las resinas epóxicas y reforzadas con fibras de carbono, boro, Kevlar y vidrio. Dentro de las aplicaciones comerciales se incluyen los tanques de almacenamiento, tubos reforzados y tubería, flechas motrices, alabes de turbinas de viento y barras pararrayos; éstas se encuentran fabricadas de FRP convencionales. Los polímeros incluyen resinas de poliéster, epóxicas y fenólicas; la fibra común para refuerzo es la de vidrio.

15.5 PROCESOS DE PULTRUSIÓN

El proceso básico de pultrusión se creó alrededor de 1950 para hacer cañas de pescar de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés). El proceso es similar a la extrusión (de aquí la similitud del nombre), pero implica el estirado de la pieza de trabajo (de aquí el prefijo inglés pul que se usa en lugar de ex). Como en la extrusión, la pultrusión produce secciones continuas, rectas de sección transversal constante. Se puede usar un proceso relacionado, llamado pulformado, para hacer piezas curvas, que además tengan variaciones en la sección recta a lo largo de la pieza.

15.5.1 Pultrusión

La ***pultrusión*** es un proceso en el cual se sumerge en un baño de resina una mecha continua de fibras y después se tira de ellas a través de un troquel formador donde se cura la resina impregnada. La disposición se esquematiza en la figura 15.11, que muestra cómo se corta el producto curado en grandes secciones rectas. Estas secciones quedan reforzadas con fibras continuas en toda su longitud. Como en la extrusión, las piezas tienen una sección transversal constante y un perfil determinado por la forma de la abertura del troquel.

El proceso consiste en cinco pasos (identificados en el esquema) que se ejecutan en una secuencia continua [1]: 1) ***alimentación de filamentos***, las fibras se surten de una estizola (anaqueles con clavijas que sostienen bobinas de filamento); 2) ***impregnación con resina***, las fibras se sumergen en la resina líquida no curada; 3) ***formado de un troquel previo***, en el cual se da gradualmente la forma aproximada de la sección transversal deseada a la colección de filamentos; 4) ***formado y curado***, se tira de las fibras impregnadas a través

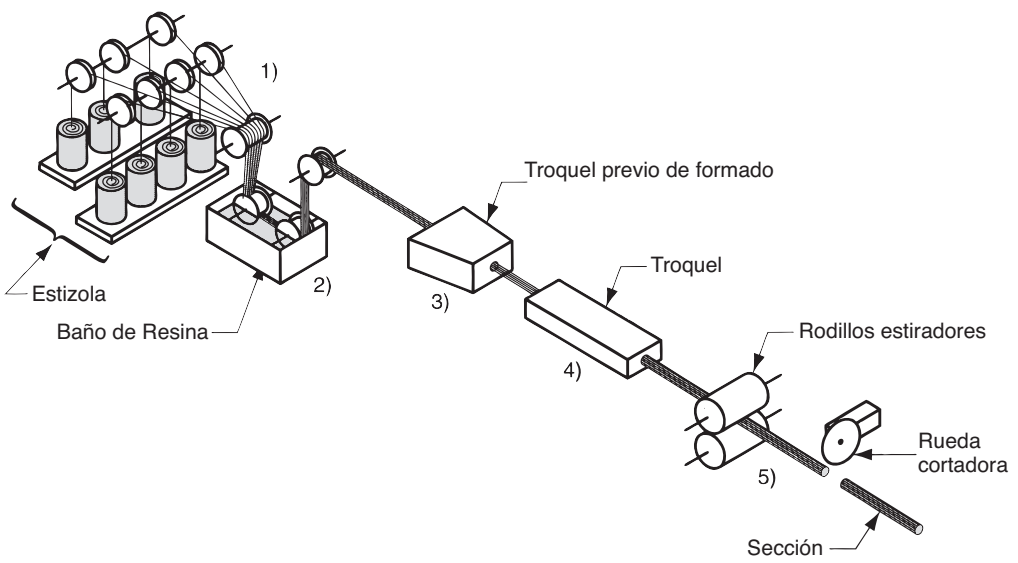


FIGURA 15.11 Proceso de pultrusión (véase el texto para interpretar los números de la secuencia).

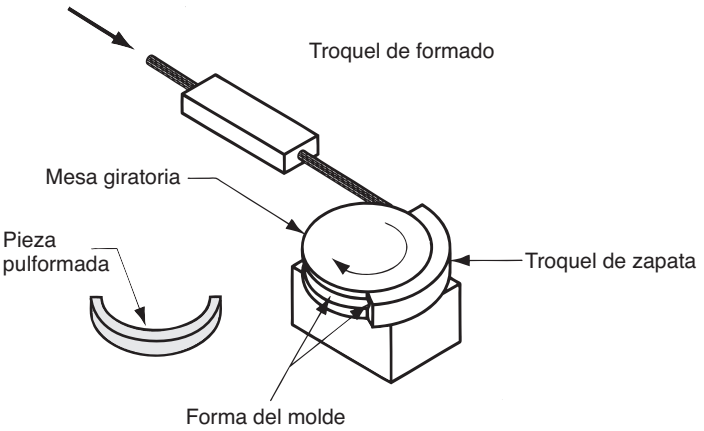


FIGURA 15.12 Proceso de pulformado (el esquema no muestra la operación de corte de la pieza pulformada).

del troquel caliente cuya longitud es de 1 a 1.5 m (3 a 5 ft) y cuyas superficies internas están altamente pulimentadas; y 5) ***estirado y cortado***, en donde se usan rodillos tractores para extraer del troquel la longitud curada, después de lo cual se corta mediante una rueda cortadora con granos de SiC o diamante.

Las resinas comunes usadas en pultrusión son poliésteres insaturados, epóxicos y silicones. Todas estas resinas son polímeros termofijos. El procesamiento de los polímeros epóxicos presenta dificultades debido a su adherencia en las superficies del troquel. Se ha estudiado también algunas posibles aplicaciones de los termoplásticos [1]. El vidrio-E es el material de refuerzo más ampliamente usado; sus proporciones fluctúan entre 30 y 70%. El módulo de elasticidad y la resistencia a la tensión se incrementan con el contenido de refuerzo. Los productos hechos por pultrusión incluyen varillas sólidas, tubería, tiras de lámina plana, perfiles estructurales (como canales, vigas anguladas y compuestas), manivelas de herramientas para trabajo con alto voltaje y cubiertas para el carril conductor de trenes subterráneos.

15.5.2 Pulformado

Los procesos de pultrusión se limitan a secciones rectas de sección transversal constante. Hay también necesidad de piezas largas reforzadas con fibra continua, pero de forma más bien curva cuya sección transversal puede variar a través de su longitud. Para estas piezas menos regulares son apropiados los procesos de pulformado. El ***pulformado*** se puede definir como una pultrusión con pasos adicionales para formar un contorno semicircular y alterar la sección transversal en uno o más puntos a lo largo de su longitud. Un esquema del equipo se ilustra en la figura 15.12. Después de salir del troquel formador, la pieza continua de trabajo se alimenta dentro de una mesa giratoria con moldes negativos colocados en su periferia. El trabajo se fuerza dentro de las cavidades de los moldes por medio de un troquel de zapata que aprieta la sección transversal en varios puntos y forma la curvatura. El diámetro de la mesa determina el radio de la pieza. Conforme la pieza de trabajo sale de la mesa de troqueles, se corta a la longitud prevista para generar las piezas discretas. En el pulformado se utilizan también las resinas y fibras que se usan en la pultrusión. Una aplicación importante de este proceso es la producción de muelles de hoja para automóviles.

15.6 OTROS PROCESOS DE FORMADO PARA PMC

Son dignos de mencionarse algunos procesos para dar forma a los PMC entre los que se incluyen el vaciado centrifugado, el laminado de tubos, el laminado continuo y el corte.

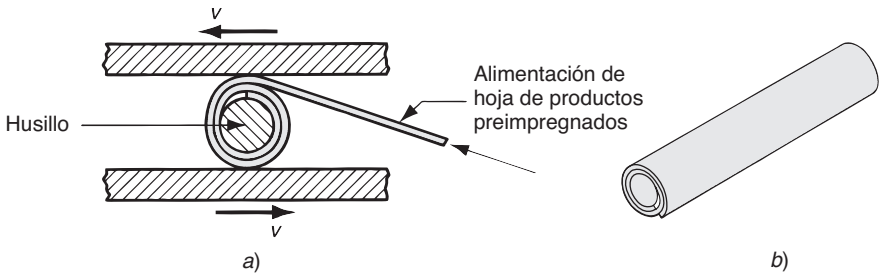


FIGURA 15.13 Laminado de tubos que muestra *a*) un medio posible de envolver productos preimpregnados de FRP alrededor de un husillo y *b*) el tubo terminado después del curado y de retirar el husillo.

Además, muchos de los procesos tradicionales de formado de termoplásticos son aplicables a los FRP (de fibras cortas) basados en polímeros TP; éstos incluyen el moldeo por soplado, el termoformado y la extrusión.

Vaciado centrifugado Este proceso es ideal para productos cilíndricos como tubos y tanques. El proceso es el mismo que su contraparte en fundición metálica (sección 11.3.4). Pequeños trozos de fibras, combinados con resina líquida, se vacían en un molde cilíndrico que gira rápidamente. La fuerza centrífuga presiona los ingredientes contra la pared del molde donde tiene lugar el curado. La superficie interna que resulta es bastante lisa. La contracción de la pieza o el uso de moldes hendidos permiten la remoción de la pieza.

Laminado de tubos Los tubos de FRP se pueden fabricar a partir de láminas con productos preimpregnados por una técnica de laminado [6], que se muestra en la figura 15.13. Dichos tubos se usan en cuadros de bicicletas y armaduras especiales. En el proceso, se envuelve alrededor de un husillo cilíndrico y varias veces una lámina con productos preimpregnados precortada para obtener la pieza de un tubo de un espesor conformado de múltiples capas. La lámina enrollada se encierra en una camisa que se contrae al calentarse y se cura en horno. Cuando la camisa se contrae, los gases atrapados los expulsa por los extremos del tubo. Cuando se completa el curado se retira el husillo para dejar un tubo laminado de FRP. La operación es simple y el costo de las herramientas es bajo. El proceso puede variar en cuanto a los diferentes métodos de envoltura y en el uso de moldes de acero para encerrar el rollo de productos preimpregnados y tener así un mejor control dimensional.

Laminado continuo En la construcción se usan paneles de plástico reforzado con fibra, algunas veces translúcidos y corrugados. Su producción involucra varios procesos: 1) impregnación de capas de esteras de fibra de vidrio o tela tejida por inmersión en resina líquida o pasándola bajo un bisturí, 2) unión entre películas de cubierta (celofán, poliéster u otro polímero) y 3) compactación entre rodillos de presión y curado; 4) el corrugado se agrega por medio de rodillos de formado o zapatas de molde.

Métodos de corte Los compuestos laminados FRP se cortan ya sea en el estado curado o no curado. Los materiales no curados (productos preimpregnados, preformas, SMC y otras formas iniciales) se cortan al tamaño para aplicación de capas, moldeado, etc. Las herramientas típicas de corte incluyen navajas, tijeras, cizallas de potencia y cizallas manuales. También se usan métodos no tradicionales de corte, como corte por rayo láser y por chorro de agua (capítulo 26).

Los FRP curados son duros, tenaces, abrasivos y difíciles de cortar. Pero es necesario cortarlos en muchos de los procesos de formado de FRP para eliminar el material en exceso, hacer agujeros y perfiles y para otros propósitos. Las herramientas de corte de carburo cementado y sierras de acero de alta velocidad se deben usar para cortar plásticos reforzados con fibra de vidrio. En algunos compuestos avanzados (por ejemplo boro-epóxico), se obtienen mejores resultados con las herramientas de corte con diamante. Se usa también con buenos resultados el corte con chorro de agua en los FRP curados; este proceso reduce el polvo y los problemas de ruido asociados con los métodos convencionales de aserrado.

REFERENCIAS

[1] Bader, M. G., Smith, W., Isham, A. B., Rolston, J. A. y Metzner, A. B. ***Delaware Composites Design Encyclopedia,*** Vol. 3. ***Processing and Fabrication Technology***. Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, P., 1990.

[2] Chawla, K. K. ***Composite Materials: Science and Engineering***. 2a. ed. Springer-Verlag, Nueva York, 1998.

[3] Charrier, J-M. ***Polymeric Materials and Processing***. Oxford University Press, Nueva York, 1991.

[4] Coulter, J. P. "Resin Impregnation During the Manufacture of Composite Materials," ***PhD Dissertation.*** University of Delaware, 1988.

[5] ***Engineering Materials Handbook***. Vol. 1. ***Composites***, ASM International, Metals Park, Ohio,1987.

[6] Mallick, P. K. ***Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design.*** 2a. ed. Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1993.

[7] McCrum, N. G., Buckley, C. P. y Bucknall, C. B. ***Principles of Polymer Engineering.*** Oxford University Press, Inc., Oxford, U.K., 1988.

[8] Morton-Jones, D. H. ***Polymer Processing***. Chapman and Hall, London, U.K., 1989.

[9] Schwartz, M. M. ***Composite Materials Handbook***. 2a. ed. McGraw-Hill Company, Nueva York, 1992.

[10] Strong, A. B. ***Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods and Applications.*** Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1989.

[11] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed., vol. II. ***Forming***, 1984.

[12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). ***Tool and Manufacturing Engineers Handbook.*** 4a. ed., vol. III. ***Materials, Finishing and Coating,*** 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

15.1. ¿Cuáles son los polímeros usados más comúnmente en los polímeros reforzados con fibra?

15.2. ¿Cuál es la diferencia entre mecha e hilo?

15.3. ¿Qué es una estera en el contexto de los refuerzos de fibra?

15.4. ¿Por qué se dice que las partículas y las hojuelas son miembros de la misma clase de materiales de refuerzo?

15.5. ¿Qué es un compuesto para el moldeo de láminas (SMC)?

15.6. ¿En qué se diferencia un producto preimpregnado de un compuesto moldeado?

15.7. ¿Por qzzué los productos laminados de FRP hechos por el método de aspersión no son tan fuertes como los productos similares hechos por aplicación manual?

15.8. ¿Cuál es la diferencia entre la aplicación húmeda y la aplicación de productos preimpregnados en la aplicación manual de capas?

15.9. ¿Qué es un autoclave?

15.10. ¿Cuáles son algunas de las ventajas del procesamiento en molde cerrado para PMC en relación con el proceso del molde abierto?

15.11. Identifique algunas de las diferentes formas de compuestos de moldeo para PMC.

15.12. ¿Qué es el moldeo preformado?

15.13. Describa el moldeo por inyección con reacción reforzada (RRIM).

15.14. ¿Qué es el bobinado de filamentos?

15.15. ¿Cuál es la ventaja del control numérico computarizado sobre el control mecánico en el bobinado de filamentos?

15.16. Describa el proceso de pultrusión.

15.17. ¿En qué se diferencia el pulformado de la pultrusión?

15.18. ¿Con qué clase de productos se asocia el laminado de tubos?

15.19. ¿Cómo se cortan los FRP?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 14 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

15.1. ¿Cuál de los siguientes es el tipo de polímero más común en los compuestos de polímero de fibra reforzada: *a*) elastómeros, *b*) termoplásticos o *c*) termofijos?

15.2. ¿Dentro de cuál de las siguientes categorías se clasifica la mayoría de los productos de caucho? (tres respuestas mejores). *a*) elastómero reforzado con negro de humo, *b*) compuesto reforzado con fibra, *c*) compuesto reforzado con partículas, *d*) compuesto en matriz polimérica, *e*) elastómero puro y *f*) polímero puro?

15.3. Otros nombres para los procesos de moldeo abierto son los siguientes (dos respuestas mejores): *a*) moldeo por compresión, *b*) laminación por contacto, *c*) moldeo por contacto, *d*) bobinado de filamentos, *e*) moldeo de troquel de ajuste, *f*) moldeo preformado y *g*) pultrusión.

15.4. ¿En cuáles de las categorías generales siguientes de procesos de formado PMC se clasifica el aplicado manual (dos respuestas mejores): *a*) proceso de moldeo cerrado, *b*) moldeo por compresión, *c*) moldeo por contacto,

d) bobinado de filamentos o *e*) proceso de moldeo abierto?

15.5. ¿En qué superficie del producto laminado por el método de aplicado manual, un molde positivo con una superficie lisa producirá un buen acabado: *a*) superficie interior o *b*) superficie exterior?

15.6. ¿Una pieza moldeada con SMC es una forma de cuál de los siguientes procesos? *a*) moldeo por compresión, *b*) moldeo por contacto, *c*) moldeo por inyección, *d*) proceso en molde abierto, *e*) pultrusión o *f*) moldeo por transferencia.

15.7. ¿El bobinado de filamentos implica el uso de cuál de los siguientes refuerzos de fibra? *a*) filamentos continuos, *b*) telas, *c*) esteras, *d*) productos preimpregnados, *e*) fibras cortas o *f*) mechas tejidas.

15.8. En el bobinado de filamentos, cuando se enrolla un filamento alrededor de un husillo cilíndrico a un ángulo de hélice cercano a 90º ¿cómo se llama? *a*) bobinado biaxial, *b*) bobinado helicoidal, *c*) bobinado en aros, *d*) bobinado perpendicular, *e*) bobinado polar o *f*) bobinado radial.

15.9. ¿Cuál de los siguientes procesos de conformado de plásticos es similar a la pultrusión? *a*) moldeo por soplado, *b*) extrusión, *c*) moldeo por inyección o *d*) termoformado.

15.10. El corte con chorro de agua es una de las formas de cortar o recortar FRP curados o no curados; en el caso de FRP curados, el proceso es notable por su reducción de polvo y ruido: *a*) verdadero o *b*) falso.

Parte IV

Procesamiento de partículas para metales y cerámicos

16 METALURGIA DE POLVOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

16.1 Características de los polvos en ingeniería
- 16.1.1 Características geométricas
- 16.1.2 Otras características

16.2 Producción de polvos metálicos
- 16.2.1 Atomización
- 16.2.2 Otros métodos de producción

16.3 Prensado convencional y sinterizado
- 16.3.1 Combinación y mezclado de polvos
- 16.3.2 Compactación
- 16.3.3 Sinterizado
- 16.3.4 Operaciones secundarias

16.4 Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado
- 16.4.1 Prensado isostático
- 16.4.2 Moldeo por inyección de polvos
- 16.4.3 Laminado de polvos, extrusión y forjado
- 16.4.4 Combinación de prensado y sinterizado
- 16.4.5 Sinterizado en fase líquida

16.5 Materiales y productos para metalurgia de polvos
- 16.5.1 Materiales para la metalurgia de polvos
- 16.5.2 Productos de la metalurgia de polvos

16.6 Consideraciones de diseño en metalurgia de polvos
- 16.6.1 Sistema de clasificación de piezas
- 16.6.2 Lineamientos para el diseño de piezas en metalurgia de polvos

En esta parte del libro se estudia el procesamiento de metales y cerámicas que se encuentran en la forma de polvos, partículas sólidas muy pequeñas. En el caso de las cerámicas tradicionales, los polvos se forman aplastando y moliendo materiales que comúnmente se encuentran en la naturaleza, tales como los minerales de silicato (arcilla) y el cuarzo. En el caso de los metales y los nuevos materiales cerámicos (sección 7.3), los polvos se producen mediante una gran variedad de procesos industriales. En dos capítulos se estudiarán dichos procesos, así como los métodos que se utilizan para formar productos a partir de estos materiales: el capítulo 16 trata acerca de la metalurgia de polvos, mientras que el capítulo 17 estudia el procesamiento de cerámicas a nivel partícula.

La metalurgia de polvos (PM, por sus siglas en inglés) es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen piezas a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual de producción de la PM, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión de partículas en una masa dura y rígida. La compresión, llamada ***prensado***, se realiza en una máquina tipo prensa cuyas herramientas se diseñan específicamente para la pieza que se va a producir. Las herramientas, que consisten generalmente en un troquel y uno o más punzones, pueden ser costosas y es por esto que la PM es más adecuada para niveles medios o altos de producción. El tratamiento térmico, llamado ***sinterizado***, se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. El video clip titulado Metalurgia de Polvos ilustra la tecnología de producción de PM. Las consideraciones que hacen de la metalurgia de polvos un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las piezas de PM se pueden producir masivamente en ***forma neta*** o ***casi neta***, eliminando o reduciendo la necesidad de procesos posteriores.
- Los procesos de la PM implican muy poco desperdicio de material: cerca de 97% de los polvos iniciales se convierten en producto. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas son material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la PM, se pueden hacer piezas con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de piezas de metal poroso, como rodamientos y engranes impregnados con aceite, así como filtros.
- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos se pueden formar por metalurgia de polvos. El tungsteno es un ejemplo: los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se fabrican con tecnología de PM.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por PM.
- La PM se compara favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de ±0.13 mm (±0.005 in).
- Los métodos de producción de PM se pueden automatizar para hacer más económica la operación.

Hay limitaciones y desventajas asociadas con el procesamiento de PM. Éstas incluyen: 1) alto costo del equipo y de las herramientas, 2) alto costo de los polvos metálicos, 3) dificultades en el almacenamiento y manejo de polvos metálicos (tales como degradación del metal a través del tiempo y riesgos de incendio del metal en polvo fino), 4) limitaciones en la forma de las piezas, debido a que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección lateral dentro del troquel durante el prensado, y las tolerancias deben permitir que la pieza pueda expulsarse del troquel después del prensado, y 5) las variaciones de la densidad del material a través de la pieza pueden ser un problema, especialmente para piezas de forma compleja.

Aunque se pueden producir piezas grandes hasta de 22 kg (50 lb), la mayoría de los componentes hechos por PM son menores de 2.2 kg (5 lb). Una colección típica de estas piezas se muestra en la figura 16.1. Las aleaciones de hierro, acero y aluminio constituyen el mayor tonelaje de metales que se usan en la PM. Otros metales incluyen cobre, níquel y metales refractarios como el molibdeno y el tungsteno. Los carburos metálicos como el carburo de tungsteno se incluyen frecuentemente dentro del campo de la metalurgia de polvos; sin embargo, como estos materiales son cerámicos, se estudiarán en el capítulo siguiente.

El desarrollo del campo moderno de la metalurgia de polvos se remonta al siglo XIX (véase nota histórica 16.1). El alcance de la tecnología moderna incluye no solamente la

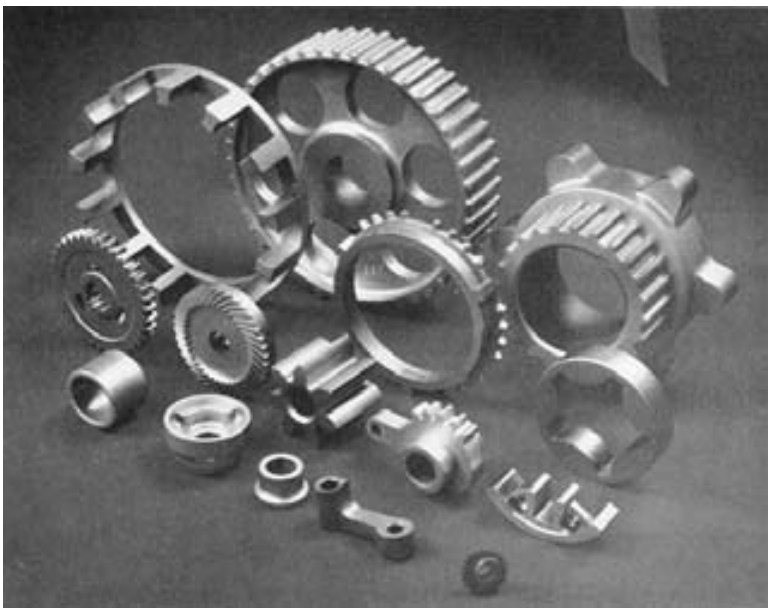


FIGURA 16.1 Una colección de piezas fabricadas mediante metalurgia de polvos (cortesía de Dorst America, Inc.).

producción de piezas, sino también la preparación de los polvos iniciales. El éxito en la metalurgia de polvos depende en gran parte de las características de los polvos iniciales; este tema se analizará en la sección 16.1. Las secciones siguientes describen la producción de polvos, el prensado y el sinterizado. Hay una correlación estrecha entre la tecnología de la PM y los aspectos del procesamiento de cerámicos (capítulo 17). En cerámica los materiales de partida son también polvos, así que los métodos para caracterizar los polvos están estrechamente relacionados con la PM. Varios de los métodos de formado son también similares.

Nota *histórica* 16.1 *Metalurgia de polvos*

Desde tiempos antiguos se ha usado polvos de metales como oro y cobre, así como algunos de los óxidos metálicos, con propósitos decorativos. Se usaban para decorar piezas de cerámica, como base de pinturas y cosméticos. Se cree que los egipcios usaban metalurgia de polvos para hacer herramientas desde fechas tan antiguas como el año 3000 a. C.

El campo moderno de la metalurgia de polvos data de los inicios del siglo XIX, al despertarse un gran interés por el platino. Alrededor de 1815, el inglés William Wollaston creó una técnica para preparar polvos de platino, compactarlos a alta presión y cocerlos (sinterizarlos) al rojo vivo. El proceso de Wollaston marca el principio de la metalurgia de polvos tal como se practica actualmente.

En 1870 se expidieron en Estados Unidos unas patentes de Gwynn relacionadas con rodamientos autolubricantes hechos por metalurgia de polvos. Él usó una mezcla de 99% de estaño pulverizado y 1% de petróleo, que mezclaba, calentaba y finalmente sometía a alta presión para elaborar la forma deseada dentro de la cavidad de un molde.

Hacia los primeros años del siglo XX, las lámparas incandescentes se habían convertido en un producto comercial importante. Se probó una serie de metales para los filamentos, como carbono, circonio, vanadio y osmio, pero se concluyó que el tungsteno era el mejor material para estos filamentos. El problema era la dificultad de procesar el tungsteno debido a su alto punto de fusión y a sus propiedades únicas. En 1908 William Coolidge creó un procedimiento que hizo posible la producción de filamentos para lámparas incandescentes. En este procedimiento se usaba polvo fino de óxido de tungsteno (WO_3) que se reducía a polvo metálico, se prensaba en piezas compactas, se presinterizaba, se forjaba en caliente en barras redondas, se sinterizaban y finalmente se estiraban con el fin de formar alambre para filamentos. El proceso Collidge se sigue usando hoy para producir los filamentos de los focos de luz incandescente.

En la década de 1920 se fabricaron herramientas de carburo cementado (WC-Co) mediante técnicas de metalurgia de polvos (véase nota histórica 7.2). A partir de la década 1930 se produjeron rodamientos autolubricantes. En las décadas 1960 y 1970 se produjeron en masa, particularmente en la industria automotriz, engranes y otros componentes mediante la metalurgia de polvos. Y en la década de 1980 se crearon piezas de metalurgia de polvos para motores de turbina para aviones.

16.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS EN INGENIERÍA

Polvo es un sólido dividido en partículas finas. En esta sección se presentan las características de los polvos metálicos. Sin embargo, la revisión se aplica también a la mayoría de los polvos cerámicos.

16.1.1 Características geométricas

La forma de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos: 1) tamaño de las partículas y su distribución, 2) forma y estructura interna de las partículas y 3) área superficial.

Tamaño de las partículas y su distribución El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término ***número de malla*** para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por in^2 es $200^2 = 40\,000$. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

Las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas de tamaños progresivamente menores de malla. Los polvos se colocan sobre una criba de un cierto número de malla y ésta se hace vibrar para que las partículas pequeñas que caben en las aberturas caigan a la siguiente criba. La segunda criba se vacía en la tercera y así sucesivamente, de manera que las partículas se seleccionan de acuerdo con su tamaño. Se puede designar a un cierto tamaño de polvo 230 por 200, lo cual indica que los polvos han pasado por la malla 200, pero no por la 230. Para simplificar la especificación, se dice que el tamaño de la partícula es de 200. El procedimiento para seleccionar los polvos por su tamaño se llama ***clasificación***.

Las aberturas en la criba son menores que el recíproco del número de malla debido al espesor del alambre en la criba, como se ilustra en la figura 16.2. Suponiendo que la dimensión limitante de la partícula es igual a la abertura de la criba, se tiene

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w \tag{16.1}$$

donde PS = tamaño de partícula, in; MC = número de malla, aberturas por in lineal; y t_w = grueso del alambre de la malla, in. La figura muestra cómo pasarían las partículas pequeñas a través de las aberturas, mientras que las grandes se quedarían retenidas. Las variaciones que ocurren en la selección de tamaños de partículas mediante cribado se deben a las diferencias en la forma de las partículas, al rango de tamaños entre los números sucesivos de malla y a las variaciones de tamaños de las aberturas dentro de un número dado

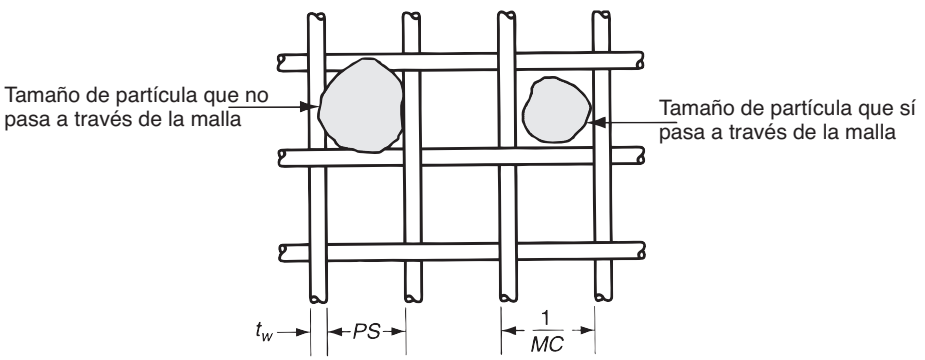


FIGURA 16.2 Malla de criba para seleccionar tamaños de partícula.

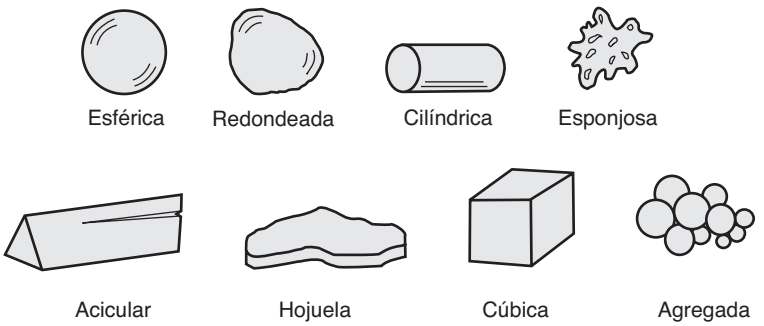


FIGURA 16.3 Varias formas posibles (ideales) de partícula en metalurgia de polvos.

de malla. Además, el método de cribado tiene un límite práctico superior de $MC = 400$ (aproximadamente) debido a la dificultad de hacer mallas tan finas y a la aglomeración de los polvos tan finos. Otros métodos para medir el tamaño de las partículas son por microscopia y técnicas de rayos X.

Los tamaños típicos de las partículas que se utilizan en la metalurgia de polvos convencional (comprimido y sinterizado) varían entre 25 y 300 μm (0.001 y 0.012 in).[1]

El extremo alto de este rango corresponde a un número de malla de aproximadamente 65. El otro extremo es muy pequeño para poderse medir mediante el método de número de malla.

Forma y estructura interna de las partículas La forma de los polvos metálicos puede catalogarse en varios tipos; algunos de ellos se ilustran en la figura 16.3. Existen variaciones tanto en la forma de las partículas de una colección de polvos como en sus tamaños. Una manera simple y útil de medir la forma es la razón del aspecto, la razón de la dimensión máxima y la mínima de una partícula dada. La razón del aspecto para una partícula esférica es 1.0; sin embargo, para un grano acicular puede ser de 2 a 4. Se requieren técnicas microscópicas para determinar las características de la forma.

Cualquier volumen de polvos sueltos contendrá poros entre las partículas. Éstos se llaman ***poros abiertos*** porque son externos a las partículas individuales. Los poros abiertos son espacios dentro de los cuales puede penetrar un fluido, como agua, aceite o un metal fundido. Además hay ***poros cerrados,*** que son vacíos internos en la estructura de una partícula individual. La existencia de estos poros internos generalmente es mínima, y sus efectos, cuando existen, son menores; no obstante, pueden influir en las medidas de la densidad, como se verá posteriormente.

Área superficial Suponiendo que la forma de la partícula sea una esfera perfecta, su área A y su volumen V están dados por:

$$A = \pi D^2 \tag{16.2}$$

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \tag{16.3}$$

donde D = diámetro de la partícula esférica, mm (in). La razón de área a volumen A/V para una esfera se determina entonces por:

$$\frac{A}{v} = \frac{6}{D} \tag{16.4}$$

En general, la razón de área a volumen puede expresarse para cualquier forma de partícula, esférica o no esférica, como sigue:

$$\frac{A}{V} = \frac{K_s}{D} \qquad \text{o} \qquad K_s = \frac{AD}{V} \tag{16.5}$$

[1] Estos valores son proporcionados por el profesor Wojciech Misiolek, mi colega en el Department of Materials Science and Engineering de la Universidad de Lehigh. La metalurgia de polvos es una de sus principales áreas de investigación.

donde K_S = factor de forma; y D en el caso general = diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula no esférica, mm (in). Entonces $K_S = 6.0$ para una esfera. Para formas de partícula diferentes a la esférica, $K_S > 6$.

De estas ecuaciones se puede inferir lo siguiente. A tamaños menores de partícula y factores de forma más altos (K_S), el área superficial será más alta para el mismo peso total de polvo metálico. Esto significa una mayor área donde puede ocurrir la oxidación. El tamaño más pequeño del polvo también conduce a una mayor aglomeración de las partículas, lo cual es una desventaja para la alimentación automática de los polvos. La razón para usar tamaños más pequeños de partículas es que suministran una contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la PM.

16.1.2 Otras características

Otras características de los polvos en ingeniería incluyen fricción interparticular, características de flujo, compactado, densidad, porosidad, composición química y películas superficiales.

Fricción interparticular y características de flujo La fricción entre las partículas afecta la disposición del polvo a fluir con facilidad y a compactarse firmemente. Una medida común de la fricción interparticular es el ***ángulo de reposo***, el cual es el ángulo formado por un montón de polvo cuando éste se vacía a través de un embudo angosto, tal como se muestra en la figura 16.4. Los ángulos más grandes indican mayor fricción entre partículas. Las partículas de menor tamaño por lo general muestran mayor fricción y grandes ángulos. Las formas esféricas producen la menor fricción interparticular, porque al desviarse de la forma esférica, se incrementa la fricción entre las partículas.

Las características de flujo son importantes durante el llenado del troquel y el prensado. El llenado automático del troquel depende de un flujo fácil y consistente de los polvos. En el prensado, la resistencia a fluir incrementa las variaciones de densidad en la parte compactada; estos gradientes de densidad son generalmente indeseables. Una medida común del flujo es el tiempo requerido para que una cierta cantidad de polvo (en peso) fluya a través de un embudo de tamaño estándar. Los tiempos menores de flujo indican mayor facilidad de flujo y menor fricción interparticular. Para reducir la fricción interparticular y facilitar el flujo durante el prensado, frecuentemente se añaden a los polvos pequeñas cantidades de lubricantes.

Empaquetamiento densidad y porosidad Las características de empaquetamiento dependen de dos medidas de densidad. Primero, la ***densidad real***, que es la densidad del volumen verdadero del material. Ésta es la densidad del material cuando los polvos se funden en una masa sólida, cuyos valores se dan en la tabla 4.1. Segundo, la ***densidad volumétrica*** es la densidad de los polvos en el estado suelto después de vaciado; éste incluye el efecto de los poros entre las partículas. Debido a los poros, la densidad volumétrica es menor que la densidad real.

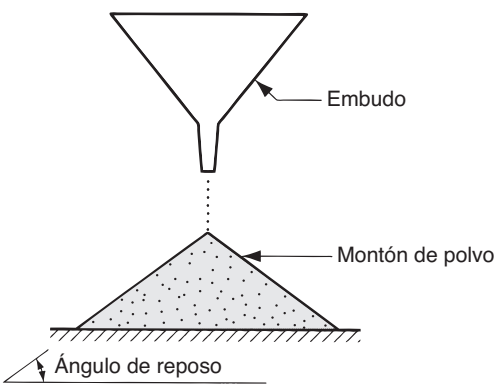


FIGURA 16.4 Fricción interparticular indicada por el ángulo de reposo de un montón de polvo vaciado desde un embudo angosto. A mayor ángulo, mayor fricción interparticular.

El ***factor de empaquetamiento*** es la densidad volumétrica dividida entre la densidad real. Los valores típicos para los polvos sueltos fluctúan entre 0.5 y 0.7. El factor de empaquetamiento depende de la forma y de la distribución de los tamaños de la partícula. Si están presentes polvos de varios tamaños, los polvos más finos se ajustarán entre los intersticios de los grandes, que de otra manera podrían ser tomados por el aire, lo que daría por resultado un factor de empaquetamiento más alto. Éste puede aumentarse también vibrando los polvos, lo cual ocasiona que se asienten más firmemente. Por último, se debe observar que la presión externa que se aplica durante la compactación, incrementa en gran medida el empaquetamiento de los polvos a través del rearreglo y deformación de las partículas.

La porosidad representa un camino alterno para considerar las características de empaquetamiento de un polvo. ***La porosidad*** se define como la razón del volumen de los poros (espacios vacíos) en el polvo, respecto al volumen volumétrico. En principio,

$$\text{Porosidad} + \text{factor de empaquetamiento} = 1.0 \tag{16.6}$$

Este asunto se complica por la posible existencia de poros cerrados en algunas de las partículas. Si el volumen interno de estos poros se incluye en la porosidad, entonces la ecuación es exacta.

Composición química y películas superficiales La caracterización del polvo no sería completa sin una identificación de su composición química. Los polvos metálicos se clasifican como elementales; esto significa que consisten en un metal puro o prealeado, en donde cada partícula es una aleación. Se revisarán estas clases y los metales que se usan comúnmente en la PM más detenidamente en la sección 16.5.1.

Las películas superficiales son un problema en la metalurgia de polvos debido a la gran área por unidad de peso del metal cuando se trata con polvos. Las posibles películas incluyen óxidos, sílice, materiales orgánicos adsorbidos y humedad [5]. Por lo general, estas películas deben removerse antes de procesar la forma.

16.2 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS

En general, los productores de polvos metálicos no son las mismas compañías que hacen las piezas de PM. Los productores de polvo son los proveedores y las plantas que manufacturan los componentes a partir de polvos metálicos son los clientes. Por tanto es apropiado separar la revisión de la producción de polvos (esta sección) de los procesos que se usan para hacer productos a partir de la PM (las siguientes secciones).

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica consumo de energía para incrementar el área superficial del metal. Los métodos son: 1) atomización, 2) químicos y 3) electrolíticos [10]. Ocasionalmente se usan métodos mecánicos para reducir el tamaño de los polvos; sin embargo, estos métodos se asocian más comúnmente con la producción de polvos cerámicos que se tratarán en el capítulo siguiente.

16.2.1 Atomización

La atomización implica la conversión de un metal fundido en un rocío de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros. Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido; varias de ellas se ilustran en la figura 16.5. Dos de los métodos se basan en la ***atomización con gas***, en los que se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido. En el inciso a de la misma figura, el gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando

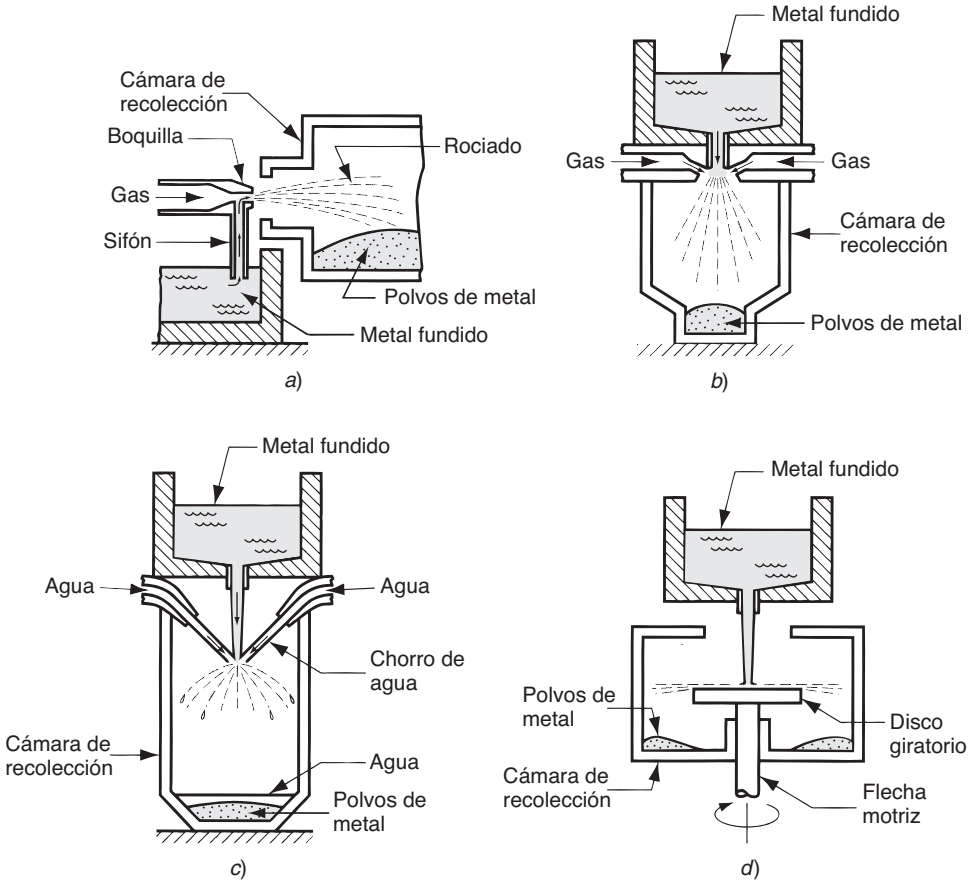


FIGURA 16.5 Varios métodos de atomización para producir polvos metálicos: *a*) y *b*) dos métodos de atomización por gas; *c*) atomización con agua y *d*) atomización centrífuga por el método de disco giratorio.

el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotas se solidifican en forma de polvo. En un método parecido que se muestra en el inciso b de la misma figura, el metal fundido fluye por gravedad a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes, los cuales tienden a ser esféricos, se recolectan en una cámara situada debajo.

El método que se ilustra en el inciso *c*) es similar al *b*), excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Éste se conoce como ***atomizado por agua*** y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que funden por abajo de 1 600 ºC (2 900 ºF). El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación. En ambos procesos de atomizado con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula varía en relación inversa con la velocidad.

Varios métodos se basan en el ***atomizado centrífugo***. Una versión es el ***método de disco rotatorio***, mostrado en el inciso d de la figura, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones, pulverizándolo.

16.2.2 Otros métodos de producción

Entre otros métodos de producción de polvos se incluyen varios procesos de reducción química, métodos de precipitación y electrólisis.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en

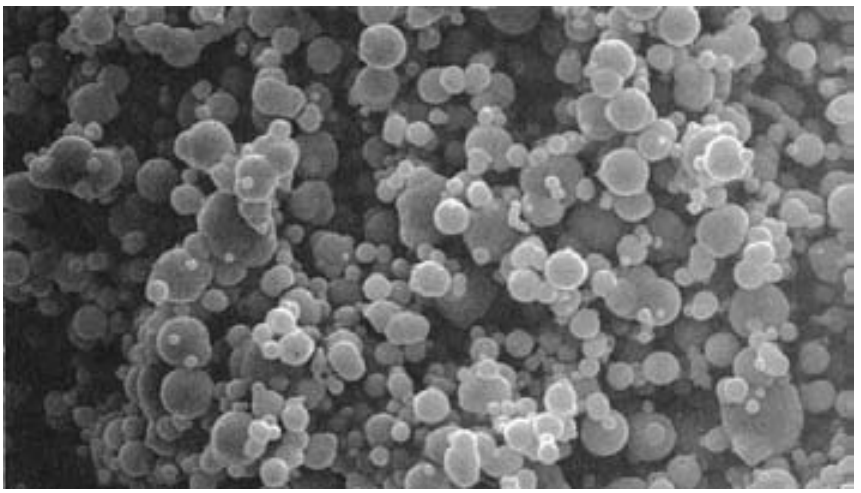


FIGURA 16.6 Polvos de hierro producidos por descomposición de pentacarbonilo de hierro; los tamaños de partícula fluctúan de 0.25 a 3.0 μm (10 a 125 μ-in) (foto cortesía de GAF Chemicals Corporation, Advanced Materials Division).

la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno o monóxido de carbono. El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza. Los polvos producidos por este método se ilustran en la fotomicrografía de la figura 16.6. Otros procesos químicos incluyen la ***precipitación*** de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

En la ***electrólisis*** se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrólito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

16.3 PRENSADO CONVENCIONAL Y SINTERIZADO

Después de la producción de polvos metálicos, la secuencia convencional de la metalurgia de polvos consiste en tres pasos: 1) combinación y mezclado de los polvos, 2) compactación, en la cual se prensan los polvos para obtener la forma deseada, y 3) sinterizado, que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza. Estos tres pasos que algunas veces se aluden como operaciones primarias de la metalurgia de polvos se ilustran en la figura 16.7. En ocasiones también se ejecutan operaciones secundarias destinadas a mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y para otros propósitos.

16.3.1 Combinación y mezclado de polvos

Para lograr buenos resultados en la compactación y el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse por completo antes del proceso. Los términos combinación y mezclado se usan en este contexto. La ***combinación*** se refiere al intermezclado de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. Los tamaños diferentes de partículas se combinan frecuentemente para reducir la porosidad. El ***mezclado*** se refiere a la mezcla de polvos de distinta composición química.

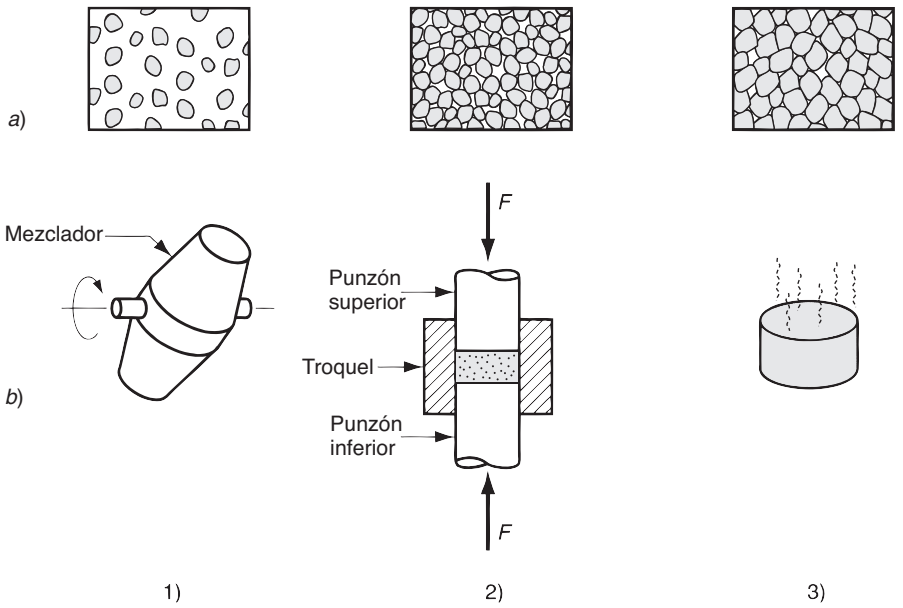


FIGURA 16.7 Secuencia convencional de producción en metalurgia de polvos: 1) mezclado, 2) compactado y 3) sinterizado; en *a*) se muestra la condición de las partículas, mientras que en *b*) se muestran las operaciones y la pieza durante la secuencia.

Una ventaja de la tecnología de metalurgia de polvos es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios. La diferencia entre mezclado y combinación no siempre es precisa en la práctica industrial.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos. Algunas alternativas se ilustran en la figura 16.8; éstas son: *a*) por rotación en tambor, *b*) por rotación en un recipiente de cono doble, *c*) por agitación en un mezclador de tornillo y *d*) por agitación en un mezclador de paletas. En estos dispositivos hay más ciencia de la que se puede sospechar. Los mejores resultados se obtienen cuando se llenan entre 20% y 40% de su capacidad. Los recipientes se diseñan generalmente con deflectores internos u otras formas para impedir la caída libre durante el mezclado de polvos de diferentes tamaños, debido a que las variaciones en la velocidad de asentamiento de los distintos tamaños generan segregación, precisamente lo contrario de lo que se busca con la combinación. No es conveniente que los polvos se sometan a vibración, ya que esto también produce segregación.

Generalmente se añaden otros ingredientes a los polvos metálicos durante el paso de combinación o mezclado. Estos aditivos son: 1) ***lubricantes***, como los estearatos de zinc y de aluminio en pequeñas cantidades para reducir la fricción entre las partículas y en las paredes del troquel durante la compactación; 2) ***aglutinantes***, que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las piezas prensadas pero no sinterizadas; y 3) ***desfloculantes***, que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante el procesamiento subsecuente.

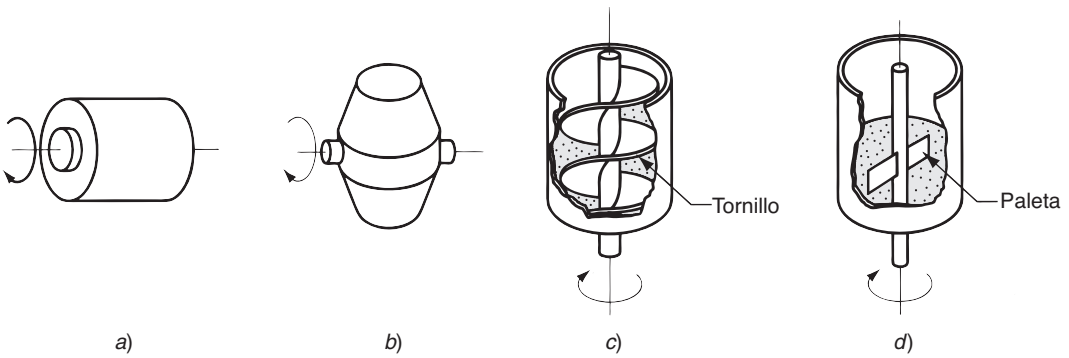


FIGURA 16.8 Varios dispositivos de combinación y mezclado: *a*) tambor rotatorio, *b*) doble cono rotatorio, *c*) mezclador de tornillo y *d*) mezclador de paletas.

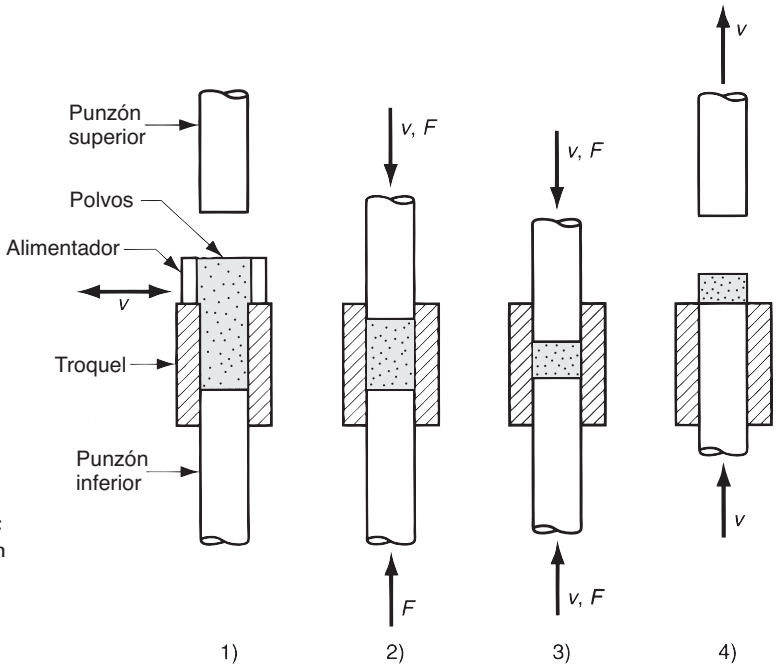


FIGURA 16.9 Prensado, el método convencional de compactación de polvos metálicos en metalurgia de polvos: 1) llenado de la cavidad del troquel con polvos, por alimentación automática en la producción; 2) posición inicial, 3) posición final de los punzones inferior y superior durante la compactación y 4) eyección de la pieza.

16.3.2 Compactación

En la compactación se aplica alta presión a los polvos para darles la forma requerida. El método convencional de compactación es el ***prensado***, en el cual punzones opuestos aprietan el polvo contenido en un troquel. Los pasos en el ciclo de prensado se muestran en la figura 16.9. A la pieza de trabajo después de prensada se le llama ***compactado fresco***; el término ***fresco*** significa que la pieza no está completamente procesada. Como resultado del prensado, la densidad de la pieza, llamada ***densidad fresca***, es mucho más grande que la densidad volumétrica inicial. La ***resistencia fresca*** de la pieza es adecuada para el manejo cuando es prensada, pero mucho menor que la que se logra después del sinterizado.

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un rempaquetamiento de los polvos en un arreglo más eficiente, eliminando los "puentes" que se forman durante el llenado, reduciendo el espacio de los poros e incrementando el número de puntos de contacto entre las partículas. Al incrementarse la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de los poros. La progresión se ilustra en la figura 16.10 para partículas iniciales de forma

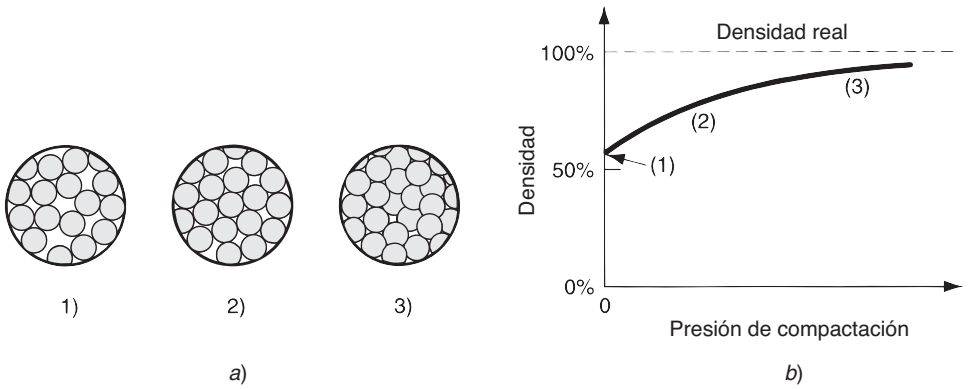


FIGURA 16.10 *a*) Efecto de la presión aplicada durante la compactación: 1) polvos sueltos iniciales después del llenado, 2) rempaquetamiento y 3) deformación de las partículas; y *b*) densidad de los polvos en función de la presión. La secuencia corresponde a los pasos 1, 2 y 3 de la figura 16.9.

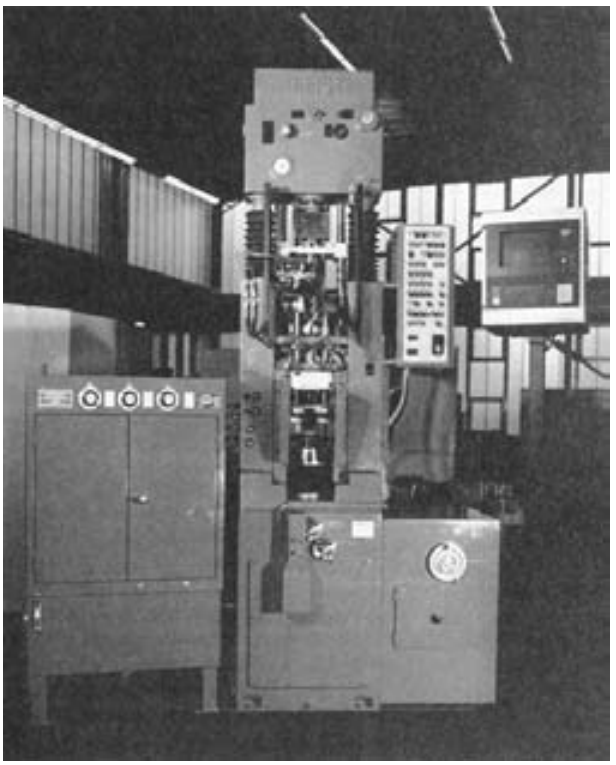


FIGURA 16.11 Prensa hidráulica de 450 kN (50 ton) para compactación de componentes de metalurgia de polvos. Esta prensa tiene la capacidad de actuar en niveles múltiples para producir piezas de formas complejas en metalurgia de polvos. (Foto cortesía de Dorst America, Inc.).

esférica. También se muestra la densidad asociada, representada para las tres vistas como una función de la presión aplicada.

Las prensas usadas en la compactación convencional en la metalurgia de polvos son mecánicas, hidráulicas o una combinación de las dos. En la figura 16.11 se muestra una unidad hidráulica de 450 kN (50 ton). Debido a diferencias en la complejidad de las piezas asociadas a los requerimientos de prensado, las prensas se pueden clasificar en 1) prensado en una dirección, con prensas de acción simple; o 2) prensado en dos direcciones, con prensas de varios tipos, incluyendo las de arietes hidráulicos opuestos, de doble acción o de múltiple acción. La tecnología de las prensas comúnmente disponibles puede suministrar hasta diez acciones de control separadas para producir piezas de forma bastante compleja. Se examinará la complejidad de las piezas y otros aspectos de diseño en la sección 16.6.

La capacidad de una prensa para producción en PM se da generalmente en toneladas, o kN o MN. La fuerza requerida para el prensado depende del área proyectada de la pieza (área en el plano horizontal para una prensa vertical) multiplicada por la presión necesaria para compactar los polvos del metal; expresando esto en forma de ecuación,

$$F = A_p p_c \tag{16.7}$$

donde F = fuerza requerida, N (lb); A_p = área proyectada de la pieza, mm^2 (in^2); y p_c = presión de compactación requerida para el material del polvo dado, MPa (lb/in^2). Las presiones típicas de compactación fluctúan entre 70 MPa (10 000 lb/in^2) para polvos de aluminio y 700 MPa (100 000 lb/in^2) para polvos de hierro y acero.

16.3.3 Sinterizado

Después del prensado, el compactado fresco carece de fuerza y resistencia: se desmorona fácilmente al menor esfuerzo. El ***sinterizado*** es una operación de tratamiento térmico

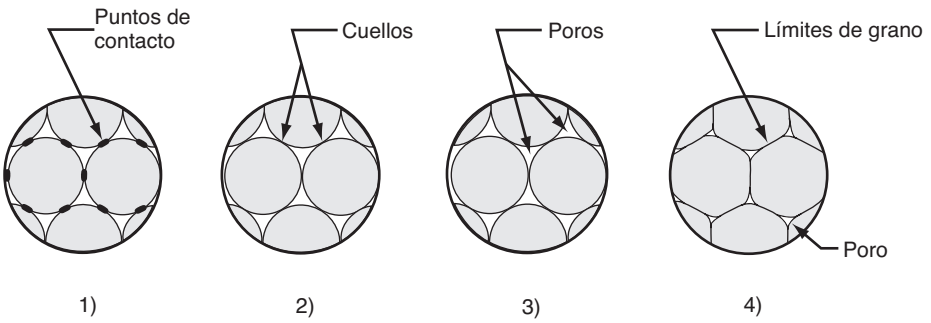


FIGURA 11.12 Sinterizado a escala microscópica: 1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, 2) los puntos de contacto crecen para convertirse en "cuellos", 3) los poros entre las partículas reducen su tamaño y 4) se desarrollan límites de grano entre las partículas, en las regiones donde había cuellos.

que se ejecuta sobre el compactado para unir sus partículas metálicas, incrementando de esta manera su fuerza y resistencia. El tratamiento se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre 0.7 y 0.9 del punto de fusión del metal (en la escala absoluta). El término ***sinterizado en estado sólido*** o ***sinterizado en fase sólida*** se usa algunas veces para este sinterizado convencional debido a que el metal permanece sin fundir a la temperatura del tratamiento.

En opinión de los investigadores, la fuerza básica que mueve al sinterizado es la reducción de la energía superficial [5], [12]. El compactado fresco consiste en muchas partículas distintas que tienen su propia superficie; por tanto, el área superficial total contenida en el compactado es muy alta. Bajo la influencia del calor, el área se reduce por la formación y crecimiento de las uniones entre las partículas; esto implica la reducción de la energía superficial. Mientras más fino sea el polvo inicial, más alta será la superficie del área total y más grande la fuerza que mueve al proceso.

La serie de dibujos en la figura 16.12 muestra en escala microscópica los cambios que ocurren durante el sinterizado de los polvos metálicos. El sinterizado implica transporte de masa para crear los cuellos y transformarlos en límites de grano. El principal mecanismo para que esto ocurra es la difusión; otro posible mecanismo es el flujo plástico. La contracción ocurre durante el sinterizado como resultado de la reducción del tamaño de los poros. Esto depende en gran medida de la densidad del compactado fresco, y ésta a su vez de la presión durante la compactación. Cuando las condiciones del procesamiento se controlan estrechamente, la contracción generalmente es predecible.

Dado que las aplicaciones de la PM involucran generalmente producciones medianas o altas, la mayoría de los hornos de sinterizado se diseñan con dispositivos mecanizados para el traslado de las piezas de trabajo durante el proceso. El tratamiento térmico consiste en tres pasos realizados en tres cámaras de hornos continuos: 1) precalentado, en el cual se queman los lubricantes y los aglutinantes, 2) sinterizado y 3) enfriado. El tratamiento se ilustra en la figura 16.13. Las temperaturas típicas y los tiempos de sinterizado se proporcionan en la tabla 16.1 para metales seleccionados.

En la práctica moderna del sinterizado se controla la atmósfera del horno. Los propósitos de la atmósfera controlada son: 1) proteger de la oxidación, 2) proporcionar una atmósfera reductora para remover los óxidos existentes, 3) suministrar una atmósfera carburizadora y 4) ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado. Las atmósferas de los hornos de sinterizado comunes son: de gas inerte, basadas en nitrógeno, de amoniaco disociado, de hidrógeno y basadas en gas natural [5]. Las atmósferas al vacío se usan para ciertos metales, como los aceros inoxidables y el tungsteno.

16.3.4 Operaciones secundarias

Las funciones de las operaciones secundarias son varias, incluidas la densificación, el dimensionamiento, la impregnación, la infiltración, el tratamiento térmico y el acabado.

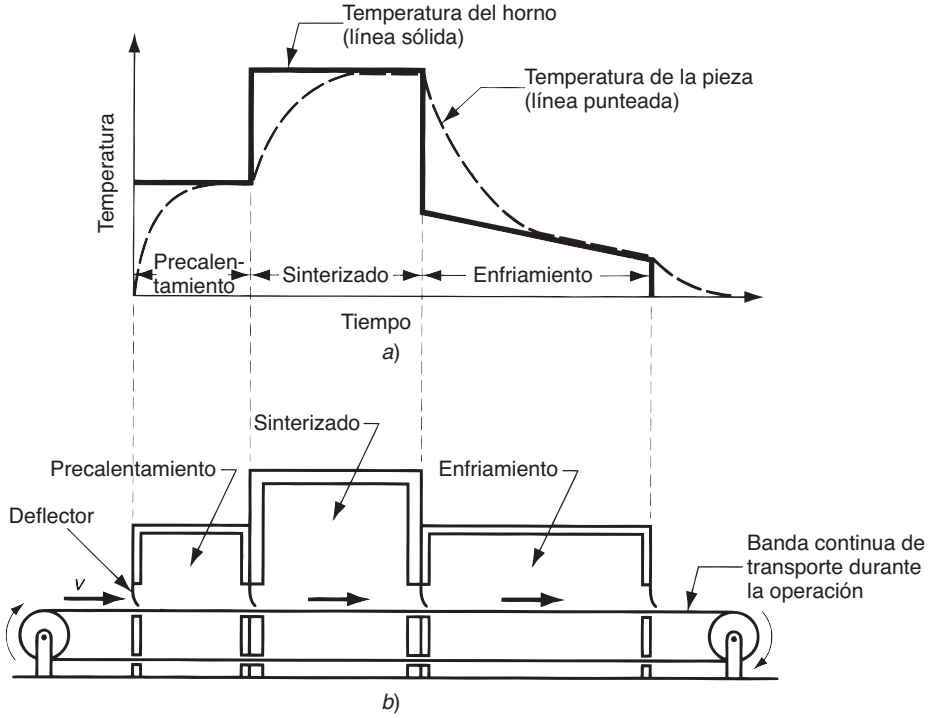


FIGURA 16.13
a) Ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y *b*) sección transversal esquemática de un horno continuo de sinterizado.

Densificación y dimensionamiento Numerosas operaciones secundarias se ejecutan para aumentar la densidad y mejorar la precisión, o para lograr formas adicionales en las piezas sinterizadas. El ***reprensado*** es una operación de prensado en la cual se aprieta la pieza en un troquel cerrado para aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas. El ***dimensionamiento*** es la compresión de una pieza sinterizada para mejorar su precisión dimensional. El ***acuñado*** es una operación de prensado sobre una pieza sinterizada para imprimir detalles en su superficie.

Algunas piezas sinterizadas requieren un ***maquinado*** posterior. Rara vez se utiliza el maquinado para dimensionar las piezas; más bien se usa para crear características geométricas que no se pueden lograr por prensado, como son cuerdas internas o externas, perforaciones laterales y otros detalles.

Impregnación e infiltración La porosidad es una característica única e inherente a la tecnología de metalurgia de polvos. Ésta se puede aprovechar para crear productos especiales, llenando el espacio disponible en los poros con aceite, polímeros o metales que tienen un punto de fusión más bajo que la base del metal en polvo.

TABLA 16.1 Temperaturas y tiempos típicos de sinterizado para polvos de metales seleccionados.

	Temperaturas de sinterizado		
Metal	°C	°F	Tiempo típico
Latón	850	1 600	25 min
Bronce	820	1 500	15 min
Cobre	850	1 600	25 min
Hierro	1 100	2 000	30 min
Acero inoxidable	1 200	2 200	45 min
Tungsteno	2 300	4 200	480 min

Recopilada de [8] y [13].

Impregnación es el término que se usa cuando se introduce aceite u otro fluido dentro de los poros de una pieza sinterizada. Los productos más comunes de este proceso son los rodamientos impregnados con aceite: los engranes y componentes similares de maquinaria. Los rodamientos autolubricados, fabricados usualmente de bronce o hierro con 10 a 30% de aceite en volumen, se usan ampliamente en la industria automotriz. Los tratamientos se realizan mediante inmersión de las piezas sinterizadas en un baño de aceite caliente.

Una aplicación alterna de la impregnación involucra a las piezas de la metalurgia de polvos, a las que se les debe ejercer una presión fuerte o impenetrable a los fluidos. En este caso, las piezas se impregnan con varios tipos de resinas de polímeros que ingresan en los espacios de los poros en forma líquida y luego se solidifican. En algunos casos, la impregnación de resina se utiliza para facilitar el procesamiento subsecuente, por ejemplo, para permitir el uso de soluciones de procesamiento (como los químicos para chapado) que de otra forma empaparían los poros y degradarían el producto, o mejorarían el maquinado de la pieza de la metalurgia de polvos.

La ***infiltración*** es una operación en la cual se llenan los poros de las piezas de PM con un metal fundido. El punto de fusión del metal de relleno debe ser menor que el de la pieza. El proceso implica calentar el metal de relleno en contacto con el componente sinterizado, de manera que la acción de capilaridad haga fluir al relleno dentro de los poros. La estructura resultante es relativamente no porosa y la pieza infiltrada tiene una densidad más uniforme, así como una tenacidad y una resistencia mejoradas. Una aplicación de este proceso es la infiltración con cobre de las piezas con PM de hierro sinterizado.

Tratamiento térmico y acabado Los componentes de polvos metálicos pueden tratarse térmicamente (capítulo 27) y terminarse (galvanoplastia o pintura, capítulo 29) por la mayoría de las operaciones que se usan en las piezas fabricadas por fundición y otros procesos de trabajo de metales. Debido a la porosidad de las piezas sinterizadas, se debe tener cuidado con algunos de estos tratamientos por ejemplo, no deben usarse los baños de sales para calentar estas piezas. Se pueden; aplicar a las piezas sinterizadas operaciones de chapeado y recubrimiento con fines de apariencia y resistencia a la corrosión. Se debe tener cuidado para evitar que las soluciones químicas queden atrapadas en los poros; frecuentemente se usan la impregnación y la infiltración para este propósito. Los chapeados comunes para piezas sinterizadas incluyen cobre, níquel, cromo, zinc y cadmio.

16.4 ALTERNATIVAS DE PRENSADO Y TÉCNICAS DE SINTERIZADO

La secuencia convencional de prensado y sinterizado es la más utilizada en la tecnología de la metalurgia de polvos. Los métodos para procesamientos adicionales se analizan en esta sección. Estos métodos se ubican en tres categorías: 1) métodos de compactación alternativa, 2) combinación de compactación y sinterizado, y 3) métodos alternativos de sinterizado.

16.4.1 Prensado isostático

Una característica del prensado convencional es que la presión se aplica uniaxialmente. Esto impone limitaciones sobre la forma de la pieza, ya que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección perpendicular a la aplicación de la presión. El prensado uniaxial produce también variaciones de densidad en la compactación, después del prensado. En el ***prensado isostático***, la presión se aplica en todas direcciones contra los polvos contenidos en el molde flexible; para lograr la compactación se usa la presión hidráulica. El prensado isostático puede hacerse de dos formas: 1) prensado isostático frío y 2) prensado isostático caliente.

El ***prensado isostático frío*** (CIP, por sus siglas en inglés) es un compactado que se realiza a temperatura ambiente. El molde, hecho de caucho u otro material elastómero, se

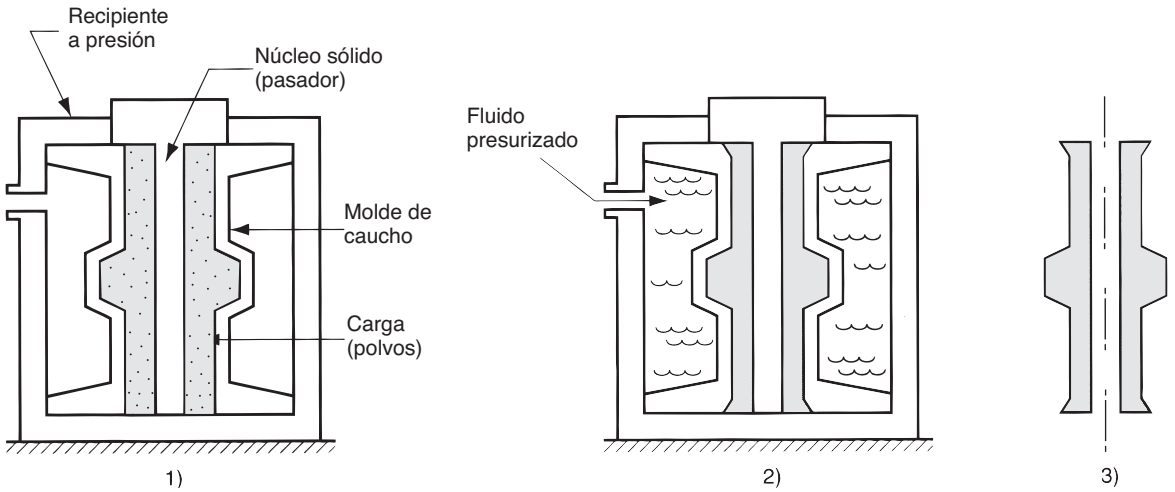


FIGURA 16.14 Prensado isostático en frío: 1) se colocan los polvos en el molde flexible, 2) se aplica presión hidrostática sobre el molde para compactar los polvos y 3) se reduce la presión y se retira la pieza.

sobredimensiona para compensar la contracción. Se usa agua o aceite para ejercer la presión hidrostática contra el molde dentro de la cámara. La figura 16.14 ilustra la secuencia del proceso en prensado isostático en frío. Las ventajas del CIP incluyen una densidad más uniforme, herramientas menos costosas y mayor aplicación a corridas cortas de producción. Es difícil lograr una buena precisión dimensional en el prensado isostático debido a la flexibilidad del molde. En consecuencia, se requieren operaciones de formado y acabado antes o después del sinterizado, para obtener las dimensiones requeridas.

El prensado isostático caliente (HIP, por sus siglas en inglés) se lleva a cabo a alta presión y temperatura, usando como medio de compresión un gas que puede ser argón o helio. El molde que contiene los polvos se hace de lámina de metal para resistir altas temperaturas. El HIP realiza en un paso el prensado y la sinterización. A pesar de esta aparente ventaja, es un proceso relativamente costoso y sus aplicaciones parecen concentrarse actualmente en la industria aeroespacial. Las piezas de PM hechas por HIP se caracterizan por su alta densidad (porosidad cercana a cero), unión interparticular completa y buena resistencia mecánica.

16.4.2 Moldeo por inyección de polvos

El moldeo por inyección se asocia estrechamente con la industria de los plásticos (sección 13.6). Se puede aplicar el mismo proceso básico para formar piezas de polvos metálicos o cerámicos; la diferencia es que el polímero inicial contiene una alta proporción de materia particulada, típicamente entre 50% y 85% en volumen. En metalurgia de polvos, se usa el término ***moldeo por inyección metálica*** (MIM). El proceso más general es el ***moldeo por inyección de polvos*** (PIM, por sus siglas en inglés), que incluye polvos metálicos y cerámicos. En MIM, los pasos son los siguientes [6]: 1) los polvos metálicos se mezclan con un aglutinante apropiado; 2) se forman pelets granulares con la mezcla; 3) los pelets se calientan a la temperatura de moldeo, se inyectan en la cavidad de un molde y la pieza se enfría y retira del molde, 4) se procesa la pieza para remover el aglomerante mediante varias técnicas térmicas o por solvente; 5) la pieza se sinteriza y 6) se ejecutan las operaciones secundarias que se requieran.

El aglutinante actúa como un portador de partículas en el moldeo por inyección de polvos. Sus funciones son aportar características apropiadas de flujo durante el moldeo y sostener los polvos en la forma moldeada hasta el sinterizado. Los cinco tipos básicos de aglutinantes en PIM son: 1) los polímeros termofijos, como los fenólicos, 2) los polímeros

termoplásticos, como el polietileno, 3) el agua, 4) los geles, 5) los materiales inorgánicos [6]. Los tipos que se usan con mayor frecuencia son los polímeros.

El moldeo por inyección de polvos es apropiado para formar piezas similares a las del moldeo por inyección de plásticos. Su costo no es competitivo para piezas de simetría axial simple, ya que en estos casos es adecuado el método de prensado convencional y sinterizado. El PIM parece más económico para pequeñas piezas complejas de alto valor. La contracción que acompaña a la densificación durante el sinterizado limita la precisión dimensional.

16.4.3 Laminado de polvos, extrusión y forjado

La laminación, la extrusión y el forjado son procesos volumétricos característicos del formado de metales (capítulo 19). Se describen en este contexto de la metalurgia de polvos.

Laminación de polvos Los polvos pueden comprimirse en una operación de laminado para formar material metálico en tiras. El proceso se dispone comúnmente para operar de manera continua o semicontinua, como se muestra en la figura 16.15. Los polvos metálicos se compactan entre dos rodillos para formar una tira fresca con la que se alimenta directamente a un horno de sinterizado. Después se enfría, se lamina y se vuelve a sinterizar.

Extrusión de polvos La extrusión es un proceso básico de manufactura (sección 1.3.1). En la extrusión de polvos, el polvo inicial puede tener formas diferentes. En el método más popular, los polvos se colocan al vacío en una lata de lámina metálica hermética, se calientan y se extruyen junto con el recipiente. En otra variante, se preforman los tochos por un proceso de prensado convencional y sinterización, y después se extruyen en caliente. Estos métodos alcanzan un alto grado de densificación en los productos de PM.

Forjado de polvos El forjado es un proceso importante en el formado de metal (sección 1.3.1). En el ***forjado de polvos***, la parte inicial es una pieza de metalurgia de polvos preformada mediante prensado y sinterizado al tamaño apropiado. Las ventajas de este método son: 1) la densificación de la pieza de PM; 2) el costo de las herramientas es más bajo y se requieren pocos "golpes" durante la forja (y por tanto mayor velocidad de producción), ya que la pieza inicial está preformada y 3) poco desperdicio de material.

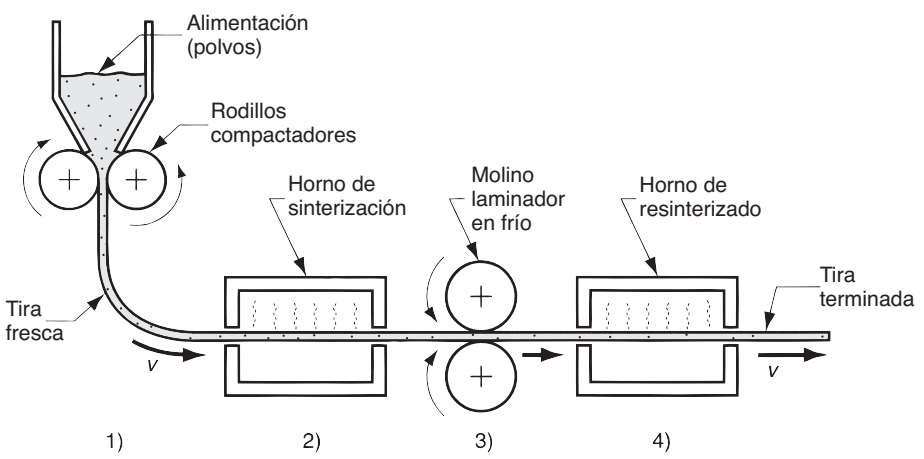


FIGURA 16.15 Laminado de polvos: 1) se alimentan los polvos a través de los rodillos compactadores para formar una tira fresca, 2) sinterizado, 3) laminado en frío y 4) resinterizado.

16.4.4 Combinación de prensado y sinterizado

El prensado isostático caliente (sección 16.4.1) alcanza la compactación y el sinterizado en un solo paso. Otras técnicas que combinan los dos pasos son el prensado caliente y el sinterizado por chispas.

Prensado caliente La disposición de un proceso de prensado caliente uniaxial es muy similar al prensado de PM convencional, excepto que el calor se aplica durante la compactación. El producto resultante es generalmente duro, denso, fuerte y bien dimensionado. A pesar de estas ventajas, el proceso presenta ciertos problemas técnicos que limitan su adopción. Los principales problemas son: 1) la selección del material del molde que pueda soportar las altas temperaturas de sinterización, 2) los largos ciclos de producción que se requieren para realizar la sinterización y 3) el calentamiento y el mantenimiento de un control atmosférico en el proceso [1]. El prensado caliente tiene algunas aplicaciones en la producción de productos sinterizados de carburo usando moldes de grafito.

Sinterizado por chispas Es una alternativa que combina el prensado y el sinterizado, pero que supera algunos de los problemas del prensado caliente. El proceso consiste en dos pasos básicos [1], [13]: 1) los polvos o un compactado fresco preformado se colocan en un troquel; y 2) los punzones superior e inferior, que también sirven como electrodos, comprimen la pieza aplicando una corriente eléctrica de alta energía que al mismo tiempo quema los contaminantes de la superficie y sinteriza los polvos, y forma una pieza densa y sólida en cerca de 15 s. El proceso se ha aplicado a varios metales.

16.4.5 Sinterizado en fase líquida

El sinterizado convencional (sección 16.3.3) es un sinterizado en estado sólido, en el cual el metal se sinteriza a una temperatura por debajo de su punto de fusión. En sistemas que involucran una mezcla de dos polvos metálicos, donde existe una diferencia de temperatura de fusión entre los metales, se usa un tipo alterno de sinterización, llamado sinterizado en fase líquida. En este proceso, se mezclan los dos polvos iniciales y luego se calientan a una temperatura lo suficientemente alta para fundir el metal de más bajo punto de fusión, pero no el otro. El metal fundido moja perfectamente las partículas sólidas, creando una estructura densa con uniones fuertes entre los metales una vez solidificados. Un calentamiento prolongado puede generar la aleación de los metales por una disolución gradual de las partículas sólidas en el metal líquido o la difusión del metal líquido en el sólido, dependiendo de los metales involucrados. En cualquier caso, el producto resultante está completamente densificado (sin poros) y es fuerte. Ejemplos de sistemas que involucran sinterización en fase líquida son: Fe-Cu, W-Cu y Cu-Co [5].

16.5 MATERIALES Y PRODUCTOS PARA METALURGIA DE POLVOS

Las materias primas para el procesamiento en metalurgia de polvos son más costosas que para otros trabajos de metal, debido a la energía adicional requerida para reducir el metal a polvo. Por consiguiente, la metalurgia de polvos solamente es competitiva en ciertos tipos de aplicaciones. En esta sección se identificarán los materiales y productos que parecen más apropiados para la metalurgia de polvos.

16.5.1 Materiales para la metalurgia de polvos

Desde un punto de vista químico, los polvos metálicos se pueden clasificar en elementales y prealeados. Los polvos ***elementales*** consisten en un metal puro y se usan en aplicaciones

donde la alta pureza es importante. Por ejemplo, el hierro puro puede usarse donde importan sus propiedades magnéticas. Los polvos elementales más comunes son de hierro, de aluminio y de cobre.

Los polvos elementales se mezclan también con otros polvos metálicos para producir aleaciones especiales que son difíciles de formular por métodos convencionales. Las herramientas de acero son un ejemplo; la metalurgia de polvos permite combinar ingredientes que son difíciles o imposibles por las técnicas tradicionales de aleación. El uso de mezclas de polvos elementales facilita el procesamiento para formar una aleación, aun cuando no involucre aleaciones especiales. Ya que los polvos son metales puros, no son tan fuertes como los metales prealeados. Por tanto se deforman más fácilmente durante el prensado, así que la densidad y la resistencia fresca son más altas que los compactados prealeados.

En los ***polvos prealeados***, cada partícula es una aleación que tiene la composición química deseada. Los polvos prealeados se usan cuando la aleación no puede formularse mediante la mezcla de polvos elementales; el acero inoxidable es un ejemplo importante. Los polvos prealeados más comunes son ciertas aleaciones de cobre, acero inoxidable y acero de alta velocidad.

Los polvos elementales y prealeados de uso más común en orden aproximado de tonelaje son: 1) el hierro, con mucho el metal más usado en PM, mezclado frecuentemente con grafito para hacer piezas de acero, 2) el aluminio, 3) el cobre y sus aleaciones, 4) el níquel, 5) el acero inoxidable, 6) el acero de alta velocidad y 7) otros materiales de metalurgia de polvos como el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el estaño y los metales preciosos.

16.5.2 Productos de la metalurgia de polvos

La ventaja sustancial de la tecnología de polvos es que las piezas se hacen en forma neta o casi neta; requieren poco o ningún formado adicional después de procesarse en metalurgia de polvos. Algunos de los componentes comúnmente fabricados mediante metalurgia de polvos son engranes, rodamientos, catarinas, sujetadores, contactos eléctricos, herramientas de corte y varias piezas de maquinaria. La producción en grandes cantidades de engranes y rodamientos se adapta particularmente bien a la metalurgia de polvos por dos razones: 1) tienen una forma definida principalmente en dos dimensiones (la superficie superior tiene cierta forma y hay pocas o ninguna forma lateral) y 2) se necesita porosidad en el material para servir como depósito de lubricantes. Mediante la metalurgia de polvos también se pueden hacer piezas más complejas con forma tridimensional, añadiendo operaciones secundarias como maquinado para completar la forma de las piezas prensadas y sinterizadas, y observando ciertos lineamientos de diseño, como los que se reseñan en la siguiente sección.

16.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN METALURGIA DE POLVOS

El uso de técnicas de la metalurgia de polvos es generalmente apropiado para cierta clase de situaciones de producción y diseño de piezas. En esta sección se intenta definir las características de estas aplicaciones donde la metalurgia de polvos es más apropiada. Se presenta primero un sistema de clasificación para piezas de metalurgia de polvos, y luego se ofrecen algunos lineamientos sobre el diseño de los componentes.

16.6.1 Sistema de clasificación de piezas

La Metal Powder Industries Federation (MPIF) define cuatro clases de diseño de piezas de metalurgia de polvos, atendiendo al nivel de dificultad en el prensado convencional. El sistema es útil porque indica alguna de las limitaciones que deben hacerse en las formas

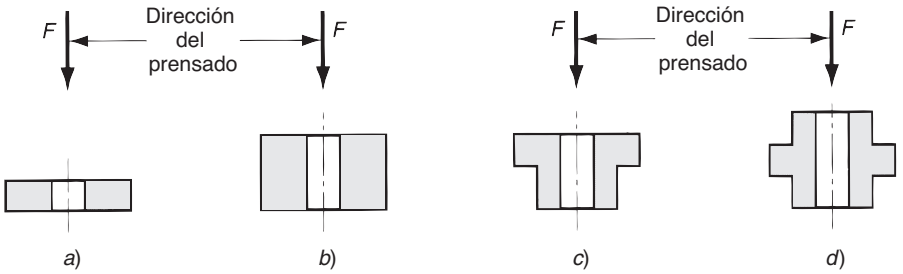


FIGURA 16.16 Cuatro clases de piezas en metalurgia de polvos (vista lateral, la sección transversal es circular): *a*) clase I, formas delgadas simples que se pueden presionar en una dirección; *b*) clase II, formas simples pero más gruesas que requieren presión en dos direcciones; *c*) clase III, dos niveles de espesor presionados en dos direcciones, y *d*) clase IV, múltiples niveles de espesor presionados en dos direcciones, con controles separados para cada nivel a fin de lograr una densificación apropiada a través de la compactación.

cuando se usan los procesamientos convencionales de metalurgia de polvos. Las cuatro clases de piezas se ilustran en la figura 16.16.

16.6.2 Lineamientos para el diseño de piezas en metalurgia de polvos

El sistema de clasificación de la MPIF suministra algunos lineamientos aplicables a la forma de las piezas, apropiada a las técnicas de prensado convencional en metalurgia de polvos. En los siguientes lineamientos se ofrecen sugerencias de diseño adicionales, recopiladas de [2], [10] y [13].

- La economía de los procesamientos mediante metalurgia de polvos usualmente requiere grandes cantidades de piezas para justificar el costo del equipo y las herramientas especiales necesarias. Se sugieren cantidades mínimas de 10 000 unidades [13], aun cuando hay excepciones.
- La capacidad de fabricar piezas con un nivel controlado de porosidad es una característica única de la metalurgia de polvos. Son posibles porosidades hasta de 50%.
- La metalurgia de polvos se puede usar para hacer piezas de metales y aleaciones inusuales, materiales que podrían ser difíciles o imposibles de producir por otros medios.
- La forma de la pieza debe permitir su remoción del troquel después del prensado; esto significa en términos generales que la pieza debe tener lados verticales o casi verticales, aunque se pueden hacer escalonados como sugiere el sistema de clasificación de la MPIF (figura 16.16). Deben evitarse características de diseño como muescas y perforaciones laterales como las que se muestran en la figura 16.17. Son permisibles las

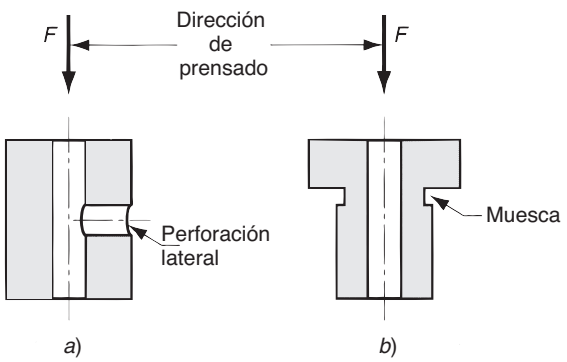


FIGURA 16.17 Formas de las piezas que deben evitarse en metalurgia de polvos, *a*) perforaciones laterales y *b*) muescas laterales. La remoción de la pieza es imposible.

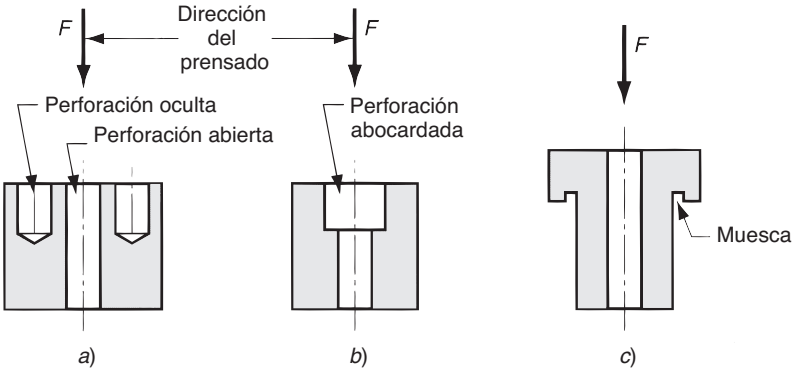


FIGURA 16.18 Formas permisibles de las piezas en metalurgia de polvos: *a*) perforaciones verticales ocultas y abiertas, *b*) perforaciones verticales abocardadas y *c*) muescas en dirección vertical. Estas formas permiten la remoción de la pieza.

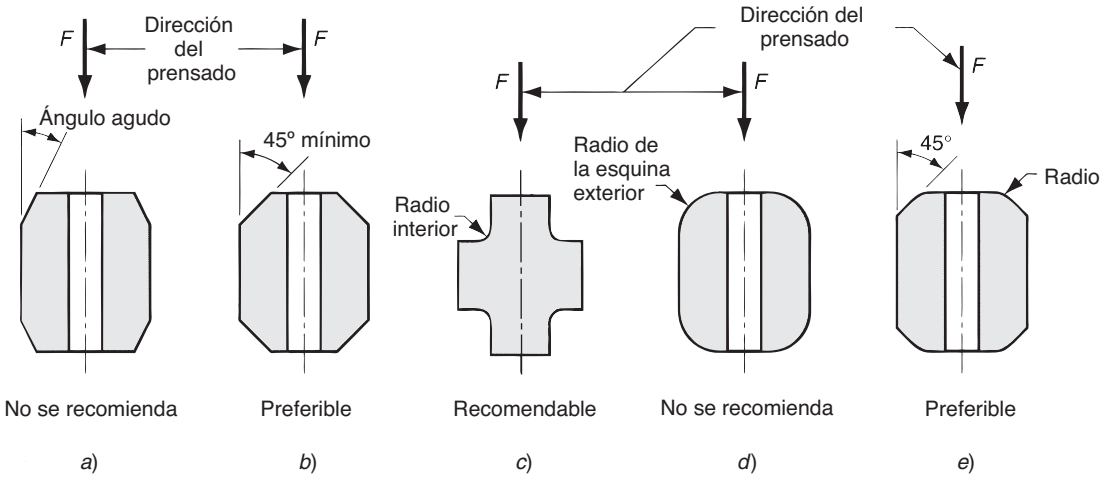


FIGURA 16.19 Se puede lograr chaflanes y esquinas redondeadas, pero deben observarse ciertas reglas: *a*) evitar ángulos agudos del chaflán, *b*) son preferibles ángulos mayores para la rigidez del punzonado, *c*) son deseables los radios interiores pequeños, *d*) los radios completos en las esquinas exteriores son difíciles porque el punzonado es frágil en los bordes de las esquinas, *e*) los problemas en las esquinas exteriores pueden solucionarse combinando radios y chaflanes.

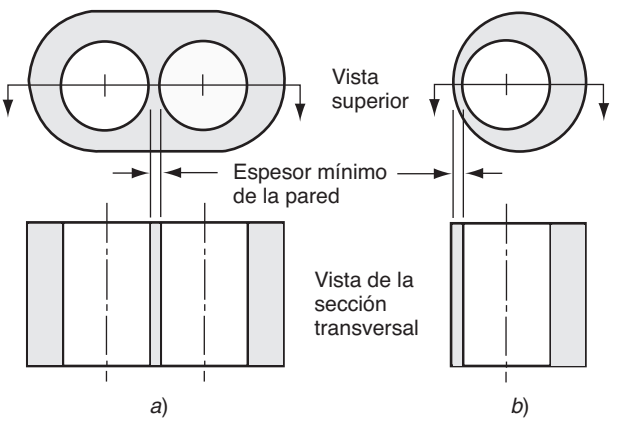


FIGURA 16.20 El espesor mínimo recomendado para las paredes *a*) entre perforaciones o *b*) entre una perforación y la pared exterior debe ser 1.5 mm (0.060 in).

muescas y perforaciones verticales, como las de la figura 16.18, porque no interfieren con la remoción. Las perforaciones verticales pueden hacerse de sección transversal no redonda (por ejemplo, cuadradas o estriadas) sin aumentar significativamente las herramientas o las dificultades de procesamiento.

- ➢ Las cuerdas roscadas no se pueden fabricar en metalurgia de polvos; si se necesitan, deben maquinarse en la pieza ya tratada por PM.
- ➢ Los chaflanes y esquinas redondeadas son posibles en el prensado de metalurgia de polvos, como se muestra en la figura 16.19. Cuando los ángulos son muy agudos se encuentran problemas con la rigidez de los punzones.
- ➢ El espesor de la pared debe tener un mínimo de 1.5 mm (0.060 in) entre dos perforaciones o entre una perforación y la pared exterior de la pieza, como se indica en la figura 16.20. El diámetro mínimo recomendado de la perforación es de 1.5 mm (0.060 in).

REFERENCIAS

[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., ***Manufacturing Processes***, 8a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.

[2] Bralla, J. G.(ed.), ***Design form Manufacturability Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.

[3] Bulger, M., "Metal Injection Molding," ***Advanced Materials & Processes***, marzo de 2005, pp. 39-40.

[4] Dixon, R. H. T. y Clayton, A., ***Powder metallurgy for Engineers***, The Machinery Publishing Co. Ltd., Brighton, U.K., 1971.

[5] German, R. M., ***Powder Metallurgy Science***. 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J., 1994.

[6] German, R. M., ***Powder Injection Molding***, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J. 1990.

[7] Johnson, P. K., "P/M Industry Trends in 2005", **Advanced Materials & Processes**, marzo de 2005, pp. 25-28.

[8] ***Metals Handbook***, 9a. ed., vol. 7. ***Powder Metallurgy***. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.

[9] Pease, L. F., "A Quick Tour of Powder Metallurgy", ***Advanced Materials & Processes,*** marzo de 2005, pp. 36-38.

[10] ***Powder Metallurgy Design Handbook***, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, 1989.

[11] Schey, J. A., ***Introduction to Manufacturing Processes***, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.

[12] Waldron, M. B. y Daniell, B. L., ***Sintering***, Heyden, Londres, U. K., 1978.

[13] Wick, C., Benedict, J.T. y Veilleux, R. F. (eds.), ***Tools and Manufacturing Engineers Handbook,*** 4a. ed., vol. II, **Forming**. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich. 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

16.1. Mencione algunas razones que explican la importancia comercial de la metalurgia de polvos.

16.2. ¿Cuáles son algunas desventajas de los métodos de metalurgia de polvos?

16.3. ¿Qué significa el número de malla en el cribado de polvos para su clasificación?

16.4. ¿Cuál es la diferencia entre poros abiertos y poros cerrados en los polvos metálicos?

16.5. ¿Qué significa el término razón de aspecto para una partícula metálica?

16.6. ¿Cómo se mide el ángulo de reposo para una cantidad dada de polvo metálico?

16.7. Defina la densidad real y la densidad volumétrica para polvos metálicos.

16.8. ¿Cuáles son los principales métodos para producir polvos metálicos?

16.9. ¿Cuáles son los tres pasos básicos de los procesos de formado convencionales en la metalurgia de polvos?

16.10. ¿Cuál es la diferencia técnica entre mezclado y combinado en la metalurgia de polvos?

16.11. ¿Cuáles son algunos de los ingredientes que se añaden usualmente a los polvos metálicos durante el mezclado o combinado?

16.12. ¿Qué se entiende por el término compactado fresco?

16.13. Describa lo que les pasa a las partículas individuales durante la compactación.

16.14. ¿Cuáles son los tres pasos en el ciclo de sinterizado en metalurgia de polvos?

16.15. ¿Cuáles son algunas razones por las que convienen hornos con atmósfera controlada en el sinterizado?
16.16. ¿Cuáles son las ventajas de la infiltración en la metalurgia de polvos?
16.17. ¿Qué diferencia hay entre moldeo por inyección de polvos y moldeo por inyección metálica?
16.18. ¿Cómo se distingue el prensado isostático del prensado convencional y sinterizado en metalurgia de polvos?
16.19. Describa el sinterizado en fase líquida.
16.20. ¿Cuáles son las dos clases básicas de polvos metálicos desde el punto de vista químico?
16.21. ¿Por qué la metalurgia de polvos es tan apropiada para la producción de engranes y rodamientos?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

16.1. El tamaño de las partículas que pueden pasar a través de una criba se obtiene por el recíproco del número de malla de la criba: *a*) verdadero o *b*) falso.
16.2. Para un peso dado de polvo metálico, el área superficial total de los polvos se incrementan por (dos respuestas mejores): *a*) mayor tamaño de partícula, *b*) menor tamaño de partícula, *c*) mayor factor de forma o *d*) menor factor de forma.
16.3. Al aumentar el tamaño de partícula, la fricción interparticular *a*) disminuye, *b*) aumenta o *c*) permanece igual.
16.4. ¿Cuál de las siguientes formas de polvo tiende a poseer la menor fricción interparticular? *a*) acicular, *b*) cúbica, *c*) hojuelas, *d*) esférica y *e*) redondeada.
16.5. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta en el contexto de los polvos metálicos? (tres respuestas correctas) *a*) porosidad + factor de empaquetamiento = 1.0, *b*) factor de empaquetamiento = 1/porosidad, *c*) factor de empaquetamiento = 1.0 – porosidad, *d*) factor de empaquetamiento = – porosidad, *e*) factor de empaquetamiento = densidad volumétrica/densidad real?
16.6. ¿Cuál de las siguientes fórmulas tipifica de manera más precisa las temperaturas de sinterizado en la metalurgia de polvos? *a*) 0.5 T_m, *b*) 0.8 T_m, *c*) T_m, donde T_m = temperatura de fundido del metal.
16.7. El reprensado se refiere a una operación de prensado que se usa para comprimir una pieza no sinterizada de un troquel cerrado y lograr así su dimensionado y un mejor acabado de la superficie: *a*) verdadero o *b*) falso.
16.8. ¿A cuál de las siguientes opciones se refiere la impregnación? (dos respuestas son más apropiadas): *a*) llenar los poros de una pieza de metalurgia de polvos con un metal fundido, *b*) colocar polímeros en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos, *c*) empapado de aceite por acción de capilaridad en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos y *d*) algo que no debe pasar en una fábrica.
16.9. En el prensado isostático, ¿con cuál de los siguientes materiales está hecho típicamente el molde? *a*) caucho, *b*) lámina de metal, *c*) textiles, *d*) polímero termofijo o *e*) acero de herramienta.
16.10. ¿Cuál de los siguientes procesos combina el prensado y el sinterizado de polvos metálicos? (tres respuestas mejores): *a*) prensado isostático caliente, *b*) prensado caliente, *c*) moldeo por inyección de metal, *d*) prensado y sinterizado y *e*) sinterizado por chispas.
16.11. ¿Cuál de las características de diseño dificultaría o imposibilitaría la realización del prensado y sinterizado convencionales? (tres respuestas mejores): *a*) esquinas exteriores redondeadas, *b*) perforaciones laterales, *c*) perforaciones roscadas, *d*) perforaciones verticales abocardadas y *e*) paredes verticales de 1/8 in (3 mm) de espesor.

PROBLEMAS

Caracterización de los polvos en ingeniería

16.1. Una criba con un número de malla 325 tiene alambres con un diámetro de 0.001377 in. Utilizando la ecuación (16.1) determine: *a*) el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b*) la proporción de espacios abiertos en la criba.
16.2. Una criba con número de malla 10 tiene alambres con un diámetro de 0.0213 in. Utilizando la ecuación (16.1), determine: *a*) el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b*) la proporción de espacios abiertos en la criba.

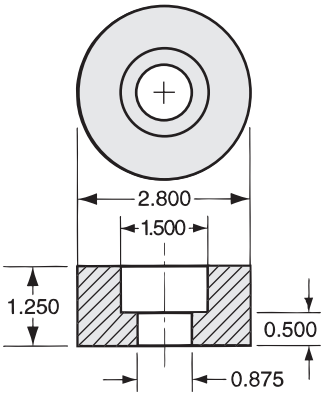


FIGURA P16.13 Pieza para el problema 16.13 (dimensiones en in).

16.3. ¿Cuál es la razón de aspecto de una partícula con forma cúbica?

16.4. Determine el factor de forma para partículas metálicas de las siguientes formas ideales: *a*) esférica, *b*) cúbica, *c*) cilíndrica con una razón de longitud al diámetro de 1:1, *d*) cilíndrica con razón de longitud al diámetro de 2:1 y *e*) hojuela en forma de disco cuya razón de espesor a diámetro es 1:10.

16.5. Un montón de polvo de hierro pesa 2 libras. Las partículas son de forma esférica y todas tienen el mismo diámetro de 0.002 in. *a*) Determine el área superficial total de todas las partículas que estén apiladas. *b*) Si el factor de empaquetamiento es igual a 0.6, determine el volumen de la pila de partículas. Nota: la densidad del hierro es igual a 0.284 lb/in^3.

16.6. Resuelva el problema 16.5, si el diámetro de las partículas es de 0.004 in. Suponga el mismo factor de empaquetamiento.

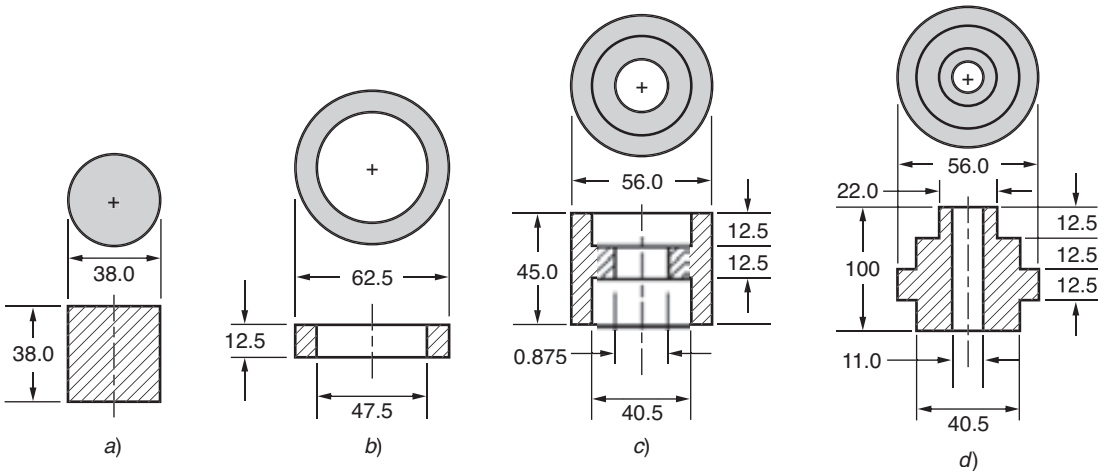
16.7. En el problema 16.5 suponga que el diámetro promedio de la partícula es igual a 0.002 in; sin embargo, los tamaños varían formando una distribución estadística como sigue: 25% en peso de las partículas miden 0.001 in, 50% miden 0.002 in y 25% miden 0.003 in. Dada esta distribución, ¿cuál es área superficial total de todas las partículas en el montón?

16.8. En un cubo sólido de cobre cuyo lado = 1.0 ft se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas, ¿cuál es el porcentaje de incremento en el área superficial total si el diámetro de cada partícula es de 0.004 in? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).

16.9. En cubo sólido de aluminio, cuyos lados = 1.0 m, se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas. ¿Cuánta superficie se añade por este proceso si el diámetro de la partícula es de 100 micras? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).

16.10. Dado un volumen grande de polvos metálicos, en el cual todos son perfectamente esféricos y tienen exactamente el mismo diámetro, ¿cuál es el factor de empaquetamiento máximo posible que pueden tener?

FIGURA P16.14 Piezas para el problema 16.14 (dimensiones en milímetros).



Consideraciones de diseño y compactación

16.11. En cierta operación de prensado los polvos metálicos que se le alimentan a un molde abierto tienen un factor de empaquetamiento de 0.5. La operación de prensado reduce el polvo a dos terceras partes de su volumen inicial. En la operación de sinterizado posterior, la contracción asciende a 10% sobre base volumétrica. Dado que éstos son los únicos factores que afectan la estructura de la pieza terminada, determine su porosidad final.

16.12. Se va a prensar un rodamiento de forma simple a partir de polvos de bronce usando una presión de compactación de 207 MPa. El diámetro exterior es de 44 mm, el diámetro interior de 22 mm y la longitud del rodamiento es de 25 mm. ¿Cuál es el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación?

16.13. La pieza que se muestra en la figura P16.13 se va a prensar a partir de polvos de hierro, usando una presión de compactación de 75 000 lb/in^2. Las dimensiones están en in. Determine *a*) la dirección más apropiada del prensado, *b*) el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación y *c*) el peso final de la pieza si la porosidad es de 10%. Suponga que la contracción durante el sinterizado se puede despreciar.

16.14. Indique a qué clase de piezas de metalurgia de polvos pertenece cada uno de los cuatro dibujos que aparecen en la figura P16.14; indique también si la pieza debe ser prensada en una o dos direcciones y cuántos niveles de control de prensa se requerirán. Las dimensiones están en milímetros.

17 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS Y CERMETS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

17.1 Procesamiento de cerámicas tradicionales
- 17.1.1 Preparación de las materias primas
- 17.1.2 Procesos de formado
- 17.1.3 Secado
- 17.1.4 Cocimiento (sinterizado)

17.2 Procesamiento de cerámicas nuevas
- 17.2.1 Preparación de materiales iniciales
- 17.2.2 Formado
- 17.2.3 Sinterizado
- 17.2.4 Acabado

17.3 Procesamiento de cermets
- 17.3.1 Carburos cementados
- 17.3.2 Otros cermets y compuestos en matriz cerámica

17.4 Consideraciones para el diseño de productos

En el capítulo 7 se analizó que las cerámicas se dividen en tres categorías: 1) cerámicas tradicionales, 2) nuevos productos de cerámica y 3) vidrios. El procesamiento del vidrio involucra principalmente solidificación y se estudió en el capítulo 12. En este capítulo se considerarán los métodos de procesamiento particulado que se usan para las cerámicas nuevas y las tradicionales. También se estudiarán el procesamiento de los compuestos matriciales metálicos y los cerámicos.

Las cerámicas tradicionales se hacen a partir de minerales que se encuentran en la naturaleza e incluyen alfarería, porcelana, ladrillos y cemento. Las nuevas cerámicas se hacen a partir de materias primas producidas sintéticamente y cubren un amplio espectro de productos, como herramientas de corte, huesos artificiales, combustibles nucleares y sustratos de circuitos electrónicos. El material inicial para todos estos artículos es polvo. En el caso de las cerámicas tradicionales, los polvos se mezclan usualmente con agua para aglutinar temporalmente las partículas y lograr una consistencia adecuada para darles forma. En las nuevas cerámicas se usan otras sustancias aglutinantes durante el formado. Las piezas frescas se sinterizan después de ser formadas. En cerámica se llama ***cocimiento***, pero su función es la misma que en metalurgia de polvos: efectuar una reacción de estado sólido que una los materiales en una masa sólida y dura.

Los métodos de procesamiento que se revisarán en este capítulo son importantes tecnológica y comercialmente porque en la práctica todos los productos cerámicos se for-

man por estos métodos (excepto, por supuesto, los productos de vidrio). La secuencia de manufactura es muy similar entre las cerámicas tradicionales y las nuevas cerámicas, debido a que la forma del material inicial es la misma: polvo. Sin embargo, los métodos de procesamiento para las dos categorías son bastante diferentes, por lo que se analizarán en forma individual.

17.1 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS TRADICIONALES

En esta sección se revisará la tecnología de producción de cerámicas tradicionales, como alfarería, gres y otras lozas de mesa, ladrillos, azulejos y cerámica refractaria. Las ruedas de esmeril se producen también por los mismos métodos básicos. Lo que estos productos tienen en común es que sus materias primas consisten en silicatos cerámicos (arcillas). La secuencia de procesamiento de la mayoría de las cerámicas tradicionales incluye los pasos ilustrados en la figura 17.1.

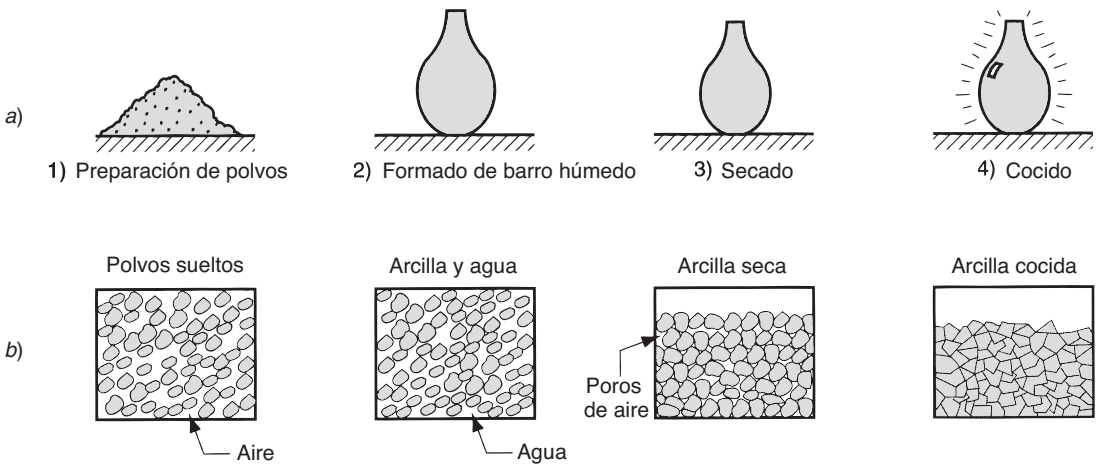
17.1.1 Preparación de las materias primas

Los procesos de formado de los productos cerámicos tradicionales requieren que el material inicial tenga la forma de una pasta plástica, compuesta de finos polvos cerámicos mezclados con agua; su consistencia determina la facilidad para formar el material y la calidad del producto final. Las materias primas cerámicas se encuentran generalmente en la naturaleza como terrones rocosos, y su reducción a polvo es el propósito de los pasos de preparación en el procesamiento cerámico.

Las técnicas para reducir el tamaño de las partículas en el procesamiento de las cerámicas aportan varias formas de energía mecánica, como impacto, compresión y frotamiento. El término ***pulverización*** se usa para estas técnicas, las cuales son más efectivas en materiales frágiles, incluidos el cemento, las menas metálicas y los metales frágiles. Se distinguen dos tipos generales de operaciones de pulverización: el triturado y la molienda.

El ***triturado*** se refiere a la ruptura de grandes trozos provenientes de la mina en tamaños más pequeños para su reducción posterior. Se puede requerir varias etapas (por ejemplo, triturado primario y triturado secundario), y la relación de reducción en cada etapa

FIGURA 17.1 Pasos usuales en el procesamiento tradicional de las cerámicas: 1) preparación de materias primas, 2) formado, 3) secado y 4) cocimiento. El inciso *a*) muestra la pieza de trabajo durante la secuencia, mientras que el inciso *b*) muestra la condición de los polvos.



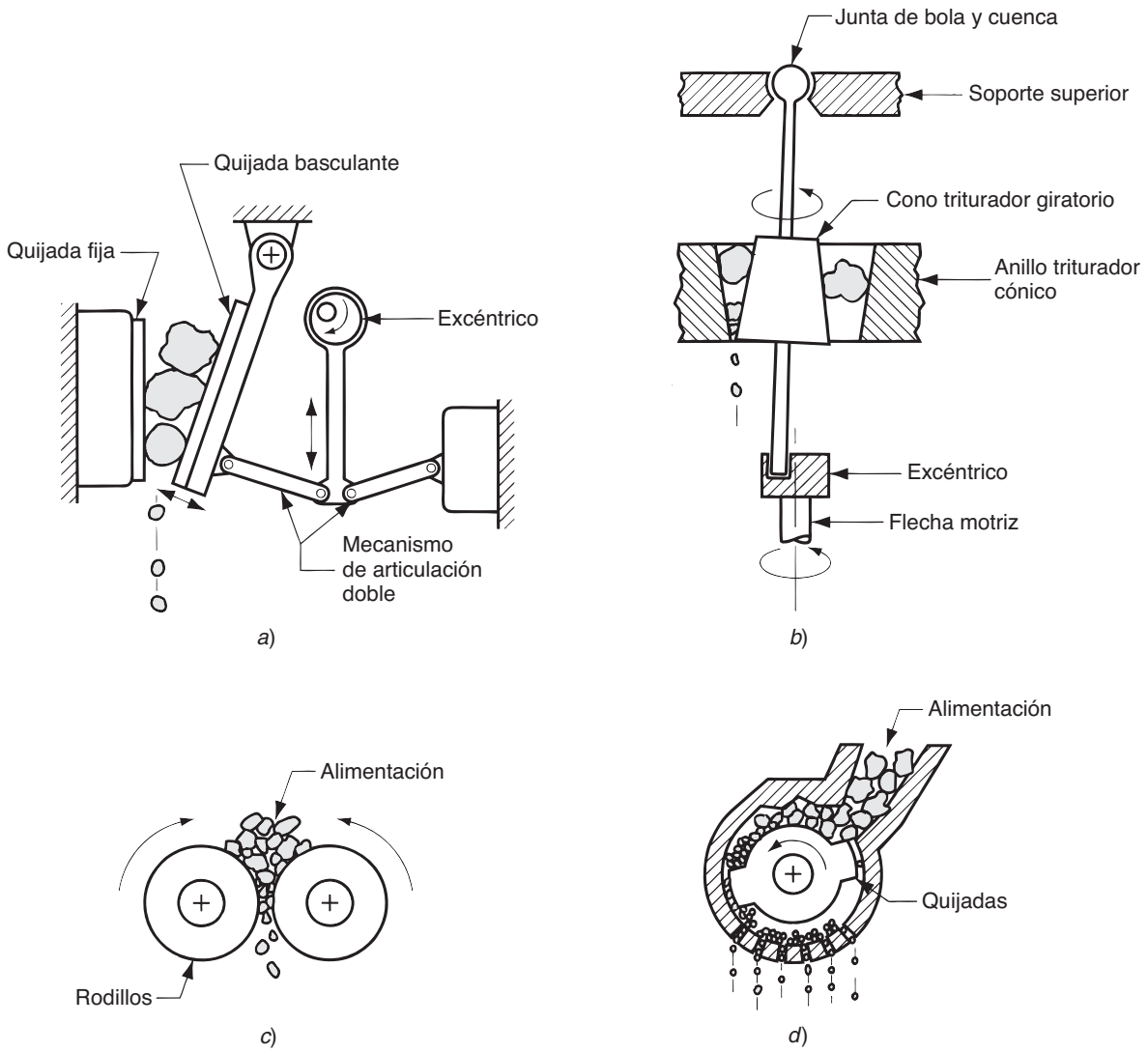


FIGURA 17.2 Operaciones de trituración: *a*) triturador de quijadas, *b*) triturador giratorio, *c*) triturador de rodillos y *d*) molino de martillos.

puede ser del orden de 3 a 6. El triturado de minerales se realiza por compresión contra superficies rígidas o por impacto contra superficies rígidas con movimiento restringido [1]. El equipo que se usa para realizar el triturado es de varios tipos. En la figura 17.2 se muestran algunos equipos utilizados para llevarlo a cabo: *a*) trituradores de quijadas, en los cuales una quijada grande se mueve hacia delante y hacia atrás para triturar los terrones contra una superficie dura y rígida; *b*) trituradores giratorios, que usan un cono giratorio para comprimir los trozos contra una superficie dura y rígida, *c*) trituradores de rodillos, en los cuales los trozos de cerámica se aprietan entre tambores rotatorios; y *d*) molinos de martillos, que usan martillos rotatorios para golpear el material y romper los trozos.

La ***molienda***, en este contexto, se refiere a la operación de reducir las piezas pequeñas después del triturado a polvos finos. La molienda se realiza por abrasión e impacto del mineral triturado por el libre movimiento de un medio duro y suelto, como bolas, piedras o barras [1]. En la figura 17.3 se ilustran algunos ejemplos de molienda: *a*) molino de balines, *b*) molino de rodillos y *c*) molienda por impacto.

Un ***molino de balines*** contiene esferas duras mezcladas con el material a pulverizar, que giran dentro de un recipiente cilíndrico grande. El movimiento arrastra a los balines y

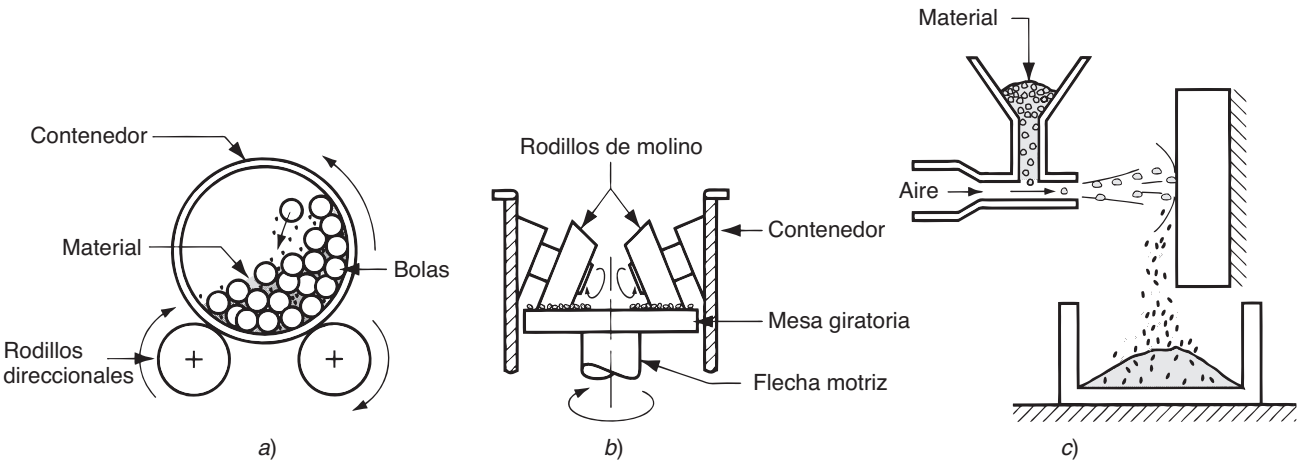


FIGURA 17.3 Métodos mecánicos para producir polvos cerámicos: *a*) molino de balines, *b*) molino de rodillos y *c*) molienda por impacto.

el material hacia arriba en la pared del recipiente y los hace caer para realizar la molienda por una combinación de impacto y frotamiento. Estas operaciones frecuentemente añaden agua a la mezcla, de manera que se forme una pasta aguada. En un ***molino de rodillos***, el material se comprime contra la mesa horizontal del molino mediante rodillos que giran sobre la superficie de la mesa. Aunque no se muestra claramente en el diagrama, la presión de los rodillos sobre la mesa se regula por resortes mecánicos o medios hidroneumáticos. En la ***molienda por impacto***, que parece usarse poco, las partículas del material se proyectan contra una superficie plana dura, ya sea por corriente de aire a alta velocidad o mediante un chorro de una pasta muy fluida a alta velocidad. El impacto fractura las piezas en partículas más pequeñas.

La pasta plástica requerida para el formado consiste en polvos cerámicos y agua. La arcilla es el ingrediente principal de la pasta, ya que tiene características ideales de formado. Mientras más agua tenga la mezcla, la arcilla será más plástica y fácil de formar. Sin embargo, cuando se seca y se cuece la pieza formada, se presenta la contracción que puede causar grietas en el producto. Para evitar este problema se añaden a la pasta otras materias primas cerámicas que no se encogen al secarse y quemarse (o al cocerse), con frecuencia en cantidades significativas. También se pueden añadir otros componentes que tienen funciones especiales. De esta manera, los ingredientes de la pasta cerámica se pueden dividir en las siguientes tres categorías [3]: 1) arcilla, que proporciona la consistencia y plasticidad requeridas para el formado, 2) materias primas no plásticas, tales como alúmina y sílice, que no se encogen durante el secado y el cocido, pero desafortunadamente reducen la plasticidad en la mezcla durante el formado y 3) otros ingredientes, tales como fundentes, que vitrifican durante el cocimiento y promueven la sinterización del material cerámico (feldespato) y agentes humectantes que mejoran la mezcla de los ingredientes.

Estos ingredientes se mezclan perfectamente por vía húmeda o seca. Además de su función de molienda, el molino de balines sirve para este propósito. También deben ajustarse las cantidades apropiadas de polvo y agua en la pasta, de manera que se pueda aumentar o disminuir la humedad, dependiendo de la condición anterior de la pasta y de la consistencia final deseada.

17.1.2 Procesos de formado

Las proporciones óptimas de polvo y agua dependen del proceso de formado que se usa. Algunos procesos de formado requieren alta fluidez; otros actúan sobre una composición que tiene bajo contenido de agua. Con cerca de 50% de agua, la mezcla es una pasta aguada que fluye como un líquido. Al reducirse el contenido de agua, se hace necesario

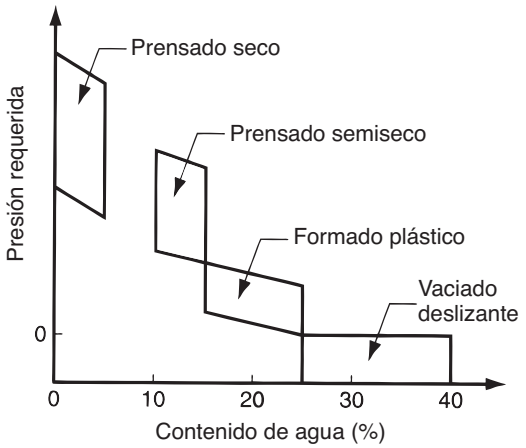


FIGURA 17.4 Cuatro categorías de procesos de formado para cerámicas tradicionales comparadas con el contenido de agua y la presión requerida para formar la arcilla.

aumentar la presión sobre la pasta para producir un flujo similar. Por tanto, los procesos de formado pueden dividirse con base en la consistencia de la mezcla: 1) fundición o vaciado deslizante, en la cual la mezcla es ligera con 25 a 40% de agua; 2) métodos de formado plástico, en los cuales se forma la arcilla en condición plástica con 15 a 25% de agua; 3) prensado semiseco, en el cual la arcilla está húmeda (10 a 15% de agua), pero posee baja plasticidad; y 4) prensado seco, en el cual la arcilla está básicamente seca, contiene menos de 5% de agua. La arcilla seca no tiene plasticidad. Las cuatro categorías se representan en la gráfica de la figura 17.4, donde se comparan estas categorías con la condición de la arcilla que se usa como material inicial. Cada categoría incluye varios procesos diferentes de formado.

Fundición o vaciado deslizante El vaciado deslizante se usa en metalurgia de polvos, pero su aplicación en cerámica es mucho más común. En este método se vacía una suspensión de polvos cerámicos en agua, llamada ***pasta líquida***, dentro de un molde poroso de yeso ($CaSO_4$–$2H_2O$) donde el agua de la mezcla es absorbida de manera gradual por el yeso y se forma una capa de arcilla firme en la superficie del molde. La composición de la pasta líquida es típicamente de 25 a 40% de agua, y el remanente es arcilla mezclada de manera frecuente con otros ingredientes. Debe ser lo suficientemente fluida para penetrar en los resquicios de la cavidad del molde, pero también es conveniente que el contenido de agua sea bajo para lograr mayores velocidades de producción. El vaciado deslizante tiene dos variantes principales: 1) vaciado drenado y 2) vaciado sólido. En ***el vaciado drenado***, que es el proceso tradicional, el molde se invierte para drenar el exceso de pasta líquida después de que se ha formado la capa semisólida, dejando así una parte hueca en el molde; éste se abre después y se remueve la parte. La secuencia es muy similar a la fundición hueca de metales y se ilustra en la figura 17.5. Ésta se usa para hacer jarras de té, vasos,

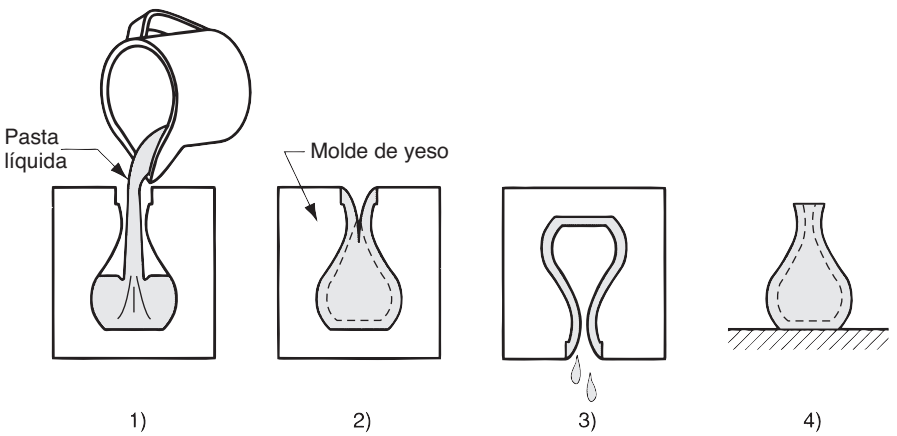


FIGURA 17.5 Secuencia de los pasos en el vaciado drenado, una forma de vaciado deslizante: 1) se vacía la pasta líquida en la cavidad del molde, 2) elagua es absorbida por el molde de yeso para formar una capa firme, 3) el exceso de pasta líquida se vacía afuera y 4) se retira la parte del molde y se recorta.

objetos de arte y otros productos huecos de servicio. En el ***vaciado sólido***, que se usa para producir productos sólidos, se da el tiempo suficiente para que el cuerpo entero se vuelva firme. El molde debe llenarse periódicamente con pasta líquida adicional para compensar la contracción debida a la absorción de agua.

Formado plástico Esta categoría incluye varios métodos manuales y mecanizados. Todos ellos requieren que la mezcla inicial tenga consistencia plástica, lo cual se logra generalmente con un contenido de agua de 15 a 25%. Para los métodos manuales se usan generalmente arcillas en el límite superior del rango, que constituyen un material más fácil de formar; sin embargo, esto viene acompañado de mayor contracción en el secado. Los métodos mecanizados emplean por lo general mezclas con menor contenido de agua y por tanto la arcilla inicial es más espesa.

Aunque los métodos manuales de formado se remontan a miles de años atrás, actualmente los siguen usando hábiles artesanos ya sea para producción o para obras de arte. El ***modelado a mano*** involucra la creación del producto cerámico por manipulación de la masa de arcilla plástica a fin de darle la forma deseada. Además de las piezas de arte, se hacen por este método los patrones para los moldes de yeso en el vaciado deslizante. El ***vaciado o moldeado a mano*** es un método similar, pero se utiliza un molde o forma para determinar las partes de la configuración geométrica. El ***torneado a mano*** sobre un torno de alfarero es otro refinamiento de los métodos artesanales. El ***torno de alfarero*** es una mesa redonda que gira en una flecha vertical accionada por un motor o por un pedal. Los productos cerámicos de sección transversal circular pueden formarse en el torno de alfarero usando algunas veces un molde que proporciona la forma interna.

Estrictamente hablando, el uso del torno de alfarero accionado con motor es un método mecanizado. Sin embargo, la mayoría de los métodos mecanizados de formación de arcilla se caracterizan por mucha menor participación manual que el método de torneado manual descrito. Estos métodos más mecanizados incluyen el torneado ligero, el prensado plástico y la extrusión. El ***torneado ligero*** es una extensión del método del alfarero, en el cual el modelado a mano se remplaza por técnicas mecanizadas. Se usa para producir grandes cantidades de artículos idénticos, como platos y tazones para uso doméstico. Aunque hay variantes en las herramientas y métodos usados, con diferentes niveles de automatización y refinamiento de los procesos básicos, en la figura 17.6 se describe la secuencia típica: 1) un pedazo de arcilla húmeda se coloca en un molde convexo; 2) una herramienta de formado presiona contra el pedazo para generar la forma inicial aproximada. La operación se llama ***tejuelado*** y la pieza de trabajo creada se llama ***tejuela***; y 3) una herramienta plantilladora calentada imparte el contorno final en la superficie durante la rotación de la pieza de trabajo. La razón para calentar la herramienta es producir vapor de la arcilla húmeda, lo cual evita la adherencia. Estrictamente relacionado con el torneado ligero, es el ***moldeo al torno con estirado***, por medio del cual la forma del molde básico es cóncava en vez de convexa [7]. En ambos procesos se usa algunas veces, en lugar de la plantilla, una herramienta rodante que forma la arcilla por rodamiento, evitando la necesidad de tejuelear el pedazo inicial.

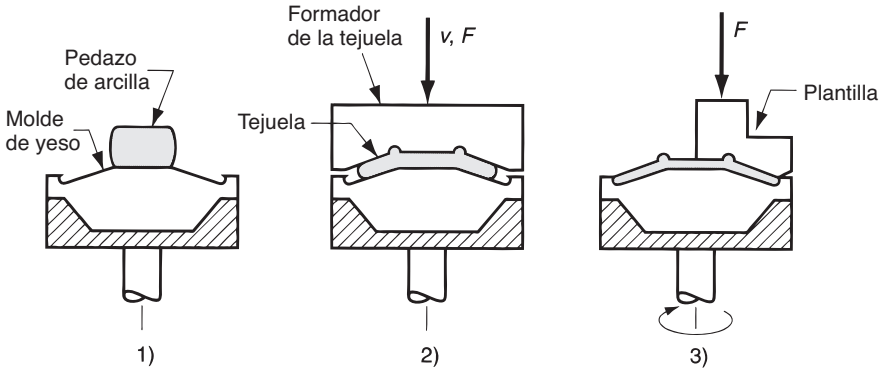


FIGURA 17.6 Secuencia del torneado ligero: 1) un pedazo de arcilla húmeda se coloca en un molde convexo, 2) tejueleado y 3) una plantilla imparte la forma final al producto. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (*v* = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

El ***prensado plástico*** es un proceso de formación en el cual el pedazo de arcilla plástica se prensa entre un molde inferior y otro superior contenidos en un arillo metálico. Los moldes se hacen de un material poroso como yeso; así, al aplicar vacío detrás de los moldes se remueve la humedad de la arcilla. Las secciones del molde se abren entonces, usando presión de aire positiva para prevenir la adherencia de la pieza en el molde. El prensado plástico alcanza producciones más altas que el torneado y no se limita a piezas de simetría radial.

La ***extrusión*** se usa en el procesamiento cerámico para producir secciones largas de sección transversal uniforme que se cortan a la longitud de pieza requerida. El equipo de extrusión utiliza una acción tipo tornillo que ayuda a mezclar la arcilla y a empujar el material plástico a través de la abertura del troquel. Esta secuencia de producción se usa ampliamente para hacer tabiques huecos, losetas, tubos de drenado, tubería en general y aislantes. Se usa también para hacer pedazos de barro inicial para otros procesos cerámicos, como torneado ligero y prensado plástico.

Prensado semiseco En el prensado semiseco las proporciones de agua en la arcilla inicial están típicamente en el rango de 10 a 15%. Esta proporción produce una baja plasticidad que impide el uso de métodos de formado plástico, los cuales requieren una arcilla con mayor plasticidad. Los procesos semisecos usan alta presión para superar la baja plasticidad del material y forzado dentro de la cavidad de un troquel, tal como se muestra en la figura 17.7. Con frecuencia se forma rebaba debido al exceso de barro que se introduce entre las secciones del troquel.

Prensado seco La diferencia principal entre el prensado semiseco y el prensado seco es el contenido de humedad del material inicial. El contenido de humedad de la arcilla inicial en el prensado seco está típicamente por debajo de 5%. Generalmente se agregan aglutinantes a la mezcla de polvos para proporcionar suficiente resistencia a la pieza prensada para su manejo subsiguiente. También se añaden lubricantes para prevenir que la pieza se pegue al dado durante el prensado y la expulsión. Debido a que la arcilla seca no tiene plasticidad y es muy abrasiva, el diseño del troquel y los procedimientos de operación son diferentes al prensado semiseco. Los troqueles se hacen de acero para herramienta endurecido o carburo de tungsteno cementado para reducir el desgaste. Como la arcilla seca no fluye durante el prensado, la forma de la pieza es relativamente simple, por lo que se debe agregar y distribuir en el troquel la cantidad correcta de polvo inicial. No se forman rebabas en el prensado seco y no ocurre contracción de secado, así que el tiempo de

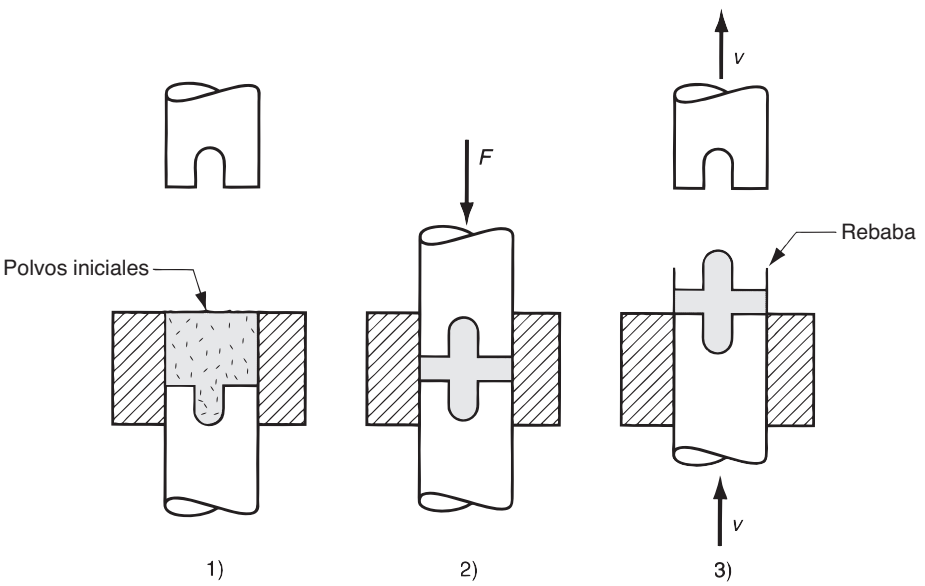


FIGURA 17.7 Prensado semiseco: 1) depósito de polvo húmedo en la cavidad del troquel, 2) prensado y 3) apertura del troquel y expulsión de la pieza. Los símbolos *v* y *F* indican movimiento (v = velocidad) y fuerza aplicada, respectivamente.

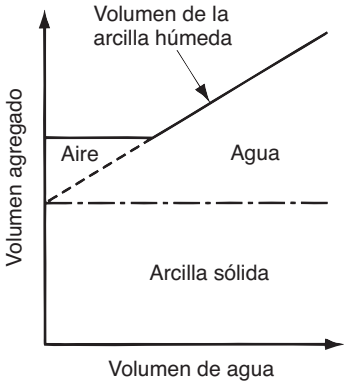


FIGURA 17.8 Volumen de la arcilla como una función del contenido de agua. La relación que se muestra aquí es típica; varía para diferentes composiciones de la arcilla.

secado se elimina, lográndose una buena precisión en las dimensiones del producto final. La secuencia del proceso en el prensado seco es similar a la del prensado semiseco. Los productos típicos incluyen azulejos para baño, aisladores eléctricos y ladrillos refractarios.

17.1.3 Secado

El agua juega un papel importante en la mayoría de los procesos tradicionales de formado cerámico. Pero en adelante ya no tiene ningún objeto y debe removerse del cuerpo de la pieza antes de cocerla. La contracción es un problema durante este paso porque el agua aporta volumen a la pieza y cuando se retira, el volumen se reduce. El efecto se puede ver en la figura 17.8. Al añadir agua inicialmente a la arcilla seca, ésta remplaza simplemente al aire de los poros entre los granos cerámicos y no hay cambio de volumen. Al incrementarse el contenido de agua por arriba de cierto punto, los granos empiezan a separarse y el volumen aumenta, lo que da por resultado una arcilla húmeda que tiene plasticidad y facilidad de formado. Al aumentar el contenido de agua, la mezcla se convierte a la larga en una suspensión líquida de partículas de arcilla en agua.

El proceso inverso ocurre en el secado. Al remover agua de la arcilla húmeda, el volumen de la pieza se contrae. El proceso de secado ocurre en dos etapas, como se describe en la figura 17.9. En la primera etapa, la velocidad de secado es rápida y constante, debido a que el agua de la superficie de la arcilla se evapora en el aire circundante y el agua interior emigra, por acción capilar, hacia la superficie para remplazarla. Durante esta etapa ocurre la contracción, con el riesgo asociado de deformación y agrietamiento debido a las variaciones del secado en diferentes secciones de la pieza. En la segunda etapa de secado, el contenido de humedad se ha reducido hasta que los granos cerámicos han quedado en

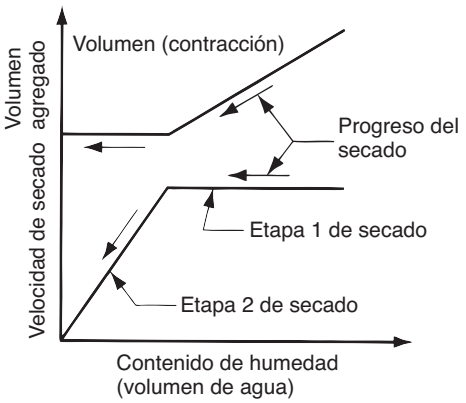


FIGURA 17.9 Curva de velocidad de secado típica asociada a una reducción de volumen (contracción por secado) para un cuerpo cerámico. La velocidad de secado en la segunda etapa se muestra aquí como una línea recta (disminución constante de la velocidad en función del contenido de agua); la función se muestra en la literatura de varias formas, cóncava o convexa [3], [7].

contacto, y ocurre poca o ninguna contracción. El proceso de secado se hace más lento, como se puede ver en la gráfica de la velocidad decreciente.

En producción, el secado se realiza de manera usual en cámaras donde se controla la temperatura y la humedad para lograr el programa apropiado de secado. Debe tenerse cuidado de no remover demasiado rápido el agua de la pieza, para evitar que se formen altos gradientes de humedad, haciendo el material más propenso a las grietas. El calentamiento se hace normalmente por una combinación de convección y radiación usando fuentes infrarrojas. Los tiempos típicos de secado van desde 15 minutos para secciones delgadas hasta varios días para secciones muy gruesas.

17.1.4 Cocimiento (sinterizado)

Después del formado, pero antes del cocimiento, se dice que la pieza cerámica está ***fresca*** (el mismo término que en la metalurgia de polvos), lo cual significa que no está completamente procesada o tratada. La pieza fresca carece de dureza y resistencia, debe cocerse para fijar la forma de la pieza y lograr dureza y resistencia en el producto final. El ***cocimiento*** es el proceso de tratamiento térmico que sinteriza al material cerámico y se realiza en un ***horno cerámico***. En el ***sinterizado*** se desarrollan uniones entre los granos cerámicos y esto va acompañado de densificación y reducción de porosidad. Por tanto, ocurre una nueva contracción en el material policristalino, además de la que ya ha ocurrido en el secado. La sinterización en cerámica es básicamente el mismo mecanismo que en la metalurgia de polvos. En el cocimiento de la cerámica tradicional pueden ocurrir ciertas reacciones químicas entre los componentes de la mezcla y formarse también una fase vítrea entre los cristales, la cual actúa como aglutinante. Ambos fenómenos dependen de la composición química del material cerámico y de las temperaturas de cocimiento que se usan.

Las piezas de cerámica no glaseadas se cuecen solamente una vez; los productos glaseados se cuecen dos veces. El ***glaseado*** se refiere a la aplicación de un recubrimiento cerámico en la superficie para hacer las piezas más impermeables al agua y mejorar su apariencia (sección 7.2.2). La secuencia de procesamiento usual de los artículos glaseados es: 1) cocimiento de los artículos antes del glaseado para endurecer el cuerpo de la pieza, 2) aplicar el glaseado y 3) cocer la pieza una segunda vez para endurecer el glaseado.

17.2 PROCESAMIENTO DE CERÁMICAS NUEVAS

La mayoría de las cerámicas tradicionales se basa en la arcilla (barro), que posee la capacidad única de adquirir plasticidad cuando se mezcla con agua, y dureza cuando se seca y se cuece. La arcilla consta de varios compuestos de silicato hidratado de aluminio, mezclados usualmente con otros materiales cerámicos, para formar una composición química más bien compleja. Las cerámicas nuevas (sección 7.3) se basan en compuestos químicos más simples, como óxidos, carburos y nitruros. Estos materiales no poseen la plasticidad y facilidad de formado de las arcillas tradicionales cuando se mezclan con agua. Por consiguiente, los polvos deben combinarse con otros ingredientes para lograr la plasticidad y otras propiedades convenientes durante el formado y aplicar así los métodos convencionales. Las nuevas cerámicas se diseñan generalmente para aplicaciones que requieren alta resistencia, dureza y otras propiedades que no se encuentran en los materiales cerámicos tradicionales. Estos requerimientos motivaron la introducción de varias técnicas nuevas de procesamiento no usadas anteriormente en las cerámicas tradicionales.

La secuencia de manufactura para las nuevas cerámicas se puede resumir en los siguientes pasos: 1) preparación de materiales iniciales, 2) formado, 3) sinterizado y 4) acabado. Si bien la secuencia es casi la misma para las cerámicas tradicionales, los detalles son frecuentemente muy diferentes, como se verá a continuación.

17.2.1 Preparación de materiales iniciales

Como la resistencia que se especifica para estos materiales es generalmente mucho más grande que para las cerámicas tradicionales, los polvos iniciales deben ser más homogéneos en tamaño y composición, y los tamaños de partícula deben ser menores (la resistencia de los productos cerámicos resultantes es inversamente proporcional al tamaño de los granos). Por tanto, se requiere un mayor control de polvos iniciales. La preparación de los polvos incluye métodos mecánicos y químicos. Los métodos mecánicos constan de las mismas operaciones de molienda que se llevan a cabo en el molino de balines utilizado con las cerámicas tradicionales. La dificultad con estos métodos es que las partículas cerámicas se contaminan con el material de los balines y paredes del molino. Esto compromete la pureza de los polvos cerámicos y como resultado aparecen grietas microscópicas que reducen la resistencia del producto final.

Se usan dos métodos químicos para lograr mayor homogeneidad en los polvos de los nuevos cerámicos: 1) secado por congelación y 2) precipitación de una solución. En ***secado por congelación***, las sales de un producto químico inicial apropiado se disuelven en agua y la solución se rocía para formar gotas pequeñas que son rápidamente congeladas. Después, se remueve la humedad de las gotas en una cámara de vacío; la sal resultante secada por congelación se descompone por calentamiento para formar polvos cerámicos. El secado por congelación no es aplicable a todos los cerámicos, debido a que en algunos casos no es posible identificar un material inicial soluble en agua.

La ***precipitación de una solución*** es otro método de preparación que se usa para las nuevas cerámicas. En el proceso típico, el compuesto cerámico deseado se disuelve a partir del mineral inicial, permitiendo filtrar las impurezas. Entonces se precipita un compuesto intermedio de la solución, que se convierte en el compuesto deseado por calentamiento. Un ejemplo del método de precipitación es el ***proceso Bayer*** para producir alúmina de alta pureza (se usa también en la producción de aluminio). En este proceso el óxido de aluminio se disuelve del material llamado bauxita, para remover los compuestos de hierro y otras impurezas. Luego se precipita el hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) de la solución y se reduce a Al_2O_3 por calentamiento.

La preparación posterior de polvos incluye la clasificación por tamaños y el mezclado antes de darles forma. Se requieren polvos muy finos para las aplicaciones de las nuevas cerámicas, por lo que se deben separar los granos y clasificarlos de acuerdo con su tamaño. Se requiere también el mezclado total de las partículas para evitar segregación, especialmente cuando se combinan diferentes polvos cerámicos.

Frecuentemente se combinan varios aditivos con los polvos iniciales, por lo general en pequeñas cantidades. Estos aditivos incluyen 1) ***plastificantes***, para mejorar la plasticidad y facilidad de trabajo; 2) ***aglutinantes***, para unir las partículas cerámicas en una masa sólida en el producto final, 3) ***agentes humectantes***, para mejorar el mezclado; 4) ***desfloculantes***, que ayudan a prevenir la aglomeración y la unión prematura de los polvos y 5) ***lubricantes***, para reducir la fricción entre los granos cerámicos durante el formado y para reducir la adherencia cuando se retira la pieza del molde.

17.2.2 Formado

Muchos de los procesos de formado para las nuevas cerámicas han sido tomados de la metalurgia de polvos y de la cerámica tradicional. Los métodos de prensado y sinterizado analizados en la sección 16.3 han sido adaptados para los nuevos materiales cerámicos. Se han usado algunas de las técnicas de formado de las cerámicas tradicionales (sección 17.1.2) para formar las nuevas cerámicas, incluido el vaciado deslizante, la extrusión y el prensado seco. Los procesos que describiremos a continuación no se relacionan normalmente con el formado de cerámicas tradicionales, aunque varios de ellos se asocian con la metalurgia de polvos.

Prensado caliente El prensado caliente es similar al prensado seco (sección 17.1.2), excepto porque el proceso se lleva a cabo a temperaturas elevadas; así el sinterizado del pro-

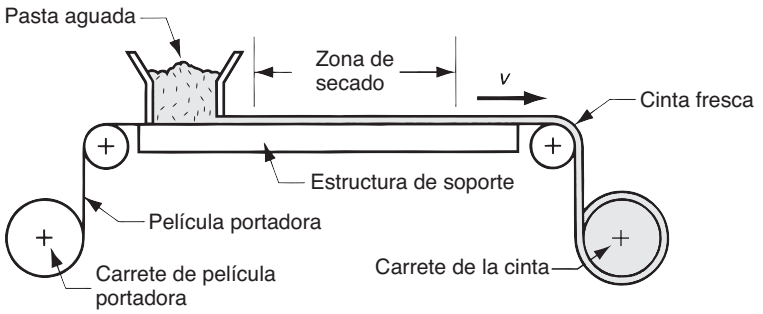


FIGURA 17.10 Proceso de bisturí que se usa para fabricar láminas delgadas de cerámica. El símbolo *v* indica movimiento (*v* = velocidad).

ducto se realiza simultáneamente con el prensado. Esto elimina la necesidad de un paso de cocimiento adicional en la secuencia. Se obtienen densidades más altas y granos de tamaño más fino, pero la vida del troquel se reduce por la abrasión de las partículas calientes contra la superficie del troquel.

Prensado isostático El prensado isostático de las cerámicas es el mismo proceso que se usa en la metalurgia de polvos (sección 16.4.1). Usa presión hidrostática para compactar los polvos cerámicos en todas direcciones, evitando la falta de uniformidad del producto final, problema que se observa frecuentemente en los métodos de prensado uniaxial tradicional.

Procesos de bisturí Este proceso se usa para hacer láminas delgadas de material cerámico. Una aplicación común son las láminas que se usan en la industria electrónica como materiales de sustrato para los circuitos integrados. El proceso se muestra en el diagrama de la figura 17.10. Una pasta aguada cerámica se introduce en una película portadora móvil como el celofán. El espesor de la cerámica en la película portadora se determina por un limpiador llamado ***bisturí***. Al moverse la pasta por debajo de la línea, se seca formando una cinta cerámica fresca flexible. Al final de la línea se enreda la cinta en un carrete para su procesado posterior. La cinta fresca se puede cortar o procesar antes de cocerse.

Moldeo por inyección de polvos (PIM, por sus siglas en inglés) Es el mismo proceso que se usa en metalurgia de polvos (sección 16.4.2), excepto porque los polvos son cerámicos en lugar de metálicos. Las partículas cerámicas se mezclan con un polímero termoplástico que actúa como portador y que proporciona las características apropiadas de flujo a las temperaturas de moldeo. La mezcla se calienta y se inyecta en la cavidad de un molde. Cuando el polímero se enfría y endurece, se abre el molde y se retira la pieza. Debido a que las temperaturas que se necesitan para plastificar el portador son mucho más bajas que las requeridas para efectuar el sinterizado del material cerámico, la pieza sigue fresca después del moldeo. Antes del sinterizado se debe remover el aglutinante plástico. Esto se llama ***desaglomeración*** y se realiza generalmente por una combinación de tratamientos térmicos con solventes.

Las aplicaciones del moldeo por inyección de polvos para los cerámicos son limitadas debido a las dificultades en la desaglomeración y el sintetizado. El cocimiento del polímero es relativamente lento, y su remoción debilita la resistencia de la parte moldeada. Con frecuencia se presentan torceduras y grietas durante el sinterizado. Los productos cerámicos hechos por PIM son especialmente vulnerables a grietas microestructurales que limitan su resistencia.

17.2.3 Sinterizado

Como la plasticidad que se necesita para formar las nuevas cerámicas no se basa en una mezcla con agua, se puede omitir el secado comúnmente requerido para remover el agua de las cerámicas frescas tradicionales en el procesamiento de la mayoría de los nuevos productos cerámicos. Sin embargo, el paso de sinterizado todavía es muy necesario para obtener las máximas resistencia y dureza posibles. Las funciones de sinterizado son las

mismas que antes: 1) unir los granos individuales en una masa sólida, 2) incrementar la densidad y 3) reducir o eliminar la porosidad.

Para sinterizar el material cerámico se usan comúnmente temperaturas de 80 a 90% del punto de fusión. El mecanismo de sinterización es diferente entre las nuevas cerámicas, que se basan predominantemente en un solo compuesto químico (por ejemplo, Al_2O_3), y las cerámicas basadas en arcilla, las cuales comprenden a varios compuestos con diferentes puntos de fusión. En el caso de las nuevas cerámicas, el mecanismo de sinterizado es la difusión de masa a través de las superficies de contacto de las partículas, probablemente acompañada de algún flujo plástico. Este mecanismo ocasiona que los centros de las partículas se muevan para juntarse más; el efecto se traduce en una densificación del material final. En el sinterizado de cerámicas tradicionales, este mecanismo se complica por la fusión de algunos constituyentes y la formación de una fase glaseada que actúa como aglutinante entre los granos.

17.2.4 Acabado

Las piezas hechas con la nueva cerámica requieren algunas veces acabado. En general esta operación tiene uno o más de los siguientes propósitos: 1) incrementar la precisión dimensional, 2) mejorar el acabado de la superficie y 3) hacer cambios menores en la forma de la pieza. Las operaciones de acabado involucran generalmente esmerilado y otros procesos abrasivos (capítulo 25). Se necesita usar abrasivos de diamante para cortar los materiales cerámicos endurecidos.

17.3 PROCESAMIENTO DE CERMETS

Muchos compuestos en matriz metálica (MMC, por sus siglas en inglés) y compuestos en matriz cerámica (CMC) se procesan por métodos de procesamiento particulado. Los ejemplos más prominentes son los carburos cementados y otros cermets.

17.3.1 Carburos cementados

Los carburos cementados son una familia de los materiales compuestos que consisten en partículas de carburos cerámicos incorporadas en un metal aglutinante. Se clasifican como compuestos de matriz metálica debido a que el aglutinante metálico es la matriz que mantiene junta la masa del material; sin embargo, las partículas de carburo constituyen la proporción más grande del material compuesto y fluctúa normalmente entre 80 y 95% en volumen. Los carburos cementados se clasifican técnicamente como cermets, aunque con frecuencia se distinguen de otros materiales en esta clase.

El carburo cementado más importante es el carburo de tungsteno en un aglutinante de cobalto (WC-Co). En esta categoría se incluyen generalmente ciertas mezclas de WC, TiC y TaC en una matriz de Co en las cuales el carburo de tungsteno es el principal componente. Otros carburos cementados incluyen carburo de titanio en níquel (TiC-Ni) y carburo de cromo en níquel (Cr_3C_2-Ni). Estos compuestos se revisaron en la sección 9.2.1, y los ingredientes de carburo se describieron en la sección 7.3.2. Aquí interesa el procesamiento de carburos cementados que se basa en tecnologías particuladas.

Para proveer una pieza fuerte y libre de poros, los polvos de carburo deben sinterizarse con un aglutinante metálico. El cobalto es el que funciona mejor con WC, en lo que el níquel es mejor con TiC y Cr_3C_2. La proporción usual de un aglutinante metálico va de 4% hasta 20%. Los polvos de carburo y el aglutinante metálico se mezclan perfectamente en húmedo en un molino de balines (u otra máquina mezcladora apropiada) para formar un lodo homogéneo. La molienda sirve también para refinar el tamaño de partícula. El lodo se seca después en una atmósfera controlada o al vacío para prevenir oxidación en la preparación para la compactación.

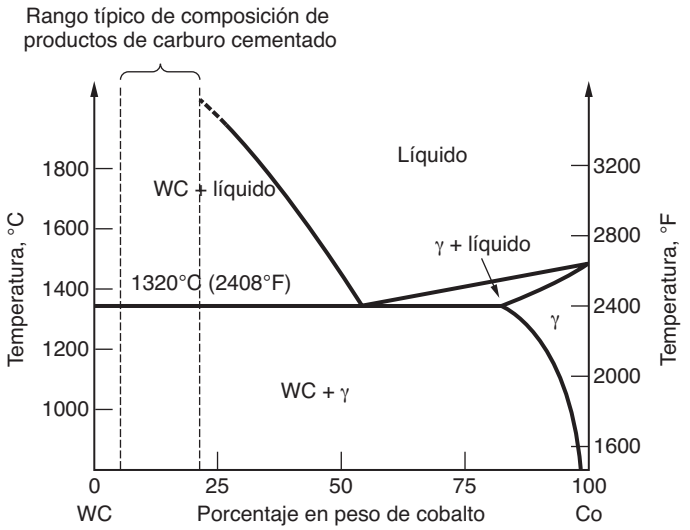
Compactación Se usan varios métodos para formar la mezcla de polvos en un compactado fresco de forma deseada. El proceso más común es el prensado frío, descrito anteriormente y usado para alta producción de piezas de carburo cementado, como insertos para herramientas de corte. Los troqueles que se usan en el prensado frío deben hacerse sobredimensionados para tomar en cuenta la contracción durante el sinterizado. La contracción lineal puede ser de 20% o más. Para alta producción, los troqueles se hacen con revestimiento de WC-Co para reducir el desgaste, debido a la naturaleza abrasiva de las partículas de carburo. Para cantidades más pequeñas, se prensan grandes secciones planas y luego se cortan en piezas más pequeñas de tamaño específico.

Se usan otros métodos de compactación para los productos de carburo cementado, entre los que se incluyen el ***prensado isostático*** y el ***prensado caliente*** para piezas grandes, como troqueles para estirado y balines para molinos, y ***extrusión*** para secciones transversales largas, formas circulares, rectangulares u otras. Cada uno de estos procesos se describió ya sea en este capítulo o en el anterior.

Sinterizado Aunque es posible sinterizar WC y TiC sin un metal aglutinante, el material resultante poseerá algo menos de 100% de la densidad real. La utilización de un aglutinante proporciona una estructura que virtualmente está libre de porosidad.

El sinterizado de WC-Co implica el sinterizado en fase líquida (sección 16.4.5). El proceso puede explicarse con el diagrama de fase binaria para estos constituyentes en la figura 17.11. En el diagrama se identifica el rango de composición típica para los productos comerciales de carburo cementado. Las temperaturas típicas de sinterizado para WC-Co se encuentran entre 1 370 ºC a 1 425 ºC (2 500 ºF a 2 600 ºF), las cuales están debajo del punto de fusión del cobalto, que es 1 495 ºC (2 716 ºF). Por consiguiente, el metal aglutinante puro no funde a la temperatura de sinterizado. Sin embargo, como muestra el diagrama de fase, el WC se disuelve en el Co en el estado sólido. Durante el tratamiento por calor, el WC se disuelve gradualmente dentro de la fase gamma y su punto de fusión se reduce, de tal forma que finalmente el metal se funde. A medida que se forma la fase líquida, ésta fluye y empapa las partículas de WC, y además disuelve el sólido. La presencia del metal fundido también sirve para remover gases de las regiones internas de la compactación. Estos mecanismos se combinan para efectuar un rearreglo entre las partículas remanentes de WC, lo cual produce un empaquetamiento más estrecho, y a su vez también una densificación y una contracción significativas de la masa del WC-Co. Posteriormente, durante el enfriado en el ciclo de sinterizado, el carburo disuelto se precipita y se deposita dentro de los cristales ya existentes, para formar una estructura consistente, la cual es empapada completamente por el aglutinante de Co.

FIGURA 17.11 Diagrama de fase WC-Co. Fuente: [6].



Operaciones secundarias Se requieren procesamientos subsecuentes después del sinterizado para lograr un control dimensional adecuado de las piezas de carburo cementado. El esmerilado con ruedas abrasivas de diamante o de otro material muy duro es la operación secundaria más común desempeñada para este propósito. Otros procesos usados para formar los carburos cementados duros incluyen el maquinado con descarga eléctrica y el maquinado ultrasónico, dos procesos de remoción de material no tradicionales que se analizan en el capítulo 26.

17.3.2 Otros cermets y compuestos de matriz cerámica

Además de los carburos cementados, otros cermets se basan en óxidos cerámicos como el Al_2O_3 y MgO. El cromo es un aglutinante metálico común que se usa en estos materiales compuestos. Las proporciones de cerámica a metal cubren un rango más amplio que el de los carburos cementados; en algunos casos el metal es el principal ingrediente. Estos cermets se transforman en productos útiles mediante los mismos métodos de formado que se usan para los carburos cementados.

La tecnología común de los compuestos en matriz cerámica (sección 9.3) incluye materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3, BN, Si_3N_4 y vidrio) reforzados con fibras de carbono, SiC o Al_2O_3. Si las fibras son bigotillos (fibras que consisten en un monocristal), estos CMC pueden procesarse por métodos particulados que se usan para las nuevas cerámicas (sección 17.2).

17.4 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE PRODUCTOS

Si la aplicación es correcta, los materiales cerámicos tienen propiedades especiales que los hacen atractivos para los diseñadores. Las siguientes recomendaciones para el diseño, recopiladas por Bralla [2] y otras fuentes, se aplican a los materiales cerámicos tanto tradicionales como nuevos, aunque es más probable que los diseñadores encuentren oportunidades para los nuevos cerámicos en productos de ingeniería. En general, estos mismos lineamientos se aplican para carburos cementados.

- Los materiales cerámicos son varias veces más fuertes a la compresión que a la tensión; los componentes deben diseñarse para soportar esfuerzos de compresión, mas no esfuerzos de tracción.
- Las cerámicas son frágiles y casi no poseen ductilidad. Las piezas cerámicas no deben usarse en aplicaciones que impliquen cargas de impacto o altos esfuerzos que puedan causar fractura.
- Aunque muchos procesos de formado de cerámicos permiten formas complejas, es deseable mantener formas simples por razones económicas y técnicas. Debe evitarse perforaciones profundas, canales y muescas, así como grandes proyecciones en voladizo.
- Los bordes exteriores y las esquinas deben contener radios o chaflanes, y las esquinas inferiores deben ser redondeadas. Estos reglamentos se violan, por supuesto, en las aplicaciones para herramientas de corte, en los cuales los bordes cortantes deben ser agudos para que puedan funcionar. Los bordes de corte se fabrican frecuentemente con radios o chaflanes muy pequeños para protegerlos del desportillado microscópico que puede conducir a fallas.
- La contracción de la pieza en el secado y cocimiento (para cerámicas tradicionales), y en sinterizado (para cerámicas nuevas) puede ser significativa y el diseñador debe tomarla en cuenta para establecer dimensiones y tolerancias. Esto es principalmente un problema para los ingenieros de manufactura que deben determinar las tolerancias apropiadas para que las dimensiones finales estén dentro de las tolerancias especificadas.
- Se debe evitar las roscas en las piezas cerámicas. Son difíciles de fabricar y no tienen la resistencia adecuada en el servicio después de su fabricación.

REFERENCIAS

[1] Bhowmick, A. K., Bradley Pulverizer Company, Allentown, Pa., personal communication, febrero, 1992.

[2] Bralla, J. G. (editor-in-chief), ***Design for Manufacturing Handbook***, 2a. ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1999.

[3] Hlavac, J., ***The Technology of Glass and Ceramics***, Elsevier Scientific Publishing Co., Nueva York, 1983.

[4] Kingery, W. D., Bowen, H. K. y Uhlmann, D. R., ***Introduction to Ceramics***, 2a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.

[5] Richerson, D. W., ***Modern Ceramic Engineering***, 2a. ed., Marcel Dekker, Inc., Nueva York, 1992.

[6] Schwarzkopf, P. y Kieffer, R., ***Cemented Carbides***, The Macmillan Co., Nueva York, 1960.

[7] Singer, F. y Singer, S. S., ***Industrial Ceramics***, Chemical Publishing Co., Nueva York, 1963.

[8] Somiya, S., editor, ***Advanced Technical Ceramics***, Academic Press, Inc., San Diego, Calif., 1989.

PREGUNTAS DE REPASO

17.1. ¿Cuál es la diferencia entre las cerámicas tradicionales y las nuevas cerámicas desde el punto de vista de las materias primas?

17.2. Mencione los pasos básicos en la secuencia de procesamiento de las cerámicas tradicionales.

17.3. ¿Cuál es la diferencia técnica entre triturado y molienda en la preparación de materias primas para las cerámicas tradicionales?

17.4. Describa el proceso de vaciado deslizante en el procesamiento de las cerámicas tradicionales.

17.5. Mencione y describa brevemente algunos de los métodos de formado plástico que se usan para formar los productos cerámicos tradicionales.

17.6. ¿En qué consiste el proceso de torneado ligero?

17.7. ¿Cuál es la diferencia entre el prensado seco y el prensado semiseco de las piezas de cerámica tradicional?

17.8. ¿Qué le sucede a un material cerámico cuando se sinteriza?

17.9. ¿Cuál es el nombre del horno que se usa para cocer artículos cerámicos?

17.10. ¿Qué es el glaseado en el procesamiento de cerámicas tradicionales?

17.11. ¿Por qué es importante el secado en el procesamiento de las cerámicas tradicionales, no requerido usualmente en el procesamiento de las nuevas cerámicas?

17.12. ¿Por qué es más importante la preparación de las materias primas en el procesamiento de las nuevas cerámicas que para las cerámicas tradicionales?

17.13. ¿En qué consiste el proceso de secado por congelación que se usa para fabricar ciertos polvos de las nuevas cerámicas?

17.14. Describa el proceso del bisturí.

17.15. El sinterizado en fase líquida se usa para compactados de WC-Co, aun cuando las temperaturas de sinterizado están abajo del punto de fusión de WC y Co. ¿Cómo es posible esto?

17.16. Mencione algunas recomendaciones de diseño para piezas cerámicas.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 16 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

17.1. El siguiente equipo se usa para triturar y moler minerales en la preparación de materias primas para cerámicas tradicionales. ¿Cuál de las piezas que se mencionan se usa para moler? *a*) molino de balines, *b*) molino de martillo, *c*) triturador de quijadas, *d*) triturador de rodillos o *e*) molino de rodillos.

17.2. ¿Cuál de los siguientes compuestos se vuelve un material plástico y fácil de formar cuando se mezcla con cantidades adecuadas de agua? *a*) óxido de aluminio, *b*) óxido de hidrógeno, *c*) silicato hidratado de aluminio o *d*) bióxido de silicio.

17.3. ¿A qué porcentaje de agua se vuelve la arcilla un material plástico adecuado para los procesos de formación plástica de las cerámicas tradicionales? *a*) 5%, *b*) 10%, *c*) 20% o *d*) 40%.

17.4. ¿Cuál de los siguientes procesos no es un método de formado plástico que se usa para las cerámicas tradicionales? (hay tres respuestas correctas): *a*) prensado seco, *b*) extrusión, *c*) tejueleado, *d*) torneado ligero, *e*) moldeo al torno con estirado, *f*) vaciado deslizante o *g*) repujado.

17.5. El término pieza fresca se refiere en cerámica a una parte que ha sido formada, pero todavía no cocida: *a*) verdadero o *b*) falso.

17.6. En el producto final de un material cerámico nuevo policristalino, la resistencia aumenta con el tamaño del grano: *a*) verdadero o *b*) falso.

17.7. ¿Cuál de los siguientes procesos para materiales cerámicos nuevos realiza el formado y sinterizado simultáneamente? *a*) proceso del bisturí, *b*) secado por congelación, *c*) prensado caliente, *d*) moldeo por inyección o *e*) prensado isostático.

17.8. ¿Cuál de los siguientes no corresponde a los propósitos de las operaciones de acabado que se usan para piezas hechas con las nuevas cerámicas? (dos mejores respuestas): *a*) aplicar un recubrimiento superficial, *b*) galvanoplastia la superficie, *c*) mejorar el acabado de la superficie, *d*) incrementar la precisión dimensional o *e*) endurecer por trabajo la superficie.

17.9. ¿Cuál de los siguientes términos describe mejor lo que es un carburo cementado (una respuesta mejor): *a*) cerámica, *b*) cermet, *c*) compuesto, *d*) metal, *e*) nueva cerámica o *f*) cerámica tradicional.

17.10. ¿Cuál de las siguientes formas geométricas debe evitarse en el diseño de los componentes estructurales hechos de nuevas cerámicas (tres respuestas mejores): *a*) agujeros profundos, *b*) esquinas interiores redondeadas, *c*) esquinas exteriores redondeadas, *d*) bordes agudos, *e*) secciones delgadas o *f*) cuerdas?

Parte V

Formado de metal y trabajo de láminas metálicas

18 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

18.1 Panorama del formado de metales
18.2 Comportamiento del material en el formado de metales
18.3 Efecto de la temperatura en el formado de metales
18.4 Efecto sobre la velocidad de deformación
18.5 Fricción y lubricación en el formado de metales

El ***formado de metales*** incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un ***troquel*** para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por tanto, el metal se deforma para tomar la forma que determina la forma del troquel. El formado de metales domina el tipo de operaciones de formado que se identifican en el capítulo 1 como ***procesos de deformación*** (figura 1.4).

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de formado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son por lo general una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades las afecta la temperatura. La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del formado de metales. En este capítulo se examinarán dichos aspectos, pero primero se da una visión general de los procesos de formado de metales.

18.1 PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

Los procesos del formado se pueden clasificar en: 1) procesos de deformación volumétrica y 2) procesos de trabajo de láminas metálicas. Estas dos categorías se cubren en detalle en los capítulos 19 y 20, respectivamente. Cada categoría incluye diferentes tipos de operaciones de formado, como se indica en la figura 18.1.