

Segunda edición
(Correspondiente a la 9ª edición original)

CIENCIA E INGENIERÍA DE
MATERIALES

Segunda edición
(Correspondiente a la 9ª edición original)

CIENCIA E INGENIERÍA DE
MATERIALES

WILLIAM D. CALLISTER, JR.
Department of Metallurgical Engineering
The University of Utah

DAVID G. RETHWISCH
Department of Chemical and Biochemical Engineering
The University of Iowa

Versión española traducida por

PERE MOLERA SOLÀ

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica
Profesor Honorífico de la Universidad de Barcelona

NÚRIA SALÁN BALLESTEROS

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica
Universidad Politécnica de Cataluña



**EDITORIAL
REVERTÉ**

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Registro bibliográfico (ISBD)

Callister, William D., Jr

[Materials Science and Engineering. Español]

Ciencia e ingeniería de materiales / William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch ; versión española traducida por: Pere Molera Solà y Núria Salán Ballesteros.– 2ª ed. – Barcelona : Reverté, 2016.

XX, 904, [4] p. : il. col. ; 27 cm.

Traducción de : Materials Science and Engineering , Ninth Edition. – Glosario. Índice.

DL B 875-2016 – ISBN 978-84-291-7251-5

1. Materiales. 2. Ingeniería. I. Rethwisch, David G., coaut. II. Molera Solà, Pere, trad. III. Salán Ballesteros, Núria, trad. IV. Título.

620

Título de la obra original:

Materials Science and Engineering. 9th Edition

Edición original en lengua inglesa publicada por

John Wiley & Sons, Inc.

Copyright © 2011, 2015 John Wiley & Sons. All Rights Reserved

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 2016

ISBN: 978-84-291-7251-5

Versión española traducida por:

Pere Molera Solà

Doctor en Ciencias Químicas

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

Profesor Honorífico de la Universidad de Barcelona

y

Núria Salán Ballesteros

Doctora en Ciencia de Materiales e Ingeniería Metalúrgica

Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

Universidad Politécnica de Cataluña

DISEÑO DE LA CUBIERTA: DAVID KIMURA + GABRIELA VARELA

MAQUETACIÓN: REVERTÉ-AGUILAR

Imagen de la cubierta: "Scanning Electron Microscope Image of the Seed Inside the MOF Crystals" por Dr. Paolo Falcaro y Dr. Dario Buso, usado bajo CC BY 3.0 / Recortada del original.

www.scienceimage.csiro.au/image/11684/scanning-electron-microscope-image-of-the-seed-inside-the-mof-crystals/creativecommons.org/licenses/by/3.0/

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

Fax: (34) 93 419 51 89

08029 Barcelona. España

reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Impreso en España - *Printed in Spain*

Depósito Legal: DL B 875-2016

Impresión: Ulzama

1437

*Dedicado a
Bill Stenquist, editor y amigo*

En esta nueva edición se han mantenido los objetivos y planteamientos de las ediciones anteriores en relación con la enseñanza de Ciencia e Ingeniería de Materiales. El **primero y más importante objetivo** es dar a conocer los fundamentos básicos con un nivel adecuado para el estudiantado universitario que haya cursado materias básicas de cálculo, química y física.

El **segundo objetivo** es presentar cada tema en un orden lógico, de lo más simple a lo más complejo. Cada capítulo se sustenta en el contenido de los anteriores.

El **tercer objetivo**, o la filosofía, que se intenta mantener a lo largo del texto, es que si vale la pena tratar un tema o concepto, entonces vale la pena tratarlo con el detalle suficiente y en la medida en que el estudiantado tenga la oportunidad de entenderlo plenamente sin tener que consultar otras fuentes; además, en la mayoría de los casos se proporciona algún contenido práctico relevante.

El **cuarto objetivo** es incluir en el libro características que permitan acelerar el proceso de aprendizaje. Estas ayudas incluyen:

- Numerosas ilustraciones y fotografías, que ahora se presentan a todo color, para ayudar a visualizar lo que se está presentando.
- “Objetivos de aprendizaje”, para focalizar la atención del estudiantado en lo que se debería captar de cada capítulo.
- Secciones “¿Por qué estudiar...?” y “Contenidos Innovadores”, así como casos de estudio que generan interés para iniciar discusiones sobre el tema.
- “Autoevaluación” preguntas que ponen a prueba la comprensión del estudiantado acerca del tema en cuestión a nivel conceptual.
- Términos clave y descripciones de las ecuaciones fundamentales, destacados en los márgenes para una rápida localización.
- Cuestiones y problemas al final de cada capítulo, diseñados para facilitar la comprensión progresiva de los conceptos y la asimilación de competencias en el estudiantado.
- Respuestas a los problemas seleccionados, para que el estudiantado pueda comprobar su evolución y el trabajo realizado.
- Un glosario, una lista global de símbolos y referencias para facilitar la comprensión de los temas tratados.
- Correlaciones procesado, estructura, propiedades y desarrollo, junto a mapas conceptuales de resumen para los cuatro grupos de materiales (aceros, vidrios-cerámicos, fibras poliméricas, y semiconductores de silicio), que integran los conceptos importantes desarrollados capítulo a capítulo
- Secciones “Contenidos Innovadores” que dan relevancia a la cobertura de actualidad con debates acerca de materiales habituales y de interés, y sus aplicaciones.

El **quinto objetivo** es mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje mediante el uso de nuevas tecnologías al alcance de la mayoría de profesorado y estudiantado de ingeniería en la actualidad.

Nuevos contenidos

Se han considerado cambios importantes en esta nueva edición. Uno de los más significativos es la incorporación de varias secciones nuevas, así como revisiones/ampliaciones de otras secciones. Estos cambios incluyen:

- Reorganización en la secuencia y el contenido de varios capítulos. Estos cambios responden a las sugerencias a ediciones anteriores.
- Numerosos problemas de ejemplo, nuevos y revisados.
- Tablas revisadas, ampliadas y actualizadas.
- Dos nuevos casos de estudio: “El fallo de los barcos Liberty” (Capítulo 1) y “El uso de materiales compuestos en el Boeing 787 Dreamliner” (Capítulo 16).
- Hibridación de enlaces de carbono (Capítulo 2)
- Revisión de la discusión sobre planos y direcciones cristalográficos para incluir su uso en las ecuaciones de determinación de los índices planares y direccionales (Capítulo 3)
- Exposición revisada sobre la determinación del tamaño de grano (Capítulo 6)
- Nueva sección sobre la estructura de fibras de carbono (Capítulo 14)
- Revisión y ampliación de los temas sobre estructuras, propiedades y aplicaciones de nanocarbonos: fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno (Capítulo 14)
- Revisión y ampliación de los temas sobre compuestos estructurales: compuestos laminares y paneles sándwich (Capítulo 16)
- Nueva sección sobre la estructura, propiedades y aplicaciones de los materiales nanocompuestos (Capítulo 16)

Recursos para estudiantes www.reverte.com/microsites/callister2e

En este sitio los estudiantes pueden encontrar importantes recursos que complementan el texto; estos incluyen:

- **Respuestas a las preguntas de Autoevaluación** que se encuentran repartidas a lo largo de todo texto.
- **Biblioteca de Casos de Estudio** (en inglés). Una forma de demostrar los principios de la ingeniería es a través de casos de estudios: análisis de las estrategias de resolución de problemas aplicados a ejemplos reales de aplicaciones/dispositivos/fallos encontrados en ingeniería. Se proporcionan los cinco casos de estudio siguientes: (1) Selección de Materiales para un eje cilíndrico sometido a tensiones de torsión; (2) Muelle para válvula de automoción; (3) Fallo de un eje trasero de automóvil; (4) Sustitución de articulación de cadera humana; y (5) Traje de protección química.
- **Módulo de Ingeniería Mecánica (IM)** (en inglés). Este módulo aborda temas de ciencia de materiales e ingeniería que no están contemplados en el libro y que son relevantes en ingeniería mecánica.

Recursos para profesores www.reverte.com/microsites/callister2e

En este enlace, los profesores que utilicen esta obra como libro de texto en sus cursos pueden acceder, previo registro, a varios recursos que les facilitarán la tarea de preparar sus clases. Entre los recursos disponibles se incluyen:

- **Todos los recursos que se encuentran disponibles para los estudiantes.**
- **Manual de soluciones para profesores** (en inglés). Soluciones detalladas de todas las cuestiones y problemas de final de capítulo (tanto en Word[®] como en formato PDF Adobe Acrobat[®]).

- **Galería de imágenes.** Ilustraciones del libro. El profesorado puede usarlas en pruebas de evaluación u otros ejercicios que crea conveniente para el estudiantado.
- **Diapositivas Art PowerPoint®.** Imágenes en PowerPoint que el profesorado puede utilizar fácilmente para crear sus propias diapositivas de PowerPoint.
- **Presentaciones en PowerPoint.** Estas diapositivas, desarrolladas por los autores y Peter M. Anderson (The Ohio State University), siguen la línea principal de los temas del texto, e incluyen materiales tomados del texto, así como otras fuentes. Las diapositivas están disponibles tanto en formato PDF de Adobe Acrobat® como en PowerPoint®.
- **Soluciones para los Casos de Estudio** (en inglés).
- **Soluciones a los problemas del módulo Web de Ingeniería Mecánica** (en inglés).

Feedback

Tenemos un sincero interés en conocer las necesidades de profesorado y estudiantado de la comunidad de Ciencia e Ingeniería de Materiales, por lo que solicitamos sus comentarios acerca de esta edición. Los comentarios, sugerencias y críticas pueden ser enviados a los autores por correo electrónico a la siguiente dirección: promoción@reverte.com.

Agradecimientos

Desde que emprendimos la tarea de escribir esta edición y todas las anteriores, muchos profesores y estudiantes, demasiados para mencionarlos a todos, compartieron con nosotros sus opiniones sobre este trabajo e hicieron valiosas contribuciones para hacerlo más eficaz como herramienta de enseñanza y aprendizaje. A todos aquellos que nos han ayudado, expresamos nuestro sincero agradecimiento.

Queremos expresar nuestro reconocimiento a todas aquellas personas que han hecho contribuciones a esta edición.

Estamos especialmente en deuda con Eric Hellstrom y Theo Siegrist, de la Universidad Estatal de Florida, por sus comentarios y sugerencias para esta edición.

Agradecemos además a los numerosos profesores que participaron en la encuesta de comercialización de otoño 2011; sus valiosas contribuciones fueron la fuerza que impulsó muchos de los cambios y adiciones contemplados en esta edición.

Queremos agradecer también a Dan Sayre, Editor Ejecutivo, Jennifer Welter, Senior Product Diseñador y Jessica Knecht, Asistente del Programa Editorial, por su orientación y asistencia en esta revisión. Por último, pero no menos importante, apreciamos profunda y sinceramente el estímulo continuo y el apoyo de nuestras familias y amigos.

William D. Callister, Jr.
David G. Rethwisch

RELACIÓN DE SÍMBOLOS xviii

1. Introducción 1

- Objetivos de aprendizaje 2
- 1.1 Perspectiva histórica 2
- 1.2 Ciencia de los materiales e ingeniería 2
- 1.3 ¿Por qué estudiar ciencia e ingeniería de materiales? 4
 - Caso de Estudio: Rotura de los barcos Liberty 5
- 1.4 Clasificación de los materiales 6
 - Caso de Estudio: Envases de bebidas gaseosas 11
- 1.5 Materiales avanzados 12
- 1.6 Necesidad de materiales modernos 14
 - Resumen 15
 - Referencias 15
 - Cuestiones y problemas 16

2. Estructura atómica y enlaces interatómicos 17

- Objetivos de aprendizaje 18
- 2.1 Introducción 18
 - ESTRUCTURA ATÓMICA 18**
- 2.2 Conceptos fundamentales 18
- 2.3 Los electrones en los átomos 20
- 2.4 La tabla periódica 26
 - ENLACES ATÓMICOS EN SÓLIDOS 28**
- 2.5 Fuerzas y energías de enlace 28
- 2.6 Enlaces interatómicos primarios 30
- 2.7 Enlace secundario o de Van der Waals 37
 - Contenidos Innovadores: Agua (dilatación por congelación) 40
- 2.8 Enlaces mixtos 41
- 2.9 Moléculas 42
- 2.10 Correlaciones entre tipo de enlace y clasificación 42
 - Resumen 43
 - Referencias 44
 - Cuestiones y problemas 44

3. Fundamentos de cristalografía 47

- Objetivos de aprendizaje 48
- 3.1 Introducción 48
 - ESTRUCTURAS CRISTALINAS 48**
- 3.2 Conceptos fundamentales 48
- 3.3 Celdas unitarias 49
- 3.4 Sistemas cristalinos 50
 - COORDENADAS CRISTALOGRÁFICAS, DIRECCIONES Y PLANOS 51**
- 3.5 Coordenadas puntuales 52
- 3.6 Direcciones cristalográficas 54
- 3.7 Planos cristalográficos 60
 - MATERIALES CRISTALINOS Y NO CRISTALINOS 65**
- 3.8 Monocristales 65
- 3.9 Materiales policristalinos 65
- 3.10 Anisotropía 67
- 3.11 Sólidos no cristalinos 67
 - Resumen 68
 - Referencias 69
 - Cuestiones y problemas 69

4. Estructura en sólidos cristalinos 73

- Objetivos de aprendizaje 74
- 4.1 Introducción 74
 - ESTRUCTURAS METÁLICAS CRISTALINAS 74**
- 4.2 Estructura cúbica centrada en las caras 75
- 4.3 Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo 76
- 4.4 Estructura cristalina hexagonal compacta 77
- 4.5 Cálculo de densidad en metales 80
 - ESTRUCTURAS CRISTALINAS EN CERÁMICOS 81**
- 4.6 Geometrías en estructuras iónicas 82
- 4.7 Estructuras cristalinas tipo AX 85
- 4.8 Estructuras cristalinas tipo A_mX_p 86
- 4.9 Estructuras cristalinas tipo $A_mB_nX_p$ 86
- 4.10 Cálculos de densidad en cerámicos 88

xii • Contenido

- 4.11 Cerámicos de base silicato 89
 - 4.12 Carbono 93
 - 4.13 Cristalinidad en polímeros 94
 - 4.14 Polimorfismo y alotropía 97
 - 4.15 Disposiciones atómicas 97
 - 4.16 Densidades lineales y planares 97
 - Contenidos Innovadores: Estaño (transformación alotrópica) 98
 - 4.17 Estructuras cristalinas compactas 100
- DIFRACCIÓN DE RAYOS X:
DETERMINACIÓN DE ESTRUCTURAS
CRISTALINAS 103**
- 4.18 El fenómeno de la difracción 103
 - 4.19 Difracción de rayos X y Ley de Bragg 105
 - 4.20 Técnicas de difracción 106
 - Resumen 109
 - Referencias 111
 - Cuestiones y problemas 111
 - Problema de diseño 116

5. Estructuras de los polímeros 117

- Objetivos de aprendizaje 118
- 5.1 Introducción 118
- 5.2 Moléculas de hidrocarburos 118
- 5.3 Moléculas poliméricas 121
- 5.4 La química de moléculas poliméricas 121
- 5.5 Peso molecular 125
- 5.6 Forma molecular 128
- 5.7 Estructura molecular 130
- 5.8 Configuraciones moleculares 131
- 5.9 Polímeros termoplásticos y termoestables 134
- 5.10 Copolímeros 135
- 5.11 Cristales poliméricos 137
 - Resumen 139
 - Referencias 140
 - Cuestiones y problemas 141

6. Imperfecciones en sólidos 143

- Objetivos de aprendizaje 144
 - 6.1 Introducción 144
- DEFECTOS PUNTALES 144**
- 6.2 Defectos puntuales en los metales 144
 - 6.3 Defectos puntuales en cerámicos 146
 - 6.4 Impurezas en sólidos 149
 - 6.5 Defectos puntuales en polímeros 153
 - 6.6 Especificaciones de composición 154
- IMPERFECCIONES DIVERSAS 158**
- 6.7 Dislocaciones - defectos lineales 158
 - 6.8 Defectos interfaciales 161

- Contenidos Innovadores: Catalizadores (y defectos superficiales) 164
- 6.9 Defectos volumétricos 165
- 6.10 Vibraciones atómicas 165

EL EXAMEN MICROSCÓPICO 166

- 6.11 Conceptos básicos de microscopía 166
- 6.12 Técnicas microscópicas 167
- 6.13 Determinación del tamaño de grano 171
 - Resumen 174
 - Referencias 176
 - Cuestiones y problemas 176
 - Problema de diseño 179

7. Difusión 180

- Objetivos de aprendizaje 181
- 7.1 Introducción 181
- 7.2 Mecanismos de difusión 182
- 7.3 Difusión en estado estacionario 183
- 7.4 Difusión en estado no estacionario 185
- 7.5 Factores de la difusión 189
- 7.6 Difusión en semiconductores 194
 - Contenidos Innovadores: Aluminio para las interconexiones de circuitos integrados 197
- 7.7 Otros tipos de difusión 198
- 7.8 Difusión en materiales iónicos y poliméricos 198
 - Resumen 201
 - Referencias 203
 - Cuestiones y problemas 203
 - Problema de diseño 206

8. Propiedades mecánicas de los metales 208

- Objetivos de aprendizaje 209
 - 8.1 Introducción 209
 - 8.2 Conceptos de tensión y deformación 210
 - 8.3 Deformación elástica 214
 - 8.4 Deformación plástica 220
 - 8.5 Dureza 231
- VARIABILIDAD DE PROPIEDADES Y FACTORES DE DISEÑO Y SEGURIDAD 237**
- 8.6 Variabilidad de las propiedades de materiales 237
 - 8.7 Factores de diseño/seguridad 239
 - Resumen 243
 - Referencias 245
 - Cuestiones y problemas 245
 - Problema de diseño 251

9. Dislocaciones y mecanismos de endurecimiento 253

- Objetivos de aprendizaje 254
- 9.1 Introducción 254
- DISLOCACIONES Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA 254**
- 9.2 Conceptos fundamentales 255
- 9.3 Características de las dislocaciones 257
- 9.4 Sistemas de deslizamiento 258
- 9.5 Deslizamiento en monocristales 260
- 9.6 Deformación plástica de materiales policristalinos 263
- 9.7 Deformación por maclado 265
- MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO EN LOS METALES 266**
- 9.8 Endurecimiento por reducción del tamaño de grano 266
- 9.9 Endurecimiento por disolución sólida 268
- 9.10 Endurecimiento por deformación 269
- RECOCIDO DE RECUPERACIÓN, RECRISTALIZACIÓN Y CRECIMIENTO DE GRANO 272**
- 9.11 Recuperación (recocido de recuperación) 272
- 9.12 Recristalización 273
- 9.13 Crecimiento de grano 277
- Resumen 279*
- Referencias 281*
- Cuestiones y problemas 281*
- Problemas de diseño 284*

10. Rotura 285

- Objetivos de aprendizaje 286
- 10.1 Introducción 286
- FRACTURA 287**
- 10.2 Fundamentos de fractura 287
- 10.3 Fractura dúctil 287
- 10.4 Fractura frágil 289
- 10.5 Principios de mecánica de la fractura 291
- 10.6 Ensayos de tenacidad de fractura 299
- FATIGA 304**
- 10.7 Tensiones cíclicas 304
- 10.8 La curva S-N 306
- 10.9 Iniciación y propagación de fisuras 310
- 10.10 Factores que afectan a la vida a fatiga 312
- 10.11 Factores ambientales 314
- TERMOFLUENCIA 315**
- 10.12 Fluencia generalizada 315
- 10.13 Efecto de la tensión y de la temperatura 316
- 10.14 Métodos de extrapolación de datos 319
- 10.15 Aleaciones para aplicaciones de alta temperatura 320

- Resumen 321*
- Referencias 324*
- Cuestiones y problemas 324*
- Problema de diseño 328*

11. Diagramas de fases 329

- Objetivos de aprendizaje 330
- 11.1 Introducción 330
- DEFINICIONES Y CONCEPTOS FUNDAMENTALES 330**
- 11.2 Límite de solubilidad 331
- 11.3 Fases 332
- 11.4 Microestructura 332
- 11.5 Equilibrio de fases 332
- 11.6 Diagramas de fases unitarios (un componente) 333
- DIAGRAMAS DE FASES BINARIOS (DOS COMPONENTES) 334**
- 11.7 Sistemas isomorfos binarios 335
- 11.8 Interpretación de diagramas de fases 337
- 11.9 Desarrollo de microestructuras en aleaciones isomorfas 341
- 11.10 Propiedades mecánicas de aleaciones isomorfas 342
- 11.11 Sistemas eutécticos binarios 343
- 11.12 Desarrollo de microestructuras en aleaciones eutécticas 348
- Contenidos Innovadores: Soldaduras libres de plomo 349
- 11.13 Diagramas de equilibrio con fases o compuestos intermedios 355
- 11.14 Reacciones eutectoide y peritética 358
- 11.15 Transformaciones de fases congruentes 359
- 11.16 Cerámicos y diagramas de fases ternarios 360
- 11.17 La regla de las fases de Gibbs 360
- EL SISTEMA HIERRO-CARBONO 363**
- 11.18 Diagrama de fases hierro-carburo de hierro (Fe-Fe₃C) 363
- 11.19 Desarrollo de microestructuras en aleaciones hierro-carbono 366
- 11.20 Influencia de otros elementos de aleación 374
- Resumen 374*
- Referencias 377*
- Cuestiones y problemas 377*

12. Transformaciones de fase 384

- Objetivos de aprendizaje 385
- 12.1 Introducción 385
- TRANSFORMACIONES DE FASES 385**
- 12.2 Conceptos fundamentales 385

xiv • Contenido

- 12.3 Cinética de transformaciones de fase 386
- 12.4 Transformaciones metaestables frente a estados de equilibrio 397
- VARIACIONES MICROESTRUCTURALES Y DE PROPIEDADES EN ALEACIONES HIERRO-CARBONO 398**
- 12.5 Diagramas de transformación isotérmica 398
- 12.6 Diagramas de transformación por enfriamiento continuo 409
- 12.7 Comportamiento mecánico de aceros al carbono 412
- 12.8 Martensita revenida 416
- 12.9 Revisión de transformaciones de fase y propiedades mecánicas de los aceros 419
- Contenidos Innovadores: Aleaciones con memoria de forma 422
- Resumen* 425
- Referencias* 427
- Cuestiones y problemas* 427
- Problemas de diseño* 431

13. **Propiedades y aplicaciones de los metales 432**

- Objetivos de aprendizaje 433
- 13.1 Introducción 433
- ALEACIONES FÉRREAS 433**
- 13.2 Aceros 434
- 13.3 Fundiciones de hierro 439
- ALEACIONES NO FÉRREAS 445**
- 13.4 Cobre y sus aleaciones 446
- 13.5 Aluminio y sus aleaciones 447
- 13.6 Magnesio y sus aleaciones 450
- 13.7 Titanio y sus aleaciones 451
- 13.8 Metales refractarios 452
- 13.9 Superaleaciones 454
- 13.10 Metales nobles 455
- 13.11 Otras aleaciones no férreas 455
- Contenidos Innovadores: Aleaciones metálicas utilizadas en las monedas de euro 456
- Resumen* 457
- Referencias* 458
- Cuestiones y problemas* 458
- Problemas de diseño* 458

14. **Propiedades y aplicaciones de los cerámicos 460**

- Objetivos de aprendizaje 461
- 14.1 Introducción 461
- DIAGRAMAS DE FASES EN MATERIALES CERÁMICOS 461**
- 14.2 Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ 462
- 14.3 Sistema $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 462

- 14.4 Sistema $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ 463
- 14.5 Sistema $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 464

PROPIEDADES MECÁNICAS 465

- 14.6 Fractura frágil de los materiales cerámicos 465
- 14.7 Comportamiento tensión-deformación 469
- 14.8 Mecanismos de deformación plástica 471
- 14.9 Otras consideraciones mecánicas 473

TIPOS Y APLICACIONES DE LOS CERÁMICOS 475

- 14.10 Vidrios 476
- 14.11 Vitrocerámicas 476
- 14.12 Productos de arcilla 478
- 14.13 Refractarios 478
- 14.14 Abrasivos 480
- 14.15 Cementos 481
- 14.16 Carbono 482
- 14.17 Cerámicos avanzados 484
- Resumen* 489
- Referencias* 492
- Cuestiones y problemas* 492
- Problemas de diseño* 494

15. **Características y aplicaciones de los polímeros 495**

- Objetivos de aprendizaje 496
- 15.1 Introducción 496
- COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS POLÍMEROS 496**
- 15.2 Comportamiento esfuerzo-deformación 496
- 15.3 Deformación macroscópica 498
- 15.4 Deformación viscoelástica 499
- 15.5 Fractura de polímeros 503
- 15.6 Características mecánicas 505
- MECANISMOS DE DEFORMACIÓN Y DE ENDURECIMIENTO PARA POLÍMEROS 506**
- 15.7 Deformación de polímeros semicristalinos 506
- 15.8 Factores que influyen en las propiedades mecánicas de polímeros semicristalinos 508
- Contenidos Innovadores: Película de polímero retráctil (*shrink-wrap*) 512
- 15.9 Deformación de elastómeros 512
- CRISTALIZACIÓN, FUSIÓN Y TRANSICIÓN VÍTREA EN POLÍMEROS 514**
- 15.10 Cristalización 515
- 15.11 Fusión 516
- 15.12 La transición vítrea 516
- 15.13 Temperaturas de fusión y de transición vítrea 516
- 15.14 Factores que influyen en la temperatura de fusión y de transición vítrea 518

TIPOS DE POLÍMEROS 520

- 15.15 Plásticos 520
Contenidos Innovadores: Bolas de billar
fenólicas 522
- 15.16 Elastómeros 523
- 15.17 Fibras 525
- 15.18 Aplicaciones diversas 525
- 15.19 Materiales poliméricos avanzados 527
Resumen 531
Referencias 533
Cuestiones y problemas 533
Cuestiones de diseño 537

16. Materiales compuestos 538

- Objetivos de aprendizaje 539
- 16.1 Introducción 539
**MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS
CON PARTÍCULAS 541**
- 16.2 Materiales compuestos con partículas
grandes 541
- 16.3 Materiales compuestos consolidados por
dispersión de partículas 545
**MATERIALES COMPUESTOS REFORZADOS
CON FIBRAS 546**
- 16.4 Influencia de la longitud de la fibra 546
- 16.5 Influencia de la orientación y concentración
de las fibras 547
- 16.6 La fase fibra 556
- 16.7 La fase matriz 557
- 16.8 Materiales compuestos de matriz polimérica 557
- 16.9 Materiales compuestos de matriz metálica 563
- 16.10 Materiales compuestos de matriz cerámica 564
- 16.11 Materiales compuestos carbono-carbono 566
- 16.12 Materiales compuestos híbridos 566
- 16.13 Conformación de materiales compuestos
reforzados con fibras 567
MATERIALES COMPUESTOS ESTRUCTURALES 569
- 16.14 Materiales compuestos laminares 569
- 16.15 Paneles sándwich 571
Caso de Estudio: Materiales compuestos en el
Boeing 787 Dreamliner 573
- 16.16 Nanocompuestos 574
Resumen 577
Referencias 579
Cuestiones y problemas 580
Problemas de diseño 582

**17. Fabricación y procesamiento de materiales en
ingeniería 584**

- Objetivos de aprendizaje 585
- 17.1 Introducción 585

CONFORMADO DE METALES 585

- 17.2 Operaciones de hechurado 586
- 17.3 Moldeo 588
- 17.4 Otras técnicas 589

TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE LOS METALES 591

- 17.5 Tratamientos de recocido 591
- 17.6 Tratamientos térmicos de los aceros 593
- 17.7 Endurecimiento por precipitación 603

**CONFORMACIÓN Y PROCESADO DE
CERÁMICAS 610**

- 17.8 Conformación y procesamiento de vidrios y
vitrocerámicas 610
- 17.9 Fabricación y procesamiento de productos
de arcilla 615
- 17.10 Compactación de polvos 620
- 17.11 Moldeo en cinta 622

SÍNTESIS Y PROCESADO DE POLÍMEROS 623

- 17.12 Polimerización 623
- 17.13 Aditivos de los polímeros 625
- 17.14 Técnicas de conformado de plásticos 627
- 17.15 Fabricación de elastómeros 629
- 17.16 Fabricación de fibras y películas 630
Resumen 631
Referencias 634
Cuestiones y problemas 634
Problemas de diseño 636

**18. Corrosión y degradación de
los materiales 638**

- Objetivos de aprendizaje 639
- 18.1 Introducción 639
CORROSIÓN DE METALES 640
- 18.2 Consideraciones electroquímicas 640
- 18.3 Velocidad de corrosión 647
- 18.4 Predicción de la velocidad de corrosión 648
- 18.5 Pasividad 655
- 18.6 Factores ambientales 656
- 18.7 Tipos de corrosión 656
- 18.8 Corrosión ambiental 664
- 18.9 Prevención de la corrosión 664
- 18.10 Oxidación 666
CORROSIÓN EN CERÁMICAS 669
DEGRADACIÓN DE POLÍMEROS 670
- 18.11 Hinchamiento y disolución 670
- 18.12 Rotura del enlace 672
- 18.13 Degradación por exposición a la intemperie 673
Resumen 674
Referencias 676
Cuestiones y problemas 676
Problemas de diseño 679

19. Propiedades eléctricas 680

Objetivos de aprendizaje 681

19.1 Introducción 681

CONDUCCIÓN ELÉCTRICA 681

19.2 Ley de Ohm 681

19.3 Conductividad eléctrica 682

19.4 Conducción electrónica e iónica 683

19.5 Estructura de bandas de energía de los sólidos 683

19.6 Conducción en términos de modelos de bandas y de enlaces atómicos 685

19.7 Movilidad electrónica 687

19.8 Resistividad eléctrica de los metales 688

19.9 Características eléctricas de aleaciones comerciales 691

Contenidos Innovadores: Cableado eléctrico de aluminio 691

SEMICONDUCTIVIDAD 693

19.10 Semiconductividad intrínseca 693

19.11 Semiconducción extrínseca 696

19.12 Dependencia de la concentración de portadores respecto de la temperatura 699

19.13 Factores que afectan la movilidad de portadores 700

19.14 El efecto Hall 704

19.15 Dispositivos semiconductores 706

CONDUCCIÓN ELÉCTRICA EN CERÁMICOS IÓNICOS Y EN POLÍMEROS 712

19.16 Conducción en materiales iónicos 713

19.17 Propiedades eléctricas de los polímeros 713

COMPORTAMIENTO DIELECTRICO 714

19.18 Capacidad 714

19.19 Vectores de campo y polarización 716

19.20 Tipos de polarización 719

19.21 Dependencia de la constante dieléctrica respecto a la frecuencia 721

19.22 Rigidez dieléctrica 722

19.23 Materiales dieléctricos 722

OTRAS CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES 722

19.24 Ferroelectricidad 722

19.25 Piezoelectricidad 723

Contenidos Innovadores: Cabezales de impresoras para inyección de tinta con cerámicos piezoeléctricos 724

Resumen 725

Referencias 728

Cuestiones y problemas 728

Problemas de diseño 732

20. Propiedades térmicas 734

Objetivos de aprendizaje 735

20.1 Introducción 735

20.2 Capacidad calorífica 735

20.3 Dilatación térmica 739

Contenidos Innovadores: Invar y otras aleaciones de baja dilatación 741

20.4 Conductividad térmica 742

20.5 Tensiones térmicas 745

Resumen 747

Referencias 748

Cuestiones y problemas 748

Problemas de diseño 750

21. Propiedades magnéticas 751

Objetivos de aprendizaje 752

21.1 Introducción 752

21.2 Conceptos fundamentales 752

21.3 Diamagnetismo y paramagnetismo 756

21.4 Ferromagnetismo 758

21.5 Antiferromagnetismo y ferrimagnetismo 759

21.6 Influencia de la temperatura en el comportamiento magnético 763

21.7 Dominios e histéresis 764

21.8 Anisotropía magnética 767

21.9 Materiales magnéticos blandos 768

Contenidos Innovadores: Aleación de hierro-silicio para núcleos de transformador 769

21.10 Materiales magnéticos duros 770

21.11 Almacenamiento magnético 773

21.12 Superconductividad 776

Resumen 779

Referencias 781

Cuestiones y problemas 781

Problemas de diseño 784

22. Propiedades ópticas 785

Objetivos de aprendizaje 786

22.1 Introducción 786

CONCEPTOS FUNDAMENTALES 786

22.2 Radiación electromagnética 786

22.3 Interacciones de la luz con los sólidos 788

22.4 Interacciones atómicas y electrónicas 789

PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS METALES 790

PROPIEDADES ÓPTICAS DE LOS NO METALES 791

22.5 Refracción 791

22.6 Reflexión 793

22.7 Absorción 793

22.8 Transmisión 797

- 22.9 Color 797
- 22.10 Opacidad y translucidez en dieléctricos 799
- APLICACIONES DE FENÓMENOS ÓPTICOS 800**
- 22.11 Luminiscencia 800
- 22.12 Fotoconductividad 800
- Contenidos Innovadores: Diodos emisores de luz (LED) 801
- 22.13 Láseres 803
- 22.14 La fibra óptica en las comunicaciones 807
- Resumen 809*
- Referencias 811*
- Cuestiones y problemas 812*
- Problema de diseño 813*

23. Cuestiones económicas, ambientales y sociales en ciencia e ingeniería de materiales 814

- Objetivos de aprendizaje 815
- 23.1 Introducción 815
- CONSIDERACIONES ECONÓMICAS 815**
- 23.2 Diseño de componentes 816
- 23.3 Materiales 816
- 23.4 Técnicas de fabricación 816
- CONSIDERACIONES AMBIENTALES Y SOCIALES 817**
- 23.5 Cuestiones de reciclaje en ciencia e ingeniería de los materiales 819
- Contenidos Innovadores: Polímeros / Plásticos biodegradables y biorrenovables 822
- Resumen 824*
- Referencias 825*
- Cuestiones de diseño 825*

Apéndice A El sistema Internacional de Unidades(SI) 826

Apéndice B Propiedades de materiales de ingeniería seleccionados 828

- B.1 Densidad 828
- B.2 Módulo elástico 831
- B.3 Coeficiente de Poisson 835
- B.4 Resistencia y ductilidad 836
- B.5 Tenacidad de fractura en deformación plana 841
- B.6 Coeficiente lineal de dilatación térmica 843
- B.7 Conductividad térmica 846
- B.8 Calor específico 849
- B.9 Resistividad eléctrica 852
- B.10 Composiciones de aleaciones metálicas 855

Apéndice C Costes y costes relativos de materiales de ingeniería seleccionados 857

Apéndice D Estructuras de unidades repetitivas en polímeros comunes 862

Apéndice E Temperaturas de transición vítrea y de fusión para polímeros comunes 866

Glosario 867

Respuestas a problemas seleccionados 880

Índice 885

Características de elementos seleccionados

Valores de propiedades físicas seleccionadas

Abreviaturas de unidades

Prefijos de múltiplos y submúltiplos SI

Factores de conversión de unidades

Tabla periódica de los elementos

Relación de símbolos

Entre paréntesis se indica la sección del texto en la que se hace referencia al correspondiente símbolo.

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| A = área | d = valor medio del tamaño (diámetro) de grano (9.8) |
| Å = angstrom, unidad | d_{hkl} = espaciado interplanar para planos de índices de Miller h , k y l (4.19) |
| A_i = peso atómico del elemento i (2.2) | E = energía (2.5) |
| a = parámetro de red: longitud eje- x de la celda unitaria (4.2) | E = módulo de elasticidad o módulo de Young (8.3) |
| a = longitud de fisura de una superficie de rotura (10.5) | \mathcal{E} = intensidad de campo eléctrico (19.3) |
| %A = ductilidad, en alargamiento porcentual (8.4) | E_f = energía de Fermi (19.5) |
| %at = porcentaje atómico (6.6) | E_g = intervalo prohibido de energía (19.6) |
| B = densidad de flujo magnético (inducción) (21.2) | $E_r(t)$ = módulo de relajación (15.4) |
| B_r = remanencia magnética (inducción remanente) (21.7) | e = carga eléctrica del electrón (19.7) |
| BCC = estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (4.3) | e^- = electrón (18.2) |
| b = parámetro de red: longitud eje- y de la celda unitaria (3.4) | erf = función de error gaussiana (7.4) |
| \mathbf{b} = vector de Burgers (6.7) | exp = e , base de logaritmos naturales |
| C = capacitancia (19.18) | F = fuerza, interatómica o mecánica (2.5, 8.2) |
| C_i = concentración (composición) del componente i en % en peso (6.6) | \mathcal{F} = constante de Faraday (18.2) |
| C_i' = concentración (composición) del componente i en % atómico (6.6) | FCC = estructura cristalina cúbica centrada en las caras (4.2) |
| C_v, C_p = capacidad calorífica a volumen y presión constantes (20.2) | FEA = factor de empaquetamiento atómico (4.2) |
| CPR = velocidad de penetración de corrosión (18.3) | G = módulo de cizalladura (8.3) |
| CVN = Charpy con entalla V, Charpy-V (10.6) | GP = grado de polimerización (5.5) |
| %CW = porcentaje de trabajo en frío (9.10) | H = resistencia del campo magnético (21.2) |
| c = parámetro de red: longitud eje- z de la celda unitaria (3.4) | H_c = coercitividad magnética (21.7) |
| c = velocidad de radiación electromagnética en el vacío (22.2) | HB = dureza Brinell (8.5) |
| D = coeficiente de difusión (7.3) | HCP = estructura cristalina hexagonal compacta (4.4) |
| D = desplazamiento dieléctrico (19.19) | HK = dureza Knoop (8.5) |
| d = diámetro | HRB, HRF = dureza Rockwell: escalas B y F (8.5) |
| | HR15N, HR45W = dureza Rockwell superficial: escalas 15N y 45W (8.5) |
| | HV = dureza Vickers (8.5) |
| | h = constante de Planck (22.2) |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (hkl) = índices de Miller para un plano cristalográfico (3.7) | r_A, r_C = radio iónico aniónico y catiónico (4.6) |
| $(hkil)$ = índices de Miller para un plano cristalográfico, cristales hexagonales (3.7) | relación P-B = relación de Pilling–Bedworth (18.10) |
| I = intensidad de corriente eléctrica (19.2) | S = amplitud de tensión de fatiga (10.8) |
| I = intensidad de radiación electromagnética (22.3) | SEM = microscopía electrónica de barrido, microscopio electrónico de barrido |
| i = densidad de corriente (18.3) | T = temperatura |
| i_C = densidad de corriente de corrosión (18.4) | T_c = temperatura de Curie (21.6) |
| J = flujo de difusión (7.3) | T_C = temperatura crítica de superconducción (21.12) |
| J = densidad de corriente eléctrica (19.3) | T_g = temperatura de transición vítrea (15.12, 17.8) |
| K_c = tenacidad de fractura (10.5) | T_f = temperatura de fusión |
| K_{Ic} = tenacidad de fractura en deformación plana (Modo I) (10.5) | TEM = microscopía electrónica de transmisión, microscopio electrónico de transmisión |
| k = constante de Boltzmann (6.2) | t = tiempo |
| k = conductividad térmica (20.4) | t_r = tiempo de vida a rotura (10.12) |
| l = longitud | U_r = módulo de resiliencia (8.4) |
| l_c = longitud crítica de fibra (16.4) | [uvw] = índices para una dirección cristalográfica (3.6) |
| \ln = logaritmo natural | [$uvtw$], [UVW] = índices para una dirección cristalográfica, cristales hexagonales (3.6) |
| \log = logaritmo en base 10 | V = diferencia de potencial eléctrico (voltaje) (18.2, 19.2) |
| \overline{M} = magnetización (21.2) | V_C = volumen de celda unitaria (4.4) |
| \overline{M}_n = peso molecular medio numérico (5.5) | V_C = potencial de corrosión (18.4) |
| \overline{M}_w = peso molecular medio másico (5.5) | V_H = voltaje Hall (19.14) |
| %mol = porcentaje de moles | V_i = fracción volumétrica de fase i (11.8) |
| N = número de ciclos de fatiga (10.8) | v = velocidad |
| N_A = número de Avogadro (4.5) | %vol = porcentaje en volumen |
| N_f = vida a fatiga (10.8) | W_i = fracción másica de fase i (11.8) |
| n = número cuántico principal (2.3) | x = longitud |
| n = número de átomos por celda unitaria (4.5) | x = coordenada espacial |
| n = exponente de endurecimiento por deformación (8.4) | Y = parámetro adimensional de la función de tenacidad de fractura (factor de forma) (10.5) |
| n = número de electrones en una reacción electroquímica (18.2) | y = coordenada espacial |
| n = número de electrones de conducción por metro cúbico (19.7) | %Z = ductilidad, en porcentaje de reducción de área, estricción (8.4) |
| n = índice de refracción (22.5) | z = coordenada espacial |
| n' = para cerámicos, el número de unidades de formulación por celda unitaria (4.10) | α = parámetro de red: ángulo interaxial y - z de la celda unitaria (3.4) |
| n_i = concentración de carga intrínseca (electrones y huecos) (19.10) | α, β, γ = designaciones de fases |
| P = polarización dieléctrica (19.19) | α_t = coeficiente de dilatación térmica lineal (20.3) |
| p = número de agujeros por metro cúbico (19.10) | β = parámetro de red: ángulo interaxial x - z de la celda unitaria (3.4) |
| %peso = porcentaje en peso (6.6) | γ = parámetro de red: ángulo interaxial x - y de la celda unitaria (3.4) |
| Q = energía de activación | γ = deformación cortante (8.2) |
| Q = magnitud de carga almacenada (19.18) | Δ = precede el símbolo de un parámetro para indicar una variación finita |
| R = radio atómico (4.2) | ϵ = deformación ingenieril (8.2) |
| R = constante de gases | ϵ = permitividad dieléctrica (19.18) |
| RM = resistencia a tracción (8.4) | ϵ_r = constante dieléctrica o permitividad relativa (19.18) |
| r = distancia interatómica (2.5) | |
| r = velocidad de reacción (18.3) | |

$\dot{\epsilon}_s$ = velocidad de termofluencia en estado estacionario (10.12)
 ϵ_T = deformación real (8.4)
 η = viscosidad (14.8)
 η = sobretensión (18.4)
 2θ = ángulo de difracción de Bragg (4.20)
 θ_D = temperatura Debye (20.2)
 λ = longitud de onda de radiación electromagnética (4.19)
 μ = permeabilidad magnética (21.2)
 μ_B = magnetón de Bohr (21.2)
 μ_r = permeabilidad magnética relativa (21.2)
 μ_e = movilidad del electrón (19.7)
 μ_h = movilidad de hueco (19.10)
 ν = relación de Poisson (8.3)
 ν = frecuencia de radiación electromagnética (22.2)
 ρ = densidad (4.5)
 ρ = resistividad eléctrica (19.2)
 ρ = radio de curvatura en el fondo de la fisura (10.5)
 σ = tensión/esfuerzo ingenieril, a tracción o compresión (8.2)
 σ = conductividad eléctrica (19.3)
 σ^* = resistencia longitudinal (composite) (16.5)
 σ_c = tensión crítica de propagación de fisura (10.5)
 σ_{fs} = resistencia a flexión (14.7)
 σ_m = tensión máxima, esfuerzo máximo (10.5)
 σ_m = tensión media, esfuerzo medio (10.7)

σ'_m = tensión de rotura de la matriz en un material compuesto (16.5)
 σ_T = tensión verdadera, esfuerzo verdadero (8.4)
 σ_w = tensión/esfuerzo de seguridad o tensión/esfuerzo de trabajo (8.7)
 σ_y = resistencia a fluencia, límite elástico (8.4)
 τ = tensión de cizalla, tensión cortante (8.2)
 τ_c = resistencia de unión fibra-matriz / resistencia a fluencia cortante de la matriz (16.4)
 τ_{crss} = tensión de cizalladura crítica (9.5)
 χ_m = susceptibilidad magnética (21.2)

Subíndices

c = composite
 cd = composite de fibra discontinua
 cl = dirección longitudinal (composite de fibras alineadas)
 ct = dirección transversal (composite de fibras alineadas)
 f = final
 f = a fractura
 f = fibra
 i = instantáneo/a
 m = matriz
 $m, \text{máx}$ = máximo/a
 mín = mínimo/a
 0 = original
 0 = en equilibrio
 0 = en vacío

Capítulo 1 Introducción

© iStockphoto/Mark Oleksiy



© iStockphoto/Jill Chen



© iStockphoto/Mark Oleksiy



© blickwinkel/Alamy



© blickwinkel/Alamy

Un elemento muy habitual, fabricado a partir de tres tipos de materiales diferentes, es un envase de refresco. Las bebidas se comercializan en latas de aluminio/acero (metal) (arriba), en botellas de vidrio (cerámica) (centro) y en recipientes de plástico (polímero) (abajo).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Elaborar una lista de seis tipos de propiedades diferentes que determinen la aplicabilidad de los materiales.
2. Citar los cuatro componentes que intervienen en el diseño, la producción y la utilización de materiales, y describir brevemente las interrelaciones entre estos componentes.
3. Citar tres criterios importantes en el proceso de selección de materiales.
4. (a) Enumerar las tres clasificaciones primarias de materiales sólidos y, a continuación, citar la característica química significativa de cada una.
(b) Conocer los cuatro tipos de materiales avanzados y, para cada grupo, su(s) característica(s) distintiva(s).
5. (a) Definir brevemente *material inteligente*.
(b) Explicar brevemente el concepto de *nanotecnología* tal como se aplica a los materiales.

1.1 PERSPECTIVA HISTÓRICA

Probablemente los materiales estén más profundamente arraigados en nuestra cultura de lo que habitualmente se cree. Transporte, vivienda, vestimenta, comunicación, entretenimiento y producción de alimentos, prácticamente todos los segmentos de nuestra vida cotidiana, están influidos en mayor o menor medida por los materiales. Históricamente, el desarrollo y el progreso de las sociedades han estado íntimamente ligados a las capacidades de sus miembros para producir y manipular materiales que cubran sus necesidades. De hecho, las primeras civilizaciones han sido denominadas por el nivel de desarrollo de sus materiales (Edad de Piedra, Edad de Bronce, Edad de Hierro).¹

Los primeros humanos tenían acceso a un número muy limitado de materiales, proporcionados por la naturaleza: piedra, madera, arcilla, pieles, etc. Con el tiempo, descubrieron técnicas para producir materiales que tenían propiedades superiores a las de los naturales; estos nuevos materiales incluían cerámica y diversos metales. Además descubrieron que las propiedades de un material podían ser alteradas por tratamientos térmicos y por la adición de otras sustancias. En este aspecto, la utilización de materiales era totalmente un proceso de selección que implicaba la elección entre un determinado conjunto, bastante limitado, de materiales, del más adecuado para una aplicación, en virtud de sus características. Hace relativamente poco tiempo que la comunidad científica ha llegado a comprender las relaciones entre los elementos estructurales de los materiales y sus propiedades. Este conocimiento, adquirido a lo largo de los últimos 100 años aproximadamente, los ha capacitado, en gran medida, para modificar o adaptar las características de los materiales. Así, decenas de miles de diferentes materiales han evolucionado con características bastante especializadas para satisfacer las necesidades de una sociedad moderna y compleja, incluyendo metales, plásticos, vidrios y fibras.

El desarrollo de muchas de las tecnologías que han aumentado la confortabilidad de nuestra existencia ha estado íntimamente asociado a la accesibilidad y disponibilidad de los materiales adecuados. El avance en la comprensión de un tipo de material es a menudo el precursor de la progresión de una tecnología. Por ejemplo, la evolución de la automoción no habría sido posible sin la disponibilidad de acero económico o algún otro sustitutivo comparable. Actualmente, sofisticados dispositivos electrónicos se basan en componentes fabricados a partir de materiales denominados *semiconductores*.

1.2 CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA

A veces es útil dividir la disciplina de ciencia e ingeniería de materiales en dos ámbitos diferenciados: la *ciencia de materiales* y la *ingeniería de materiales*. En sentido estricto, la ciencia de materiales implica la investigación de las relaciones que existen entre las estructuras y las propiedades de los materiales. En contraste, la ingeniería de materiales implica, sobre la base

¹Las fechas aproximadas de inicio de las Edades de Piedra, Bronce y Hierro son, respectivamente, 2,5 millones aC, 3500 aC y 1000 aC.

de estas correlaciones estructura-propiedad, el diseño o proyecto de la estructura de un material para conseguir un conjunto determinado de propiedades.² Desde una perspectiva funcional, el papel de la ciencia de materiales consiste en desarrollar o sintetizar nuevos materiales, mientras que desde la ingeniería de materiales se persigue crear nuevos productos o sistemas que utilicen los materiales existentes y/o el desarrollo de técnicas para el procesamiento de materiales. La mayoría de las personas graduadas en programas de materiales están capacitadas tanto en ciencia como en ingeniería de materiales.

Llegados a este punto, la *estructura* es un término confuso que merece una explicación. Normalmente, la estructura de un material se refiere a la disposición de sus componentes internos. La *estructura subatómica* considera los electrones dentro de los átomos individuales y las interacciones con sus núcleos. A nivel atómico, la estructura contempla la organización de los átomos o moléculas entre sí. El siguiente gran dominio estructural, que contiene grandes grupos de átomos aglomerados entre sí, se denomina *microscópico*, lo que significa que el objeto se puede observar utilizando algún tipo de microscopio. Por último, los elementos estructurales que se pueden ver a simple vista se denominan *macroscópicos*.

La noción de *propiedad* requiere una descripción elaborada, vinculada al hecho de que, en servicio, todos los materiales están expuestos a estímulos externos que inducen algún tipo de respuesta. Así, por ejemplo, una muestra o un espécimen sometidos a la acción de fuerzas externas pueden experimentar deformación, mientras que una superficie de metal pulido refleja la luz. La propiedad de un material se expresa en términos de la clase y la magnitud de la respuesta a un estímulo específico impuesto. En general, las definiciones de las propiedades suelen ser independientes de la forma y del tamaño del material.

Prácticamente todas las propiedades relevantes de los materiales sólidos se pueden agrupar en seis categorías diferentes: mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas. Para cada una de ellas hay un tipo característico de estímulo capaz de provocar respuestas diferentes. Las propiedades mecánicas se refieren a la deformación por una carga o fuerza aplicada; algunos ejemplos son el módulo elástico (rigidez), la resistencia y la tenacidad. Para las propiedades eléctricas, tales como la conductividad eléctrica y la constante dieléctrica, el estímulo es un campo eléctrico. El comportamiento térmico de los sólidos puede ser representado en términos de capacidad calorífica y de conductividad térmica. Las propiedades magnéticas demuestran la respuesta de un material a la aplicación de un campo magnético. Para las propiedades ópticas, el estímulo es la radiación electromagnética o la luz; el índice de refracción y la reflectividad son propiedades ópticas representativas. Finalmente, las propiedades químicas se refieren a la reactividad química de los materiales. Los capítulos que siguen discuten las propiedades que se encuentran dentro de cada una de estas seis clasificaciones.

Además de la estructura y las propiedades, en la ciencia e ingeniería de materiales están implicados otros dos componentes importantes, a saber, el *procesado* y el *rendimiento*. Con respecto a las relaciones de estos cuatro componentes, la estructura de un material depende de cómo se procesa. Además, el rendimiento de un material es una función de sus propiedades. Así, la interrelación entre el procesamiento, la estructura, las propiedades y el rendimiento es como se representa esquemáticamente en la Figura 1.1. A lo largo de este texto se destacarán las relaciones entre estos cuatro componentes en términos de diseño, producción y utilización de los materiales.

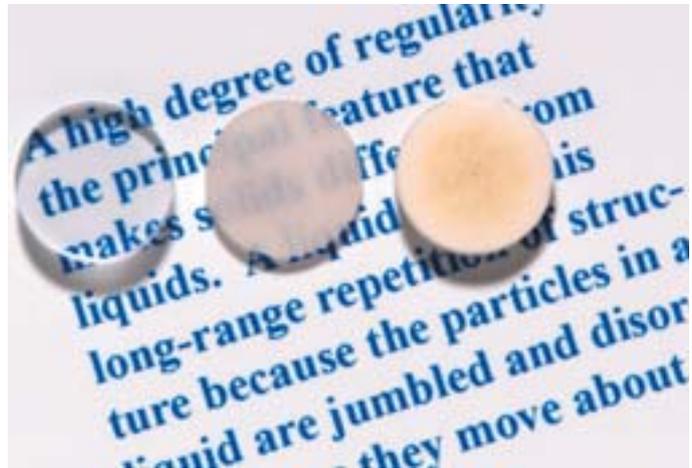
La Figura 1.2, que presenta un ejemplo de este principio de procesamiento-estructura-propiedades-servicio, es una fotografía que muestra tres especímenes en forma de discos delgados colocados sobre un papel impreso. Es obvio que las propiedades ópticas (es decir, la transmitancia de luz) de cada uno de los tres materiales son diferentes; el de la izquierda



Figura 1.1 Los cuatro componentes de la disciplina de la ciencia e ingeniería de materiales y su interrelación.

²A lo largo de este texto se destacan las relaciones entre las propiedades de los materiales y sus elementos estructurales.

Figura 1.2 Tres especímenes de óxido de aluminio, en forma de discos delgados, se han colocado sobre una página impresa con el fin de demostrar sus diferencias en la transmitancia de la luz. El disco de la izquierda es *transparente* (es decir, prácticamente toda la luz que se refleja desde la página pasa a través de él), mientras que el que se halla en el centro es *translúcido* (lo que significa que una parte de esa luz reflejada es transmitida a través del disco). El disco de la derecha es *opaco*, es decir, la luz no pasa a través de él. Estas diferencias en las propiedades ópticas son una consecuencia de las diferencias en la estructura de estos materiales, resultantes del proceso de transformación o procesado de los materiales.



Specimen preparation, P. A. Lessing

es transparente (es decir, prácticamente toda la luz reflejada pasa a través de él), mientras que los discos del centro y de la derecha son, respectivamente, translúcido y opaco. Todos estos especímenes son del mismo material, óxido de aluminio, pero el de la izquierda es lo que se conoce como *monocristal* porque tiene un alto grado de perfección, que da lugar a su transparencia. El disco del centro se compone de numerosos cristales individuales muy pequeños que están todos unidos; los límites entre estos pequeños cristales provocan la dispersión de una porción de la luz reflejada desde la página impresa, lo que hace que este material sea ópticamente translúcido. Por último, la muestra de la derecha se compone no sólo de muchos cristales pequeños, unidos entre sí, sino también de un gran número de poros muy pequeños, o espacios vacíos. Estos poros también dispersan eficazmente la luz reflejada y hacen que este material se comporte como opaco.

Por lo tanto, las estructuras de estas tres muestras son diferentes en términos de límites de cristales y poros, que afectan a las propiedades de transmitancia óptica. Además, cada material ha sido elaborado utilizando una técnica de procesamiento diferente. Si la transmitancia óptica es un parámetro importante con relación a la aplicación definitiva en servicio, el rendimiento de cada material será distinto.

1.3 ¿POR QUÉ ESTUDIAR CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES?

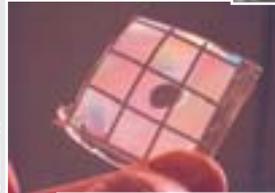
¿Por qué se estudian los materiales? En más de una ocasión, especialistas de ciencia o ingeniería aplicada, ya sea mecánica, civil, química o eléctrica, se enfrentan a un problema de diseño con materiales, como un engranaje de transmisión, la superestructura de un edificio, un componente de una refinería de petróleo, o un chip de circuito integrado. Por supuesto, los especialistas en ciencia e ingeniería de materiales están totalmente dedicados a la investigación y diseño de materiales.

Muchas veces, un problema de materiales consiste en la selección del material adecuado de entre miles disponibles. La decisión final se basa, normalmente, en varios criterios. En primer lugar, deben caracterizarse las condiciones en servicio, que dictarán las propiedades requeridas del material. Sólo en raras ocasiones un material posee la combinación máxima o ideal de propiedades, y, por tanto, puede ser necesario intercambiar una característica por otra. Un ejemplo clásico es aquella situación en la que se requiere resistencia y ductilidad: un material que presenta una elevada resistencia suele tener normalmente una ductilidad limitada. En estos casos puede ser necesario un compromiso razonable entre dos o más propiedades.

Una segunda consideración se desprende del deterioro de las propiedades del material que pueda ocurrir durante la operación en servicio. Por ejemplo, la resistencia mecánica se puede reducir significativamente como consecuencia de la exposición a temperaturas elevadas o a ambientes corrosivos.

Capítulo 2 Estructura atómica y enlaces interatómicos

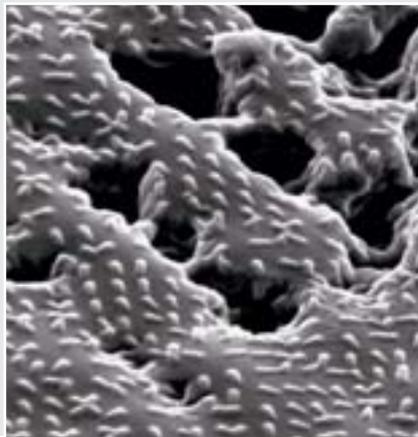
Cortesía de Jeffrey Karp, Robert Langer, and Alex Galaktatos



Paul D. Stewart/Science Source



Cortesía de Jeffrey Karp, Robert Langer, and Alex Galaktatos



La fotografía de la parte inferior de la página es de un reptil tropical inofensivo llamado gecko, un animal extraordinario y fascinante.

Los geckos tienen los pies muy pegajosos (se muestra uno en la tercera fotografía) que se aferran a prácticamente cualquier superficie. Esta característica les permite correr rápidamente por paredes verticales y a lo largo de la parte inferior de superficies horizontales. De hecho, un gecko puede soportar su masa corporal con un solo dedo! El secreto de esta notable capacidad es la presencia de una cantidad extremadamente grande de pelos microscópicos en cada una de las almohadillas de sus pies. Cuando

estos pelos entran en contacto con una superficie, se establecen débiles fuerzas de atracción (enlaces Van der Waals) entre las moléculas de dichos pelos y la estructura atómica de la superficie a la que se adhiere. El hecho de que estos pelos sean tan pequeños y tan numerosos explica por qué los geckos se sujetan con tanta fuerza a las superficies. Para liberarse de su agarre, el gecko simplemente relaja los dedos de los pies y los pelos se distancian de la superficie.

Gracias al conocimiento de este mecanismo de adhesión, los científicos han desarrollado varios adhesivos sintéticos ultrarresistentes, uno de los cuales es una cinta adhesiva (que se muestra en la segunda fotografía) especialmente prometedora en procedimientos quirúrgicos para reemplazar suturas y grapas en el cierre de heridas e incisiones. Este material conserva su naturaleza adhesiva en ambientes húmedos, es biodegradable y no libera sustancias tóxicas a medida que se disuelve durante el proceso de curación. Las características microscópicas de esta cinta adhesiva se muestran en la fotografía superior.

Barbara Peacock/Photodisc/Getty Images, Inc.



¿POR QUÉ ESTUDIAR *Estructura atómica y enlaces interatómicos*?

Una razón importante sería para tener una comprensión de la unión interatómica en sólidos, ya que en algunos casos el tipo de enlace permite explicar las propiedades de un material. Por ejemplo, consideremos el hecho de que el carbono puede existir tanto como grafito y como diamante. Mientras que el grafito es relativamente blando y tiene consistencia “grasienta”, el diamante es uno de los materiales más duros. Además, las

propiedades eléctricas del diamante y del grafito son diferentes: el diamante es un mal conductor de la electricidad mientras que el grafito es razonablemente un buen conductor. Estas disparidades en las propiedades son directamente atribuibles a un tipo de unión interatómica que se encuentra en el grafito pero que no existe en el diamante (véase Sección 4.12).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Conocer los dos modelos atómicos citados e indicar las diferencias entre ellos.
2. Describir el principio de la mecánica cuántica referente a las energías electrónicas.
3. (a) Trazar esquemáticamente las energías atractiva, repulsiva y neta respecto a la separación interatómica de dos átomos o iones.
- (b) Establecer relaciones entre la separación de equilibrio y la energía de unión.
4. (a) Describir brevemente los enlaces iónico, covalente, metálico, enlace de hidrógeno y enlace Van der Waals.
- (b) Indicar qué materiales presentan cada tipo de unión.

2.1 INTRODUCCIÓN

Algunas de las propiedades más importantes de los materiales sólidos dependen de la distribución geométrica de sus átomos, así como las interacciones que existen entre los átomos o moléculas constituyentes. A modo de preparación para temas posteriores, se consideran varios conceptos fundamentales: estructura atómica, configuraciones electrónicas de los átomos de la tabla periódica y los diversos tipos de enlaces primarios y secundarios, en tanto que mantienen unidos a los átomos que componen un sólido. Estos temas son tratados brevemente, bajo la suposición de que algunos de los materiales, en este punto, resultan familiares.

Estructura atómica

2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Cada átomo está formado por un pequeño núcleo compuesto de protones y neutrones y está rodeado de electrones en movimiento.¹ Tanto electrones como protones están cargados eléctricamente y la magnitud de su carga es $1,602 \times 10^{-19}$ C, que es de signo negativo para los electrones y positivo para los protones; los neutrones son eléctricamente neutros. Los tamaños de estas partículas subatómicas son extremadamente pequeñas; así, protones y neutrones tienen aproximadamente la misma masa, $1,67 \times 10^{-27}$ kg, significativamente mayor que la de un electrón, $9,11 \times 10^{-31}$ kg.

número atómico (Z) Cada elemento químico se caracteriza por el número de protones de su núcleo, conocido como **número atómico (Z)**.² Para un átomo eléctricamente neutro o completo, el número atómico es igual al número de electrones. Este número atómico varía, en unidades enteras, de 1 a 92 desde el hidrógeno hasta el uranio (el de mayor número atómico de los elementos de origen natural).

La *masa atómica (A)* de un átomo específico puede ser expresada como la suma de las masas de protones y neutrones del núcleo. Aunque el número de protones es el mismo para

¹ Los protones, neutrones y electrones se componen de otras partículas subatómicas, como quarks, neutrinos y bosones. Sin embargo, esta discusión sólo hace referencia a protones, neutrones y electrones.

² Los términos que aparecen en **negrita** se definen en el Glosario, tras el Apéndice E.

isótopo
peso atómico
unidad de masa
atómica (uma)

todos los átomos de un elemento dado, el número de neutrones (N) puede ser variable. Así algunos átomos de determinados elementos tienen dos o más masas atómicas diferentes, que se denominan **isótopos**. El **peso atómico (A)** de un elemento corresponde a la media ponderada de las masas atómicas de los isótopos³ existentes en su estado natural. La **unidad de masa atómica (uma)** puede ser usada para calcular el peso atómico. Se establece una escala en la cual 1 uma se define como 1/12 de la masa atómica del isótopo más común de carbono, carbono 12 (^{12}C) ($A = 12,00000$). Dentro de este esquema, las masas de los protones y los neutrones son un poco mayores que la unidad y

$$A \cong Z + N \quad (2.1)$$

mol

El peso atómico de un elemento, o el peso molecular de un compuesto, se puede especificar sobre la base de uma por átomo (o molécula) o masa por mol de material. En un **mol** de una sustancia, hay $6,022 \times 10^{23}$ átomos o moléculas (número de Avogadro). Estos dos esquemas de peso atómico se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$1 \text{ uma/átomo (o molécula)} = 1 \text{ g/mol}$$

Así, por ejemplo, el peso atómico del hierro es de 55,85 uma/átomo, o de 55,85 g/mol. En ocasiones resulta conveniente el uso de uma/átomo o uma/molécula, aunque en otras ocasiones se prefiere más la cantidad de gramos (o kilogramos) por mol de sustancia. Este último modelo es el que se utilizará en este texto.

PROBLEMA RESUELTO 2.1

Cálculo del peso atómico medio para el cerio

El cerio tiene cuatro isótopos naturales: 0,185% de ^{136}Ce , con un peso atómico de 135,907 uma; 0,251% de ^{138}Ce , con un peso atómico de 137,906 uma; 88,450% de ^{140}Ce , con un peso atómico de 139,905 uma, y 11,114% de ^{142}Ce , con un peso atómico de 141,909 uma. Calcular el peso atómico medio del Ce.

Solución

El peso atómico medio de un elemento hipotético M , \bar{A}_M , se calcula mediante la suma de las fracciones correspondientes a los pesos atómicos de todos sus isótopos; es decir,

$$\bar{A}_M = \sum_i f_{iM} A_{iM} \quad (2.2)$$

En esta expresión, f_{iM} es la fracción de cada isótopo i para el elemento M (es decir, el porcentaje en que se encuentra presente dividido entre 100), multiplicado por el peso atómico del isótopo correspondiente.

Para el cerio, la ecuación 2.2 toma la forma siguiente:

$$\bar{A}_{\text{Ce}} = f_{^{136}\text{Ce}} A_{^{136}\text{Ce}} + f_{^{138}\text{Ce}} A_{^{138}\text{Ce}} + f_{^{140}\text{Ce}} A_{^{140}\text{Ce}} + f_{^{142}\text{Ce}} A_{^{142}\text{Ce}}$$

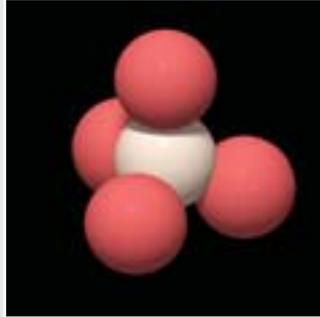
Los valores proporcionados en el enunciado del problema conducen a

$$\begin{aligned} \bar{A}_{\text{Ce}} &= \left(\frac{0,185\%}{100}\right)(135,907 \text{ uma}) + \left(\frac{0,251\%}{100}\right)(137,906 \text{ uma}) \\ &+ \left(\frac{88,450\%}{100}\right)(139,905 \text{ uma}) + \left(\frac{11,114\%}{100}\right)(141,909 \text{ uma}) \\ &= (0,00185)(135,907 \text{ uma}) + (0,00251)(137,906 \text{ uma}) + (0,8845)(139,905 \text{ uma}) \\ &+ (0,11114)(141,909 \text{ uma}) \\ &= 140,115 \text{ uma} \end{aligned}$$

³ El término *masa atómica* es realmente más exacto que *peso atómico* en la medida en que, en este contexto, se trata de masas y no de pesos. Sin embargo, peso atómico es, por convención, la terminología preferida y se utiliza en todo este libro. Se ha de considerar, pues, que *no* es necesario dividir el peso molecular por la constante gravitatoria.

Capítulo 3 Fundamentos de cristalografía

Cortesía de Amir C. Akhavan

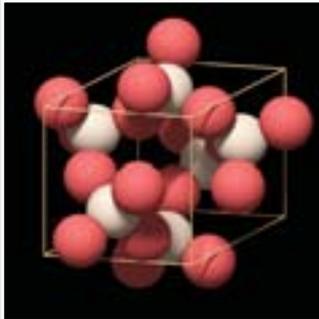


(a)

Las ilustraciones muestran la estructura de cuarzo (SiO_2) desde tres perspectivas dimensionales diferentes. Las bolas blancas y rojas representan, respectivamente, los átomos de silicio y de oxígeno.

(a) Representación esquemática de la unidad estructural básica del cuarzo (y de todos los silicatos). Cada átomo de silicio está unido y rodeado por cuatro átomos de oxígeno, cuyos centros están situados en los vértices de un tetraedro. Químicamente, esta unidad se representa como SiO_4^{4-} .

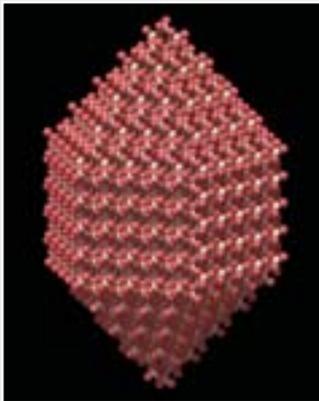
Cortesía de Amir C. Akhavan



(b)

(b) Esquema de una celda unitaria para el cuarzo, que se compone de varios tetraedros SiO_4^{4-} interconectados.

Cortesía de Amir C. Akhavan



(c)

(c) Diagrama esquemático que muestra un gran número de tetraedros SiO_4^{4-} interconectados. La forma de esta estructura es característica para un monocristal de cuarzo.

Cortesía de Irocks.com



(d)

(d) Fotografía de dos monocristales de cuarzo. Es preciso destacar que la forma del cristal grande de la imagen tiene una forma similar a la de la estructura que se muestra en (c).

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Fundamentos de cristalografía?*

Las propiedades de algunos materiales están directamente relacionadas con sus estructuras cristalinas. Por ejemplo, el magnesio y el berilio puros y no deformados, con una estructura cristalina determinada, son mucho más frágiles (es decir, se rompen bajo grados menores de deformación) que los metales puros y no deformados, tales como oro y plata, que tienen otra estructura cristalina (véase Sección 9.4).

Además, existen diferencias significativas entre los materiales cristalinos y no cristalinos, aunque tengan la misma composición química. Por ejemplo, los cerámicos y los polímeros no cristalinos normalmente son transparentes, mientras que estos mismos materiales, en su forma cristalina (o semicristalina), tienden a ser opacos o, en el mejor de los casos, translúcidos.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir la diferencia, para estructuras atómicas o moleculares, entre materiales cristalinos y no cristalinos.
2. Considerando índices en tres direcciones, esbozar las direcciones correspondientes a estos índices dentro de una celda unitaria.
3. Especificar los índices de Miller para un plano comprendido en una celda unitaria.
4. Distinguir entre materiales monocristalinos y materiales policristalinos.
5. Definir *isotropía* y *anisotropía* con respecto a las propiedades de los materiales.

3.1 INTRODUCCIÓN

El Capítulo 2 se ha ocupado, principalmente, de los distintos tipos de enlace atómico, que están determinados por las estructuras electrónicas de los átomos individuales. Este capítulo se centra en el siguiente nivel de la estructura de los materiales: la disposición adoptada por los átomos en el estado sólido. En este contexto, se introducen conceptos de cristalinidad y no-cristalinidad. Para los sólidos cristalinos, se presenta el concepto de estructura cristalina, especificado en términos de la celda unitaria. Se explica el esquema por el cual se expresan coordenadas de puntos, direcciones y planos. Se consideran los materiales como monocristales, materiales policristalinos y materiales no cristalinos.

Estructuras cristalinas

3.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

cristalino

Los materiales sólidos se pueden clasificar de acuerdo con la regularidad con que los átomos o iones se sitúan unos respecto de otros. En un material **cristalino** los átomos se sitúan en una disposición repetitiva o periódica a lo largo de grandes distancias atómicas, siguiendo una pauta ordenada de largo alcance. Durante la solidificación, los átomos se colocan siguiendo un patrón tridimensional repetitivo, en el que cada átomo está unido a sus átomos vecinos. Todos los metales, muchos materiales cerámicos y ciertos polímeros forman estructuras cristalinas en condiciones normales de solidificación. Aquellos materiales que no cristalizan, o no adoptan este orden atómico de largo alcance, se denominan materiales *no cristalinos* o *amorfos* y se discuten brevemente al final de este capítulo.

estructura cristalina

Algunas de las propiedades de los sólidos cristalinos dependen de la **estructura cristalina** del material, es decir, de la ordenación espacial de átomos, iones o moléculas. Hay una cantidad enorme de estructuras cristalinas diferentes, todas con orden atómico de largo alcance, desde estructuras relativamente simples para los metales, a extremadamente complejas, como se aprecia en algunos materiales cerámicos y poliméricos. El presente

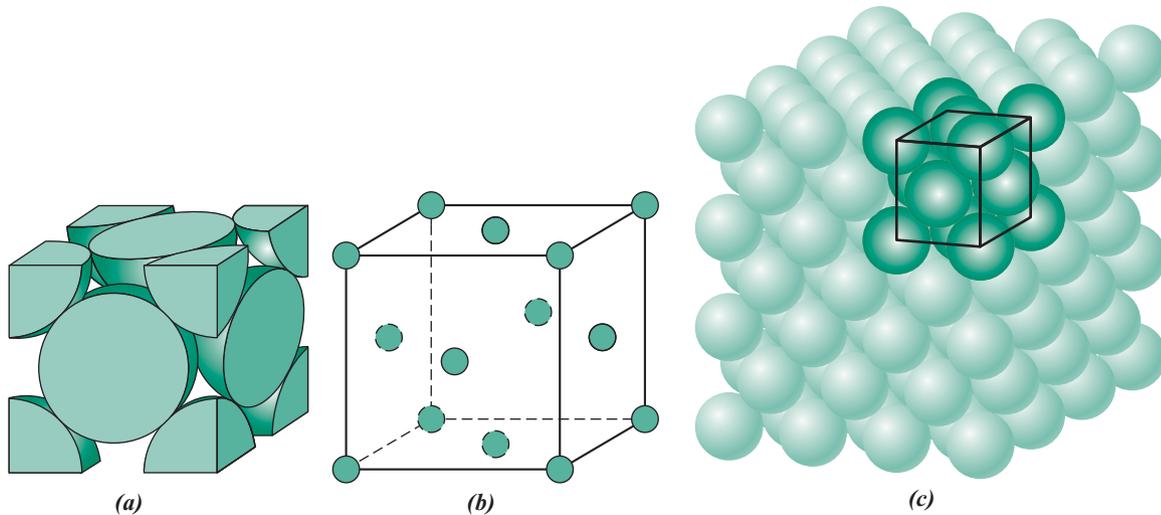


Figura 3.1 Para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras, (a) representación de celda unitaria con esferas rígidas, (b) celda unitaria de esferas reducidas y (c) agregado de muchos átomos. [Figura (c) adaptada de G. W. Moffatt, W. G. Pearsall y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 por John Wiley & Sons, New York.]

análisis se ocupa de los conceptos fundamentales de los sólidos cristalinos, y el Capítulo 4 está dedicado a las estructuras cristalinas de los metales, cerámicos y polímeros.

Cuando se describen estructuras cristalinas, los átomos (o iones) se consideran esferas rígidas que tienen diámetros bien definidos. Este es el denominado *modelo atómico de esfera rígida* en el que las esferas representan átomos vecinos en contacto. Un ejemplo del modelo de esferas sólidas que representa la disposición atómica de algunos de los metales elementales comunes, se muestra en la Figura 3.1a. En este caso particular, todos los átomos son idénticos. A veces el término **red** se utiliza en el contexto de estructuras cristalinas; en este sentido una *red* significa una disposición tridimensional de puntos que coinciden con las posiciones de los átomos (o centros de las esferas).

red

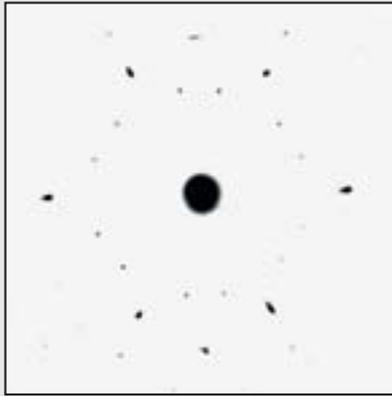
3.3 CELDAS UNITARIAS

El orden atómico en sólidos cristalinos indica qué grupos pequeños de átomos forman un patrón repetitivo. Es por ello que, en la descripción de estructuras cristalinas, a menudo es conveniente subdividir la estructura en entidades pequeñas que se repiten, denominadas **celdas unitarias**. Las celdas unitarias de la mayoría de las estructuras cristalinas son paralelepípedos o prismas con tres conjuntos de caras paralelas, uno de los cuales se dibuja dentro del agregado de esferas (véase Figura 3.1c) que, en este caso, es un cubo. La celda unitaria se elige para representar la simetría de la estructura cristalina, de manera que todas las posiciones de los átomos de un cristal pueden ser generados por las traslaciones de la celda unitaria a lo largo de los ejes. Así, pues, la celda unitaria es la unidad estructural fundamental y define la estructura cristalina mediante su geometría y por las posiciones de los átomos que la componen. Es aconsejable que los vértices de los paralelepípedos coincidan con las esferas rígidas que representan los átomos. Aunque se pueda elegir más de una celda unitaria para representar una determinada estructura cristalina en particular, generalmente se considera la celda unitaria que tiene el nivel más alto de simetría geométrica.

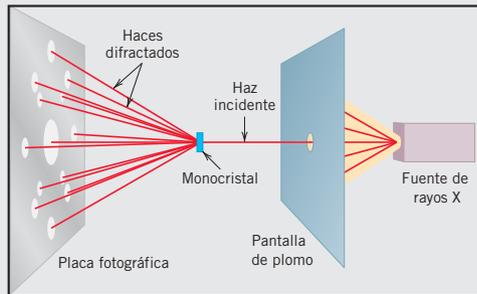
celda unitaria

Capítulo 4 Estructura en sólidos cristalinos

Cortesía de J. G. Byrne

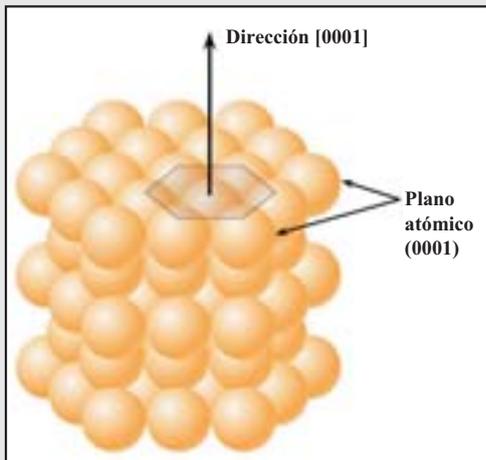


(a)

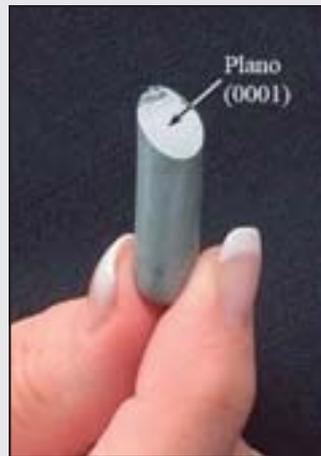


(b)

(a) Imagen de Difracción de rayos X [o fotografía de Laue (Sección 4.20)] para un monocrystal de magnesio. (b) Diagrama esquemático que ilustra cómo se generan los patrones de difracción (manchas) en (a). La pantalla de plomo bloquea todos los haces generados por la fuente de rayos X, salvo un estrecho haz, en una sola dirección. Este haz incidente es difractado por planos cristalográficos individuales del monocrystal (que tienen diferentes orientaciones), lo que da lugar a los distintos haces difractados que inciden en la placa fotográfica. Las intersecciones de estos haces con la placa aparecen como manchas cuando se revela la película. La mancha grande en el centro de (a) corresponde al haz incidente, que es paralelo a una dirección cristalográfica [0001]. Hay que señalar que la simetría hexagonal de la estructura cristalina hexagonal compacta del magnesio [mostrada en (c)] se indica



(c)



(d)

© William D. Callister, Jr.

mediante el patrón de puntos de difracción que se ha generado.

(d) Fotografía de un monocrystal de magnesio que se escinde (o divide) a lo largo de un plano (0001) de la superficie plana. Además, la dirección perpendicular a este plano es una dirección [0001].

(e) Fotografía de una rueda de automóvil ligera, fabricada con magnesio (*mag wheel*).

iStockphoto



(e)

[Figura (b) de J. E. Brady y F. Senese, *Chemistry: Matter and Its Changes*, 4a edición. Copyright © 2004 por John Wiley & Sons, Hoboken, NJ. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.]

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Estructura en sólidos cristalinos*?

Algunas de las propiedades de los materiales pueden explicarse por sus estructuras cristalinas. Por ejemplo, (a) magnesio y berilio, puros y no deformados, que tienen una determinada estructura cristalina, son mucho más frágiles (es decir, se fracturan con menores grados de deformación) que oro y plata, puros y no deformados, que tienen otra estructura cristalina distinta (véase

Sección 9.4); (b) los comportamientos magnéticos y ferroeléctricos permanentes de algunos materiales cerámicos se explican por sus estructuras cristalinas (Secciones 21.5 y 19.24); y (c) el grado de cristalinidad de polímeros semicristalinos afecta a la densidad, la rigidez, la resistencia y la ductilidad de éstos (Secciones 4.13 y 15.8).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Dibujar las celdas unitarias para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras, la cúbica centrada en el cuerpo y la hexagonal compacta.
2. Deducir las relaciones entre la longitud de arista de la celda unitaria y el radio atómico para la estructura cristalina cúbica centrada en las caras y la cúbica centrada en el cuerpo.
3. Calcular las densidades de los metales con estructuras cúbica centrada en las caras y cúbica centrada en el cuerpo, a partir de las unidades de la celda unitaria.
4. Esquematizar y describir las celdas unitarias de las estructuras cristalinas de cloruro de sodio, cloruro de cesio, blenda de zinc, diamante, fluorita y perovskita. Hacer lo mismo para las estructuras atómicas del grafito y del vidrio de sílice.
5. Teniendo en cuenta la fórmula química de un compuesto cerámico y los radios iónicos de los iones que lo componen, predecir la estructura cristalina.
6. Describir cómo las estructuras cristalinas cúbica centrada en las caras y hexagonal compacta, pueden ser generadas por el apilamiento de planos compactos de los átomos. Hacer lo mismo para la estructura cristalina de cloruro de sodio en términos de empaquetamiento de planos compactos de iones.
7. Describir brevemente el estado cristalino para materiales poliméricos.

4.1 INTRODUCCIÓN

Los conceptos fundamentales de las estructuras cristalinas (celdas unitarias, coordenadas cristalográficas puntuales, direcciones y planos) han sido explicados en el Capítulo 3. En este capítulo se presentan las estructuras cristalinas que se encuentran en metales, cerámicos y polímeros. Los materiales cerámicos se discuten con mayor detalle en el Capítulo 14. Las características y detalles de las estructuras de las cadenas poliméricas se tratan en el Capítulo 15. En la sección final de este capítulo se describe brevemente cómo las estructuras cristalinas se determinan experimentalmente a partir de técnicas de difracción de rayos X.

Estructuras metálicas cristalinas

El enlace atómico en este grupo de materiales es metálico y, por tanto, de naturaleza no direccional. En consecuencia, hay unas restricciones mínimas en cuanto al número y posición de los átomos vecinos más cercanos, lo que conduce a un número relativamente grande de vecinos muy próximos y empaquetamientos atómicos compactos para la mayoría de las estructuras cristalinas metálicas. Utilizando el modelo de estructura cristalina de esferas rígidas para los metales, cada esfera representa un ion. En la Tabla 4.1 se recogen los radios atómicos para varios metales. La mayor parte de los metales comunes presentan tres estructuras cristalinas relativamente simples: cúbica centrada en las caras, cúbica centrada en el cuerpo y hexagonal compacta.

4.2 ESTRUCTURA CÚBICA CENTRADA EN LAS CARAS

cúbica centrada en las caras (FCC)

Longitud de arista para la celda unitaria cúbica centrada en las caras.

Esta estructura cristalina, habitual en muchos metales, tiene una celda unitaria de geometría cúbica, con los átomos situados en cada uno de los vértices y en los centros de todas las caras del cubo, de ahí su denominación de estructura cristalina **cúbica centrada en las caras (FCC)**.^{*} Algunos de los metales más conocidos que tienen esta estructura cristalina son cobre, aluminio, plata y oro (véase Tabla 4.1). En la Figura 3.1a se muestra un modelo de esferas rígidas para la celda unitaria FCC, mientras que en la figura 3.1b los centros de los átomos están representados por círculos pequeños para proporcionar una mejor perspectiva de las posiciones de los átomos. El agregado de átomos de la Figura 3.1c representa una sección de un cristal que contiene muchas celdas unitarias FCC. Estas esferas o iones están en contacto a lo largo de la diagonal de una cara. La arista del cubo (de longitud a) y el radio atómico R se relacionan según la expresión

$$a = 2R\sqrt{2} \quad (4.1)$$

Este resultado se obtiene en el Problema Resuelto 4.1.

Tabla 4.1

Radios atómicos y estructuras cristalinas para 16 metales

| Metal | Estructura cristalina ^a | Radio atómico ^b (nm) | Metal | Estructura cristalina | Radio atómico (nm) |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| Aluminio | FCC | 0,1431 | Molibdeno | BCC | 0,1363 |
| Cadmio | HCP | 0,1490 | Níquel | FCC | 0,1246 |
| Cromo | BCC | 0,1249 | Platino | FCC | 0,1387 |
| Cobalto | HCP | 0,1253 | Plata | FCC | 0,1445 |
| Cobre | FCC | 0,1278 | Tantalio | BCC | 0,1430 |
| Oro | FCC | 0,1442 | Titanio (α) | HCP | 0,1445 |
| Hierro (α) | BCC | 0,1241 | Tungsteno | BCC | 0,1371 |
| Plomo | FCC | 0,1750 | Zinc | HCP | 0,1332 |

^aFCC = cúbica centrada en las caras; HCP = hexagonal compacta; BCC = cúbica centrada en el cuerpo. ^bUn nanómetro (nm) es igual a 10^{-9} m; para convertir nanómetros a unidades de angstrom (Å), se ha multiplicar el valor de nanómetros por 10.

En ocasiones es necesario determinar el número de átomos asociados a cada celda unitaria. En función de la ubicación de un átomo, se puede considerar que esté compartido con celdas unitarias adyacentes, es decir, que sólo una fracción del átomo está asignada a una celda específica. Por ejemplo, para celdas unitarias cúbicas, un átomo interior “pertenece” completamente a esa celda unitaria, un átomo que está en el centro de una cara está compartido con otra celda y un átomo situado en un vértice se comparte entre ocho celdas. El número de átomos por celda unitaria, N , puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$N = N_i + \frac{N_c}{2} + \frac{N_v}{8} \quad (4.2)$$

donde

N_i = número de átomos interiores

N_c = número de átomos en las caras

N_v = número de átomos en los vértices

Para la estructura cristalina FCC, hay ocho átomos en los vértices ($N_v = 8$), seis átomos en las caras ($N_c = 6$) y no hay átomos interiores ($N_i = 0$), por tanto, de la Ecuación 4.2,

$$N = 0 + \frac{6}{2} + \frac{8}{8} = 4$$

^{*}Se ha mantenido la notación del texto original, FCC, para la denominación abreviada de la estructura cúbica centrada en las caras, en lugar de su versión traducida, CCC (*N. de los T.*).

es decir, que se pueden asignar un total de cuatro átomos enteros a una celda unitaria determinada. Esto se representa en la Figura 3.1a, en la que se representan sólo porciones de esfera dentro de los límites del cubo. La celda está compuesta por el volumen del cubo que se genera desde los centros de los átomos de los vértices, como se muestra en la figura.

Las posiciones de los vértices y las caras son equivalentes; es decir, si el vértice del cubo situado originalmente en un átomo se traslada al centro del átomo de una cara, la estructura de la celda no se altera.

Otras dos características importantes de la estructura cristalina son el **número de coordinación** y el **factor de empaquetamiento atómico (FEA)**. En los metales, cada átomo siempre está en contacto con el mismo número de átomos vecinos, que es el número de coordinación. En las estructuras cúbicas centradas en las caras, el número de coordinación es 12. Esto puede comprobarse observando la Figura 3.1, en la que el átomo de la cara frontal tiene cuatro átomos vecinos en los vértices que lo rodean, cuatro átomos de los centros de las caras que están en contacto por atrás, y otros cuatro átomos equivalentes de los centros de las caras de la siguiente celda unitaria por la parte delantera (y que no se muestra).

El FEA es la suma de los volúmenes de las esferas de todos los átomos comprendidos en la celda unitaria (considerando el modelo atómico de esfera rígida) dividido por el volumen de esa celda unitaria, según

$$\text{FEA} = \frac{\text{volumen de los átomos en una celda unitaria}}{\text{volumen total de la celda unitaria}} \quad (4.3)$$

Definición del factor de empaquetamiento atómico

Para la estructura FCC, el factor de empaquetamiento atómico es 0,74, que es el empaquetamiento máximo posible si todas las esferas tienen el mismo diámetro. El cálculo de FEA también se incluye como un problema resuelto. Los metales presentan, habitualmente, factores de empaquetamiento atómico grandes para optimizar la protección proporcionada por la nube de electrones libres.

4.3 ESTRUCTURA CRISTALINA CÚBICA CENTRADA EN EL CUERPO

Otra estructura cristalina común en metales es la que tiene una celda unitaria cúbica con los átomos situados en los ocho vértices y un solo átomo en el interior del cubo, por eso se denomina estructura cristalina **cúbica centrada en el cuerpo (BCC)**.^{*} En la Figura 4.1c se muestra una colección de esferas que representa esta estructura cristalina, mientras que las

cúbica centrada en el cuerpo (BCC)

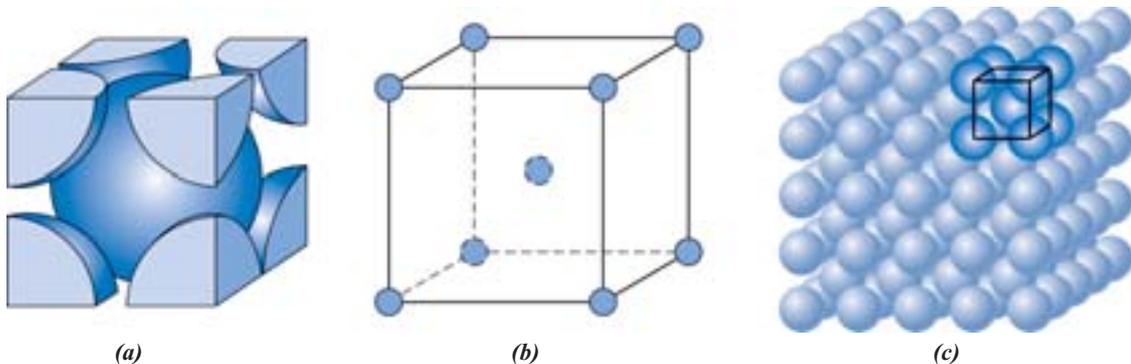
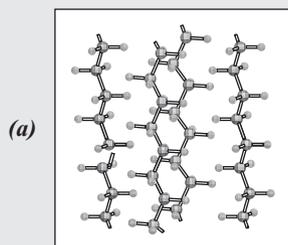


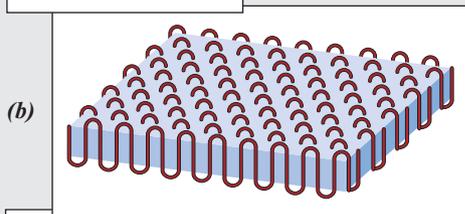
Figura 4.1 Representación de la celda unitaria de la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, (a) con esferas rígidas y (b) con esferas reducidas. (c) Representación de un agregado de muchos átomos con estructura BCC. [Figura (c) de W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 51. Copyright © 1964 por John Wiley & Sons, New York.]

^{*}Se ha mantenido la notación del texto original, BCC, para la denominación abreviada de la estructura cúbica centrada el cuerpo, en lugar de su versión traducida, CC (*N. de los T.*).

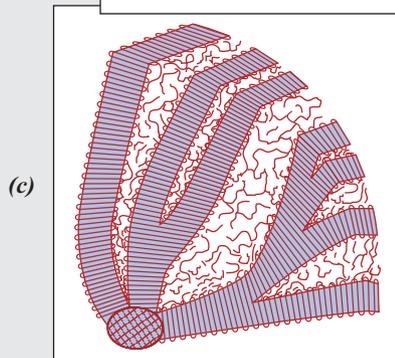
Capítulo 5 Estructuras de los polímeros



(a) Representación esquemática de la disposición de cadenas moleculares de la región cristalina del polietileno. Las bolas negras y grises representan átomos de carbono y de hidrógeno, respectivamente.

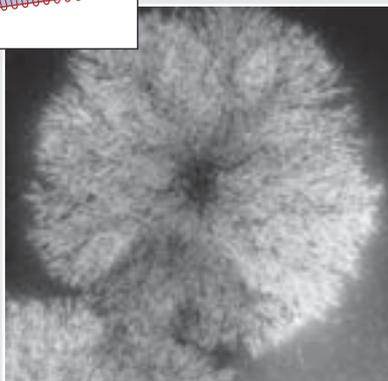


(b) Diagrama esquemático de una estructura lamelar (región cristalina polimérica laminar, en la que las cadenas moleculares, lineales y curvadas, se pliegan de una parte a otra). Los pliegues se encuentran en la superficie lamelar.



(c) Esquema de la estructura de una esferulita originada en algunos polímeros semicristalinos. Las lamelas se distribuyen radialmente, desde un centro común, separadas y conectadas por regiones de material amorfo, donde las cadenas moleculares (curvas rojas) adoptan configuraciones desordenadas.

(d) Micrografía electrónica de transmisión que muestra la estructura de una esferulita. Estructuras lamelares (líneas blancas) de unos 10 nm de grosor, se extienden radialmente desde el centro ($\times 12\ 000$).



(d)

(e) Una bolsa de polietileno con fruta en su interior.



(e)

(Fotografía de la Figura (d) proporcionada por P. J. Phillips. Publicada en R. Bartnikas y R. M. Eichhorn. *Engineering Dielectrics*, Vol. IIA, *Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behavior*, 1983. Copyright ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA 19103. Reproducción autorizada).

Glow Images

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Estructuras de los polímeros?*

Un número relativamente grande de características químicas y estructurales afectan a las propiedades y el comportamiento de los materiales poliméricos. Algunas de estas influencias son:

1. Grado de cristalinidad de polímeros semicristalinos en densidad, rigidez, resistencia y ductilidad (Secciones 4.13 y 15.8).

2. Grado de entrecruzamiento en materiales de rigidez comparable a la goma (Sección 15.9).

3. Química del polímero a las temperaturas de fusión y de transición vítrea (Sección 15.14).

Objetivos de aprendizaje

Después del estudio de este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir una típica molécula polimérica en función de su cadena estructural y, además, cómo se genera la molécula mediante unidades repetitivas.
2. Dibujar unidades repetitivas para polietileno, poli(cloruro de vinilo), politetrafluoretileno, polipropileno y poliestireno.
3. Calcular los pesos moleculares numérico medio y másico medio, así como el grado de polimerización de un polímero específico.
4. Nombrar y describir brevemente:
 - (a) los cuatro tipos generales de estructuras moleculares de los polímeros,
 - (b) los tres tipos de estereoisómeros,
 - (c) las dos clases de isómeros geométricos y
 - (d) los cuatro tipos de copolímeros.
5. Citar las diferencias de comportamiento y de estructura molecular entre polímeros termoplásticos y termoestables.
6. Describir brevemente y dibujar la estructura esferulítica de un polímero semicristalino.

5.1 INTRODUCCIÓN

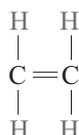
A lo largo de cientos de años se han utilizado polímeros naturales procedentes de plantas y animales. Estos materiales incluyen madera, caucho, algodón, lana, cuero y seda. Otros polímeros naturales, como las proteínas, los enzimas, los almidones y la celulosa, tienen importancia en los procesos bioquímicos y fisiológicos de plantas y animales. La moderna investigación científica ha determinado la estructura molecular de este grupo de materiales y ha desarrollado numerosos polímeros sintetizados a partir de pequeñas moléculas orgánicas. Muchos plásticos, cauchos y materiales fibrosos son polímeros sintéticos. Después de la Segunda Guerra Mundial, el campo de los materiales se ha visto revolucionado por la llegada de los polímeros sintéticos. La síntesis de estos materiales suele ser barata y las propiedades conseguidas comparables, y a veces superiores, a las de sus análogos naturales. En algunas aplicaciones los metales y la madera se sustituyen por polímeros, que tienen propiedades idóneas y se pueden fabricar a bajo coste.

Las propiedades de los polímeros, como en el caso de los metales y de las cerámicas, están relacionadas con la estructura elemental del material. En este capítulo se estudian las estructuras molecular y cristalina de los polímeros, y en el Capítulo 15 se tratará la relación entre estructura y algunas propiedades físicas y químicas, así como procedimientos de conformado y aplicaciones típicas.

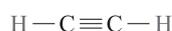
5.2 MOLÉCULAS DE HIDROCARBUROS

Dado que la mayoría de los polímeros son orgánicos, seguidamente se revisan algunos conceptos fundamentales relacionados con la estructura de sus moléculas. Muchos materiales orgánicos son *hidrocarburos*: compuestos de carbono e hidrógeno con enlace interatómico

covalente. Cada átomo de carbono tiene cuatro electrones que pueden participar en enlaces covalentes, mientras que cada átomo de hidrógeno sólo tiene un electrón enlazante. Un enlace covalente se forma cuando cada uno de los átomos del enlace contribuye con un electrón, como se ha representado en la Figura 2.12 para la molécula de hidrógeno (H_2). Dobles y triples enlaces entre dos átomos de carbono implican la contribución de dos o tres pares de electrones, respectivamente.¹ Por ejemplo, en el etileno, que tiene la fórmula química C_2H_4 , los dos átomos de carbono están enlazados entre sí por un doble enlace y cada uno de ellos a dos átomos de hidrógeno con enlaces sencillos, como se representa en la fórmula estructural



donde — y = representan los enlaces sencillo y doble, respectivamente. A veces se producen, como en el acetileno (C_2H_2) enlaces triples:



insaturado

Las moléculas que tienen dobles y triples enlaces covalentes se denominan **insaturadas**, lo que significa que cada átomo de carbono no está unido al número máximo (cuatro) de otros átomos como especifica su valencia. Un doble enlace de una molécula insaturada se puede interpretar como dos enlaces sencillos. La movilidad de la posición de uno de estos enlaces sencillos alrededor del átomo de carbono permite la adición de otro átomo o grupo de átomos a la molécula original. En un hidrocarburo **saturado** todos los enlaces son sencillos y no se pueden añadir otros nuevos átomos sin previa eliminación de los ya enlazados.

saturado

Algunos de los hidrocarburos más sencillos pertenecen a la familia de la parafina. Las moléculas en forma de cadena de parafina incluyen metano (CH_4), etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}). En la Tabla 15.1 se indica la composición y la estructura molecular de moléculas de parafina. Los enlaces covalentes entre átomos de una molécula son fuertes, pero los enlaces de hidrógeno y de Van der Waals entre moléculas son débiles; por este motivo estos hidrocarburos tienen puntos de fusión y de ebullición relativamente

Tabla 5.1

Composición y estructura molecular de algunos compuestos parafínicos: C_nH_{2n+2}

| Nombre | Composición | Estructura | Punto de ebullición (°C) |
|---------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Metano | CH_4 | $\begin{array}{c} H \\ \\ H-C-H \\ \\ H \end{array}$ | -164 |
| Etano | C_2H_6 | $\begin{array}{c} H & H \\ & \\ H-C & -C-H \\ & \\ H & H \end{array}$ | -88,6 |
| Propano | C_3H_8 | $\begin{array}{c} H & H & H \\ & & \\ H-C & -C & -C-H \\ & & \\ H & H & H \end{array}$ | -42,1 |
| Butano | C_4H_{10} | | -0,5 |
| Pentano | C_5H_{12} | | 36,1 |
| Hexano | C_6H_{14} | | 69,0 |

¹En el esquema de un enlace híbrido del carbono (Sección 2.6), un átomo de carbono con enlaces simples forma orbitales híbridos sp^3 ; un átomo de carbono con doble enlace forma híbridos sp^2 y un átomo de carbono con triple enlace adopta una hibridación sp .

Las bandas o anillos en la imagen de las esferulitas son el resultado de la torsión de las lamelas, como es el caso del caucho natural.

Las esferulitas de los polímeros equivalen a los granos de los metales policristalinos y de las cerámicas. Sin embargo, cada esferulita está formada por regiones lamelares cristalinas y por regiones amorfas. Polietileno, polipropileno, cloruro de polivinilo, politetrafluoroetileno y nylon tienen estructura esferulítica al cristalizar a partir de un líquido.

RESUMEN

| | |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Moléculas poliméricas | <ul style="list-style-type: none"> • La mayoría de los materiales poliméricos están compuestos de cadenas muy largas de átomos de carbono enlazados con grupos laterales de varios átomos (O, Cl, etc.) o grupos orgánicos tales como metilo, etilo o fenilo. • Estas macromoléculas están formadas por unidades repetitivas, entidades estructurales muy pequeñas, que se repiten a lo largo de la cadena. |
| La química de moléculas poliméricas | <ul style="list-style-type: none"> • En la Tabla 5.3 se muestran las unidades repetitivas de polímeros químicamente sencillos: polietileno, politetrafluoroetileno, poli(cloruro de vinilo), polipropileno, etc. • Un <i>homopolímero</i> tiene todas las unidades repetitivas del mismo tipo. Las cadenas de los copolímeros se componen de dos o más clases de unidades repetitivas. • Las unidades repetitivas se clasifican según el número de enlaces activos (es decir, su funcionalidad): <ul style="list-style-type: none"> Los monómeros bifuncionales tienen dos enlaces activos y forman esqueletos de estructura bidimensional. Los monómeros trifuncionales tienen tres enlaces activos y forman estructuras reticuladas en tres dimensiones. |
| Peso molecular | <ul style="list-style-type: none"> • El peso molecular de los <i>altos polímeros</i> puede superar el millón. No todas las moléculas son del mismo tamaño, por lo que se determina una distribución de pesos moleculares. • El peso molecular se expresa habitualmente en función de los valores numérico y másico medios. Los valores de estos parámetros se obtienen empleando las Ecuaciones 5.5a y 5.5b, respectivamente. • La longitud de la cadena también se puede especificar mediante el grado de polimerización, que indica el número medio de unidades repetitivas en la molécula (Ecuación 5.6). |
| Forma molecular | <ul style="list-style-type: none"> • El enmarañamiento molecular se produce al torcer, doblar o plegar las cadenas como consecuencia de las rotaciones de los enlaces de la cadena. • La flexibilidad rotacional decrece en presencia de dobles enlaces en la cadena y de grupos laterales voluminosos en la unidad repetitiva. |
| Estructura molecular | <ul style="list-style-type: none"> • Existen cuatro estructuras moleculares: lineal (Figura 5.7a), ramificada (Figura 5.7b), entrecruzada (Figura 5.7c) y reticulada (Figura 5.7d). |
| Configuraciones moleculares | <ul style="list-style-type: none"> • En las unidades repetitivas con más de un átomo o grupo de átomos unidos a la cadena principal: <ul style="list-style-type: none"> Son posibles las configuraciones cabeza-cabeza y cabeza-cola. Diferencias en la disposición espacial de estos átomos o grupos de átomos conducen a los estereoisómeros isotáctico, sindiotáctico y atáctico. • Cuando una unidad repetitiva tiene dobles enlaces pueden aparecer isómeros cis y trans. |

Polímeros termoplásticos y termoestables

- En cuanto al comportamiento a temperaturas elevadas, los polímeros se clasifican en termoplásticos o termoestables.

Los polímeros *termoplásticos* tienen estructuras lineales y ramificadas; se ablandan cuando se calientan y se endurecen cuando se enfrían.

Por el contrario, los polímeros *termoestables*, una vez que se endurecen, no se ablandan con el calentamiento; sus estructuras son entrecruzadas y reticuladas.

Copolímeros

- Los tipos de copolímeros son: al azar (Figura 5.9a), alternados (Figura 5.9b), en bloque (Figura 5.9c) y de injerto (Figura 5.9d).
- Las unidades repetitivas empleadas en materiales de caucho polimérico se presentan en la Tabla 5.5.

Cristales poliméricos

- Las regiones cristalinas (lamelas) tienen una estructura de cadena plegada (Figura 5.11) Las cadenas dentro de la lamela están alineadas y dobladas hacia atrás y adelante sobre sí mismas, con pliegues localizados en la superficie de la lamela.
- Muchos polímeros semicristalinos forman esferulitas, que consisten en una colección de lamelas dispuestas radialmente desde el centro.

Términos y conceptos importantes

| | | |
|-----------------------------|----------------------------|------------------------|
| Bifuncional | Estereoisomería | Polímero entrecruzado |
| Cis (estructura) | Funcionalidad | Polímero lineal |
| Configuración atáctica | Grado de polimerización | Polímero ramificado |
| Configuración isotáctica | Homopolímero | Polímero reticulado |
| Configuración sindiotáctica | Insaturado | Polímero termoestable |
| Copolímero | Isomería | Polímero termoplástico |
| Copolímeros al azar | Lamela | Saturado |
| Copolímeros alternados | Macromolécula | Trans (estructura) |
| Copolímeros de injerto | Modelo de cadenas plegadas | Trifuncional |
| Copolímeros en bloque | Monómero | Unidad repetitiva |
| Esferulita | Polímero | |

REFERENCIAS

- Brazel, C. S. y S. L. Rosen, *Fundamental Principles of Polymeric Materials*, 3rd edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2012.
- Carraher, C. E., Jr., *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry*, 8th edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- Cowie, J. M. G. y V. Arrighi, *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*, 3rd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- Engineered Materials Handbook*, Vol. 2, *Engineering Plastics*, ASM International, Materials Park, OH, 1988.
- McCrum, N. G., C. P. Buckley y C. B. Bucknall, *Principles of Polymer Engineering*, 2nd edition, Oxford University Press, Oxford, 1997. Chapters 0–6.
- Painter, P. C. y M. M. Coleman, *Fundamentals of Polymer Science: An Introductory Text*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 1997.
- Rodriguez, F., C. Cohen, C. K. Ober y L. Archer, *Principles of Polymer Systems*, 5th edition, Taylor & Francis, New York, 2003.
- Sperling, L. H., *Introduction to Physical Polymer Science*, 4th edition, Wiley, Hoboken, NJ, 2006.
- Young, R. J. y P. Lovell, *Introduction to Polymers*, 3rd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2011.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

Moléculas de hidrocarburos y de polímeros La química de moléculas poliméricas

- 5.1 Esquematizar las unidades repetitivas de los siguientes polímeros: (a) policlorotrifluoroetileno y (b) poli(vinil alcohol) [o poli(alcohol de vinilo)].

Peso molecular

- 5.2 Calcular los pesos moleculares de la unidad repetitiva de los siguientes polímeros: (a) poli(cloruro de vinilo), (b) poli(etilen tereftalato), (c) policarbonato y (d) poli(vinil alcohol).
- 5.3 El peso molecular numérico medio de un polipropileno es de 1 000 000 g/mol. Calcular el grado de polimerización.
- 5.4 (a) Calcular el peso molecular de la unidad repetitiva del poliestireno. (b) Calcular el peso molecular numérico medio de un poliestireno con un grado de polimerización de 26 000.
- 5.5 La siguiente tabla cita el peso molecular del polipropileno. Calcular (a) el peso molecular numérico medio, (b) el peso molecular másico medio y (c) el grado de polimerización.

| Intervalo de peso molecular (g/mol) | x_i | w_i |
|-------------------------------------|-------|-------|
| 8000–16 000 | 0,05 | 0,02 |
| 16 000–24 000 | 0,16 | 0,10 |
| 24 000–32 000 | 0,24 | 0,20 |
| 32 000–40 000 | 0,28 | 0,30 |
| 40 000–48 000 | 0,20 | 0,27 |
| 48 000–56 000 | 0,07 | 0,11 |

- 5.6 Se tabulan los pesos moleculares de algunos polímeros. Calcular (a) el peso molecular numérico medio y (b) el peso molecular másico medio. (c) Si se sabe que el grado de polimerización es 750, ¿a qué polímero de los listados en Tabla 5.3 corresponde? ¿Por qué?

| Intervalo de peso molecular (g/mol) | x_i | w_i |
|-------------------------------------|-------|-------|
| 15 000–30 000 | 0,04 | 0,01 |
| 30 000–45 000 | 0,07 | 0,04 |
| 45 000–60 000 | 0,16 | 0,11 |
| 60 000–75 000 | 0,26 | 0,24 |
| 75 000–90 000 | 0,24 | 0,27 |
| 90 000–105 000 | 0,12 | 0,16 |
| 105 000–120 000 | 0,08 | 0,12 |
| 120 000–135 000 | 0,03 | 0,05 |

- 5.7 ¿Es posible que un poli(metacrilato de metilo) homopolímero tenga un grado de polimerización de 530? ¿Por qué sí o por qué no?

| Intervalo de peso molecular (g/mol) | w_i | x_i |
|-------------------------------------|-------|-------|
| 8 000–20 000 | 0,02 | 0,05 |
| 20 000–32 000 | 0,08 | 0,15 |
| 32 000–44 000 | 0,17 | 0,21 |
| 44 000–56 000 | 0,29 | 0,28 |
| 56 000–68 000 | 0,23 | 0,18 |
| 68 000–80 000 | 0,16 | 0,10 |
| 80 000–92 000 | 0,05 | 0,03 |

- 5.8 El polietileno de alta densidad se clora induciendo la sustitución de átomos de hidrógeno por átomos de cloro.
- (a) Determinar la concentración de Cl (en % en peso) que se debe añadir para que la sustitución alcance el 8% de los átomos de hidrógeno originales.
- (b) ¿En qué difiere la cloración del polietileno de la del poli(cloruro de vinilo)?

Forma molecular

- 5.9 En una molécula de polímero lineal que gira libremente, la longitud total L de la cadena depende de la longitud del enlace d entre átomos de la cadena, del número total de enlaces en la molécula N y del ángulo θ entre átomos de la cadena. Es decir:

$$L = Nd \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5.8)$$

Además, la distancia media cabeza-cola r (Figura 5.6) de una serie de moléculas poliméricas es igual a

$$r = d\sqrt{N} \quad (5.9)$$

Un politetrafluoretileno lineal tiene un peso molecular numérico medio de 300 000 g/mol; calcular los valores medios de L y r para este material.

- 5.10 Usando las definiciones de longitud total de la cadena molecular L (Ecuación 5.8) y distancia media cabeza-cola r (ecuación 5.9) determinar para el polietileno:
- (a) el peso molecular numérico medio para $L = 2600$ nm y
- (b) el peso molecular numérico medio para $r = 30$ nm.

Configuración molecular

- 5.11** Dibujar porciones de la molécula de poliestireno lineal que son: (a) sindiotáctico, (b) atáctico y (c) isotáctico. Utilizar los esquemas bidimensionales de las notas al pie de página 9, 10 y 11 de este capítulo.
- 5.12** Esquematizar las estructuras cis y trans para (a) butadieno y (b) cloropreno. Utilizar los esquemas bidimensionales de la nota al pie de página 12 de este capítulo.

Polímeros termoplásticos y termoestables

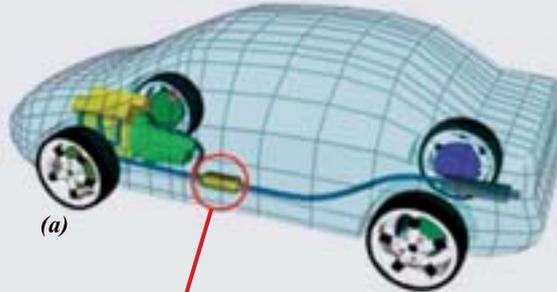
- 5.13** Comparar los polímeros termoplásticos y termoestables (a) en función de las características mecánicas en sobrecalentamiento y (b) en función de las posibles estructuras moleculares.
- 5.14** (a) ¿Es posible triturar y reutilizar el fenol-formaldehído? ¿Por qué sí o por qué no?
(b) ¿Es posible triturar y reutilizar el polipropileno? ¿Por qué sí o por qué no?

Copolímeros

- 5.15** Esquematizar la estructura de la unidad repetitiva de cada uno de los siguientes copolímeros alternados: (a) poli(butadieno-cloropreno), (b) poli(estireno-metacrilato de metilo) y (c) poli(acrilonitrilo-cloruro de vinilo).
- 5.16** El peso molecular numérico medio del copolímero alterno poli(estireno-butadieno) es 1 350 000 g/mol. Determinar el número medio de unidades repetitivas de estireno y de butadieno por molécula.
- 5.17** Calcular el peso molecular numérico medio de un copolímero al azar de caucho nitrilo [copolímero poli(acrilonitrilo-butadieno)] cuya fracción de unidades repetitivas del butadieno es 0,30. Suponer que esta concentración corresponde a un grado de polimerización de 2500.
- 5.18** Se sabe que un copolímero alterno tiene un peso molecular numérico medio de 250 000 g/mol y un grado de polimerización numérico medio de 350. Si una unidad repetitiva es el etileno ¿cuál es la otra unidad repetitiva: etileno, propileno, tetrafluoretileno o cloruro de vinilo? ¿Por qué?
- 5.19** (a) Determinar la relación entre unidades repetitivas de butadieno y de acrilonitrilo en un copolímero que tiene un peso molecular másico medio de 350 000 g/mol y un grado de polimerización másico medio de 4500.
(b) De las siguientes posibilidades: al azar, alterno, en bloque o de injerto, ¿de qué tipo o tipos de copolímeros será éste? ¿Por qué?
- 5.20** Copolímeros entrecruzados consistentes en 60% en peso de etileno y 40% en peso de propileno pueden tener propiedades similares a las del caucho natural. En un copolímero de esta composición, determinar la fracción de ambos tipos de unidades repetitivas.
- 5.21** Un copolímero al azar de poli(isobutileno-isopreno) tiene un peso molecular másico medio de 200 000 g/mol y un grado de polimerización de 3000. Calcular la fracción de unidades repetitivas de isobutileno y de isopreno en este copolímero.

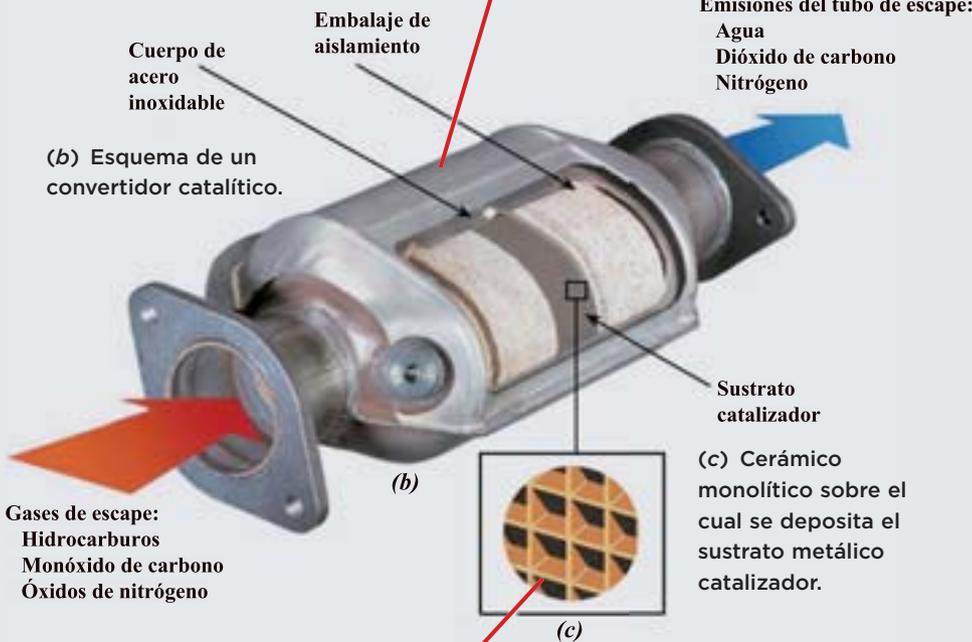
Capítulo 6 Imperfecciones en sólidos

(a) Diagrama esquemático que muestra la ubicación del convertidor catalítico en el sistema de escape de un automóvil.



Gracias a los defectos atómicos es posible reducir las emisiones de gases contaminantes procedentes de los actuales motores de automóviles. Un convertidor catalítico es un dispositivo que reduce los contaminantes y se instala en el sistema de escape de los automóviles. Las moléculas de los gases contaminantes se adhieren a los defectos de la superficie de materiales metálicos cristalinos del convertidor catalítico, y durante ese período de contacto, esas moléculas experimentan reacciones químicas que las convierten en otras sustancias no contaminantes o menos contaminantes. En el apartado de Contenidos Innovadores de la Sección 6.8 se proporciona una descripción detallada de este proceso.

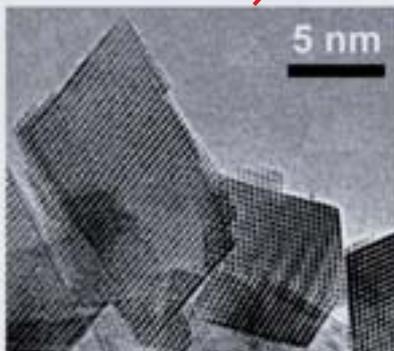
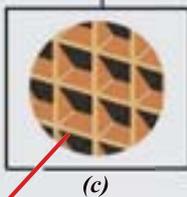
(b) Esquema de un convertidor catalítico.



Emisiones del tubo de escape:
Agua
Dióxido de carbono
Nitrógeno

Gases de escape:
Hidrocarburos
Monóxido de carbono
Óxidos de nitrógeno

(c) Cerámico monolítico sobre el cual se deposita el sustrato metálico catalizador.



(d) Micrografía electrónica de transmisión de alta resolución que muestra los defectos superficiales en los monocristales de un material utilizado en convertidores catalíticos.

[Figura (a) de W. J. Stark, L. Mädler, M. Maciejewski, S. E. Pratsinis y A. Baiker, "Flame-Synthesis of Nanocrystalline Ceria/Zirconia: Effect of Carrier Liquid," *Chem. Comm.*, 588-589 (2003). Reproducción autorizada por The Royal Society of Chemistry.]

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Imperfecciones en sólidos?*

Las propiedades de algunos materiales están profundamente influenciadas por la presencia de imperfecciones. En consecuencia, es importante tener un conocimiento de los tipos de imperfecciones que existen y de cómo afectan al comportamiento de los materiales. Por ejemplo, las propiedades mecánicas de los metales puros experimentan alteraciones significativas cuando éstos se alean (es decir, cuando se añaden átomos de impurezas). Por ejemplo, el latón (70% de cobre/30% de

zinc en peso) es mucho más duro y fuerte que el cobre puro (Sección 9.9).

Asimismo, los dispositivos microelectrónicos de circuitos integrados que se encuentran en ordenadores, calculadoras y diversos electrodomésticos, deben su comportamiento a concentraciones muy controladas de impurezas específicas que se incorporan en pequeñas regiones, generando zonas localizadas de materiales semiconductores (Secciones 19.11 y 19.15).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir los defectos cristalinos de vacante y autointerstitial.
2. Calcular el número de vacantes en equilibrio en un material a una temperatura determinada, conociendo las constantes relevantes.
3. Nombrar y describir ocho defectos puntuales iónicos diferentes que se encuentran en compuestos cerámicos (incluyendo defectos Schottky y Frenkel).
4. Nombrar los dos tipos de soluciones sólidas, haciendo una breve definición escrita o esquema de cada uno.
5. Nombrar y describir ocho defectos puntuales iónicos diferentes que se encuentran en materiales metálicos.
6. Conociendo las masas y pesos atómicos de dos o más elementos en una aleación de metal, calcular el porcentaje en peso y el porcentaje atómico para cada elemento.
7. Para las dislocaciones de borde, las helicoidales y las mixtas:
 - (a) describir y hacer un dibujo de cada tipo de dislocación,
 - (b) señalar la ubicación de la línea de dislocación en cada caso y
 - (c) indicar la dirección en la que se extiende la línea de dislocación.
8. Describir la estructura atómica en la vecindad de
 - (a) un límite de grano y (b) un límite de macla.

6.1 INTRODUCCIÓN

imperfección

Hasta aquí se ha supuesto tácitamente que a escala atómica existe un orden perfecto en todos los materiales cristalinos. Sin embargo, el sólido ideal no existe: todos los materiales tienen un gran número de defectos o **imperfecciones** y, de hecho, muchas de las propiedades de los materiales son profundamente sensibles a las desviaciones de la perfección cristalina. El efecto de estas irregularidades no siempre es negativo y, a menudo, algunas de las características de los materiales son gracias a la introducción controlada de defectos, como se detalla en los capítulos siguientes.

defecto puntual

Un *defecto cristalino* se refiere a una irregularidad de la red para la que una o más de sus dimensiones son del orden de un diámetro atómico. La clasificación de las imperfecciones cristalinas normalmente se hace según la geometría o las dimensiones del defecto. En este capítulo se tratan varias imperfecciones diferentes, incluyendo los **defectos puntuales** (asociados a una o dos posiciones atómicas), los defectos lineales (o unidimensionales) y los defectos interfaciales o de límite de grano, que son bidimensionales. También se comentarán las impurezas en sólidos, ya que pueden existir átomos de impurezas como defectos puntuales. Finalmente, se describen brevemente las técnicas de observación microscópica de los defectos y la estructura de los materiales.

Defectos puntuales

6.2 DEFECTOS PUNTUALES EN LOS METALES

vacante

El más simple de los defectos puntuales es la **vacante**, o vacante de red, que hace referencia a una posición ocupada por un átomo, aquí ausente (Figura 6.1). Todos los sólidos cristalinos contienen vacantes y, de hecho, no es posible crear un material cristalino libre de

Figura 6.1 Representación bidimensional de una vacante y un defecto autointersticial. (Adaptado de W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, *Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 77. Copyright © 1964 por John Wiley & Sons, New York, NY. Reproducción autorizada por Wiley & Sons, Inc.)

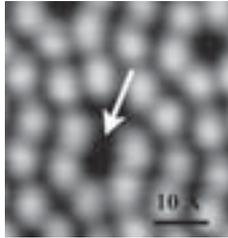
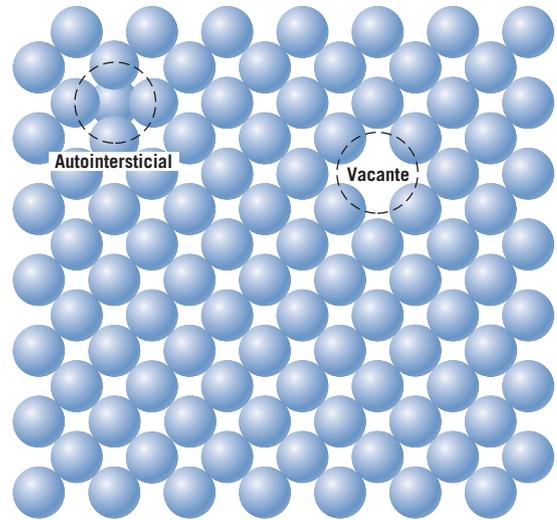


Imagen de Microscopía de Fuerza Atómica (AFM) que muestra una vacante en un plano de la superficie de tipo (111) para el silicio. Aproximadamente $\times 7000000$. (Micrografía cortesía de D. Huang, Stanford University).



estos defectos. La necesidad de la existencia de vacantes se explica mediante los principios de la termodinámica: básicamente, la presencia de vacantes aumenta la entropía (es decir, la aleatoriedad) del cristal.

El número de vacantes en equilibrio N_v para una cantidad determinada de material (generalmente por metro cúbico), depende y aumenta con la temperatura según

$$N_v = N \exp\left(-\frac{Q_v}{kT}\right) \quad (6.1)$$

Relación del número de vacantes en equilibrio con la temperatura

constante de Boltzmann

En esta expresión, N es el número total de lugares atómicos (generalmente por metro cúbico), Q_v es la energía necesaria para la formación de una vacante (J/mol o eV/átomo), T es la temperatura absoluta en kelvin¹ y k es la **constante de Boltzmann**. El valor de k es $1,38 \times 10^{-23}$ J/átomo·K, o $8,62 \times 10^{-5}$ eV/átomo·K, dependiendo de las unidades de Q_v .² Por tanto, el número de vacantes aumenta exponencialmente con la temperatura, es decir, tal como T aumenta en la Ecuación 6.1, también lo hace el término $\exp(-Q_v/kT)$. Para la mayoría de los metales, la fracción de vacantes N_v/N justo por debajo de la temperatura de fusión es del orden de 10^{-4} , es decir, una de cada 10 000 posiciones de la red está vacía. Como se indica en las discusiones siguientes, otros parámetros del material tienen una relación exponencial con la temperatura, similar a la que se recoge en la Ecuación 6.1.

autointersticial

Un defecto **autointersticial** se forma cuando un átomo del cristal se coloca en un *lugar intersticial* de la red, que es un pequeño espacio vacío que ordinariamente no está ocupado. Este tipo de defecto también está representado en la Figura 6.1. En los metales, un defecto autointersticial introduce distorsiones en la red relativamente grandes, porque el átomo es sustancialmente mayor que la posición intersticial en la que se sitúa. En consecuencia, la formación de este defecto no es muy probable, y existe en concentraciones muy pequeñas que son significativamente inferiores a las de vacantes.

¹Temperatura absoluta en kelvin (K) es igual a $^{\circ}\text{C} + 273$.

²La constante de Boltzmann por mol de átomos de gas se convierte en la constante R . En ese caso, $R = 8,31$ J/mol·K.

Capítulo 7 Difusión



Fotografía cortesía de Surfeu Division Midland-Ross

La primera fotografía de esta página corresponde a un engranaje de acero que ha sido *endurecido superficialmente*, es decir, que la capa exterior de la superficie se ha endurecido selectivamente mediante un tratamiento térmico de difusión del carbono de la atmósfera a elevada temperatura. La zona endurecida se aprecia como una región oscura en el borde exterior del segmento de engranaje seccionado. El aumento del contenido de carbono implica un aumento de la dureza de la superficie (como se explica en la Sección 12.7) que, a su vez, conduce a un incremento de la resistencia al desgaste del engranaje. Además, dentro de esta región se introducen esfuerzos de compresión residuales, que dan lugar a una mejora en la resistencia a la rotura por fatiga del engranaje cuando está en servicio (Capítulo 10).

Los engranajes de acero endurecidos se utilizan en transmisiones de automóviles, similares a la mostrada en la fotografía situada debajo del engranaje.



Cortesía de Ford Motor Company



© iStockphoto



© BRIAN KERSEY/UPI/Landov LLC

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Difusión*?

La mayoría de los materiales a menudo se someten a tratamientos térmicos que mejoran sus propiedades. Los fenómenos que ocurren durante los tratamientos térmicos casi siempre implican difusión atómica. A menudo conviene un aumento de la velocidad de difusión y ocasionalmente se toman medidas para reducirla. Las temperaturas y los tiempos de tratamiento térmico y/o la

velocidad de enfriamiento se predicen utilizando cálculos matemáticos y constantes de difusión apropiadas. El engranaje de acero que se muestra al inicio de la página anterior ha sido endurecido superficialmente (Sección 10.10); es decir, su dureza y su resistencia a la rotura por fatiga se han incrementado por difusión de un exceso de carbono o nitrógeno en la capa exterior de la superficie.

Objetivos de aprendizaje

Después del estudio de este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Identificar y describir los dos mecanismos atómicos de difusión.
2. Distinguir entre difusión en estado estacionario y en estado no estacionario.
3. (a) Escribir las ecuaciones de la primera y la segunda ley de Fick y definir todos los parámetros.
(b) Destacar el tipo de difusión en el que se aplican normalmente cada una de estas ecuaciones.
4. Escribir la solución a la segunda ley de Fick para la difusión en un sólido semiinfinito, cuando la concentración de difusión de las especies en la superficie se mantiene constante. Definir todos los parámetros en esta ecuación.
5. Calcular el coeficiente de difusión de un material a una temperatura determinada, considerando el valor adecuado de las constantes de difusión.
6. Observar alguna diferencia en los mecanismos de difusión de los metales y los sólidos iónicos.

7.1 INTRODUCCIÓN

difusión

La mayoría de los procesos y las reacciones más importantes del tratamiento de materiales se basan en la transferencia de masa, bien dentro de un determinado sólido (generalmente a nivel microscópico), o bien desde un líquido, un gas u otro sólido. Esta transferencia va acompañada inseparablemente de la **difusión**, un fenómeno de transporte por movimiento atómico. En este capítulo se discuten los mecanismos atómicos de la difusión, los desarrollos matemáticos de la difusión y la influencia de la temperatura y de la naturaleza de las sustancias difusivas en la velocidad de difusión.

El fenómeno de la difusión se puede demostrar mediante el *par difusor* formado por la unión de dos metales puestos en contacto a través de las dos caras, como está ilustrado para el cobre y el níquel en la Figura 7.1, en la que se ha esquematizado la posición de los átomos y la composición a través de la intercara. Este par se calienta a elevada temperatura (por debajo de la temperatura de fusión de ambos metales) durante un largo período de tiempo y luego se enfría a temperatura ambiente. El análisis químico revela una condición parecida a la registrada en la Figura 7.2: cobre y níquel puros en los extremos del par,

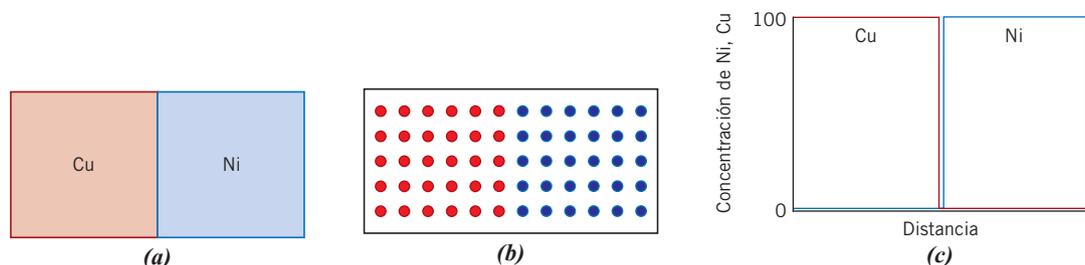


Figura 7.1 (a) Par difusor cobre-níquel antes de un tratamiento térmico a elevada temperatura. (b) Representación esquemática de las localizaciones de los átomos de Cu (círculos rojos) y Ni (círculos azules) dentro del par difusor. (c) Concentraciones de cobre y de níquel en función de la distancia en la intercara del par.

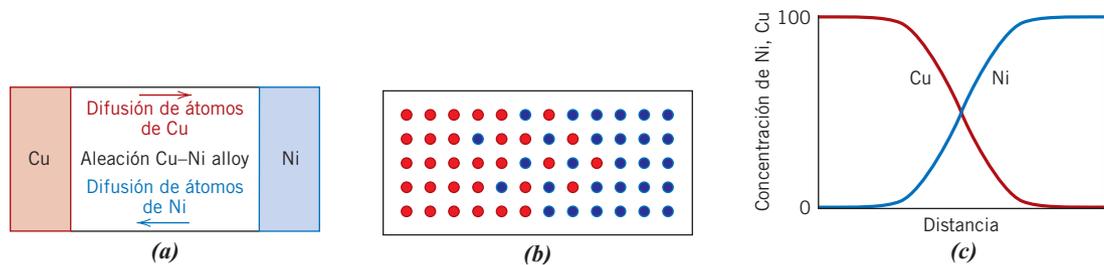


Figura 7.2 (a) Zona de aleación por difusión del par difusivo cobre-níquel después de un tratamiento térmico a temperatura elevada. (b) Representación esquemática de las localizaciones de los átomos de Cu (círculos rojos) y Ni (círculos azules) dentro del par difusor. (c) Concentraciones de cobre y de níquel en función de la posición en el par.

separados por una región de aleación. La composición de ambos metales varía con la distancia, como se ilustra en la Figura 7.2c. Este resultado indica que los átomos de cobre han emigrado o difundido dentro del níquel y que el níquel ha difundido dentro del cobre. Este proceso, en que los átomos de un metal difunden en el otro, se denomina **interdifusión** o **difusión de impurezas**.

Desde el punto de vista macroscópico la interdifusión se interpreta como los cambios de concentración que ocurren con el tiempo, como en el par de difusión Cu-Ni. Existe un claro transporte de átomos desde las regiones de elevada concentración a las de baja concentración. También se produce difusión en metales puros, en los que los átomos del mismo tipo intercambian posiciones, proceso denominado **autodifusión**, aunque no se puede observar por los cambios de composición, evidentemente.

interdifusión
difusión de impurezas

autodifusión

7.2 MECANISMOS DE DIFUSIÓN

A nivel atómico, la difusión consiste en la migración de los átomos de un sitio de la red a otro. En los materiales sólidos, los átomos están en continuo movimiento y cambian rápidamente de posición. La movilidad atómica exige dos condiciones: 1) un lugar vecino vacío, y 2) que el átomo debe tener suficiente energía como para romper los enlaces con los átomos vecinos y distorsionar la red durante el desplazamiento. Esta energía es de naturaleza vibratoria (Sección 6.10). A una temperatura determinada, alguna pequeña fracción del número total de átomos es capaz de difundir debido a la magnitud de su energía vibratoria y esta fracción aumenta al ascender la temperatura.

Se han propuesto varios modelos diferentes para este movimiento atómico, pero para la difusión en metales predominan dos.

Difusión por vacantes

En la Figura 7.3a se ha esquematizado un mecanismo de difusión que implica el intercambio de un átomo desde una posición reticular estable a una vacante o lugar reticular vecino vacío. Este mecanismo recibe el nombre de **difusión por vacantes**. Naturalmente, este proceso necesita de la presencia de vacantes y las posibilidades de la difusión de las vacantes es función del número de estos defectos. A temperatura elevada el número de vacantes de un metal es significativo (Sección 6.2). Puesto que en el movimiento difusivo los átomos y las vacantes intercambian posiciones, el movimiento de los átomos en la difusión va en sentido opuesto al de las vacantes. La autodifusión y la interdifusión ocurren mediante este mecanismo; en la interdifusión los átomos de impurezas se sustituyen por átomos de disolvente, que son los átomos de la red inicial.

difusión por vacantes

Difusión intersticial

El segundo tipo de difusión implica a átomos que van desde una posición intersticial a otra vecina desocupada. El mecanismo tiene lugar por interdifusión de átomos de soluto, como hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, que tienen átomos pequeños, idóneos

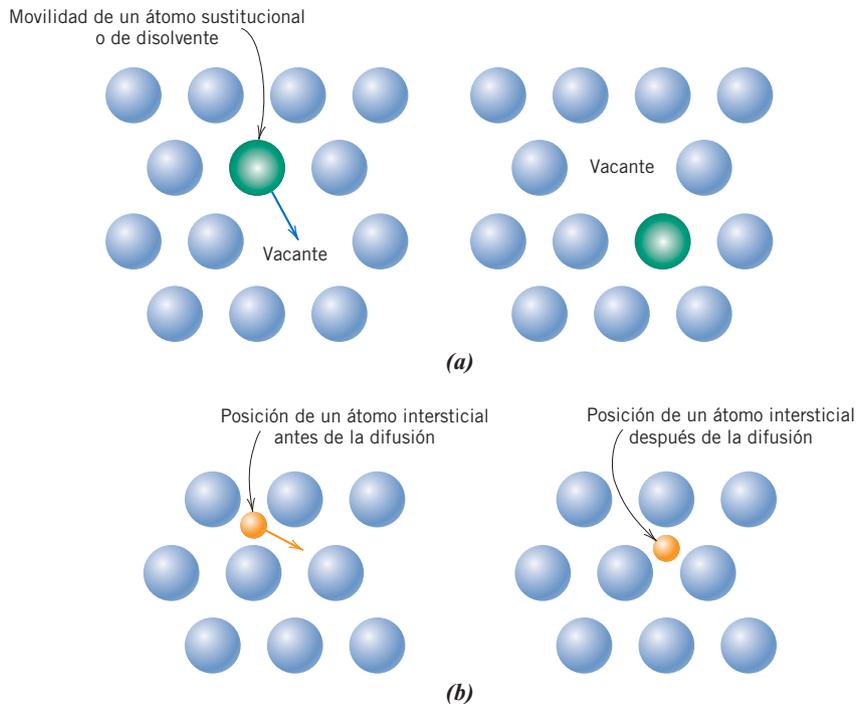


Figura 7.3 Representación esquemática de (a) difusión por vacantes y (b) difusión intersticial.

difusión intersticial

para ocupar posiciones intersticiales. Este fenómeno se denomina **difusión intersticial** (Figura 7.3b). Los átomos de soluto sustitucionales raramente ocupan posiciones intersticiales y no difunden por este mecanismo.

En la mayoría de las aleaciones, la difusión intersticial ocurre más rápidamente que la difusión por vacantes, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que las vacantes y tienen mayor movilidad. Teniendo en cuenta que hay más posiciones intersticiales vacías que vacantes, la probabilidad de movimiento atómico intersticial es mayor que la difusión por vacantes.

7.3 DIFUSIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO

flujo de difusión

Desde el punto de vista macroscópico, la difusión es un *proceso que depende del tiempo*: la cantidad de un elemento transportado dentro de otro es una función del tiempo. Muchas veces es necesario conocer a qué velocidad ocurre la difusión, o la *velocidad de la transferencia de masa*. Normalmente esta velocidad se expresa como un **flujo de difusión** (J), definido como la masa (o número de átomos) M que difunden perpendicularmente a través de la unidad de área de un sólido por unidad de tiempo. La expresión matemática se puede representar por:

Definición del flujo de difusión

$$J = \frac{M}{At} \quad (7.1)$$

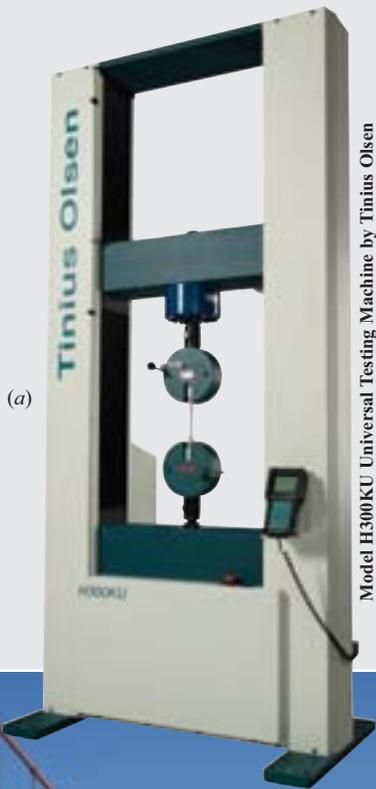
donde A es el área a través de la cual ocurre la difusión y t el tiempo que dura la difusión. Las unidades de J son kilogramos (o átomos) por metro cuadrado por segundo ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ o $\text{átomos}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$).

La expresión matemática de la difusión en estado estacionario en una dirección (x) es relativamente sencilla y el flujo de difusión es proporcional al gradiente de concentración $\frac{dC}{dx}$ según la expresión

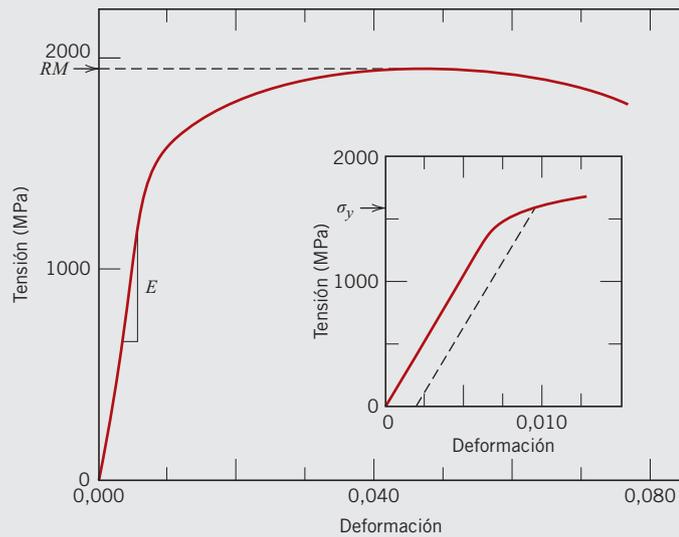
Primera ley de Fick: flujo de difusión en estado estacionario (en una dirección)

$$J = -D \frac{dC}{dx} \quad (7.2)$$

Capítulo 8 Propiedades mecánicas de los metales



(a)



(b)

La Figura (a) muestra un aparato que mide las propiedades mecánicas de los metales a partir de fuerzas de tracción aplicadas (Secciones 8.3 y 8.4). La Figura (b) se genera a partir de un ensayo de tracción realizado con un aparato como éste en una

muestra (o probeta) de acero. Los datos representados son la tensión (eje vertical, como medida de la fuerza aplicada) frente a la deformación (eje horizontal, relacionado con el grado de alargamiento de la muestra). Las propiedades mecánicas de módulo de elasticidad (rigidez, E), límite elástico (σ_y) y resistencia a la tracción (RM , σ_m) se determinan como se indica en estos gráficos.

La Figura (c) muestra un puente colgante. El peso del tablero del puente y de los automóviles impone fuerzas de tracción en los cables de sujeción verticales. Estas fuerzas son transferidas al cable principal de suspensión, el cual se comba en una forma más o menos parabólica. Las aleaciones metálicas con las que se construyen estos cables deben cumplir ciertos criterios de rigidez y resistencia. La rigidez y la resistencia de las aleaciones se puede evaluar a partir de ensayos realizados utilizando una máquina de tracción (y los gráficos tensión-deformación resultantes) similares a los mostrados.



(c)

© Mr. Focus/iStockphoto

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades mecánicas de los metales?*

Corresponde al ámbito profesional de la ingeniería entender cómo se miden las diversas propiedades mecánicas y qué representan esas propiedades. A partir de las propiedades medidas se podrán diseñar estructuras y componentes, utilizando materiales

predeterminados para que no se produzcan niveles de deformación o fallos inaceptables. Se demostrará este procedimiento respecto al diseño de un equipo de medida de tensión en el Ejercicio de Diseño 8.1.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Definir la tensión ingenieril y la deformación ingenieril.
2. Conocer la ley de Hooke y considerar las condiciones en las que es válida.
3. Definir el coeficiente de Poisson.
4. A partir de un diagrama de tensión-deformación ingenieril, determinar (a) el módulo de elasticidad, (b) el límite elástico (para una deformación de 0,002), (c) la resistencia a tracción y (d) estimar el alargamiento porcentual.
5. Para la deformación de una probeta cilíndrica dúctil, describir los cambios en el perfil de la muestra hasta el punto de rotura.
6. Calcular la ductilidad en términos de alargamiento porcentual y de porcentaje de reducción de área para un material sometido a tracción hasta rotura.
7. Dar breves definiciones y las unidades para el módulo de resiliencia y la tenacidad (estática).
8. Para una probeta sometida a tracción, a partir de la carga aplicada, dar las dimensiones de la sección transversal instantánea y las longitudes inicial e instantánea, para calcular los valores de la tensión verdadera y la deformación verdadera.
9. Nombrar las dos técnicas de ensayo de dureza más comunes; indicar las diferencias entre ellas.
10. (a) Nombrar y describir brevemente las dos técnicas diferentes de ensayo de dureza por microindentación y (b) citar situaciones en las que estas técnicas se utilizan habitualmente.
11. Calcular el esfuerzo de trabajo para un material dúctil.

8.1 INTRODUCCIÓN

Muchos materiales están sometidos a fuerzas o cargas cuando prestan servicio. Algunos ejemplos son la aleación de aluminio con la cual se construye el ala de un avión y el acero del eje de un automóvil. En tales situaciones, es necesario conocer las características del material y diseñar el componente que se fabrica con él de manera que ninguna deformación resultante sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico de un material refleja la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material, o deformación. Las principales propiedades de diseño mecánico son rigidez, resistencia, dureza, ductilidad y tenacidad.

Las propiedades mecánicas de los materiales se determinan realizando experimentos de laboratorio cuidadosamente diseñados que reproducen en todo lo posible las condiciones de servicio. Entre los factores a considerar están la naturaleza de la carga aplicada y su duración, así como las condiciones ambientales. La carga puede ser a tracción, a compresión o a cizalla, y su magnitud puede ser constante con el tiempo o fluctuar continuamente. El tiempo de aplicación puede ser sólo una fracción de segundo o durar muchos años. La temperatura de servicio también puede ser un factor importante.

Las propiedades mecánicas son interesantes para una gran variedad de sectores (p. ej., productores y consumidores de materiales, organizaciones de investigación, agencias gubernamentales) que tienen diferentes intereses. En consecuencia, es necesario que haya un poco de coherencia en la forma en que se llevan a cabo los ensayos y en la interpretación de sus resultados, y esta coherencia se logra con técnicas de ensayo estandarizadas. La definición y publicación de estas normas son a menudo coordinadas por sociedades profesionales. En los Estados Unidos la organización más solvente es la American Society for

Testing and Materials (ASTM). Su *Annual Book of ASTM Standards* (<http://www.astm.org>) comprende numerosos volúmenes que se publican y se actualizan anualmente. Un gran número de estas normas se refieren a técnicas de ensayos mecánicos, varios de los cuales están referenciados con notas al pie en éste y en los siguientes capítulos.

El papel de la ingeniería estructural es determinar las tensiones (o esfuerzos) y distribuciones de tensiones dentro de los componentes que están sometidos a cargas definidas. Esto se puede lograr mediante técnicas experimentales de ensayo o mediante análisis de tensiones teóricos y matemáticos. Estos temas se tratan en los textos tradicionales de análisis de tensión y resistencia de materiales.

Sin embargo, en la ingeniería metalúrgica y de materiales la primera preocupación es la producción y fabricación de materiales para cumplir las especificaciones de servicio según lo predicho por estos análisis de tensiones. Esto implica necesariamente una comprensión de las relaciones entre la microestructura y las características internas de los materiales y sus propiedades mecánicas.

A menudo los materiales elegidos para aplicaciones estructurales tienen combinaciones deseables de características mecánicas. La discusión actual se centra principalmente en el comportamiento mecánico de los metales, mientras que polímeros y cerámicos se tratan aparte ya que son, en gran medida, mecánicamente diferentes de los metales. En este capítulo se analiza el comportamiento tensión-deformación de los metales en relación con sus propiedades mecánicas, y también se examinan otras características mecánicas importantes. Las discusiones sobre los aspectos microscópicos de mecanismos de deformación y sobre los métodos para mejorar y moderar el comportamiento mecánico de los metales, se encuentran en capítulos posteriores.

8.2 CONCEPTOS DE TENSIÓN Y DEFORMACIÓN

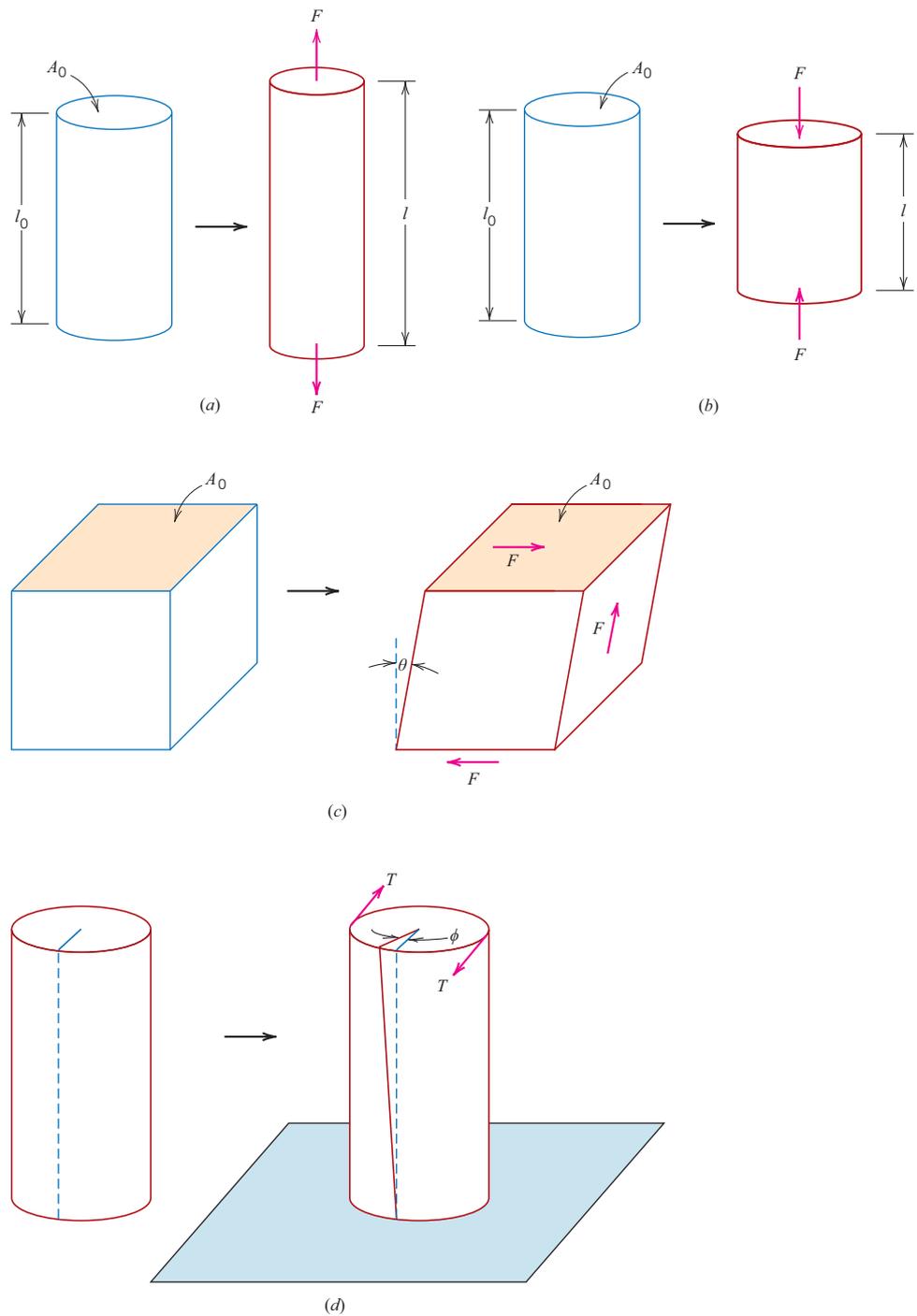
Si una carga es estática o varía muy lentamente con el tiempo y se aplica uniformemente sobre una sección transversal o la superficie de un componente, el comportamiento mecánico puede determinarse mediante un simple ensayo de tensión-deformación. En los metales, estos ensayos se realizan normalmente a temperatura ambiente. Existen tres maneras principales de aplicar la carga: tracción, compresión y cizalladura (Figuras 8.1a, b, c). En ingeniería muchas cargas son de torsión, en lugar de cizalla pura, como se ilustra en la Figura 8.1d.

Ensayo de tracción¹

Uno de los ensayos mecánicos de tensión-deformación más comunes es el de *tracción*. Se puede utilizar para determinar varias propiedades mecánicas de los materiales que son importantes en el diseño. Una probeta se deforma, por lo general hasta rotura, bajo una carga de tracción gradualmente creciente que se aplica de forma uniaxial a lo largo del eje de la muestra. En la Figura 8.2 se muestra una probeta de tracción estándar. Generalmente, la sección transversal es circular, aunque también se utilizan probetas de sección rectangular. Se elige esta configuración de probeta “hueso de perro” para que, durante el ensayo, la deformación se limite a la región estrecha de centro (que tiene una sección transversal uniforme a lo largo de su longitud) y también para reducir la probabilidad de fractura en los extremos de la muestra. El diámetro estándar es aproximadamente de 12,8 mm, mientras que la longitud de la sección reducida debe ser por lo menos cuatro veces este diámetro (usualmente, 60 mm). La longitud de referencia se utiliza en los cálculos de ductilidad,

¹Normas ASTM E8 y E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials".

Figura 8.1
 (a) Ilustración esquemática de cómo una carga de tracción produce un alargamiento y una deformación lineal positiva. (b) Ilustración esquemática de cómo una carga de compresión produce contracción y una deformación lineal negativa. (c) Representación esquemática de deformación por cizalla γ , donde $\gamma = \tan \theta$. (d) Representación esquemática de deformación por torsión (ángulo de torsión ϕ) producido por un par aplicado T .



como se comenta en la Sección 8.4, y el valor estándar es 50 mm. La probeta se sujeta por sus extremos en las mordazas de sujeción del equipo de ensayo (Figura 8.3). La máquina de tracción está diseñada para alargar la probeta a una velocidad constante y para medir continua y simultáneamente la carga instantánea aplicada (con una célula de carga) y los alargamientos resultantes (utilizando un extensómetro). El ensayo de tensión-deformación dura varios minutos y es destructivo, es decir, la muestra de ensayo se deforma permanentemente y, por lo general, se rompe. [La fotografía (a) de la presentación de este capítulo muestra una máquina de tracción moderna].

8.37 Determinar el módulo de resiliencia para cada una de las siguientes aleaciones:

| Material | Límite elástico |
|----------------------|-----------------|
| | MPa |
| Acero | 550 |
| Latón | 350 |
| Aleación de aluminio | 250 |
| Aleación de titanio | 800 |

Utilizar los valores de módulo de elasticidad de la Tabla 8.1.

8.38 Un latón para muelles ha de tener un módulo elástico de al menos 0,80 MPa. ¿Cuál debe ser su límite elástico mínimo?

8.39 Mostrar que las Ecuaciones 8.18a y 8.18b son válidas cuando no hay variación de volumen durante la deformación.

8.40 Demostrar que la Ecuación 8.16, expresión de la definición de deformación verdadera, también puede ser representada por

$$\epsilon_T = \ln \left(\frac{A_0}{A_i} \right)$$

cuando el volumen de la muestra permanece constante durante la deformación. ¿Cuál de estas dos expresiones es más vigente a la aparición de estricción? ¿Por qué?

8.41 Usando los datos del problema 8.29 y las Ecuaciones 8.15, 8.16 y 8.18a, generar una curva tensión verdadera-deformación verdadera para el aluminio. La Ecuación 8.18a no es válida más allá del punto de estricción, por tanto, los últimos cuatro puntos de los diámetros medidos, recogidos en la siguiente tabla, son los que se deben utilizar en los cálculos de tensión verdadera.

| Carga | Longitud | Diámetro |
|--------|----------|----------|
| N | mm | mm |
| 46 100 | 56,896 | 11,71 |
| 42 400 | 57,658 | 10,95 |
| 42 600 | 58,420 | 10,62 |
| 36 400 | 59,182 | 9,40 |

8.42 Se realiza un ensayo de tracción con una probeta metálica y se produce una deformación plástica verdadera de 0,20 para una tensión verdadera aplicada de 575 MPa. Para el mismo metal, el valor de K en la Ecuación 8.19 es de 860 MPa. Calcular la

deformación verdadera que resulta de la aplicación de una tensión verdadera de 600 MPa.

8.43 En una aleación metálica, una tensión verdadera de 415 MPa produce una deformación plástica verdadera de 0,475. ¿Cuánto se alargará una muestra de este material cuando se aplique una tensión verdadera de 325 MPa si la longitud inicial es de 300 mm? Suponer un valor de 0,25 para el coeficiente de endurecimiento por deformación, n .

8.44 En un latón, los siguientes valores de tensión verdadera producen las deformaciones plásticas verdaderas correspondientes:

| Tensión verdadera (MPa) | Deformación verdadera |
|-------------------------|-----------------------|
| 345 | 0,10 |
| 415 | 0,20 |

¿Qué valor de tensión verdadera es necesario para producir una deformación plástica verdadera de 0,25?

8.45 En un latón, los valores siguientes de tensión ingenieril producen las correspondientes deformaciones plásticas ingenieriles, previas a la estricción:

| Tensión ingenieril (MPa) | Deformación ingenieril |
|--------------------------|------------------------|
| 235 | 0,194 |
| 250 | 0,296 |

A partir de esta información, calcular la tensión ingenieril para producir una deformación ingenieril de 0,25.

8.46 Calcular la tenacidad (o energía absorbida a rotura) para un metal que experimenta deformación tanto elástica como plástica. Suponer la Ecuación 8.5 para la deformación elástica, que el módulo elástico es 172 GPa y que la deformación elástica termina en 0,01. Para la deformación plástica, suponer que la relación entre tensión y deformación se describe por la Ecuación 8.19, con valores de K y n de 6900 MPa y 0,30, respectivamente. Además, la deformación plástica se produce entre valores de deformación de 0,01 y 0,75, momento en que se produce la rotura.

8.47 En un ensayo de tracción se puede demostrar que la estricción comienza cuando

$$\frac{d\sigma_T}{d\epsilon_T} = \sigma_T \tag{8.32}$$

Utilizando la Ecuación 8.19, determinar el valor de la deformación verdadera en el punto de estricción.

- 8.48** Considerando el logaritmo de ambos miembros de la Ecuación 8.19, se tiene que

$$\log \sigma_T = \log K + n \log \epsilon_T \quad (8.33)$$

Por tanto, una curva de $\log \sigma_T$ frente a $\log \epsilon_T$ en la región plástica hasta el punto de estricción debe producir una línea recta con una pendiente n y una intercepción (para $\sigma_T = 0$) de $\log K$.

Utilizando los datos correspondientes tabulados en el Problema 8.29, representar gráficamente $\log \sigma_T$ frente a $\log \epsilon_T$ y determinar los valores de n y K . Será preciso convertir las tensiones y deformaciones ingenieriles en tensiones y deformaciones verdaderas mediante las Ecuaciones 8.18a y 8.18b.

- 8.49** Una probeta cilíndrica de latón, con un diámetro de 7,8 mm y una longitud de 95,0 mm, se somete a tracción con una fuerza de 6000 N. Posteriormente se retira la carga aplicada.
- (a) Calcular la longitud final de la muestra en este punto. La curva de tensión-deformación a tracción para esta aleación se muestra en la Figura 8.12.
- (b) Calcular la longitud final de la probeta cuando la carga se incrementa hasta 16500 N y luego se retira.
- 8.50** Una probeta de acero con sección transversal rectangular, de dimensiones 12,7 mm × 6,4 mm, tiene la curva tensión-deformación que se muestra en la Figura 8.22. Si se somete a una fuerza de tracción de 38000 N,
- (a) Determinar los valores de deformación elástica y plástica.
- (b) Si su longitud inicial es de 460 mm, ¿cuál será la longitud final después de que la carga de la parte (a) se aplique y luego se retire la carga?
- 8.52** Estimar las durezas Brinell y Rockwell para los materiales siguientes:
- (a) El latón naval cuya curva tensión-deformación se muestra en la Figura 8.12.
- (b) La aleación de acero cuya curva tensión-deformación se muestra en la Figura 8.22.
- 8.53** A partir de los datos representados en la Figura 8.19, especificar las ecuaciones que relacionan resistencia a tracción y dureza Brinell para latones y fundiciones nodulares, de forma similar a lo que se propone en la Ecuación 8.20 para aceros.

Variabilidad de las propiedades de los materiales

- 8.54** Citar cinco factores que provocan dispersión en las propiedades medidas de los materiales.
- 8.55** La tabla siguiente ofrece una serie de valores de dureza Rockwell B obtenidas en una sola muestra de acero. Calcular el valor medio y la desviación estándar en los valores de dureza.

| | | |
|------|------|------|
| 83,3 | 80,7 | 86,4 |
| 88,3 | 84,7 | 85,2 |
| 82,8 | 87,8 | 86,9 |
| 86,2 | 83,5 | 84,4 |
| 87,2 | 85,5 | 86,3 |

Factores de diseño/seguridad

- 8.56** ¿En qué tres criterios se basan los factores de seguridad?
- 8.57** Determinar las tensiones de trabajo de las dos aleaciones cuyas curvas tensión-deformación se muestran en las Figuras 7.12 y 7.22.

Problemas de hoja de cálculo

- 8.1HC** Para una probeta metálica cilíndrica, cargada a tracción hasta rotura, y dado un conjunto de valores de carga y los correspondientes valores de longitud, así como el diámetro previo a la deformación y la longitud inicial, generar una hoja de cálculo que permita trazar (a) la tensión ingenieril frente a la deformación ingenieril y (b) la tensión verdadera frente a la deformación verdadera en el punto de estricción.

Dureza

- 8.51** (a) Un indentador de dureza Brinell de 10 mm de diámetro, con una carga de 500 kg, produce una indentación de 1,62 mm de diámetro en una muestra de acero. Calcular el valor HB de este material.
- (b) ¿Cuál será el diámetro de la huella correspondiente a una dureza de 450 HB cuando se aplica una carga de 500 kg?

PROBLEMAS DE DISEÑO

- 8.D1** Una gran torre debe apoyarse en un conjunto de alambres de acero. Se estima que la carga soportada por cada alambre será de 11100 N. Determinar el diámetro mínimo requerido del alambre, suponiendo un factor de seguridad de 2 y un límite elástico de 1030 MPa.
- 8.D2** (a) El hidrógeno gaseoso a una presión constante de 1015 MPa fluye por el interior de una tubería cilíndrica de níquel, de pared delgada y que tiene un radio de 0,2 m. La temperatura de la tubería es 300 °C y la presión de hidrógeno en el exterior se mantiene en 0,01013 MPa. Calcular el

espesor mínimo de la pared si el flujo de difusión no ha de ser mayor que 1×10^{-7} mol/m²·s. La concentración de hidrógeno en el níquel, C_H (en moles de hidrógeno por m³ de Ni) es función de la presión de hidrógeno, P_{H_2} (en MPa), y de la temperatura absoluta (T) de acuerdo con

$$C_H = 30,8 \sqrt{p_{H_2}} \exp \left(-\frac{12,3 \text{ kJ/mol}}{RT} \right) \quad (8.34)$$

Por otro lado, el coeficiente de difusión para la difusión de H en Ni depende de la temperatura según

$$D_H(\text{m}^2/\text{s}) = 4,76 \times 10^{-7} \exp \left(-\frac{39,56 \text{ kJ/mol}}{RT} \right) \quad (8.35)$$

(b) Para tuberías cilíndricas de paredes delgadas sometidas a presión, la tensión circunferencial es función de la diferencia de presión a través de la pared (Δp), el radio del cilindro (r) y el espesor del tubo (Δx) según la expresión

$$\sigma = \frac{r\Delta p}{4\Delta x} \quad (8.25a)$$

Calcular la tensión circunferencial a la que están expuestas las paredes de este cilindro presurizado.

(c) El límite elástico del Ni a temperatura ambiente es de 100 MPa y, por otro lado, σ_y disminuye aproximadamente 5 MPa por cada 50 °C de incremento en la temperatura. ¿Es de esperar que el espesor de pared calculado en (b) sea adecuado para este cilindro de Ni a 300°C? ¿Por qué sí o por qué no?

(d) Si este espesor resulta adecuado, calcular el espesor mínimo que podría utilizarse sin que aparezca ninguna deformación en las paredes de la tubería. ¿Cuánto aumentaría el flujo de difusión con esta reducción de espesor? Por otro lado, si el espesor determinado en (c) resulta no ser adecuado, especificar a continuación el espesor mínimo que sería preciso. En este caso, ¿qué disminución del flujo de difusión resultaría?

8.D3 Considerar la difusión estacionaria de hidrógeno a través de las paredes de una tubería cilíndrica de níquel como la que se describe en el problema 8.D2. Un diseño requiere, para un flujo de difusión de 5×10^{-8} mol/m²·s, un radio de tubería de 0,125 m y presiones en el interior y en el exterior de 2,026 MPa y 0,0203 MPa, respectivamente, cuando la temperatura máxima permitida es de 450 °C. Especificar una temperatura y un espesor de pared adecuado para procurar este flujo de difusión garantizando que las paredes de la tubería no experimentarán ninguna deformación permanente.

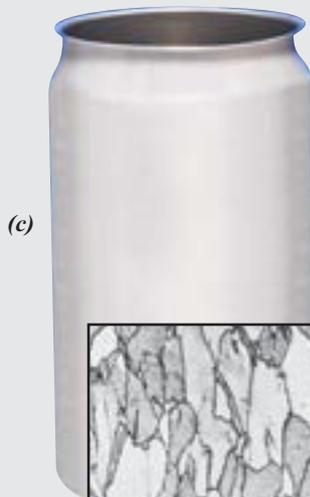
Capítulo 9 Dislocaciones y mecanismos de endurecimiento



La fotografía de la Figura (b) es una preforma de envase de aluminio para refrescos. La fotografía de la Figura (a) reproduce la microestructura de este aluminio: los granos son equiaxiales; es decir, tienen aproximadamente la misma dimensión en todas las direcciones.

La Figura (c) muestra un envase acabado, fabricado a partir de una serie de procesos de embutición durante los cuales las paredes se deforman plásticamente (y se endurecen). La estructura de los granos de aluminio de estas paredes ha cambiado, se han alargado en la dirección de endurecimiento.

La estructura resultante es similar a la mostrada en la Figura (d). En las Figuras (a) y (d) el aumento es $\times 150$.



(Las fotomicrografías de las figuras (a) y (d) proceden de W. G. Moffatt, G. W. Pearsall y J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. I, *Structure*, p. 140. Copyright © 1964 by John Wiley & Sons, New York. Figuras (b) y (c) © William D. Callister, Jr.).

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Dislocaciones y mecanismos de endurecimiento*?

El conocimiento de la naturaleza de las dislocaciones y del papel que éstas tienen en el proceso de la deformación plástica permite entender los mecanismos fundamentales de las técnicas utilizadas para fortalecer

y endurecer los metales y sus aleaciones. Así, es posible diseñar y adaptar las propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia y la tenacidad, en compuestos de matriz metálica.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir, a nivel atómico, la movilidad de las dislocaciones de cuña y helicoidales.
2. Describir cómo se produce la deformación plástica en los materiales, por desplazamiento de dislocaciones de cuña y helicoidales, en respuesta a esfuerzos de cizalladura.
3. Definir sistema de deslizamiento y citar un ejemplo.
4. Describir la alteración de la estructura de un metal policristalino al ser deformado plásticamente.
5. Explicar cómo los límites de grano impiden la movilidad de las dislocaciones y por qué un metal con granos pequeños es más duro que otro con granos grandes.
6. Describir y explicar el endurecimiento de soluciones sólidas con impurezas atómicas en posición sustitucional, en términos de interacciones de las deformaciones de red con las dislocaciones.
7. Explicar y describir el fenómeno del endurecimiento por deformación (o trabajo en frío) en términos de interacciones entre las dislocaciones y la zona deformada.
8. Describir la recristalización en términos de la alteración de la microestructura y de las características mecánicas del material.
9. Describir el fenómeno del crecimiento del grano, tanto desde el punto de vista atómico como macroscópico.

9.1 INTRODUCCIÓN

En el Capítulo 8 se ha visto que los materiales pueden experimentar dos tipos de deformación: elástica y plástica. La resistencia y la dureza son medidas de la oposición del material a la deformación plástica, que es una deformación permanente. A escala microscópica, la deformación plástica se debe al movimiento neto de un gran número de átomos en respuesta a un esfuerzo aplicado. Durante este proceso, los enlaces interatómicos se rompen y se forman de nuevo. En los sólidos cristalinos la deformación plástica involucra, normalmente, al movimiento de dislocaciones y a los defectos lineales cristalinos (que han sido comentados en la Sección 6.7). En este capítulo se analizan las características de las dislocaciones y su papel en la deformación plástica. También se comenta el maclado, otro proceso de deformación plástica en algunos metales. Además, lo que es probablemente más importante, se presentan varias técnicas de refuerzo de los metales de una sola fase y sus mecanismos se describen en términos de dislocaciones. Finalmente, las últimas secciones del capítulo están dedicadas a los tratamientos de recuperación y de recristalización –procesos que ocurren en los metales, normalmente a temperaturas elevadas– y, también, al crecimiento de grano.

Dislocaciones y deformación plástica

En los primeros estudios de los de los materiales se constató que la resistencia teórica de un cristal perfecto es muy superior al valor medido experimentalmente. Durante los años 30 se creyó que esta discrepancia en la resistencia mecánica se podía explicar por la existencia de un tipo de defecto lineal cristalino que, desde entonces, se ha llamado *dislocación*. Sin embargo, no fue hasta la década de los 50 cuando se confirmó la existencia de tal defecto mediante la observación directa con el microscopio electrónico. Desde entonces se ha desarrollado una teoría de dislocaciones que es capaz de explicar muchos de los fenómenos físicos y mecánicos de los materiales cristalinos, principalmente metales y cerámicos.

9.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Los dos tipos fundamentales de dislocaciones son la de cuña (o lineal) y la helicoidal. En una dislocación de cuña existen distorsiones localizadas de la red al borde de un semiplano adicional de átomos, el cual también define la dislocación (Figura 6.9). Una dislocación helicoidal puede visualizarse como el resultado de una distorsión por cizalladura, de manera que la línea de dislocación pasa a través del centro de una espiral, formada por rampas de planos atómicos (Figura 6.10). Muchas dislocaciones en los materiales cristalinos tienen tanto componentes helicoidales como de cuña, y se denominan dislocaciones mixtas (Figura 6.11).

La deformación plástica corresponde al movimiento de un gran número de dislocaciones. Una dislocación de cuña se mueve en respuesta a una cizalladura aplicada en una dirección perpendicular a la línea de la dislocación. La mecánica del movimiento de la dislocación se muestra en la Figura 9.1, siendo *A* el plano adicional inicial de átomos. Cuando la cizalladura se aplica de la manera indicada (Figura 9.1*a*), el plano *A* es forzado hacia la derecha y, a su vez, empuja la parte superior de los planos *B*, *C*, *D* y así sucesivamente en la misma dirección. Si la cizalladura aplicada es suficientemente elevada, los enlaces interatómicos del plano *B* se rompen a lo largo del plano de cizalladura, y la parte superior del plano *B* se convierte en el semiplano adicional de átomos, mientras que el plano *A* se une con la mitad inferior del plano *B* (Figura 9.1*b*). Este proceso se repite para los otros planos, de tal manera que el semiplano adicional se mueve de izquierda a derecha en etapas discretas mediante las sucesivas roturas de enlaces y desplazamientos de magnitud iguales a la distancia interatómica de la mitad de los planos superiores. Antes y después del movimiento de una dislocación a través de alguna zona del cristal, la distribución de los átomos es ordenada y perfecta, de modo que la estructura de la red se distorsiona únicamente durante el paso del semiplano adicional de átomos. Finalmente, éste puede emerger en la superficie de la derecha del cristal, formando un escalón de magnitud igual a una distancia interatómica, como se muestra en la Figura 9.1*c*.

deslizamiento

El proceso mediante el cual se produce la deformación plástica por el movimiento de dislocaciones se denomina **deslizamiento** y el plano a lo largo del cual se mueve la dislocación se denomina *plano de deslizamiento*, tal como se indica en la Figura 9.1. La deformación plástica macroscópica corresponde, simplemente, a la deformación permanente que resulta del movimiento, o desplazamiento, de dislocaciones como respuesta a un esfuerzo de cizalladura aplicado, tal como se representa en la Figura 9.2*a*.

El movimiento de dislocaciones es análogo al modo de locomoción de una oruga (Figura 9.3), que forma una encorvadura cerca de su extremo posterior al estirar su último

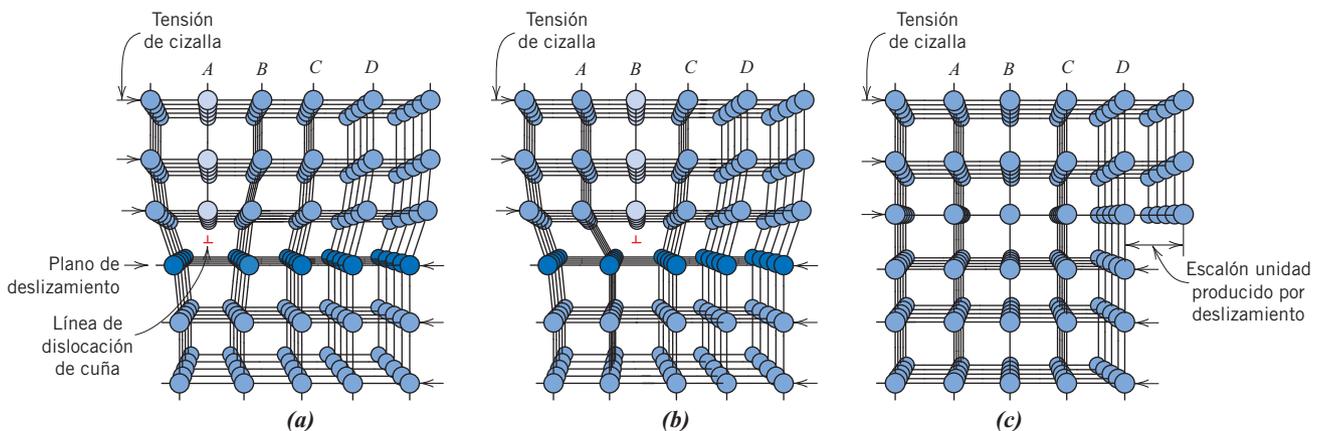


Figura 9.1 Redistribución atómica que acompañan al desplazamiento de una dislocación de cuña, a medida que ésta se mueve como respuesta a un esfuerzo de cizalla aplicado. (a) El semiplano adicional de átomos se indica como *A*. (b) La dislocación se mueve una distancia interatómica hacia la derecha a medida que *A* se une con el semiplano inferior de *B*; en el proceso, el semiplano superior de *B* se convierte en el semiplano adicional. (c) Se forma un escalón sobre la superficie del cristal a medida que el semiplano adicional llega a la superficie. (Adaptación de A. G. Guy. *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976, p. 153).

© William D. Callister, Jr.



(a)

A veces hay que realizar un esfuerzo considerable para abrir una pequeña bolsa de plástico que contiene nueces, dulces o algún otro producto comestible.

También se sabe que cuando se hace una pequeña incisión (o corte) en un borde, como el que se muestra en la fotografía (a), se requiere un esfuerzo mínimo para abrir el envoltorio. Este fenómeno está relacionado con uno de los principios básicos de la mecánica de la fractura: un esfuerzo de tracción aplicado se amplifica en la punta de una pequeña incisión o entalla.

La fotografía (b) es de un petrolero que se fracturó en una forma frágil como resultado de la propagación completa de una grieta alrededor de su casco. Esta grieta comenzó en algún tipo de pequeña entalla o hendidura aguda. A medida que el petrolero fue acometido por las olas en el mar, las tensiones resultantes se amplificaron en la punta de esta muesca o defecto hasta que se formó una grieta alargada que se propagó rápidamente y que, en última instancia, condujo a completar la fractura del cuerpo del barco.

La fotografía (c) es de un avión comercial Boeing 737-200 (vuelo 243 de Aloha Airlines) que experimentó una descompresión explosiva y un fallo estructural el 28 de abril de 1988. Una investigación del accidente concluyó que la causa fue la fatiga del metal, agravada por corrosión por fisuración (Sección 18.7), ya que el avión circulaba en zonas costeras (ambiente húmedo y salado). La tensión cíclica del fuselaje fue el resultado de la compresión y descompresión de la cámara de cabina durante los vuelos de corto alcance. Un programa de mantenimiento, debidamente ejecutado por la compañía aérea habría detectado el daño por fatiga y se hubiera prevenido este accidente.



(b)

Neal Boenzi/New York Times Pictures/Redux Pictures

Cortesía de Star Bulletin/Dennis Oda/© AP/Wide World Photos.



(c)

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Rotura*?

El diseño de un componente estructural requiere conocimientos de ingeniería para reducir al mínimo la posibilidad de fallo. Por tanto, es importante comprender la mecánica de los distintos modos de rotura (fractura, fatiga y fluencia) y, además, conocer los principios de diseño adecuados que se pueden emplear para prevenir fallos en servicio. Por ejemplo,

en las secciones M.14 a la M.16 del módulo de ayuda de ingeniería mecánica (Mechanical Engineering Online Support Module), disponible en inglés en www.reverte.com/microsites/callister2e, se discuten temas de selección y procesamiento de materiales relacionados con la fatiga de un resorte de válvula de automóvil.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir el mecanismo de propagación de grietas tanto en modo de fractura dúctil como frágil.
2. Explicar por qué los valores de resistencia de los materiales frágiles son mucho más bajos de los previstos por los cálculos teóricos.
3. Definir la tenacidad de fractura en términos de (a) una breve descripción y (b) una ecuación; definir todos los parámetros en esta ecuación.
4. Hacer una distinción entre *tenacidad de fractura* y *tenacidad de fractura en deformación plana*.
5. Nombrar y describir las dos técnicas de ensayo de tenacidad al impacto.
6. Definir el concepto de *fatiga* y especificar las condiciones en que se produce.
7. Determinar, a partir de una curva de fatiga para algunos materiales, (a) el tiempo de vida a fatiga (a un nivel de tensión determinado) y (b) la resistencia a fatiga (para un número determinado de ciclos).
8. Definir el concepto de *termofluencia* y especificar las condiciones en que se produce.
9. Determinar, a partir de las curvas de termofluencia correspondientes a algunos materiales, (a) la velocidad de termofluencia en estado estacionario y (b) la vida útil a rotura.

10.1 INTRODUCCIÓN

La rotura de los materiales de ingeniería es casi siempre una situación no deseable por varias razones: se ponen en peligro vidas humanas, se causan pérdidas económicas y se interfiere con la disponibilidad de productos y servicios, entre algunas otras. Aun cuando las causas de la rotura y el comportamiento de los materiales sean conocidos, la prevención de fallos es difícil de garantizar. Las causas más comunes son la selección y procesamiento inapropiados de materiales, el diseño inadecuado del componente o su mala utilización. También se pueden dañar partes estructurales durante el servicio, de modo que la inspección periódica y la reparación o sustitución son críticas para el diseño seguro. Los conocimientos adecuados de ingeniería permiten anticipar y planificar un posible fracaso y, en caso de que se produzca la rotura, evaluar su causa y luego tomar las medidas adecuadas de prevención de incidentes en el futuro.

En este capítulo se tratan los siguientes temas: fractura simple (tanto en modo dúctil como frágil), fundamentos de mecánica de la fractura, ensayos de tenacidad de fractura, transición dúctil-frágil, fatiga y termofluencia. Estas discusiones incluyen mecanismos de fallo, técnicas de ensayo y métodos de prevención o control de fallo.



Autoevaluación 10.1 Citar dos situaciones en las que la posibilidad de fallo es parte del diseño de un componente o producto.

(Respuesta en www.reverte.com/microsites/callister2e).

Fractura

10.2 FUNDAMENTOS DE FRACTURA

fractura dúctil
fractura frágil

Una *fractura simple* es la separación de un cuerpo en dos o más partes en respuesta a una tensión estática impuesta (es decir, constante o que varía lentamente con el tiempo) y a temperaturas bajas en relación con la temperatura de fusión del material. La fractura también puede ocurrir por fatiga (cuando se imponen esfuerzos cíclicos) y por fluencia lenta (deformación dependiente del tiempo, normalmente a temperaturas elevadas). Los temas sobre fatiga y fluencia lenta se tratan más adelante en este capítulo (Secciones 10.7 a 10.15). Aunque las tensiones aplicadas pueden ser de tracción, compresión, cizalladura o torsión (o combinaciones de éstas), la presente discusión se limitará a las fracturas que resultan de cargas de tracción uniaxial. En los metales hay dos tipos de fractura posibles **dúctil** y **frágil**. La clasificación se basa en la capacidad de un material para experimentar deformación plástica. Los metales dúctiles presentan principalmente deformación plástica con gran absorción de energía antes de la rotura. Sin embargo, a una fractura frágil le acompaña poca o ninguna deformación plástica, y normalmente hay baja absorción de energía. Las curvas tensión-deformación para ambos tipos de fracturas se muestran en la Figura 8.13.

Dúctil y *frágil* son términos relativos; el que una fractura en particular sea de un tipo u otro depende de la situación. La ductilidad puede ser cuantificada en términos de porcentaje de alargamiento (Ecuación 8.11) y porcentaje de reducción del área (Ecuación 8.12). Además, la ductilidad depende de la temperatura del material, de la velocidad de deformación y del estado de tensión. La tendencia de los materiales normalmente dúctiles a fallar de manera frágil se discute en la Sección 10.6.

Cualquier proceso de fractura está compuesto de dos etapas –formación y propagación de la grieta– en respuesta a una tensión impuesta. El modo de fractura depende en gran manera del mecanismo de propagación de grietas. La fractura dúctil se caracteriza por la existencia de mucha deformación plástica en la proximidad de la grieta que avanza. Además, el proceso tiene lugar lentamente a medida que la grieta se extiende. Una grieta de este tipo normalmente se denomina *estable*; es decir, se resiste a extenderse a menos que haya un aumento de la tensión aplicada. Además, normalmente hay evidencia de deformación plástica apreciable en las superficies de fractura (p. ej., torsión y desgarro). Sin embargo, en la rotura frágil las grietas pueden extenderse muy rápidamente, acompañadas de muy poca deformación plástica. Las grietas de este tipo se denominan *inestables*, y la propagación de la grieta, una vez iniciada, continúa espontáneamente sin que se requiera un aumento en la magnitud de la tensión aplicada.

La fractura dúctil es casi siempre preferible a la fractura frágil por dos razones: en primer lugar, la fractura frágil se produce de repente y catastróficamente, sin ninguna advertencia; esto es una consecuencia de la propagación espontánea y rápida de la grieta. Sin embargo, en una fractura dúctil la presencia de deformación plástica es una evidencia de que la rotura es inminente, permitiendo que se tomen medidas preventivas. En segundo lugar, se requiere más energía de deformación para inducir una fractura dúctil, en la medida en que estos materiales son generalmente más tenaces. Muchas aleaciones metálicas son dúctiles bajo la acción de un esfuerzo de tracción aplicado, mientras que los cerámicos son típicamente frágiles y los polímeros pueden mostrar diversidad de comportamientos.

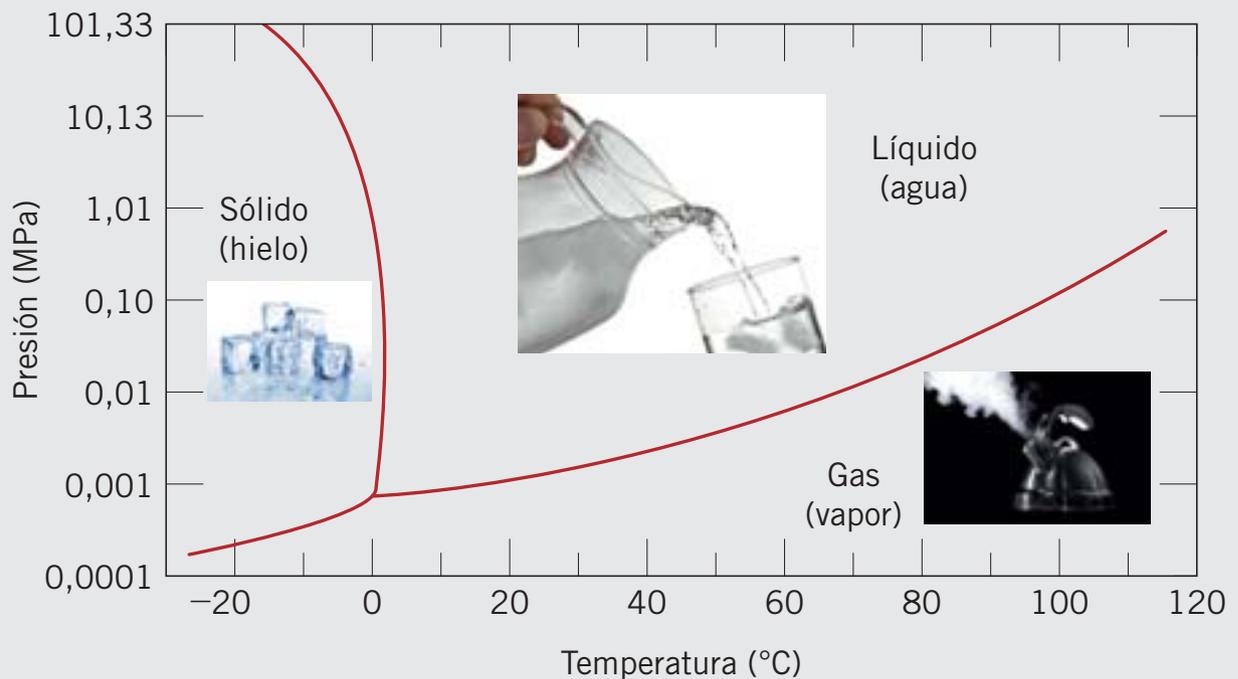
10.3 FRACTURA DÚCTIL

Las superficies de fractura dúctil tienen sus propios rasgos, tanto a nivel macroscópico como microscópico. La Figura 10.1 representa esquemáticamente dos perfiles macroscópicos característicos de fractura. La configuración mostrada en la Figura 10.1a es característica de metales extremadamente blandos, tales como el oro y el plomo puros a temperatura ambiente, y de otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperaturas elevadas. Estos materiales altamente dúctiles se rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, mostrando prácticamente una reducción de área del 100%.

El tipo de perfil de fractura por tracción más común para metales dúctiles se representa en la Figura 10.1b, donde la fractura está precedida sólo por una cantidad moderada de es-

Capítulo 11 Diagramas de fases

El gráfico adjunto es el diagrama de fases para el agua pura. Los parámetros representados son la presión exterior (eje vertical, escala logarítmica) frente a la temperatura. En cierto sentido este diagrama es un mapa en el que se delimitan tres fases muy conocidas: sólido (hielo), líquido (agua) y gas (vapor). Las tres curvas rojas representan tres límites de fase que definen estas regiones. Una fotografía localizada en cada región muestra un ejemplo de estas fases: cubos de hielo, agua líquida que llena un vaso y vapor que sale de un hervidor. (Fotografías de izquierda a derecha: © AlexStar / iStockphoto, © Canbalci / iStockphoto, © IJzendoorn / iStockphoto.)



En esta fotografía se muestran las tres fases del agua: hielo (iceberg), agua (océano o mar) y vapor (nube). Estas tres fases no están en equilibrio entre sí.

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Diagramas de fases?*

Una de las razones por las que el conocimiento y la comprensión de los diagramas de fases son importantes en ingeniería se refiere al diseño y control de los procedimientos de tratamiento térmico, ya que algunas propiedades de los materiales son función de su microestructura y, por consiguiente, de su historia térmica. A pesar de que la mayoría de los diagramas de fases representan microestructuras y estados estables

(de equilibrio), también son útiles en la comprensión del desarrollo y preservación de estructuras de no equilibrio y de sus correspondientes propiedades, a menudo más interesantes que las asociadas al estado de equilibrio. Esto está acertadamente ilustrado por el fenómeno del endurecimiento por precipitación (Sección 17.7).

Objetivos de aprendizaje

Después del estudio de este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

- (a) Esquematizar diagramas de fases isomorfos y eutécticos.
(b) Designar los dominios de fases de estos diagramas.
(c) Etiquetar las regiones liquidus, solidus y líneas solvus.
- Dado un diagrama de fases binario, designar la composición de la aleación y su temperatura; y, suponiendo que la aleación se encuentra en estado de equilibrio, determinar lo siguiente:
(a) las fases presentes,
(b) composición de las fases,
(c) las fracciones máscas de las fases.
- Para algún diagrama de fases binario hacer lo siguiente:
(a) localizar las temperaturas y las composiciones de eutécticos, eutectoides, peritéticos y transformaciones de fases congruentes; y
(b) escribir las reacciones para todas estas transformaciones, ya sea calentando o enfriando.
- Dada la composición de una aleación hierro-carbono que contiene entre 0,022% y 2,14% C en peso, ser capaz de
(a) especificar si la aleación es hipoeutectoide o hipereutectoide,
(b) identificar la fase proeutectoide,
(c) calcular las fracciones máscas de la fase proeutectoide y de la perlita y
(d) esquematizar la microestructura a temperatura justo por debajo del eutectoide.

11.1 INTRODUCCIÓN

La comprensión de los diagramas de fases de las aleaciones es de capital importancia porque existe una estrecha relación entre la microestructura y las propiedades mecánicas, y porque el desarrollo de la microestructura de una aleación está relacionado con las características de su diagrama de fases. Por otro lado, los diagramas de fases aportan información valiosa sobre la fusión, el moldeo, la cristalización y otros fenómenos.

Este capítulo presenta y trata los siguientes temas: (1) la terminología relacionada con diagramas de fases y transformaciones de fase; (2) el diagrama de fases presión-temperatura para materiales puros; (3) la interpretación de los diagramas de fases; (4) algunos diagramas de fases de aleaciones comunes y bifásicas, como el sistema hierro-carbono; y (5) el desarrollo de estructuras de equilibrio, subenfriadas, para varias situaciones.

Definiciones y conceptos fundamentales

componente

Antes de interpretar y de utilizar los diagramas de fases (o de equilibrio) conviene establecer un conjunto de definiciones y de conceptos fundamentales relacionados con las aleaciones, las fases y el equilibrio. En esta discusión frecuentemente se emplea el término **componente**, que es un metal o un compuesto que forma parte de una aleación. Por ejemplo, en un latón cobre-zinc, los componentes son Cu y Zn. *Soluto y disolvente*, ya definidos en la Sección 6.4,

sistema

también son términos comunes. **Sistema** es otro término utilizado en este contexto y tiene dos significados: por un lado, *sistema* se refiere a un cuerpo específico de un material considerado (p. ej., una cuchara de acero fundido); por otro lado, se relaciona con una serie de posibles aleaciones consistentes en los mismos componentes, pero sin referirse a las proporciones de los componentes de la aleación (p. ej., el sistema hierro-carbono).

El concepto de solución sólida se introdujo en la Sección 6.4. Una solución sólida consiste en átomos de dos tipos diferentes: los átomos del soluto ocupan posiciones sustitucionales o intersticiales en la red del disolvente y la estructura cristalina del disolvente se mantiene.

11.2 LÍMITE DE SOLUBILIDAD

límite de solubilidad

En muchas aleaciones existe, para alguna temperatura específica, una concentración máxima de átomos de soluto que se disuelven en el disolvente para formar una solución sólida, y que se denomina **límite de solubilidad**. La adición de un exceso de soluto por encima de este límite de solubilidad forma otra solución sólida o compuesto con una composición completamente diferente. El sistema agua-azúcar ($C_{12}H_{22}O_{11}$ - H_2O) ilustra este concepto. Al principio, al añadir azúcar al agua, se forma una solución agua-azúcar o jarabe. Al añadir más azúcar, la solución se concentra hasta que se alcanza el límite de solubilidad; es decir, la solución se satura de azúcar. A partir de aquí, la solución es incapaz de disolver más azúcar y las posteriores adiciones originan simples sedimentaciones en el fondo del recipiente. Ahora el sistema contiene dos fases separadas: la solución líquida agua-azúcar o jarabe y el sólido cristalino o azúcar sin disolver.

El límite de solubilidad del azúcar en agua depende de la temperatura del agua. En la Figura 11.1 se ha representado gráficamente la temperatura a lo largo del eje de ordenadas y la composición (porcentaje en peso del azúcar) a lo largo del eje de abscisas. En el eje de la composición, la concentración de azúcar aumenta de izquierda a derecha y el porcentaje de agua aumenta de derecha a izquierda. La suma de las concentraciones de agua y azúcar, para cualquier composición, es del 100% en peso, puesto que sólo hay dos componentes. El límite de solubilidad está representado por la línea casi vertical de la figura. A la izquierda de la línea, para cualquier composición y temperatura, sólo existe una solución líquida de jarabe. A la derecha de la línea coexisten el jarabe y el azúcar sólido. El límite de solubilidad a una determinada temperatura corresponde a la intersección de la coordenada de la temperatura considerada y la línea del límite de solubilidad. Por ejemplo, a 20 °C la solubilidad máxima del azúcar en agua es 65% en peso. Como indica la Figura 11.1, el límite de solubilidad se incrementa con la temperatura.

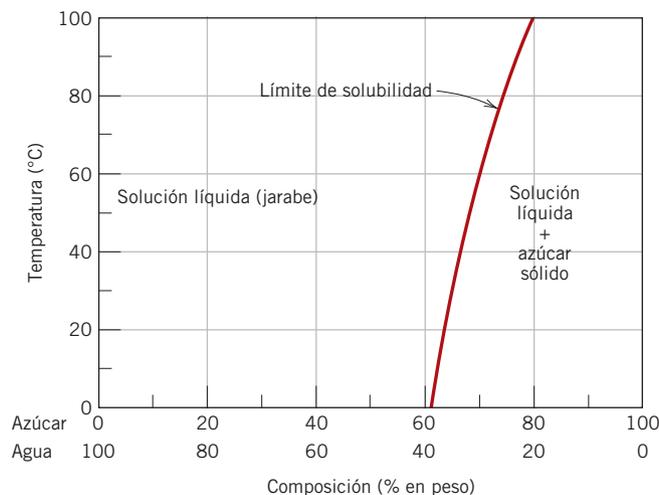


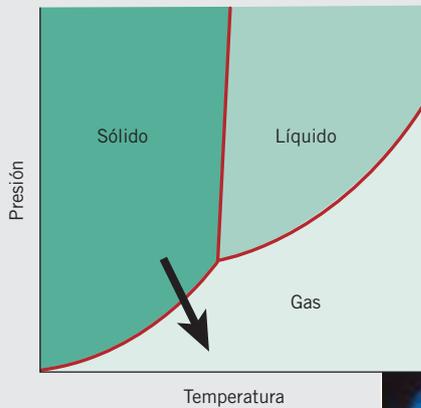
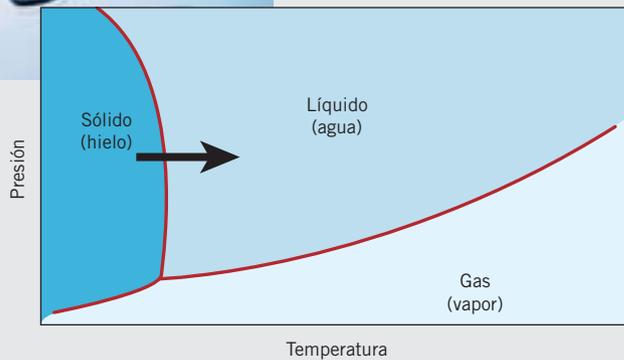
Figura 11.1 Solubilidad del azúcar ($C_{12}H_{22}O_{11}$) en agua-jarabe.

Capítulo 12 Transformaciones de fase



SuperStock

Se muestran dos diagramas de fases presión-temperatura: para el H_2O (arriba) y CO_2 (abajo). Cuando se cruzan los límites de fase se producen transformaciones de fase (curvas rojas) por cambios de temperatura o presión. Por ejemplo, el hielo funde (se transforma en agua líquida) al calentarlo, que significa cruzar el límite de fase sólido-líquido, representado por la flecha en el diagrama de fases del H_2O . Análogamente, cruzando el límite de fase sólido-gas del CO_2 , el hielo seco (CO_2 sólido) sublima y se transforma en CO_2 gaseoso. De nuevo, esta transformación se indica con una flecha.



Charles D. Winters/Photo Researchers, Inc.

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Transformaciones de fase?*

El desarrollo de un conjunto de características mecánicas deseables en un material a menudo suele ser el resultado de someterlo a un tratamiento térmico. Algunas transformaciones de fase que dependen del tiempo y de la temperatura están convenientemente representadas en diagramas de fase modificados. Es importante conocer la utilización de estos diagramas

para diseñar un tratamiento térmico idóneo y conseguir propiedades mecánicas determinadas en aleaciones a temperatura ambiente. Por ejemplo, la resistencia a tracción de un acero eutectoide (0,76% C) varía entre aproximadamente 700 MPa y 2000 MPa, dependiendo del tratamiento térmico empleado.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Representar gráficamente la fracción de transformación frente al logaritmo del tiempo para una transformación por solidificación, citando la ecuación que describe este comportamiento.
2. Describir brevemente la microestructura de cada uno de los microconstituyentes que aparecen en los aceros: perlita fina, perlita gruesa, esferoidita, bainita, martensita y martensita revenida.
3. Citar las características mecánicas generales para cada uno de los siguientes microconstituyentes:
perlita fina, perlita gruesa, esferoidita, bainita, martensita y martensita revenida. Explicar brevemente estos comportamientos en términos de microestructura (o estructura cristalina).
4. En un determinado diagrama de una transformación isotérmica (o transformación por enfriamiento continuo) de un acero, diseñar un tratamiento térmico para generar una microestructura específica.

12.1 INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos son versátiles debido a la gran variedad de propiedades mecánicas (resistencia, dureza, ductilidad, etc.), susceptibles de alteración por diferentes medios. En el Capítulo 9 se han discutido tres mecanismos de endurecimiento (aumento de resistencia): afinamiento del tamaño de grano, solución sólida y endurecimiento por deformación. Las propiedades mecánicas fundamentadas en las características microestructurales se modifican con técnicas adicionales idóneas.

La evolución microestructural de aleaciones mono y bifásicas suele implicar algún tipo de transformación de fase, como la alteración en el número o el carácter de las fases. En la primera parte de este capítulo figura una breve discusión de alguno de los principios fundamentales relacionados con las transformaciones que ocurren en las fases sólidas. Puesto que la mayoría de las transformaciones de fase no transcurren instantáneamente, se relaciona la dependencia del progreso de la reacción con el tiempo o la **velocidad de transformación**. Seguidamente se discute el desarrollo de las microestructuras bifásicas de la aleación hierro-carbono. Se introducen diagramas de fase modificados que permiten la determinación de la microestructura originada por un tratamiento térmico específico. Finalmente se discuten las propiedades mecánicas aportadas por microconstituyentes distintos de la perlita.

velocidad de transformación

Transformaciones de fases

12.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

transformación de fase

En los tratamientos de los materiales se produce una gran variedad de **transformaciones de fases**, que representan alguna alteración de la microestructura. Estas transformaciones, para los fines de este libro, se dividen en tres categorías. En un grupo se reúnen las trans-

formaciones por difusión: no cambia ni el número ni la composición de las fases presentes. Son ejemplos la solidificación de un metal puro, las transformaciones alotrópicas y la recristalización y el crecimiento de grano (Secciones 9.12 y 9.13).

En otro tipo de transformaciones por difusión se alteran las composiciones de fases y, a veces, el número. La reacción eutectoide, representada por la Ecuación 11.19, pertenece a este tipo y está descrita en la Sección 12.5.

El tercer tipo de transformaciones son adifusionales (sin difusión) y se forma una fase metaestable. La transformación martensítica (Sección 12.5) de algunos aceros es un ejemplo.

12.3 CINÉTICA DE TRANSFORMACIONES DE FASE

nucleación, crecimiento

Normalmente, con las transformaciones de fase se forma al menos una nueva fase que tiene diferentes características físico-químicas o diferente estructura que la fase original. Además, la mayoría de las reacciones en estado sólido no ocurren instantáneamente. Más bien, se empiezan formando numerosas y diminutas partículas de otra(s) fase(s), que crecen hasta completar la transformación. El progreso de una transformación de fase puede desglosarse en dos etapas distintas: **nucleación** y **crecimiento**. La nucleación implica la aparición de muy pequeñas partículas o núcleos de la nueva fase (generalmente consiste en pocos centenares de átomos) capaces de crecer. Durante la etapa del crecimiento, los núcleos incrementan su tamaño y desaparecen algunas o todas las fases originales. La transformación es completa si el crecimiento de estas partículas de la nueva fase permite alcanzar la fracción de equilibrio. A continuación se discute el mecanismo de estos dos procesos y cómo se relacionan con las transformaciones en estado sólido

Nucleación

Hay dos tipos de nucleación: *homogénea* y *heterogénea*. La distinción radica en el lugar donde se realiza. En la nucleación homogénea, el núcleo de la nueva fase se forma uniformemente en toda la fase original. En la nucleación de tipo heterogénea, el núcleo de la nueva fase se forma preferentemente en heterogeneidades, tales como paredes del recipiente, impurezas insolubles, límites de grano, dislocaciones, etc. A continuación, se discute primero la teoría de la nucleación homogénea, debido a que su desarrollo es más sencillo y, seguidamente, la heterogénea.

Nucleación homogénea

energía libre

La discusión de la teoría de la nucleación implica un parámetro termodinámico llamado **energía libre** (o *energía libre de Gibbs*), G . La energía libre es función de otros dos parámetros termodinámicos, uno de los cuales es la energía interna (*entalpía*, H) y el otro es la medida del desorden de los átomos o moléculas (*entropía*, S). No se discutirán con detalle los principios termodinámicos, pero se aplicarán a los sistemas materiales. Sin embargo, un parámetro importante relativo a las transformaciones de fase es la variación de energía libre ΔG ; la transformación ocurre espontáneamente sólo cuando ΔG tiene un valor negativo.

Para simplificar, primero se considera la solidificación de un material puro, suponiendo que el núcleo de la fase sólida que se forma en el interior del líquido adquiere la forma de un agregado de átomos con una disposición de empaquetamiento similar a la de la fase sólida. Además se supone que cada núcleo es esférico de radio r , como se ha esquematizado en la Figura 12.1.

En este caso, la adaptación de la regla de las mezclas proporciona la siguiente expresión:

$$\% \bar{Z} = W_p (\%Z)_p + W_b (\%Z)_b$$

Sustituyendo los valores de W y Z se obtiene la ductilidad:

$$\begin{aligned} \% \bar{Z} &= (0,50)(32 \%Z) + (0,50)(52 \%Z) \\ &= 42 \%Z \end{aligned}$$

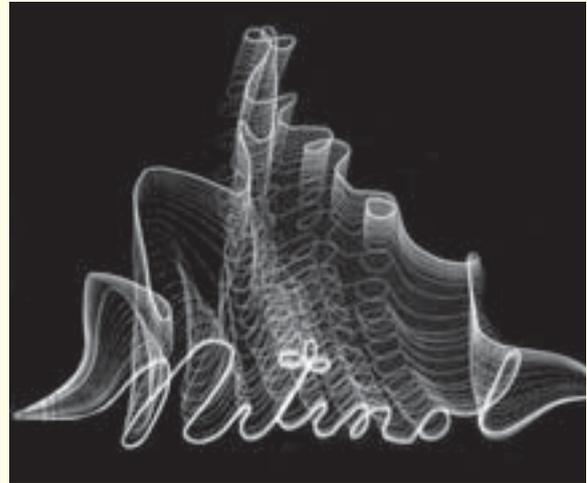
En resumen, para un acero eutectoide sometido al tratamiento térmico especificado, los valores de la resistencia a tracción y la ductilidad, son aproximadamente 1125 MPa y 42%Z, respectivamente.

C O N T E N I D O S I N N O V A D O R E S

Aleaciones con memoria de forma

Un grupo relativamente nuevo de materiales que presentan un interesante (y práctico) fenómeno son las *aleaciones con memoria de forma* (AMF o SMA). Estos materiales, al ser sometidos a un tratamiento térmico apropiado, después de ser deformados, tienen la capacidad de recuperar la forma y el tamaño previo a la deformación: esto es, el material “recuerda” su anterior forma/tamaño. Normalmente la deformación se realiza a temperatura ambiente, mientras que la forma se recupera tras un calentamiento.⁵ Algunos materiales que son capaces de recuperar cantidades significativas de deformación son: aleaciones níquel-titanio (con nombre comercial Nitinol⁶) y algunas aleaciones base cobre (aleaciones Cu-Zn-Al y Cu-Al-Ni).

Una aleación con memoria de forma es polimórfica (Sección 4.14), de modo que puede tener dos estructuras cristalinas (o fases) y el efecto memoria de forma implica transformaciones entre ellas. Una fase (llamada *fase austenita*) tiene estructura cúbica centrada en el cuerpo estable a elevada temperatura; su estructura está representada esquemáticamente en el recuadro de la etapa 1 de la Figura 12.37. Después de enfriar, la austenita se transforma espontáneamente en una fase de martensita, de manera similar a la transformación martensítica del sistema hierro-carbono (Sección 12.5). Esta transformación es adifusional, afecta a grandes grupos de átomos ordenados y se produce con mucha rapidez, siendo el grado de transfor-



Fotografía secuencial (*time-lapse*) que muestra el efecto de memoria de forma. Un alambre de una aleación con memoria de forma (Nitinol) se ha doblado y tratado de modo que perfila la palabra Nitinol. El alambre se deforma y, tras el calentamiento (por el paso de una corriente eléctrica), recupera su forma previa a la deformación y este proceso de recuperación se registra en la fotografía. [Fotografía cortesía del Naval Surface Warfare Center (anteriormente Naval Ordnance Laboratory)].

mación dependiente de la temperatura. Las temperaturas a las cuales se inicia y finaliza la transformación se indican con los niveles M_s y M_f , respectivamente,

⁵Las aleaciones que experimentan este fenómeno sólo tras el calentamiento se consideran con memoria de forma *unidireccional*. Algunos de estos materiales experimentan cambios de tamaño/forma por calentamiento y enfriamiento y, en este caso, se denominan aleaciones con memoria de forma *bidireccional*. En esta discusión se describe el mecanismo sólo para las aleaciones con memoria de forma unidireccional.

⁶*Nitinol* es un acrónimo *nickel-titanium* Naval Ordnance Laboratory, donde se descubrió esta aleación.

Capítulo 13 Propiedades y aplicaciones de los metales



© William D. Callister, Jr.

Las numerosas aleaciones de metales férricos y no férricos disponibles proporcionan una amplia gama de propiedades físicas en ingeniería; en consecuencia, los materiales de esta clase se utilizan en gran número y variedad de aplicaciones. Estas incluyen objetos comunes, como los que se muestran en esta fotografía: (de izquierda a derecha) cubiertos (tenedor y cuchillo), tijeras, monedas, un engranaje, una alianza y un tornillo con su tuerca.

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades y aplicaciones de los metales?*

En ingeniería se han de tomar frecuentemente decisiones de selección de materiales, lo que requiere una cierta familiaridad con las características generales de una amplia variedad de metales y sus aleaciones (así

como de otros tipos de materiales). Además, puede ser necesario acceder a bases de datos que contengan valores de propiedades para un gran número de materiales.

Objetivos de aprendizaje

Después de revisar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Enumerar cuatro tipos diferentes de aceros, indicando las diferencias de composición, las propiedades que los distinguen y los usos más habituales para cada uno de ellos.
2. Enumerar los cinco tipos de fundiciones de hierro y describir la microestructura y las características mecánicas generales de cada una de ellas.
3. Enumerar siete tipos distintos de aleaciones no férricas, indicar las propiedades físicas y mecánicas particulares y citar al menos tres aplicaciones habituales de cada una de ellas.

13.1 INTRODUCCIÓN

Con frecuencia un problema de materiales es realmente el de seleccionar el material que tenga la combinación apropiada de características para una aplicación específica. Por tanto, las personas involucradas en la toma de decisiones deberían tener algún conocimiento de las opciones disponibles. La primera parte de este capítulo ofrece una visión resumida de algunas de las aleaciones comerciales y sus propiedades y limitaciones generales.

Las aleaciones metálicas, en función de su composición, a menudo se agrupan en dos clases: férricas (férricas) y no férricas (no férricas). Las aleaciones férricas, en las que el hierro es el componente principal, incluyen aceros y fundiciones. Estas aleaciones y sus características son los primeros temas de discusión de esta sección. Las no férricas, que son todas las aleaciones que no tienen el hierro como elemento principal, se tratan a continuación.

Aleaciones férricas

aleación férrica

Las **aleaciones férricas**, cuyo principal componente es el hierro, se producen en mayores cantidades que cualquier otro tipo de metal. Son especialmente importantes como materiales estructurales en ingeniería. Su uso generalizado se justifica por tres razones: (1) en la corteza terrestre abundan los compuestos que contienen hierro; (2) los aceros se fabrican mediante técnicas de extracción, afinado, aleación y conformación (conformado) relativamente económicas; y (3) las aleaciones férricas son extremadamente versátiles, ya que se pueden adaptar a una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas. El principal inconveniente de muchas aleaciones férricas es la susceptibilidad a la corrosión. En esta sección se discuten composiciones, microestructuras y propiedades de diferentes tipos de aceros y fundiciones. Un esquema de clasificación de las diversas aleaciones férricas se presenta en la Figura 13.1.

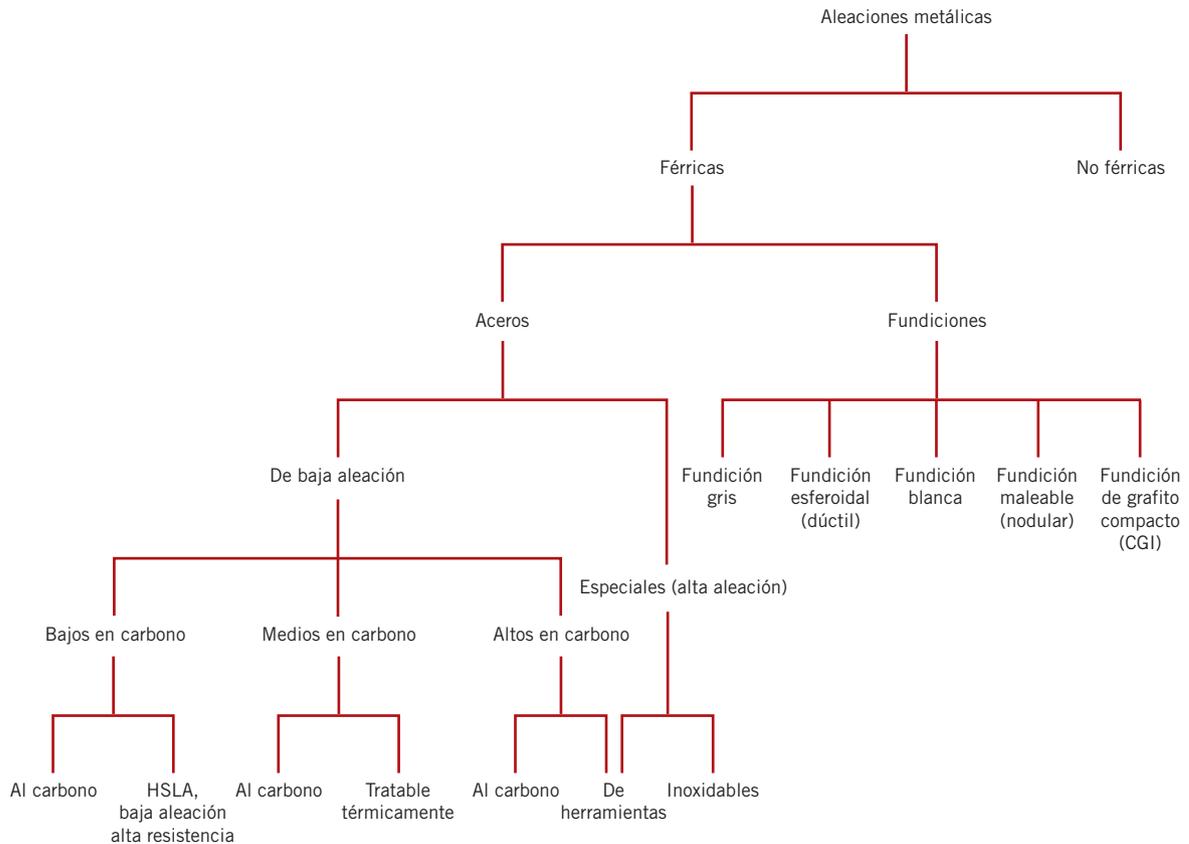


Figura 13.1 Esquema de clasificación de las aleaciones férricas.

13.2 ACEROS

Los aceros son aleaciones de hierro-carbono con concentraciones apreciables de otros elementos de aleación; existen miles de aceros que tienen diferentes composiciones o tratamientos térmicos. Las propiedades mecánicas dependen del contenido en carbono, que es normalmente inferior al 1,0% en peso. Algunos de los aceros más comunes se clasifican, según la concentración de carbono, en aceros bajos, medios y altos en carbono. También hay subclases dentro de cada grupo en función de la concentración de otros elementos de aleación. Los **aceros al carbono** sólo contienen concentraciones residuales de impurezas que no son carbono y algo de manganeso. En los **aceros aleados** se han añadido intencionalmente más elementos de aleación hasta concentraciones específicas.

acero al carbono
acero aleado

Aceros bajos en carbono

La mayor parte del acero fabricado es bajo en carbono. Éste contiene generalmente menos de 0,25% C en peso y no responde a los tratamientos térmicos que inducen formación de martensita, por lo que el endurecimiento se consigue mediante trabajo en frío. Las microestructuras están constituidas por ferrita y perlita. Como consecuencia, estos aceros son relativamente blandos y poco resistentes, pero presentan excelente ductilidad y gran tenacidad. Además, son mecanizables y soldables, y son los más económicos de todos los aceros. Sus aplicaciones típicas incluyen componentes de automoción, preformas estructurales (p. ej., vigas, perfiles en T y ángulos de hierro) y planchas para tuberías, construcción, puentes y envases. Las Tablas 13.1a y 13.1b presentan las composiciones y propiedades mecánicas de diversos aceros bajos en carbono. Estos aceros suelen tener un límite elástico de 275 MPa, una resistencia a tracción comprendida entre 415 y 550 MPa y una ductilidad (%A) del 25%.

El apéndice B se tabulan una amplia variedad de propiedades (densidad, módulo elástico, límite elástico y resistencia a tracción, resistividad eléctrica, coeficiente de dilatación térmica, etc.) de un gran número de metales y aleaciones.

RESUMEN

Aleaciones férreas (féricas)

- Las *aleaciones férreas* o féricas (aceros y fundiciones) son aquellas en las que el hierro es el componente principal. La mayoría de los aceros contienen menos de 1,0% C en peso y, además, otros elementos de aleación que los hacen susceptibles a tratamientos térmicos, a una mejora de las propiedades mecánicas y/o más resistentes a la corrosión.
- Las aleaciones férreas son ampliamente utilizadas en ingeniería por lo siguiente:
 - Los compuestos que contienen hierro son muy abundantes.
 - Las técnicas de extracción, afino y fabricación son económicas y asequibles.
 - Se pueden adaptar para tener una amplia variedad de propiedades mecánicas y físicas.
- Las limitaciones de las aleaciones féricas incluyen:
 - Densidades relativamente altas.
 - Conductividades eléctricas comparativamente bajas.
 - Susceptibilidad a la corrosión en ambientes comunes.
- Los tipos más comunes de acero son los bajos en carbono, de alta resistencia y baja aleación (HSLA), medios en carbono, de herramientas e inoxidable.
- Los aceros al carbono contienen (además de carbono) pequeñas cantidades de manganeso y concentraciones residuales de otras impurezas.
- Los aceros inoxidable se clasifican, de acuerdo con el principal constituyente microestructural, en tres grupos: ferríticos, austeníticos y martensíticos.
- Las fundiciones presentan contenidos de carbono mayores que los de los aceros (entre un 3,0% y un 4,5% C en peso, normalmente), así como otros elementos de aleación, en particular de silicio. Para estos materiales, la mayor parte del carbono está en forma de grafito en lugar de estar combinado con hierro en forma de cementita.
- Las fundiciones se clasifican en cuatro grupos: grises, dúctiles (o esferoidales), maleables (o nodulares) y de grafito compacto (CGI); los tres últimos grupos son bastante dúctiles.

Aleaciones no férreas (no féricas)

- Todas las demás aleaciones caen dentro de la categoría de no férreas (no féricas), que se subdivide según el metal base o alguna característica distintiva que es compartida por un grupo de aleaciones.
- Las aleaciones no féricas pueden subdividirse en aleaciones de forja o de fundición. Las que son susceptibles de ser conformadas por deformación se clasifican como de forja. Las aleaciones para fundición son relativamente frágiles y, por tanto, son más convenientes para fabricación por colada.
- Se han tratado las clasificaciones de siete aleaciones no férreas: cobre, aluminio, magnesio, titanio, metales refractarios, superaleaciones y metales nobles, así como un grupo variado (níquel, plomo, estaño, zinc y zirconio).

Términos y conceptos importantes

Acero al carbono
 Acero aleado
 Acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA)
 Acero inoxidable
 Aleación férrea
 Aleación hechurada

Aleación no férrea
 Bronce
 Denominación del tratamiento
 Fundición blanca
 Fundición de grafito compacto (CGI)

Fundición de hierro
 Fundición dúctil o esferoidal
 Fundición gris
 Fundición maleable o nodular
 Latón
 Resistencia específica

REFERENCIAS

- ASM Handbook*, Vol. 1, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, ASM International, Materials Park, OH, 1990.
- ASM Handbook*, Vol. 2, *Properties and Selection: Non-ferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, ASM International, Materials Park, OH, 1990.
- Davis, J. R. (Editor), *Cast Irons*, ASM International, Materials Park, OH, 1996.
- Dieter, G. E., *Mechanical Metallurgy*, 3rd edition, McGraw-Hill, New York, 1986. Chapters 15–21 provide an excellent discussion of various metal-forming techniques.
- Frick, J. (Editor), *Woldman's Engineering Alloys*, 9th edition, ASM International, Materials Park, OH, 2000.
- Henkel, D. P. y A. W. Pense, *Structures and Properties of Engineering Materials*, 5th edition, McGraw-Hill, New York, 2001.
- Metals and Alloys in the Unified Numbering System*, 12th edition, Society of Automotive Engineers and American Society for Testing and Materials, Warrendale, PA, 2012.
- Worldwide Guide to Equivalent Irons and Steels*, 5th edition, ASM International, Materials Park, OH, 2006.
- Worldwide Guide to Equivalent Nonferrous Metals and Alloys*, 4th edition, ASM International, Materials Park, OH, 2001.

CUESTIONES Y PROBLEMAS

Aleaciones férricas

- 13.1 (a)** Enumerar las cuatro clasificaciones de aceros.
(b) Para cada grupo, describir brevemente las propiedades y principales aplicaciones.
- 13.2 (a)** Citar tres razones por las que las aleaciones férricas son tan ampliamente utilizadas.
(b) Citar tres características de las aleaciones férricas que limitan su utilización.
- 13.3** ¿Cuál es la función de los elementos de aleación en los aceros de herramientas?
- 13.4** Calcular el porcentaje en volumen de grafito, V_{Gr} , en una fundición con 3,5% C en peso, suponiendo que todo el carbono está en forma de grafito. Estimar densidades de 8,0 y 2,5 g/cm³ para la ferrita y el grafito, respectivamente.
- 13.5** A partir de la microestructura, explicar brevemente por qué la fundición gris es frágil y débil a tracción.
- 13.6** Comparar las fundiciones grises y las fundiciones maleables con respecto a
(a) la composición y el tratamiento térmico,
(b) la microestructura, y
(c) las características mecánicas.

- 13.7** Comparar las fundiciones blancas y las fundiciones nodulares con respecto a
(a) la composición y el tratamiento térmico,
(b) la microestructura, y
(c) las características mecánicas.
- 13.8** ¿Es posible fabricar piezas de gran tamaño y con grandes dimensiones transversales en fundición maleable? ¿Por qué sí o por qué no?

Aleaciones no férricas

- 13.9** ¿Cuál es la principal diferencia entre aleaciones de forja y de fundición?
- 13.10** ¿Por qué los remaches de una aleación de aluminio 2017 deben ser refrigerados antes de ser utilizados?
- 13.11** ¿Cuál es la principal diferencia entre las aleaciones tratables térmicamente y las no tratables térmicamente?
- 13.12** Asignar características, limitaciones y aplicaciones a los siguientes grupos de aleaciones: aleaciones de titanio, metales refractarios, superaleaciones y metales nobles.

PROBLEMAS DE DISEÑO

Aleaciones férricas

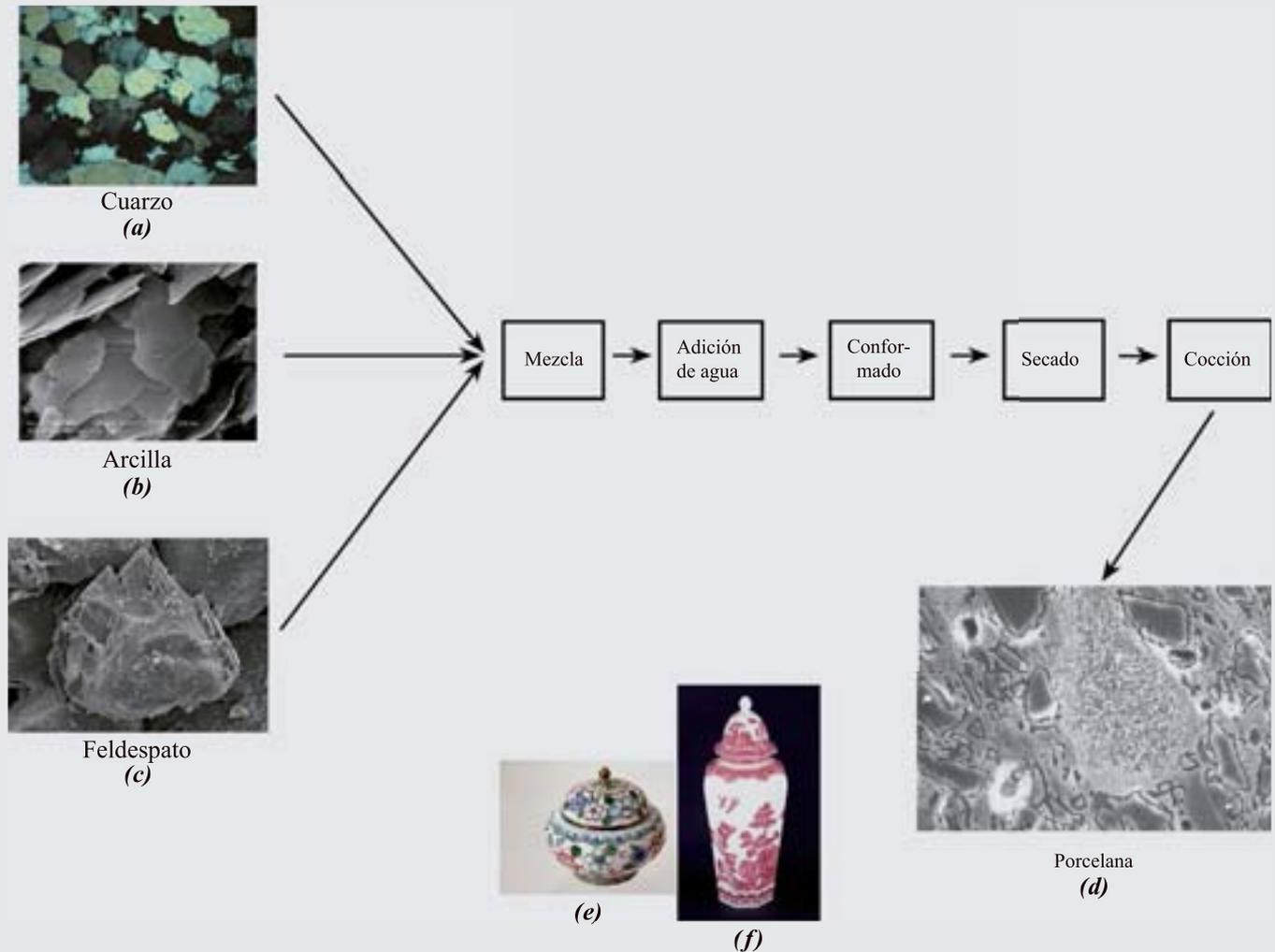
Aleaciones no férricas

- 13.D1** A partir de la siguiente lista de metales y aleaciones:
- | | |
|---------------------|-----------------------|
| Acero al carbono | Magnesio |
| Latón | Zinc |
| Fundición gris | Acero de herramientas |
| Platino | Aluminio |
| Acero inoxidable | Tungsteno |
| Aleación de titanio | |

Seleccionar el metal o aleación que resulte más adecuado para cada una de las aplicaciones siguientes y citar al menos una razón para su elección:

- (a)** Bloque de motor de combustión interna
(b) Intercambiador de calor por condensación de vapor
(c) Álabes de turboventilador de motores
(d) Brocas

Capítulo 14 Propiedades y aplicaciones de los cerámicos



Las micrografías superiores muestran partículas de (a) cuarzo, (b) arcilla y (c) feldespato, que son los componentes principales de la porcelana. Para elaborar un objeto de porcelana, estos tres ingredientes se mezclan en las proporciones adecuadas, se añade agua y se forma un objeto con la forma deseada (ya sea por colada de barbotina o por conformado hidropultrástico). A continuación, la mayor parte del agua se elimina durante una operación de secado y el objeto se cuece a una temperatura elevada con el fin de mejorar su resistencia y otras propiedades deseables. La decoración de una pieza de porcelana es posible mediante la aplicación de un esmalte en su superficie. (d) Micrografía electrónica de una porcelana cocida. (e) y (f) Objetos de arte de porcelana cocidos y vitrificados.

[Figura (a) Cortesía de Gregory C. Finn, Brock University; (b) cortesía de Hefa Cheng y Martin Reinhard, Stanford University; (c) cortesía de Martin Lee, de University of Glasgow; (d) cortesía de H.G. Brinkies, Swinburne University of Technology, Hawthorn Campus, Hawthorn, Victoria, Australia; (e) © María Natalia Morales / iStockphoto y (f) © arturoli / iStockphoto.]

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades y aplicaciones de los cerámicos?*

Algunas de las propiedades de los cerámicos pueden explicarse por sus estructuras. Por ejemplo: (a) la transparencia óptica de materiales de vidrio inorgánico se debe, en parte, a su carácter no cristalino; (b) la hidroplasticidad de las arcillas (es decir, el comportamiento plástico tras la adición de agua) se

relaciona con las interacciones entre las moléculas de agua y las estructuras de las arcilla (Secciones 4.11 y 17.9 y Figura 4.15); y (c) los comportamientos magnéticos y ferroeléctricos permanentes de algunos materiales cerámicos se explican por sus estructuras cristalinas (Secciones 21.5 y 19.24).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Explicar brevemente por qué hay una dispersión significativa en los valores de tensión de rotura para muestras idénticas del mismo material cerámico.
2. Calcular la resistencia a flexión de probetas cilíndricas de cerámica sometidas a tensión por tres puntos hasta rotura.
3. A partir de consideraciones de deslizamiento, explicar por qué los materiales cerámicos cristalinos normalmente son frágiles.
4. Describir el proceso de producción de vitrocerámicas.
5. Nombrar los dos tipos de productos de arcilla y dar dos ejemplos de cada uno.
6. Citar tres requisitos importantes que normalmente deben cumplir los cerámicos refractarios y los cerámicos abrasivos.
7. Describir el mecanismo por el cual el cemento endurece cuando se añade agua.
8. Nombrar tres formas de carbono discutidas en este capítulo y, para cada una, indicar al menos dos características específicas.

14.1 INTRODUCCIÓN

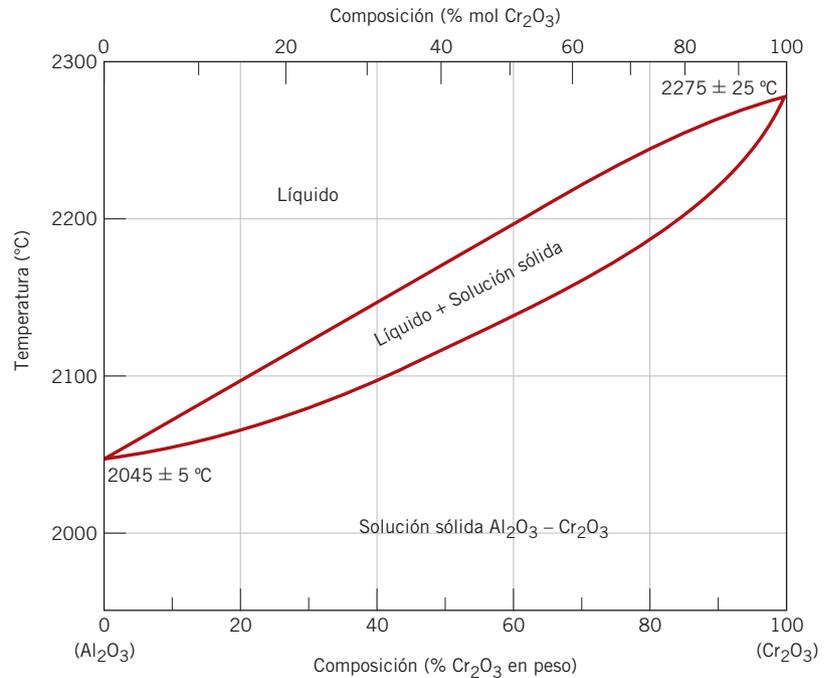
Los materiales cerámicos y sus estructuras cristalinas se han comentado brevemente en los capítulos 1 y 4. Hasta finales de los años 60, las “cerámicas tradicionales” eran los materiales más importantes de este tipo, para los cuales la materia prima principal es la arcilla. Algunos productos que se consideran “cerámicos tradicionales” son porcelana, ladrillos, azulejos y, además, vidrios y cerámicos refractarios. En los últimos tiempos se ha progresado significativamente en el conocimiento de estos materiales y de los fenómenos responsables de sus propiedades únicas. En consecuencia, estos materiales han evolucionado a una nueva generación y el término *cerámica* ha adquirido un significado mucho más amplio. De una manera u otra, estos nuevos materiales tienen un lugar destacado en el momento actual; las industrias electrónica, informática, comunicación, aeroespacial y un sinnúmero de otras, se basan en estos materiales.

En este capítulo se comentan los diagramas de fases y las características mecánicas de los materiales cerámicos. Las técnicas de fabricación de estos materiales se comentan en el Capítulo 17.

Diagramas de fases en materiales cerámicos

Los diagramas de fases de muchos sistemas cerámicos se han determinado experimentalmente. En los diagramas binarios o de dos componentes es frecuente que los dos componentes sean compuestos que comparten un elemento común, a menudo oxígeno. Estos diagramas pueden tener configuraciones similares a los sistemas metal-metal, y se interpretan de la misma manera. Una revisión de la interpretación de los diagramas de fases se encuentra en la Sección 11.8.

Figura 14.1 Diagrama de fases del sistema óxido de aluminio-óxido de cromo. (Adaptado de E. N. Bunting, "Phase Equilibria in the System $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ ". *Bur. Standards J. Research*, **6**, 1931, p. 948).



14.2 SISTEMA $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$

Uno de los diagramas de fases de materiales cerámicos relativamente simples es el del sistema de óxido de aluminio-óxido de cromo (Figura 14.1). Este diagrama tiene la misma forma que el diagrama isomorfo de cobre-níquel (Figura 11.3a), que consta de una región de fase líquida y una región sólida separadas por una región bifásica sólido-líquido que tiene la forma de una cuchilla. La solución sólida $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ es sustitucional y en ella los iones de Al^{3+} sustituyen a los de Cr^{3+} y viceversa. Existe para todas las composiciones, por debajo del punto de fusión de Al_2O_3 , porque los iones de aluminio y de cromo tienen la misma carga, así como radios similares (0,053 y 0,062 nm, respectivamente). Además, tanto Al_2O_3 como Cr_2O_3 tienen la misma estructura cristalina.

14.3 SISTEMA $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$

El diagrama de fases para el sistema óxido de aluminio-óxido de magnesio (Figura 14.2) es similar en muchos aspectos al diagrama de plomo-magnesio (Figura 11.19). Existe una fase intermedia, o mejor, un compuesto denominado *espinela*, cuya fórmula química es MgAl_2O_4 (o $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$). A pesar de que la espinela es un compuesto distinto (de composición 50% mol Al_2O_3 -50% mol MgO , con 72% en peso de Al_2O_3 y 28% en peso de MgO), se representa en el diagrama de fases como un campo monofásico en lugar de una línea vertical, como sucede con Mg_2Pb (figura 11.19). Es decir, hay una gama de composiciones para las que la espinela es un compuesto estable, por tanto no es estequiométrica, salvo que tenga una composición de 50% mol Al_2O_3 -50% mol de MgO . Además, la solubilidad de Al_2O_3 en MgO es limitada por debajo de aproximadamente 1400 °C en el extremo izquierdo de la Figura 14.2, debido principalmente a las diferencias en la carga y radio de los iones Mg^{2+} y Al^{3+} (0,072 frente a 0,053 nm). Por las mismas razones, MgO es prácticamente insoluble en Al_2O_3 , como se evidencia por la falta de una solución sólida terminal

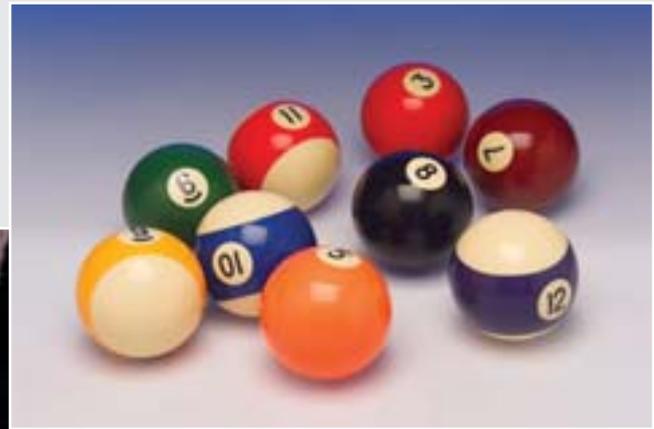
Capítulo 15 Características y aplicaciones de los polímeros

La fotografía (a) muestra bolas de billar de fenol-formaldehído (Baquelita). En los Contenidos Innovadores de la Sección 15.15 se comenta la invención del fenol-formaldehído y su uso para sustituir el marfil de las bolas de billar. En la fotografía (b) se observa una mujer jugando al billar.



© RapidEye/iStockphoto

(b)



(a)

© William D. Callister, Jr.

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Características y aplicaciones de los polímeros?*

Hay varias razones por las que, en ingeniería, se deben conocer las características, aplicaciones y procesado de los materiales poliméricos. Los polímeros se utilizan en gran variedad de aplicaciones, tales como materiales de la construcción y procesos microelectrónicos. Así,

será habitual trabajar con polímeros a lo largo de la carrera profesional de ingeniería. El conocimiento de los mecanismos de deformación elástica y plástica permite modificar y controlar su módulo elástico y la resistencia (Secciones 15.7 y 15.8).

Objetivos de aprendizaje

Después del estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Dibujar esquemáticamente los tres comportamientos característicos de tensión-deformación para materiales poliméricos.
2. Describir las distintas etapas en la deformación elástica o plástica de un polímero semicristalino (esferulítico).
3. Discutir la influencia de los siguientes factores en el módulo o la resistencia a tracción de los polímeros: (a) peso molecular, (b) grado de cristalinidad, (c) predeformación y (d) tratamiento térmico de materiales no deformados.
4. Describir el mecanismo molecular por el cual los polímeros elastoméricos se deforman elásticamente.
5. Enumerar cuatro características o elementos estructurales de un polímero que afectan tanto a su temperatura de fusión como a su temperatura de transición vítrea.
6. Citar las siete familias de polímero, en función de su aplicación, indicando las características generales de cada tipo.

15.1 INTRODUCCIÓN

Las características más importantes de los materiales poliméricos y varias técnicas de conformación se discuten en este capítulo.

Comportamiento mecánico de los polímeros

15.2 COMPORTAMIENTO ESFUERZO-DEFORMACIÓN

Las propiedades mecánicas de los polímeros se especifican con los mismos parámetros utilizados para los metales: módulo elástico, límite elástico y resistencia a tracción. El ensayo de tracción (tensión-deformación) se emplea para caracterizar parámetros mecánicos de muchos materiales poliméricos.¹ La mayoría de las características mecánicas de los polímeros son muy sensibles a la velocidad de deformación, a la temperatura y a la naturaleza química del medio (presencia de agua, oxígeno, disolventes orgánicos, etc.). En los materiales muy elásticos, como las gomas, conviene modificar las técnicas de ensayo o la forma de las probetas utilizadas para metales (Capítulo 8).

En los materiales poliméricos se aprecian tres tipos distintos de comportamiento esfuerzo-deformación, representados en la Figura 15.1. La curva *A* corresponde al comportamiento esfuerzo-deformación de un polímero frágil, ya que se rompe mientras se deforma elásticamente. El comportamiento del material representado por la curva *B* es parecido al de los metales: después de la deformación elástica inicial el material fluye y luego se deforma plásticamente. Finalmente, el comportamiento descrito por la curva *C* es totalmente elástico. Este tipo de elasticidad, que se aprecia en las gomas (grandes deformaciones recuperables producidas por pequeños esfuerzos), es propia de los polímeros denominados **elastómeros**.

elastómero

¹ASTM Standard D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics."

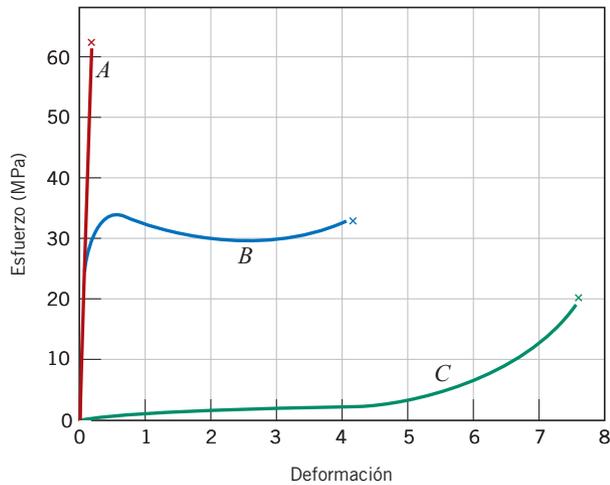


Figura 15.1 Curvas esfuerzo-deformación de polímeros: frágil (curva *A*), plástico (curva *B*) y con elevada elasticidad (elastómero) (curva *C*).

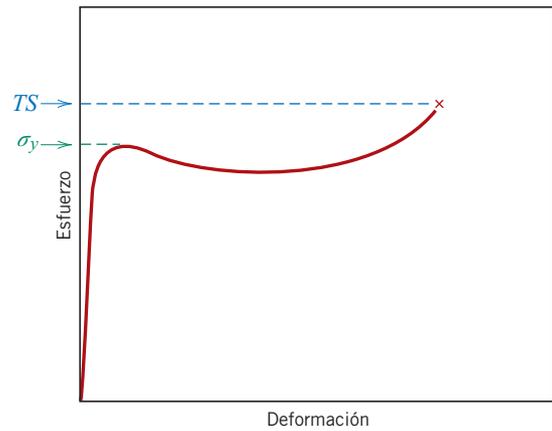


Figura 15.2 Curva esquemática esfuerzo-deformación de un polímero plástico mostrando cómo determinar el límite elástico y la resistencia a tracción.

En los polímeros, el módulo elástico (denominado *módulo de tracción* para polímeros, o a veces sólo *módulo*) y la ductilidad, en porcentaje de alargamiento, se determinan como en los metales (Sección 8.3 y 8.4). Para polímeros plásticos (curva *B* de la Figura 15.1) el límite elástico aparece en el valor máximo de la curva, justo después de la región elástica lineal (Figura 15.2). El esfuerzo en este punto máximo se denomina límite elástico (σ_y). Además, la resistencia a tracción (*RM*) corresponde al esfuerzo al cual se produce rotura (Figura 15.2). El valor de *RM* puede ser superior o inferior al de σ_y . En los polímeros plásticos, la resistencia equivale a resistencia a tracción. La Tabla 15.1 especifica propiedades mecánicas para varios materiales poliméricos y en las Tablas B.2 a B.4 del Apéndice B, se proporciona una lista más exhaustiva de valores.

Tabla 15.1 Características mecánicas a temperatura ambiente de polímeros comunes.

| Material | Densidad | Módulo elástico (GPa) | Resistencia a tracción (MPa) | Límite elástico (MPa) | Alargamiento a rotura (%) |
|-----------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Poliétileno (baja densidad), LDPE | 0,917–0,932 | 0,17–0,28 | 8,3–31,4 | 9,0–14,5 | 100–650 |
| Poliétileno (alta densidad), HDPE | 0,952–0,965 | 1,06–1,09 | 22,1–31,0 | 26,2–33,1 | 10–1200 |
| Poli(cloruro de vinilo), PVC | 1,30–1,58 | 2,4–4,1 | 40,7–51,7 | 40,7–44,8 | 40–80 |
| Politetrafluoretileno, PTFE | 2,14–2,20 | 0,40–0,55 | 20,7–34,5 | 13,8–15,2 | 200–400 |
| Polipropileno, PP | 0,90–0,91 | 1,14–1,55 | 31–41,4 | 31,0–37,2 | 100–600 |
| Poliestireno, PS | 1,04–1,05 | 2,28–3,28 | 35,9–51,7 | 25,0–69,0 | 1,2–2,5 |
| Poli(metacrilato de metilo), PMMA | 1,17–1,20 | 2,24–3,24 | 48,3–72,4 | 53,8–73,1 | 2,0–5,5 |
| Fenol-formaldehído, FF | 1,24–1,32 | 2,76–4,83 | 34,5–62,1 | — | 1,5–2,0 |
| Nylon 6,6, PA | 1,13–1,15 | 1,58–3,80 | 75,9–94,5 | 44,8–82,8 | 15–300 |
| Poliéster, PET | 1,29–1,40 | 2,8–4,1 | 48,3–72,4 | 59,3 | 30–300 |
| Policarbonato, PC | 1,20 | 2,38 | 62,8–72,4 | 62,1 | 110–150 |

Fuente: *Modern Plastics Encyclopedia '96*. Copyright 1995, The McGraw-Hill Companies. Reproducción autorizada.

C O N T E N I D O S I N N O V A D O R E S

Película de polímero retráctil (shrink-wrap)

Una interesante aplicación del tratamiento térmico en polímeros es la retractilidad empleada en el embalaje. El polímero retráctil es una película polimérica, generalmente constituida por poli(cloruro de vinilo), polietileno o por una lámina multicapas de polietileno y polipropileno. Inicialmente se deforma plásticamente (estirado en frío) de un 20% a un 300% para generar una película preestirada (alineada). La película envuelve al objeto que se ha de empaquetar o sellar. Si se calienta a unos 100 °C a 150 °C, el material preestirado se encoge hasta recuperar entre un 80% a un 90% de su deformación inicial, lo que proporciona una película transparente de polímero fuertemente estirado y libre de arrugas. Gran número de productos de consumo (p. ej., CD) se empaquetan con retractilidad.



Arriba: Protección de una conexión eléctrica mediante retractilidad (*shring-wrap*). Centro y abajo: Al aplicar calor al tubo el diámetro se reduce y con esta contracción, el tubo de polímero estabiliza la conexión y proporciona aislamiento eléctrico. (Fotografía cortesía de Insulation Products Corporation).

15.9 DEFORMACIÓN DE ELASTÓMEROS

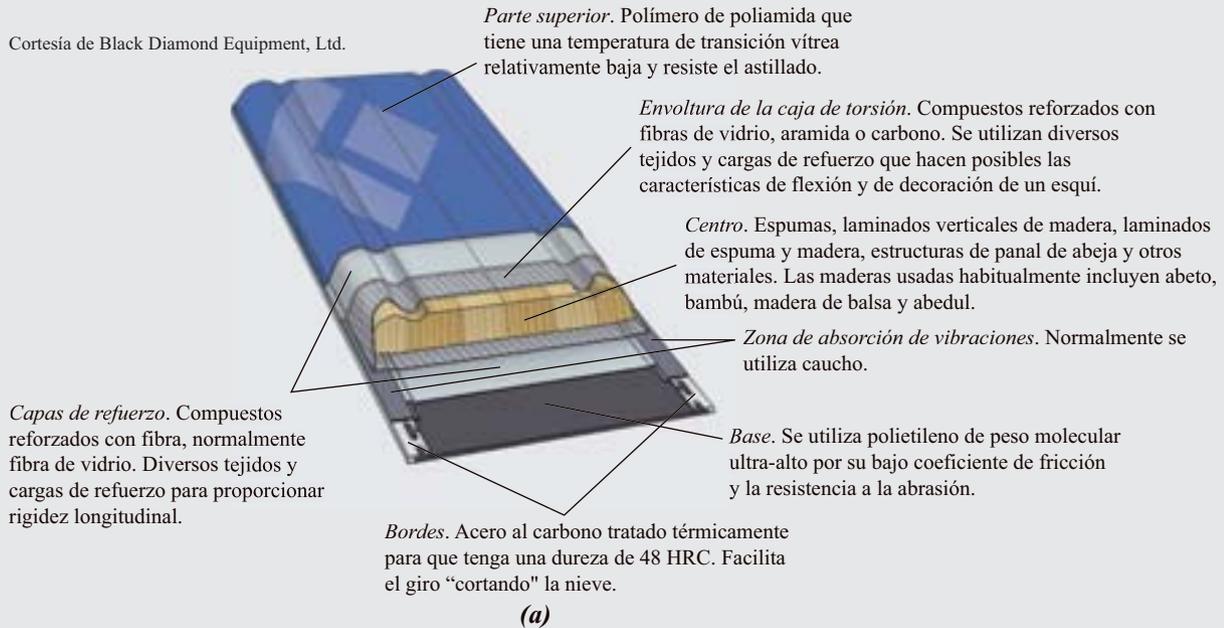
Una de las propiedades más fascinantes de los materiales elastoméricos es su elasticidad semejante a las gomas. Es decir, tienen la posibilidad de experimentar grandes deformaciones y de recuperar elásticamente su forma primitiva. Este comportamiento es el resultado del entrecruzamiento de cadenas en el polímero, que genera una fuerza de recuperación para que las cadenas vuelvan a su configuración no deformada. Probablemente este comportamiento se observó en primer lugar en los cauchos naturales; sin embargo, en las últimas décadas se han sintetizado un gran número de elastómeros con gran variedad de propiedades. La curva *C* de la Figura 15.1 reproduce el típico comportamiento esfuerzo-deformación de los elastómeros. El módulo elástico de estos materiales es muy pequeño y varía con la deformación, ya que la gráfica esfuerzo-deformación no es lineal.

En ausencia de esfuerzos, un elastómero es amorfo y está compuesto de cadenas moleculares entrecruzadas, muy retorcidas, plegadas y enrolladas. La deformación elástica posterior a la aplicación de un esfuerzo de tracción se debe, simplemente, a que se deshace el retorcimiento, plegado y enrollamiento de las cadenas, con la consiguiente elongación de las cadenas en la dirección de la tensión aplicada. Este fenómeno está representado en la Figura 15.15. Después de eliminar el esfuerzo, las cadenas recuperan la configuración original y la pieza macroscópica vuelve a tener la forma primitiva.

La fuerza impulsora de la deformación elástica es un parámetro termodinámico llamado *entropía*, que mide el grado de desorden del sistema. La entropía aumenta al aumentar el desorden. Al aplicar un esfuerzo a un elastómero las cadenas se alargan y alinean: el sistema se ordena. Desde este estado, la entropía aumenta cuando las cadenas vuelven a su enmarañamiento original. Este efecto entrópico origina dos fenómenos. En primer lugar, al aplicar un esfuerzo al elastómero, éste aumenta su temperatura; en segundo lugar, el módulo elástico aumenta al incrementar la temperatura, que es un comportamiento contrario al de otros materiales (Figura 8.8).

Capítulo 16 Materiales compuestos

Cortesía de Black Diamond Equipment, Ltd.



(a) El esquí moderno es una estructura de material compuesto relativamente compleja. En esta ilustración, se muestran los distintos componentes en una sección transversal de un esquí de alto rendimiento. Se indica la función de cada componente así como el material utilizado en su construcción.

(b) Fotografía de una instantánea de práctica de esquí sobre nieve en polvo.

© Doug Berry/iStockphoto



¿POR QUÉ ESTUDIAR *Materiales compuestos*?

Con el conocimiento de los diversos tipos de materiales compuestos o composites, y comprendiendo la relación de su comportamiento con las características, cantidades relativas, geometría/distribución y propiedades de las fases constituyentes, es posible diseñar materiales con combinaciones de propiedades que son mejores que las

que se pueden encontrar en cualquier aleación metálica, cerámico monolítico o material polimérico. Por ejemplo, en el Ejemplo de Diseño 16.1, se comenta cómo un eje tubular está diseñado para que cumpla unos requisitos de rigidez especificados.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Nombrar los cuatro grupos principales de materiales compuestos o composites y citar los rasgos distintivos de cada uno.
2. Citar la diferencia entre mecanismos de refuerzo para composites de partículas grandes y composites con dispersión de partículas.
3. Distinguir los tres tipos diferentes materiales compuestos reforzados con fibra en función de la longitud y orientación de las fibras, y comentar las distintas características mecánicas para cada tipo.
4. Calcular el módulo longitudinal y la resistencia longitudinal para un material compuesto reforzado por fibras continuas y alineadas.
5. Calcular la resistencia longitudinal para materiales compuestos con fibra discontinua y alineada.
6. Citar los tres tipos de refuerzo con fibras más comunes utilizados en materiales compuestos de matriz polimérica y, para cada uno, comentar las características deseables y las limitaciones.
7. Citar las características deseables de los compuestos de matriz metálica.
8. Indicar la razón principal para la creación de materiales compuestos de matriz cerámica.
9. Nombrar y describir brevemente las dos subclasificaciones de materiales compuestos estructurales.

16.1 INTRODUCCIÓN

A mediados del siglo xx, con la fabricación de materiales con múltiples fases deliberadamente diseñadas y desarrolladas, tales como polímeros reforzados con fibra de vidrio, aparecieron los materiales compuestos o composites como un grupo distinto en la clasificación de materiales. Aunque los materiales multifásicos, como la madera, los ladrillos de arcilla reforzada con paja, las conchas marinas e incluso algunas aleaciones como el acero, ya se conocían miles de años atrás, el reconocimiento de este nuevo concepto de la combinación de materiales diferentes durante la fabricación condujo a la identificación de materiales compuestos como un nuevo grupo, separado de metales, cerámicos y polímeros. Este concepto de materiales compuestos multifase ofrece oportunidades interesantes para el diseño de una gran variedad de materiales con combinaciones de propiedades que no podrían ser satisfechas por ninguno de los materiales monolíticos¹ convencionales tales como aleaciones metálicas, materiales cerámicos y materiales poliméricos.

Se necesitan materiales con propiedades específicas y poco comunes para determinadas aplicaciones de alta tecnología, tales como las que se encuentran en los sectores espaciales, subacuáticos, bioingeniería y en transportes. Por ejemplo, la ingeniería aeronáutica persigue materiales estructurales que tengan bajas densidades pero que sean rígidos y resistentes a la abrasión, a los impactos y a la corrosión. Esta combinación de características es formidable. Entre los materiales monolíticos, los materiales fuertes son relativamente densos; un aumento de la resistencia o de la rigidez generalmente origina una disminución de la tenacidad.

Las combinaciones de propiedades de los materiales y sus intervalos de valores se han ampliado y se siguen ampliando mediante el desarrollo de materiales compuestos. En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase

¹El término *monolítico* hace referencia a un material que tiene una microestructura continua y uniforme y que se forma a partir de un solo material; asimismo, puede estar presente más de un microconstituyente. En contraste, la microestructura de un material compuesto no es uniforme, es discontinua y tiene múltiples fases, ya que es una mezcla de dos o más materiales distintos.

principio de acción combinada

que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes, de manera que presenta la mejor combinación posible. De acuerdo con este **principio de acción combinada**, las mejores propiedades se obtienen por la combinación razonada de dos o más materiales diferentes. Muchos materiales compuestos tienen propiedades excepcionales.

En otros capítulos ya se han comentado algunos tipos de materiales compuestos, entre ellos las aleaciones metálicas multifásicas y algunos cerámicos y polímeros. Por ejemplo, los aceros perlíticos (Sección 11.19) tienen una microestructura que consiste en capas alternas de ferrita α y cementita (Figura 11.63). La fase ferrítica es blanda y dúctil, mientras que la cementita es dura y muy frágil. Las características mecánicas combinadas de la perlita (ductilidad y resistencia razonablemente elevadas) son superiores a las de cada una de las fases constituyentes. Existen compuestos naturales, como por ejemplo la madera, que consiste en fibras de celulosa flexibles embebidas en un material rígido llamado lignina. El hueso es un compuesto formado por colágeno, una proteína resistente pero blanda, y por apatito, mineral duro y frágil.

En este contexto, un material compuesto es un material multifase *obtenido artificialmente*, en oposición a los que se encuentran en la naturaleza. Además, las fases constituyentes deben ser químicamente distintas y deben estar separadas por una intercara.

Desde la ciencia e ingeniería de materiales, a la hora de diseñar materiales compuestos se han combinado determinados metales, cerámicos y polímeros para producir una nueva generación de materiales extraordinarios. La mayoría de los compuestos se han creado para mejorar la combinación de propiedades mecánicas tales como rigidez, tenacidad y resistencia a temperatura ambiente y a elevada temperatura.

Los materiales compuestos, la gran mayoría, están formados por dos fases; una, llamada **matriz**, es continua y rodea a la otra fase, denominada **fase dispersa**. Las propiedades de los compuestos están en función de las propiedades de las fases constituyentes, de sus proporciones relativas y de la geometría de la fase dispersa. La *geometría de la fase dispersa* en este contexto hace referencia a la forma, el tamaño, la distribución y la orientación de las partículas; estas características están representadas en la Figura 16.1.

matriz

fase dispersa

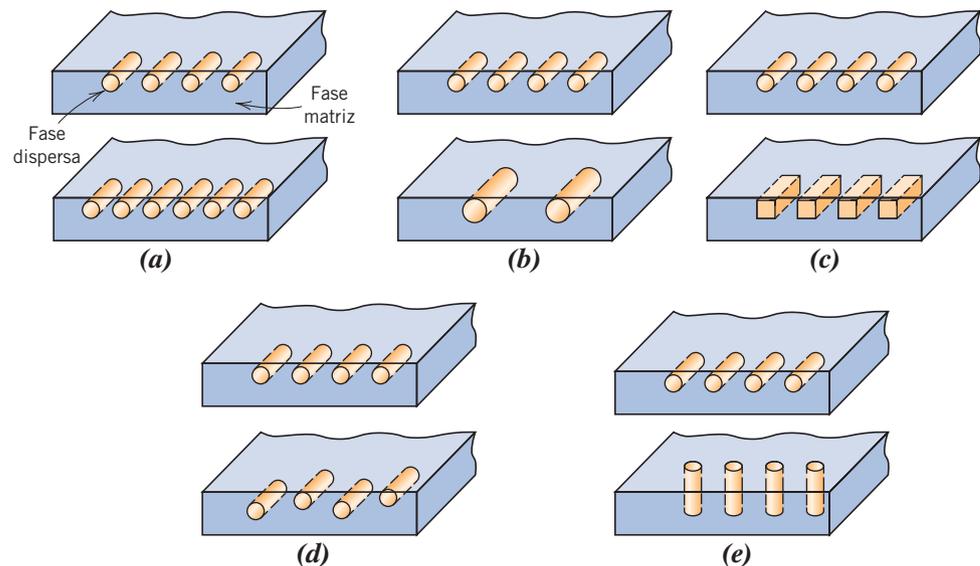


Figura 16.1 Representaciones esquemáticas de diversas características geométricas y espaciales de partículas en fase dispersa que repercuten en las propiedades de los materiales compuestos: (a) concentración, (b) tamaño, (c) forma, (d) distribución y (e) orientación. (De Richard A. Flinn y Paul K. Trojan, *Engineering Materials and Their Applications*, 4ª edición. Copyright © 1990 por John Wiley & Sons, Inc. Reproducción autorizada por John Wiley & Sons, Inc.).

Capítulo 17 Fabricación y procesamiento de materiales en ingeniería



© William D. Callister, Jr.

(a)

(a) Lata de refresco de aluminio en diversas etapas de su proceso de producción. La lata se forma a partir una lámina de aleación de aluminio. Las operaciones de producción incluyen el diseño, el hechurado, el recorte, la limpieza, la decoración y la formación del cuello y de la brida.

(b) Un operario inspecciona una bobina de chapa de aluminio.



Daniel R. Patmore/© AP/Wide World Photos.

(b)

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Fabricación y procesamiento de materiales en ingeniería?*

En ocasiones, los procesos de fabricación y de transformación de materiales afectan negativamente a algunas de sus propiedades. Por ejemplo, en la Sección 17.6 se indica que algunos aceros pueden fragilizarse durante las etapas de revenido, tras un tratamiento térmico de temple. Asimismo, algunos aceros inoxidables se hacen susceptibles a la corrosión intergranular (Sección 16.7) cuando se calientan durante períodos de tiempo largos dentro de un intervalo específico de

temperaturas. Además, como se indica en la Sección 5.4, las regiones adyacentes a uniones soldadas pueden experimentar descensos en los valores de resistencia y de tenacidad como resultado de modificaciones microestructurales no deseadas. Es importante que en la práctica de ingeniería resulten familiares las posibles consecuencias de los procedimientos de procesamiento y fabricación, con el fin de prevenir fallos imprevistos de los materiales.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Nombrar y describir cuatro operaciones de hechurado que se utilizan con aleaciones metálicas.
2. Nombrar y describir cinco técnicas de moldeo.
3. Describir los propósitos y los procedimientos para los siguientes tratamientos térmicos: recocido para eliminar tensiones, normalizado, recocido de regeneración y recocido globular.
4. Definir *templabilidad*.
5. Generar un perfil de dureza para una muestra cilíndrica de acero que ha sido austenizada y después templada, o curva de templabilidad, para una aleación específica, así como la relación entre la velocidad de temple y el diámetro de la muestra.
6. Describir y explicar los dos tratamientos térmicos que se utilizan para el endurecimiento por precipitación de una aleación, utilizando un diagrama de fases.
7. Esquematizar un diagrama, a temperatura ambiente, de la resistencia (o dureza) frente al logaritmo del tiempo para un tratamiento térmico de precipitación a temperatura constante. Explicar la forma de esta curva en términos del mecanismo de endurecimiento por precipitación.
8. Nombrar y describir brevemente cinco métodos de conformado que se utilizan para la fabricación de piezas de vidrio.
9. Describir brevemente y explicar el procedimiento térmico del temple del vidrio.
10. Describir brevemente los procesos que ocurren durante el secado y la cocción de utensilios de cerámica basada en arcilla.
11. Describir brevemente el proceso de sinterización de agregados de partículas de polvo.
12. Describir brevemente los mecanismos de polimerización por adición y por condensación.
13. Nombrar cinco tipos de aditivos para polímeros y, para cada uno, indicar cómo modifican las propiedades de los polímeros.
14. Nombrar y describir brevemente cinco técnicas de fabricación utilizadas para polímeros plásticos.

17.1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas de fabricación son métodos por los cuales los materiales se transforman en componentes que pueden ser incorporados en productos útiles. A veces puede ser necesario someter el componente a algún tipo de tratamiento de transformación con el fin de alcanzar las propiedades requeridas. En ocasiones, la idoneidad de un material para una aplicación viene dada por la facilidad de conformado y por consideraciones económicas. En este capítulo se comentan varias técnicas de fabricación y procesamiento de metales, cerámicos y polímeros (y para los polímeros también la forma en que se sintetizan).

Conformado de metales

Las técnicas de conformado de metales suelen ir precedidas por procesos de afino, aleación y, con frecuencia, tratamiento térmico que producen aleaciones con las características deseadas. La clasificación de las técnicas de conformado de metales incluye diversos procesos de hechurado, moldeo, pulvimetalurgia, soldadura y mecanizado; normalmente se

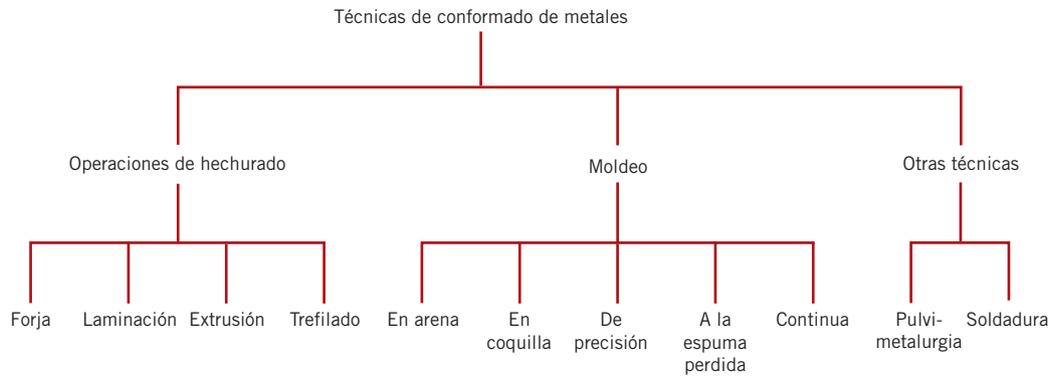


Figura 17.1 Esquema de clasificación de las técnicas de conformado de metales tratadas en este capítulo.

utilizan dos o más procesos para terminar una pieza. Los procesos escogidos dependen de varios factores; los más importantes son las propiedades del metal, el tamaño y la forma de la pieza acabada y, desde luego, el precio. Las técnicas de conformado comentadas en este capítulo se clasifican según el esquema de la Figura 17.1.

17.2 OPERACIONES DE HECHURADO

Las operaciones de hechurado cambian la forma de una preforma metálica por deformación plástica. Así, los procesos de forja, laminación, extrusión y trefilado son las técnicas más comunes entre las operaciones de hechurado. La deformación se produce mediante la aplicación de una fuerza o tensión externa, superior al límite elástico del material. La mayoría de los materiales metálicos son especialmente susceptibles al hechurado, puesto que son moderadamente dúctiles y capaces de experimentar deformación permanente sin romperse ni agrietarse.

hechurado en caliente

Si la deformación plástica se realiza a una temperatura superior a la de recristalización, el proceso se denomina **hechurado en caliente** (o trabajo en caliente, Sección 9.12); de lo contrario, se denomina hechurado en frío. La mayoría de las técnicas de hechurado pueden realizarse en frío y en caliente. En el hechurado en caliente se producen grandes deformaciones que puede repetirse sucesivamente porque el metal permanece blando y dúctil. Además, el hechurado en caliente requiere de menos energía que en frío. Sin embargo, la mayoría de los metales experimentan oxidación superficial, lo que origina pérdida de material y un acabado exterior deficiente. El **hechurado en frío** (o trabajo en frío) aumenta la resistencia y disminuye la ductilidad porque el metal adquiere acritud y se endurece; las ventajas con respecto al hechurado en caliente son: alta calidad del acabado superficial, mejores y más variadas propiedades mecánicas y gran control dimensional de la pieza acabada. En ocasiones, la deformación total requiere de una serie de etapas en las que la pieza es sucesivamente deformada en frío, en cantidades pequeñas, seguidas de etapas de recocido (Sección 17.5). Este procedimiento, sin embargo, es caro y laborioso.

hechurado en frío

Las operaciones de hechurado que se expondrán se esquematizan en la Figura 17.2.

Forja

forja

La **forja** se realiza por deformación plástica de una preforma metálica, generalmente en caliente; esto se logra mecánicamente, mediante la aplicación de golpes sucesivos (martilleo) o por deformación continua. Las piezas forjadas se clasifican en forjadas en matriz cerrada o abierta. En los procesos de forja en matriz cerrada se aplica simultáneamente una fuerza a un conjunto de dos matrices, en cuyo interior está alojada la preforma, de modo que ésta se deforma y ocupa la cavidad que hay entre ellas (Figura 17.2a). En los procesos

Capítulo 18 Corrosión y degradación de los materiales

(a) Un Ford Deluxe Sedan de 1936 con la carrocería hecha completamente de acero inoxidable, sin pintar. Seis de estos coches fueron diseñados y fabricados para aportar una prueba definitiva de la durabilidad y resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. Cada automóvil circuló a diario, recorriendo cientos de miles de kilómetros. El acabado superficial de la carrocería de acero inoxidable, al final, era esencialmente el mismo que cuando

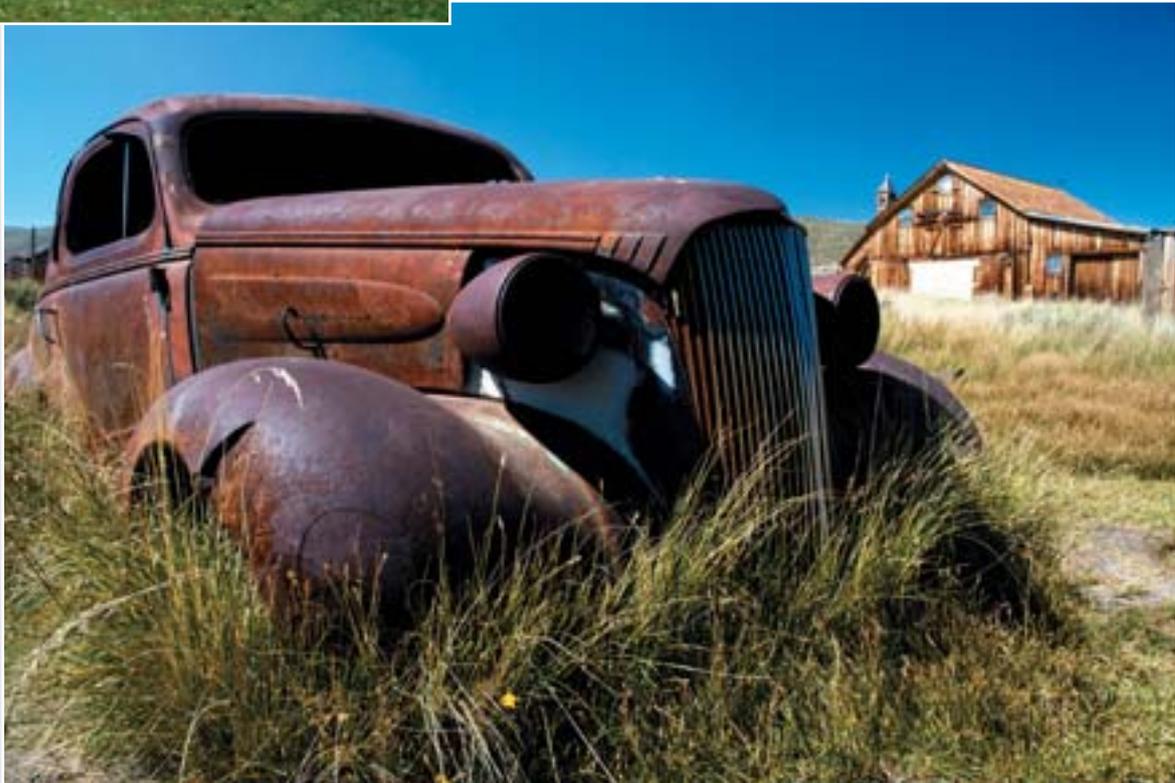
el coche salió de la línea de montaje, mientras que otros componentes, no inoxidables, como el motor, los amortiguadores, los frenos, los muelles, el embrague, la transmisión y los engranajes tuvieron que ser sustituidos. Por ejemplo, el motor de uno de los coches tuvo que ser sustituido tres veces.

(b) Por el contrario, esta imagen muestra un automóvil clásico, de la misma época que el coche de la imagen (a), que se está oxidando en el campo, en Bodie, California. La carrocería se fabricó con un acero al carbono que fue pintado. Esta pintura proporciona una protección limitada al acero, que es susceptible a la corrosión en condiciones ambientales atmosféricas normales. © EHStock/iStockphoto



Cortesía de Dan L. Greenfield, Allegheny Ludlum Corporation, Pittsburgh, PA

(a)



(b)

© EHStock/iStockphoto

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Corrosión y degradación de los materiales*?

El conocimiento de los tipos de corrosión y de degradación, y la comprensión de sus mecanismos y causas, permiten tomar medidas para evitar que se produzcan. Por ejemplo, se puede cambiar la

naturaleza del ambiente, seleccionar un material que sea relativamente no reactivo o proteger el material de procesos de deterioro apreciables.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Distinguir las reacciones electroquímicas de *oxidación* y de *reducción*.
2. Describir par galvánico, semipila estándar o normal y electrodo de hidrógeno estándar.
3. Calcular el potencial de una pila y escribir la reacción electroquímica espontánea de dos metales puros que están eléctricamente conectados, sumergidos en disoluciones de sus respectivos iones.
4. Determinar la velocidad de oxidación de un metal, conociendo la densidad de corriente de reacción.
5. Nombrar y describir brevemente los dos diferentes tipos de polarización y especificar las condiciones en virtud de las cuales se controla la velocidad.
6. Para cada una de las ocho formas de corrosión y fragilización por hidrógeno, describir la naturaleza del proceso de deterioro y proponer el mecanismo.
7. Enumerar cinco medidas usadas habitualmente para evitar la corrosión.
8. Explicar por qué los materiales cerámicos son, en general, muy resistentes a la corrosión.
9. Para los materiales poliméricos, explicar (a) dos procesos de degradación que se producen cuando están expuestos a disolventes líquidos y (b) las causas y consecuencias de la rotura de enlaces en una cadena molecular.

18.1 INTRODUCCIÓN

En un grado u otro, la mayoría de los materiales experimentan algún tipo de interacción con un gran número de ambientes de distinta clase. A menudo estas interacciones empeoran la utilidad de un material porque deterioran sus propiedades mecánicas (p. ej., ductilidad y resistencia), sus propiedades físicas o su apariencia. Ocasionalmente, en algunas aplicaciones se ignora el comportamiento de la degradación de los materiales y las consecuencias son adversas.

corrosión

Los mecanismos de deterioro son diferentes en los tres tipos de materiales. En los metales hay pérdida de material por disolución (**corrosión**) o por formación de una capa o película no metálica (*oxidación*). Los materiales cerámicos son relativamente resistentes al deterioro, que generalmente ocurre a elevadas temperaturas y en ambientes extremos, proceso que generalmente también se denomina corrosión. El mecanismo y las consecuencias de la interacción entre los polímeros y el ambiente son diferentes de los que se dan en metales y cerámicos, y el término más frecuente usado es el de **degradación**. Los polímeros, en contacto con un disolvente líquido, pueden disolverse o bien pueden absorberlo e hincharse. También las radiaciones electromagnéticas (principalmente la ultravioleta) y el calor pueden alterar la estructura molecular de los polímeros.

degradación

En este capítulo se trata el deterioro de cada uno de estos tipos de materiales, prestando especial atención a los mecanismos, a la resistencia frente al ataque de diferentes ambientes y a las precauciones para prevenir o reducir la degradación.

Corrosión de metales

La corrosión se define como el ataque destructivo e involuntario de un metal. Este ataque es electroquímico y generalmente empieza en la superficie. La corrosión es un problema de grandes dimensiones: en términos económicos se estima que aproximadamente el 5% del producto interior bruto de un país industrializado se invierte en medidas preventivas contra la corrosión y para mantener o reemplazar los productos afectados por las reacciones de corrosión. Las consecuencias de la corrosión son bien conocidas y, a modo de ejemplos cotidianos, están las capas de herrumbre de carrocerías, radiadores y tubos de escape de automóviles.

Ocasionalmente los procesos de corrosión se utilizan por las ventajas que tienen. Por ejemplo, en la Sección 6.12 se comentaron los procedimientos de ataque de las superficies metálicas para poner en evidencia los límites de grano o los diferentes componentes microestructurales aprovechando que éstos tienen distinta reactividad química.

18.2 CONSIDERACIONES ELECTROQUÍMICAS

En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico; es decir, es el resultado de una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra. Una característica de los átomos metálicos es la pérdida o ganancia de electrones en la reacción denominada de **oxidación**. Por ejemplo, un metal M, que tiene una valencia igual a n (o n electrones de valencia) puede experimentar corrosión según la siguiente reacción

oxidación

Reacción de oxidación para el metal M



donde M se convierte en un ion con $n+$ cargas positivas, perdiendo sus n electrones de valencia. Se utiliza e^{-} para simbolizar un electrón. Ejemplos de oxidación de metales son



ánodo

La zona donde tiene lugar la oxidación se denomina **ánodo** y la oxidación a veces se denomina reacción anódica.

Los electrones generados en cada átomo de metal que se oxida se transfieren a otra especie química y el proceso se denomina reacción de **reducción**. Por ejemplo, algunos metales experimentan corrosión en un medio ácido que contiene una elevada concentración de iones hidrógeno (H^{+}). El ion H^{+} se reduce según:

Reducción de iones hidrógeno en una disolución ácida



y se desprende hidrógeno gas (H_2).

Según la naturaleza del medio (disolución) al que está expuesto el metal, pueden ocurrir otras reacciones de reducción. En una disolución ácida que contiene oxígeno disuelto se puede producir la reacción de reducción siguiente

Reacción de reducción en una disolución ácida que contiene oxígeno disuelto

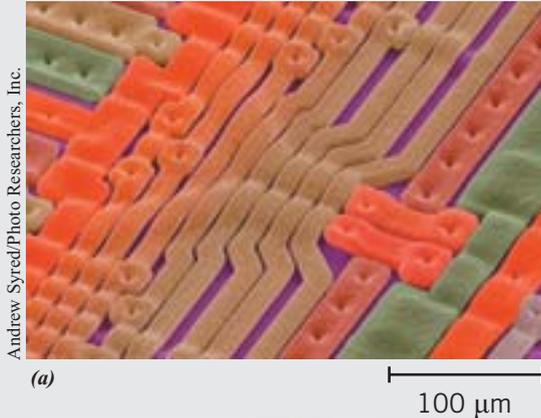


En una disolución acuosa neutra o básica con oxígeno disuelto, la reacción sería

Reacción de reducción en una disolución neutra o básica que contiene oxígeno disuelto



Capítulo 19 Propiedades eléctricas



El funcionamiento de las modernas tarjetas de memoria y unidades flash que se utilizan para almacenar información digital, se basa en las propiedades eléctricas únicas del silicio, un material semiconductor. (El concepto de memoria flash se comenta en la Sección 19.15.)

(a) Micrografía electrónica de barrido de un circuito integrado, compuesto de silicio e interconexiones metálicas. Los componentes de circuitos integrados se utilizan para almacenar información en formato digital.

(b) Tres tipos diferentes de tarjetas de memoria flash.

(c) Tarjeta de memoria flash que se inserta en una cámara digital para almacenar imágenes fotográficas (y, en algunos casos, la localización GPS).



¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades eléctricas de los materiales*?

La consideración de las propiedades eléctricas de materiales resulta de interés cuando la selección de materiales y las decisiones de tratamiento se realizan durante el diseño de un componente o estructura. Por ejemplo, si se considera un envoltorio de un circuito integrado, el comportamiento eléctrico

de los materiales distintos puede ser muy diverso. En algunos casos, se necesitan materiales con elevada conductividad eléctrica (p. ej., en cables de conexión), mientras que en otros, se requiere aislamiento eléctrico del entorno (p. ej., en una encapsulación protectora).

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo, se debería poder hacer lo siguiente:

1. Describir las cuatro posibles estructuras de bandas de energía electrónica en materiales sólidos.
2. Describir brevemente las condiciones de excitación electrónica que producen electrones libres/huecos en (a) metales, (b) semiconductores (intrínsecos y extrínsecos) y (c) aislantes.
3. Calcular la conductividad eléctrica en metales, semiconductores (intrínsecos y extrínsecos) y aislantes, a partir de sus densidades de portadores de carga y sus movilidades.
4. Distinguir entre materiales semiconductores intrínsecos y extrínsecos.
5. (a) En un gráfico de logaritmo de concentración de portadores (electrón, hueco) frente a la temperatura absoluta, dibujar curvas esquemáticas tanto para materiales semiconductores intrínsecos como extrínsecos.
(b) En la curva del semiconductor extrínseco, indicar las regiones extrínseca, intrínseca y de congelación.
6. En una unión $p-n$, explicar el proceso de rectificación en términos de movimientos de electrones y huecos.
7. Calcular la capacidad de un condensador de placas paralelas.
8. Definir la constante dieléctrica en términos de permitividades.
9. Explicar brevemente cómo la capacidad de carga de almacenamiento de un condensador puede ser aumentada por la inserción y la polarización de un material dieléctrico entre sus placas.
10. Nombrar y describir los tres tipos de polarización.
11. Describir brevemente los fenómenos de *ferroelectricidad* y *piezoelectricidad*.

19.1 INTRODUCCIÓN

El principal objetivo de este capítulo es explorar las propiedades eléctricas de los materiales, es decir, su respuesta a la acción de un campo eléctrico aplicado. Se inicia con el fenómeno de la conducción eléctrica: parámetros con los que se expresa, mecanismos de conducción por electrones y cómo la estructura de bandas de energía de un material determina su capacidad conductora. Estos principios se extienden a metales, semiconductores y aislantes. Se tratan especialmente las características de los semiconductores y sus dispositivos. Las secciones finales se dedican a los fenómenos particulares de ferroelectricidad y piezoelectricidad.

Conducción eléctrica

19.2 LEY DE OHM

ley de Ohm

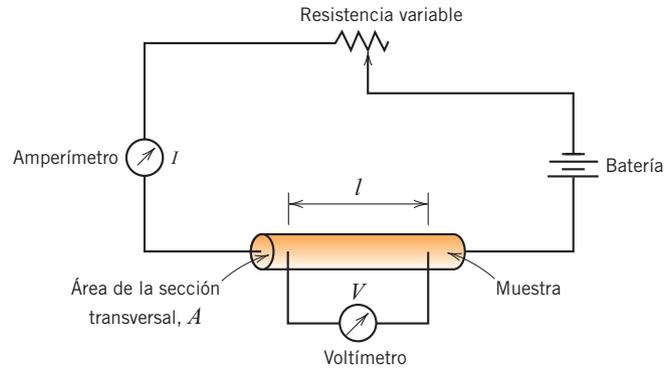
Una de las características eléctricas más importantes de un material sólido es la facilidad con que transmite la corriente eléctrica. La **ley de Ohm** relaciona la corriente, I (el paso de carga por unidad de tiempo), con el voltaje aplicado, V :

expresión de la ley de Ohm

$$V = IR \quad (19.1)$$

donde R es la resistencia del material a través del cual circula la corriente. Las unidades de V , I y R son, respectivamente, voltio (J/C), amperio (C/s) y ohmio (V/A). El valor de R depende de la geometría de la muestra y, en muchos materiales, es independiente de la

Figura 19.1 Representación esquemática del equipo utilizado para medir la resistividad eléctrica.



resistividad eléctrica

Relación entre la resistividad eléctrica y la resistencia eléctrica, el área de la sección transversal y la distancia entre los puntos de medida

Relación entre la resistividad eléctrica, el voltaje aplicado, la corriente, el área de la sección transversal de la probeta y la distancia entre los puntos de medida

corriente. La **resistividad eléctrica** ρ es independiente de la geometría de la muestra y está relacionada con R mediante la expresión

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (19.2)$$

donde l es la distancia entre los dos puntos en que se mide el voltaje y A es el área de la sección perpendicular a la dirección de la corriente. Las unidades de ρ son ohmio-metro ($\Omega \cdot \text{m}$). A partir de la expresión de la ley de Ohm y de la Ecuación 19.2, se tiene que

$$\rho = \frac{VA}{Il} \quad (19.3)$$

La Figura 19.1 muestra el esquema de un dispositivo experimental para medir la resistividad eléctrica.

19.3 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

conductividad eléctrica

Relación recíproca entre conductividad eléctrica y resistividad

Expresión de la ley de Ohm en función de la densidad de corriente, de la conductividad y del campo eléctrico aplicado

Intensidad del campo eléctrico

En ocasiones se utiliza el valor de la **conductividad eléctrica** σ para especificar el carácter eléctrico de un material. Este parámetro es simplemente el recíproco de la resistividad, a saber,

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (19.4)$$

e indica la facilidad con que un material es capaz de conducir la corriente eléctrica. La unidad de σ es la inversa del ohmio-metro [$(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$].¹ En la siguiente discusión sobre las propiedades eléctricas se utiliza tanto el concepto de resistividad como el de conductividad.

Además de la Ecuación 19.1, la ley de Ohm puede expresarse como

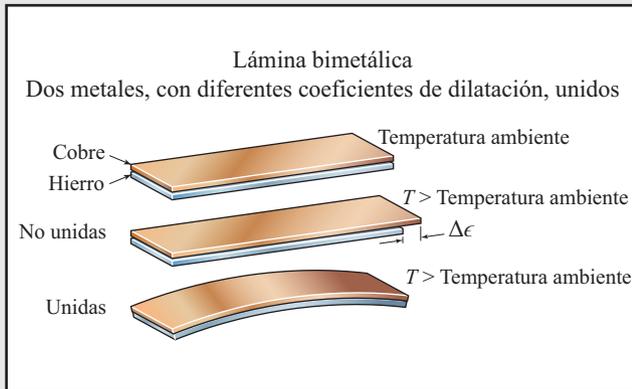
$$J = \sigma \mathcal{E} \quad (19.5)$$

en la que J es la densidad de corriente (corriente por unidad de área I/A) y \mathcal{E} es la intensidad del campo eléctrico aplicado; es decir, la diferencia de voltaje entre dos puntos dividida por la distancia que los separa:

$$\mathcal{E} = \frac{V}{l} \quad (19.6)$$

¹Las unidades del SI para la conductividad eléctrica son siemens por metro (S/m), donde $1 \text{ S/m} = 1 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. En este libro se ha optado por el uso del $(\Omega \cdot \text{m})^{-1}$ ya que estas unidades se utilizan tradicionalmente en los textos de introducción a la ciencia e ingeniería de materiales.

Capítulo 20 Propiedades térmicas



(a)



(b)



(c)

Algunos *termostatos* (dispositivos utilizados para regular la temperatura) se basan en el fenómeno de la *dilatación* térmica: elongación de un material a medida que se calienta. La base de este tipo de termostato es una *lámina* o *tira bimetalica*, formada por dos metales que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica y están unidos longitudinalmente. Una variación de temperatura hace que esta lámina se curve; cuando se calienta, el metal que tiene el coeficiente de dilatación mayor se alarga más y produce la curvatura que se muestra en la Figura (a). En el termostato que se muestra en la figura (b), la tira bimetalica es una bobina o espiral; esta configuración proporciona una tira bimetalica relativamente larga, con más deflexión para un cambio de temperatura dado y una mayor precisión. El metal que tiene el mayor coeficiente de dilatación se encuentra en la parte inferior de la tira, de manera que, cuando se calienta, la espiral tiende a relajarse. Unido al extremo de la espiral hay un *interruptor de mercurio*, formado por un pequeño bulbo de vidrio que contiene varias gotas de mercurio [Figura (b)]. Este interruptor está montado de forma que, cuando cambia la temperatura, pequeñas desviaciones del extremo de la bobina inclinan el bulbo de una manera o de otra. Así, la masa de mercurio se desplaza de un extremo al otro del bulbo. Cuando la temperatura alcanza el punto de ajuste del termostato, el contacto eléctrico se establece cuando las gotas de mercurio se desplazan a un extremo; el interruptor conecta la calefacción o el aire acondicionado. Cuando se alcanza la temperatura límite, la unidad se apaga porque el bulbo se inclina en la otra dirección, las gotas de mercurio ruedan al otro extremo y se interrumpe el contacto eléctrico.



(d)

La Figura (d) muestra las consecuencias de las inusuales altas temperaturas del 24 de julio de 1978, cerca de Asbury Park, New Jersey: líneas de ferrocarril curvadas como resultado de las tensiones de la dilatación térmica no prevista, lo que causó el descarrilamiento de un vagón de pasajeros (al fondo).

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades térmicas de los materiales?*

De los tres tipos primarios de materiales, los cerámicos son los más susceptibles a la fractura frágil por choque térmico, como resultado de las tensiones internas que se establecen dentro de una pieza cerámica por variaciones bruscas de temperatura (normalmente tras un enfriamiento súbito). El choque térmico normalmente es una situación no deseable, y la susceptibilidad de un material cerámico a este fenómeno depende de sus propiedades térmicas y mecánicas (coeficiente de dilatación térmica, conductividad térmica, módulo de

elasticidad y resistencia a la fractura). Del conocimiento de las relaciones entre los parámetros de choque térmico y estas propiedades, es posible (1) realizar, en algunos casos, modificaciones apropiadas de las características térmicas o mecánicas con el fin de conseguir un material cerámico térmicamente más resistente a los golpes; y (2) para un material cerámico específico, estimar el rango máximo de variación de temperatura permitido sin que se produzca fractura.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este se debería poder hacer lo siguiente:

1. Definir *capacidad calorífica* y *calor específico*.
2. Indicar el mecanismo principal por el cual se asimila la energía térmica en materiales sólidos.
3. Determinar el coeficiente lineal de dilatación térmica, a partir de la variación de longitud asociada a un cambio de temperatura determinado.
4. Explicar brevemente el fenómeno de la dilatación térmica desde una perspectiva atómica, usando un gráfico de energía potencial frente a la separación interatómica.
5. Definir *conductividad térmica*.
6. Indicar los dos mecanismos principales de conducción de calor en sólidos y comparar las magnitudes relativas de estas contribuciones para materiales metálicos, cerámicos y poliméricos.

20.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por *propiedad térmica* la respuesta de un material a ser calentado. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones aumentan. Si hay un gradiente de temperatura, se puede transportar la energía a las regiones más frías de la muestra hasta que, en última instancia, esta podría fundir. La capacidad calorífica, la dilatación térmica y la conductividad térmica son propiedades muy importantes en la aplicación práctica de los sólidos.

20.2 CAPACIDAD CALORÍFICA

capacidad calorífica

Definición de *capacidad calorífica* como la relación entre el cambio de energía (ganada o perdida) y el cambio resultante de temperatura

calor específico

Cuando se calienta un material sólido, éste experimenta un aumento de temperatura indicando, con ello, que absorbe energía. La **capacidad calorífica** es una propiedad que indica la capacidad de un material de absorber calor de su entorno y representa la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura en una unidad. En términos matemáticos, la capacidad calorífica C se puede expresar como

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (20.1)$$

donde dQ es la energía necesaria para producir un cambio dT en la temperatura. Generalmente, la capacidad calorífica se expresa por mol de material (p. ej., $J/mol \cdot K$ o $cal/mol \cdot K$). A veces se utiliza el **calor específico** (normalmente representado por c), que

indica la capacidad calorífica por unidad de masa y puede tener varias unidades ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$, $\text{cal}/\text{g}\cdot\text{K}$).

Existen dos métodos para medir esta propiedad, según cuales sean las condiciones del medio en que se realiza la transferencia de calor. Uno consiste en medir la capacidad calorífica mientras se mantienen la muestra a volumen constante, C_v ; el otro es en condiciones de presión constante y se representa por C_p . La magnitud de C_p es siempre mayor o igual que C_v ; sin embargo, esta diferencia es muy pequeña para la mayoría de los materiales sólidos a temperatura ambiente o por debajo.

Capacidad calorífica vibracional

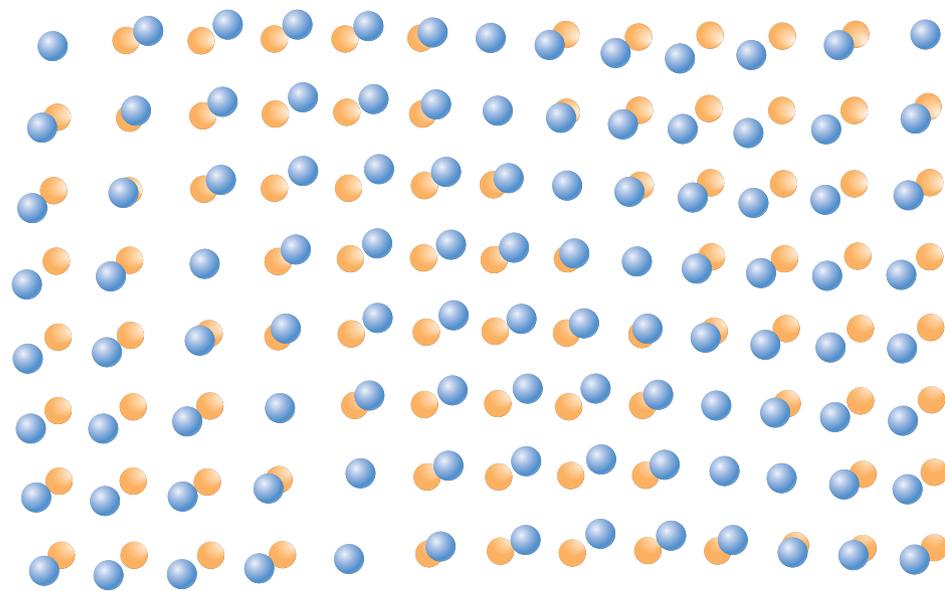
En la mayoría de los sólidos, el modo principal de absorción de energía térmica es mediante un aumento en la energía vibracional de los átomos. En los sólidos, los átomos están vibrando constantemente a frecuencias muy altas y con amplitudes relativamente pequeñas. Las vibraciones no son independientes unas de otras, y las de átomos adyacentes suelen acoplarse gracias al enlace químico. Estas vibraciones están coordinadas de tal manera que se producen ondas viajeras, fenómeno representado en la Figura 20.1. Se puede imaginar que estas ondas son como ondas elásticas o, simplemente, como ondas de sonido que se propagan a través del cristal a la velocidad del sonido. La energía térmica vibracional de un material consiste en una serie de estas ondas elásticas, que tienen un intervalo de distribuciones y frecuencias. Solamente ciertos valores de energía están permitidos (la energía está *cuantizada*) y un cuanto (*quantum*) de energía vibracional se denomina **fonón** (que es análogo al cuanto de radiación electromagnética, el *fotón*). Ocasionalmente, las propias ondas vibracionales también se denominan *fonones*.

La dispersión térmica de los electrones libres durante la conducción electrónica (Sección 19.7) se debe a estas ondas vibracionales elásticas, que también participan en el transporte de energía durante la conducción térmica (Sección 20.4).

fonón

Figura 20.1

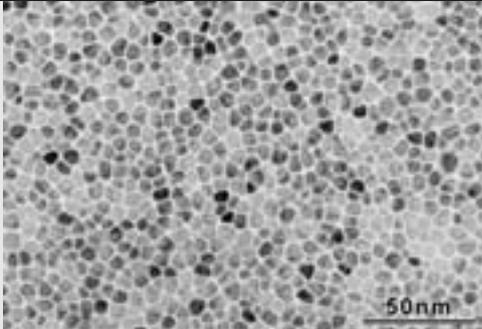
Representación esquemática de las ondas generadas en una red cristalina por vibraciones atómicas. (Adaptación de “The Thermal Properties of Materials” por J. Ziman. Copyright © 1967 por Scientific American, Inc. Derechos reservados).



- Posiciones atómicas normales de red
- Posiciones desplazadas por las vibraciones

Capítulo 21 Propiedades magnéticas

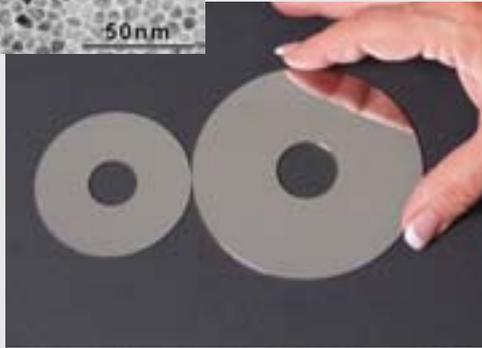
Cortesía de Seagate Recording Media



(a)

(a) Micrografía electrónica de transmisión que muestra la microestructura del medio de grabación magnético perpendicular de las unidades de disco duro.

(b)



© William D. Callister, Jr.

(b) Unidades magnéticas de almacenamiento utilizadas en ordenadores portátiles (izquierda) y de sobremesa (derecha).

(c)

Cortesía de Seagate Recording Media



(c) Interior de una unidad de disco duro. El disco circular gira normalmente a una velocidad de 5400 o 7200 rpm.

© CostinTi/Stockphoto



(d)

(d) Ordenador portátil; uno de sus componentes internos es la unidad de disco duro.

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Propiedades magnéticas de los materiales*?

La comprensión del mecanismo que explica el comportamiento magnético permanente de algunos materiales puede permitir alterar, y en algunos casos adaptar, las propiedades magnéticas. Así, en el Ejemplo

de Diseño 21.1 se indica cómo el comportamiento de un material magnético cerámico se puede mejorar modificando su composición.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Determinar la magnetización de un material a partir de su susceptibilidad magnética y de la intensidad del campo magnético aplicado.
2. Desde el punto de vista electrónico, citar y explicar brevemente las dos fuentes de momentos magnéticos en materiales.
3. Explicar brevemente la naturaleza y la fuente de (a) diamagnetismo, (b) paramagnetismo y (c) ferromagnetismo.
4. En términos de estructura cristalina, explicar la fuente de ferrimagnetismo para ferritas cúbicas.
5. (a) Describir la histéresis magnética; (b) explicar por qué los materiales ferromagnéticos y ferrimagnéticos experimentan histéresis magnética; y (c) explicar por qué estos materiales pueden convertirse en imanes permanentes.
6. Citar las características magnéticas distintivas de los materiales magnéticos blandos y duros.
7. Describir el fenómeno de la *superconductividad*.

21.1 INTRODUCCIÓN

El *magnetismo*, como fenómeno mediante el cual los materiales ejercen fuerzas atractivas o repulsivas sobre otros materiales, es conocido desde hace miles de años. Sin embargo, los principios básicos y los mecanismos que explican el fenómeno magnético son complejos y sutiles, y los científicos no los han comprendido hasta hace relativamente poco tiempo. Muchos de los dispositivos tecnológicos modernos se basan en el magnetismo y en los materiales magnéticos; éstos incluyen generadores de electricidad y transformadores, motores eléctricos, radio, televisión, ordenadores y componentes de sistemas de reproducción de audio y vídeo.

El hierro, algunos aceros y la magnetita (mineral que se encuentra en la naturaleza) son ejemplos bien conocidos de materiales magnéticos. No es tan familiar, sin embargo, el hecho de que todas las sustancias son influenciadas en mayor o menor grado por la presencia de un campo magnético. Este capítulo proporciona una breve descripción del origen de los campos magnéticos y los parámetros magnéticos, de los fenómenos del diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo y ferrimagnetismo, de algunos de los diferentes materiales magnéticos y también del fenómeno de la superconductividad.

21.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Dipolos magnéticos

Las fuerzas magnéticas se generan mediante el movimiento de partículas cargadas eléctricamente; estas fuerzas magnéticas existen además de cualquier otra fuerza electrostática que pueda haber. Muchas veces es conveniente interpretar las fuerzas magnéticas en términos de campos. Se pueden dibujar líneas de fuerza imaginarias para indicar la dirección de la fuerza en las proximidades de la fuente del campo. En la Figura 21.1 se muestran las distribuciones del campo magnético de una espira por la que circula corriente y de un imán en forma de barra.

En los materiales magnéticos se han encontrado dipolos magnéticos, que, en muchos aspectos, son análogos a los dipolos eléctricos (Sección 19.19). Los dipolos magnéticos pueden considerarse como pequeños imanes formados por un polo norte y un polo sur, en lugar de

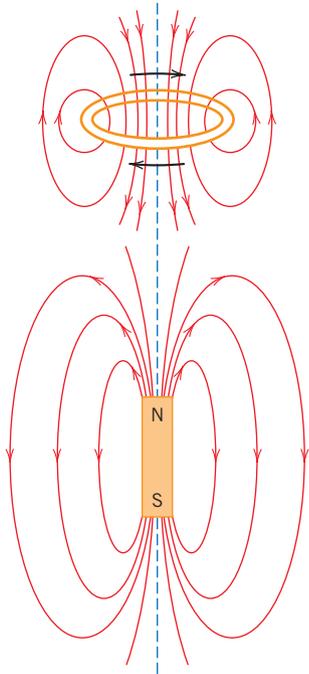


Figura 21.1 Líneas de fuerza de campo magnético alrededor de una espira (lazo de corriente) y de un imán en forma de barra.

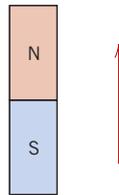


Figura 21.2 Momento magnético, indicado como una flecha.

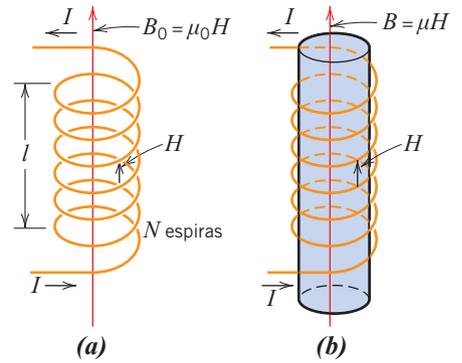


Figura 21.3 (a) Campo magnético H generado por una bobina cilíndrica, en función de la corriente I , del número de espiras N y de la longitud de la bobina l , según la Ecuación 21.1. La densidad de flujo magnético B_0 en vacío es igual a $\mu_0 H$, donde μ_0 es la permeabilidad del vacío, $4\pi \times 10^7$ H/m. (b) La densidad de flujo magnético B dentro de un material sólido es igual a μH , donde μ es la permeabilidad del material. (Adaptación de A. G. Guy, *Essentials of Materials Science*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1976) (a) N turns = N espiras

cargas eléctricas positivas y negativas. En este texto, los momentos magnéticos dipolares se representan mediante flechas (como en la Figura 21.2). Los dipolos magnéticos quedan afectados por los campos eléctricos (Figura 19.30). Dentro de un campo magnético, la fuerza del mismo campo ejerce un par que tiende a orientar los dipolos en la dirección del campo. Un ejemplo familiar es la manera en que la brújula se alinea con el campo magnético terrestre.

Vectores de campo magnético

Antes de tratar el origen de los momentos magnéticos en los materiales sólidos se describirá el comportamiento magnético en términos de varios vectores de campo. El campo magnético externo aplicado, a veces denominado **intensidad del campo magnético**, se designa por H . Si el campo magnético se genera a partir de una bobina cilíndrica (o solenoide) formada por N espiras, una junto a otra, con una longitud total l y transportando una corriente de magnitud I , entonces,

$$H = \frac{NI}{l} \tag{21.1}$$

Un esquema de esta configuración se muestra en la Figura 21.3a. El campo magnético generado por la corriente que circula por la espira y por el imán en forma de barra de la Figura 21.1 es el campo H . Las unidades de H son amperios-vuelta por metro o, simplemente, amperios/metro.

La **inducción magnética**, o **densidad de flujo magnético**, indicada por B , representa la magnitud del campo magnético dentro de una sustancia sometida a un campo H . Las unidades de B son *teslas* [o weber por metro cuadrado (Wb/m^2)]. Tanto B como H son campos vectores y están caracterizados no sólo por la magnitud, sino también por la dirección en el espacio.

intensidad del campo magnético

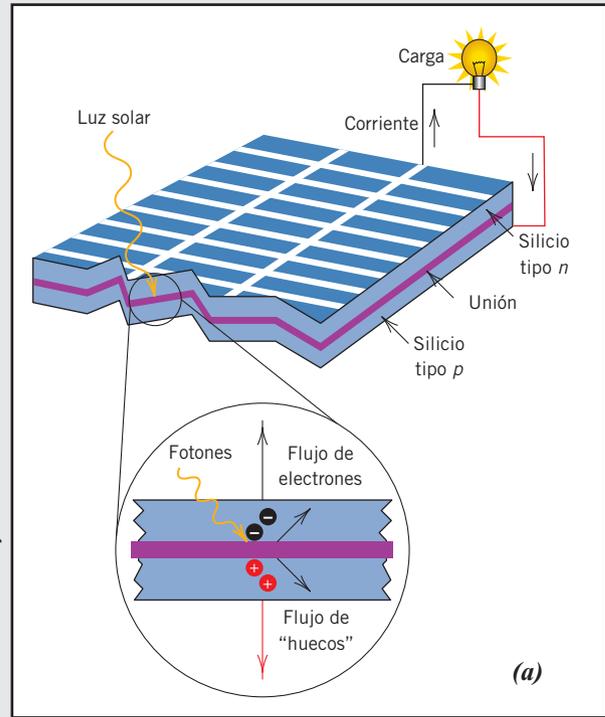
La intensidad del campo magnético dentro de una bobina depende del número de vueltas, de la corriente aplicada y de la longitud de la bobina

inducción magnética densidad de flujo magnético

Capítulo 22 Propiedades ópticas

(a) Diagrama esquemático del funcionamiento de una célula solar fotovoltaica. La célula está fabricada con silicio policristalino que ha sido elaborado para formar uniones $p-n$ (Secciones 19.11 y 19.15). Los fotones se originan cuando la luz solar excita electrones de la banda de conducción en el lado n de la unión y crea huecos en el lado p . Estos electrones y los huecos son arrastrados lejos de la unión en direcciones opuestas y se convierten en parte de una corriente externa.

Cortesía de Research Institute for Sustainable Energy (www.rise.org.au) and Murdoch University



(c) Vivienda con paneles solares.



(c)



(b)

(b) Conjunto de células fotovoltaicas de silicio policristalino.

© Brainstorm1962/iStockphoto

© Gabor Izso/iStockphoto

¿POR QUÉ ESTUDIAR *propiedades ópticas de los materiales*?

Cuando los materiales se exponen a radiación electromagnética, es importante poder predecir y modificar su respuesta. Esto sólo es posible si se conocen sus propiedades ópticas y se comprenden los mecanismos responsables de las mismas. Por ejemplo, en la Sección 21.14 para los materiales de fibra óptica

utilizados en las comunicaciones, hay que tener en cuenta que el rendimiento de las fibras ópticas se incrementa introduciendo una variación gradual del índice de refracción (índice gradual) en la superficie exterior de la fibra. Esto se logra adicionando impurezas específicas en concentraciones controladas.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Calcular la energía de un fotón a partir de su frecuencia y el valor de la constante de Planck.
2. Describir brevemente la polarización electrónica resultante de la interacción de la radiación electromagnética con los átomos y citar dos consecuencias de la polarización electrónica.
3. Explicar brevemente por qué los materiales metálicos son opacos a la luz visible.
4. Definir índice de *refracción*.
5. Describir el mecanismo de absorción de fotones por parte de (a) materiales aislantes de alta pureza y semiconductores y (b) materiales aislantes y semiconductores que contienen defectos eléctricamente activos.
6. Para materiales dieléctricos inherentemente transparentes, señalar tres fuentes de dispersión interna que pueden inducir translucidez y opacidad.
7. Describir brevemente la construcción y funcionamiento del láser de rubí y semiconductor.

22.1 INTRODUCCIÓN

El término *propiedad óptica* hace referencia a la respuesta de un material expuesto a una radiación electromagnética y, en particular, a la luz visible. En este capítulo se comentan algunos conceptos y principios fundamentales relativos a la naturaleza de la radiación electromagnética y a sus posibles interacciones con los materiales sólidos. También se analiza el comportamiento óptico de los materiales metálicos y no metálicos, en términos de sus características de absorción, reflexión y transmisión. En las secciones finales se describen la luminiscencia, la fotoconductividad y la amplificación de la luz por emisión estimulada de radiación (láser), así como la utilización práctica de este fenómeno y el uso de las fibras ópticas en las comunicaciones.

Conceptos fundamentales

22.2 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

En sentido clásico, se considera que la radiación electromagnética es un tipo de onda compuesta por un campo magnético y un campo eléctrico perpendiculares entre sí y, a su vez, perpendiculares a la dirección de propagación (Figura 22.1). La luz, el calor (o energía radiante), el radar, las ondas de radio y los rayos X son formas de radiación electromagnética. Cada una de ellas se caracteriza por el intervalo de longitudes de onda y también por la forma en que se generan. El *espectro electromagnético* abarca desde las radiaciones de rayos γ , emitidos por materiales radiactivos y con longitudes de onda de 10^{-12} m (10^{-3} nm), hasta las ondas de radiofrecuencia, con longitudes de onda de unos 10^5 m, pasando por los rayos X, luz ultravioleta, espectro visible e infrarrojos. En la Figura 22.2 se reproduce este espectro a escala logarítmica.

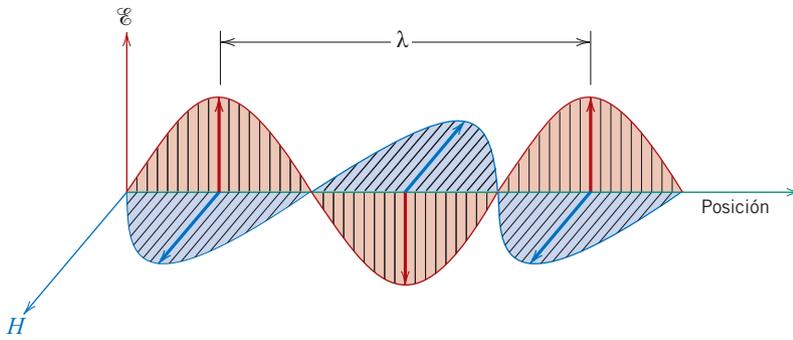


Figura 22.1 Onda electromagnética mostrando los componentes de campo eléctrico \mathcal{E} y de campo magnético H y la longitud de onda λ .

La luz visible abarca una región pequeña del espectro, con longitudes de onda comprendidas entre $0,4 \mu\text{m}$ ($4 \times 10^{-7} \text{ m}$) y $0,7 \mu\text{m}$. El color percibido viene determinado por la longitud de onda; por ejemplo, una radiación con una longitud de onda de unos $0,4 \mu\text{m}$ aparece de color violeta, mientras que los colores verde y rojo están asociados a longitudes de onda de $0,50$ y $0,65$, respectivamente. La Figura 22.2 incluye los intervalos espectrales de los colores. La luz blanca es simplemente la mezcla de todos los colores. La siguiente discusión se centra en la radiación visible, que es, por definición, la que detecta el ojo humano.

La radiación electromagnética atraviesa el vacío a la velocidad de la luz: $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Esta velocidad c está relacionada con la permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 y con la permeabilidad magnética del vacío μ_0 :

Relación entre la velocidad de la luz, la permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética en el vacío

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (22.1)$$

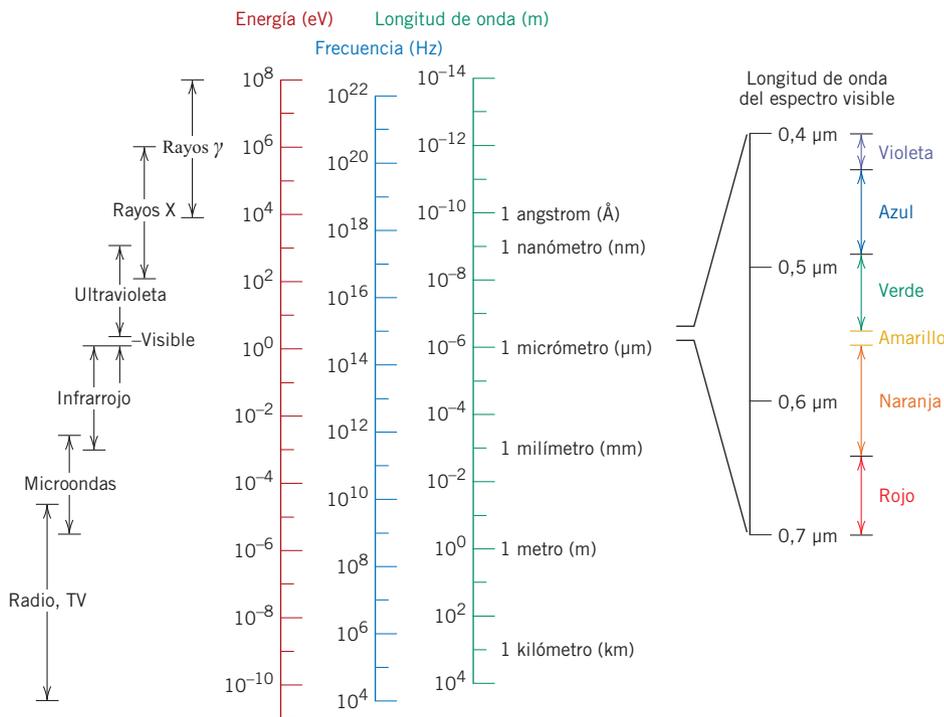


Figura 22.2 Espectro de la radiación electromagnética, incluyendo los intervalos de longitud de onda para diversos colores del espectro visible.

CONTENIDOS INNOVADORES

Diodos emisores de luz (LED)

En la Sección 19.15 se comentan las uniones $p-n$ de los semiconductores y cómo pueden ser utilizados como diodos o como rectificadores de una corriente eléctrica.¹ En algunas situaciones, cuando un potencial de polarización directa de magnitud relativamente alta se aplica a través de un diodo con una unión $p-n$, se emite luz visible (o radiación infrarroja). Esta conversión de la energía eléctrica en energía de la luz se denomina **electroluminiscencia**, y el dispositivo que lo produce se denomina **diodo emisor de luz (LED, Light-emitting diode)**. El potencial de polarización directa atrae electrones en el lado n hacia la unión, donde algunos de ellos pasan (o se “inyecta”) al lado p (Figura 22.11a). Aquí, los electrones son los portadores de carga minoritarios y por lo tanto se “recombinan” (o son aniquilados) con los huecos en la región

cerca de la unión, de acuerdo con la Ecuación 22.17, donde la energía se convierte en fotones de luz (Figura 22.11b). Un proceso análogo se produce en el lado p , los huecos viajan hacia la unión y se recombinan con los electrones mayoritarios en el lado n .

Los semiconductores de silicio y germanio elementales no son adecuados para los LED, debido a la naturaleza y estructura del intervalo prohibido de energía. Por el contrario, algunos de los compuestos semiconductores III-V tales como el arseniuro de galio (GaAs) y fosfuro de indio (InP) y aleaciones compuestas de estos materiales (p. ej., $\text{GaAs}_x\text{P}_{(1-x)}$, donde x es un pequeño número menor que la unidad) se utilizan con frecuencia. La longitud de onda (es decir, el color) de la radiación emitida está relacionada con el intervalo prohibido del semiconductor (que normalmente es el mismo para ambos lados $p-n$ del diodo). Por ejemplo, los colores rojo, naranja y amarillo aparecen en el sistema de GaAs-InP. Los LED azules y verdes también se han desarrollado utilizando aleaciones semiconductoras $(\text{Ga,In})\text{N}$. Por lo tanto, con este complemento de colores, se pueden fabricar pantallas con todos los colores utilizando LED.

Aplicaciones importantes de semiconductores LED incluyen relojes digitales y pantallas de relojes iluminados, ratones ópticos (dispositivos informáticos de entrada) y escáneres de películas. Los controles remotos electrónicos (para televisores, reproductores de DVD, etc.) también usan LED que emiten un haz infrarrojo; estas señales codificadas se reciben en los detectores de los dispositivos receptores. Además, los LED están siendo utilizados como fuentes de luz, ya que son más eficientes energéticamente que las bombillas incandescentes, generan muy poco calor y tienen una vida de servicio más larga (porque no hay filamento que se pueda fundir). La mayoría de las nuevas señales de control de tráfico utilizan LED en lugar de bombillas de incandescencia.

En la Sección 19.17 se ha mencionado que algunos materiales poliméricos pueden ser semiconductores (tanto de tipo n como p). Como consecuencia, es posible fabricar diodos emisores de luz a partir de polímeros, de los cuales hay dos tipos: (1) los *diodos emisores de luz orgánicos* (OLED, *Organic light-emitting diodes*), que tienen pesos moleculares

electroluminiscencia
diodo emisor de luz (LED)

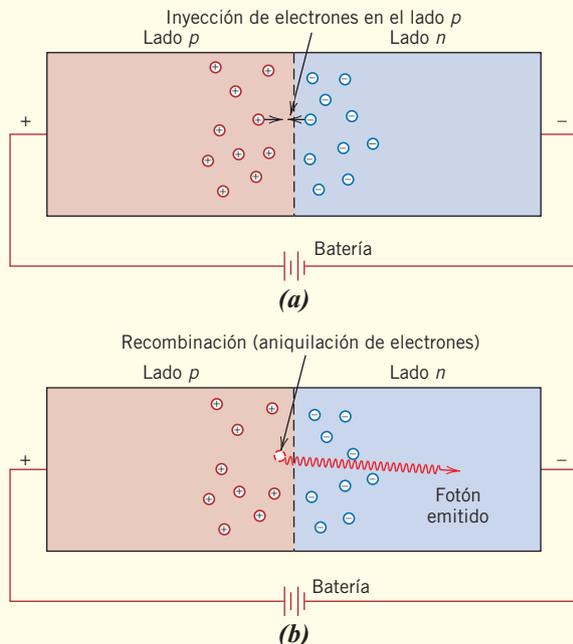


Figura 22.11 Diagrama esquemático de un semiconductor $p-n$ de conexiones polarizadas que muestra (a) la inyección de un electrón desde el lado n al lado p , y (b) la emisión de un fotón de luz, por recombinación del electrón con un hueco.

¹En la Figura 19.21 se muestra la distribución esquemática de electrones y huecos a ambas caras de una unión sin potencial eléctrico aplicado, con polaridad directa y con polaridad inversa. En la Figura 19.22 se muestra la relación característica corriente-voltaje para una unión $p-n$.

Capítulo 23 Cuestiones económicas, ambientales y sociales en ciencia e ingeniería de materiales

(a) Latas de refrescos elaboradas con una aleación de aluminio (izquierda) y con acero (derecha). La lata de acero se ha corroído significativamente y, por tanto, es biodegradable y no reciclable. Por el contrario, la lata de aluminio es reciclable pero no es biodegradable porque experimenta muy poca corrosión.



© William D. Callister, Jr.

(b) Tenedor elaborado con polímero biodegradable PLA (ácido poliláctico) en diversas etapas de degradación. Como se indica, el proceso de degradación total duró unos 45 días.

(a)



Cortesía de Jennifer Welter



© Roger Resmeyer/Corbis

(b)

(c)

(c) Artículos de picnic familiar, algunos de los cuales son reciclables y/o posiblemente no biodegradables (uno de ellos es comestible).

¿POR QUÉ ESTUDIAR *Cuestiones económicas, ambientales y sociales en ciencia e ingeniería de materiales?*

En ingeniería es esencial conocer y comprender los aspectos económicos, ya que las empresas e instituciones pretenden obtener beneficios a partir de los productos que elaboran. En ingeniería de materiales, las decisiones que se toman tienen consecuencias económicas, tanto en los costes de los materiales como en los de producción.

La concienciación en los problemas ambientales y sociales es importante en ingeniería porque, con el tiempo, se están demandando cada vez más recursos naturales. Además, los niveles de contaminación son cada vez cada

vez mayores. Las decisiones en ingeniería de materiales tienen impacto en el consumo de materias primas y de energía, en la contaminación de las aguas y de la atmósfera, en la salud humana, en el cambio climático global y en la capacidad de la sociedad de consumo para reciclar o disponer de productos usados. La calidad de vida de las generaciones presentes y futuras depende, en cierta medida, de cómo estas cuestiones se enfoquen por parte de la comunidad internacional de ingeniería.

Objetivos de aprendizaje

Después de estudiar este capítulo se debería poder hacer lo siguiente:

1. Citar y discutir brevemente tres factores que afectan a los costes de un producto y que la ingeniería puede controlar.
2. Elaborar el diagrama del ciclo total de materiales y discutir brevemente temas relevantes que corresponden a cada etapa de este ciclo.
3. Enumerar las dos entradas y las cinco salidas del esquema de evaluación del análisis o evaluación del ciclo de vida.
4. Citar aspectos que son relevantes en la filosofía del diseño de productos llamada "ecodiseño".
5. Discutir cuestiones de reciclaje/desechabilidad relativos a (a) metales, (b) vidrio, (c) plástico y caucho, y (d) materiales compuestos.

23.1 INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se han comentado diversos temas de ciencia de materiales e ingeniería de materiales que incluyen criterios a utilizar en el proceso de selección de materiales. Muchos de estos criterios de selección se refieren a las propiedades del material o combinaciones de propiedades (mecánicas, eléctricas, térmicas, de resistencia a la corrosión, etc.), en tanto que el rendimiento de un componente depende de las propiedades del material del que está hecho. La procesabilidad o facilidad de fabricación de un componente también juega un papel importante en el proceso de selección. En este libro, de una forma u otra, se han abordado prácticamente todos estos temas de caracterización de propiedades y de procesos de fabricación.

En la práctica de ingeniería, para el desarrollo de un producto comercializable se han de considerar otros criterios importantes. Algunos de estos son de naturaleza económica, que, en cierta medida, no están relacionados con los principios científicos y prácticos de la ingeniería pero, sin embargo son significativos para decidir si un producto es competitivo en el mercado comercial. Otros criterios que deben ser abordados involucran cuestiones ambientales y sociales, relacionadas con la contaminación, con la eliminación de residuos, con el reciclaje de materiales, con aspectos de toxicidad y de consumos de energía. En este capítulo final se ofrecen reseñas relativamente breves de las consideraciones económicas, ambientales y sociales que son importantes en la práctica de la ingeniería.

Consideraciones económicas

La práctica de la ingeniería implica el uso de principios científicos para diseñar componentes y sistemas de manera fiable y satisfactoria. Otra fuerza impulsora fundamental en la práctica de la ingeniería es la economía, ya que cualquier empresa o institución debe obtener un beneficio de los productos que fabrica y comercializa. Con la ingeniería se puede diseñar un componente perfecto; sin embargo, una vez fabricado, debe ponerse a la venta a un precio que sea atractivo para el sector de consumo y reportar los beneficios adecuados a la empresa.

Por otra parte, en el mundo actual y en el mercado global, los aspectos económicos no siempre se refieren al coste final de un producto. Muchos países tienen regulaciones específicas respecto a los productos químicos utilizados, a las emisiones de CO₂ y a los procedimientos de fin de vida de los materiales. Las empresas deben considerar una gran variedad de esos factores. Por ejemplo, en algunos casos, eliminar productos químicos tóxicos (regulados) en un producto resulta de un proceso de fabricación más barato.

Aquí sólo se proporciona un breve resumen de las consideraciones económicas más importantes que se aplican en la ingeniería de materiales. Al final del capítulo se proporcionan referencias que abordan estos aspectos económicos en detalle, para su eventual consulta.

La ingeniería de materiales tiene control sobre tres factores que afectan al coste de un producto: (1) el diseño de un componente, (2) los materiales utilizados y (3) la o las técnicas de fabricación. Estos factores están relacionados entre sí, ya que el diseño de componentes puede afectar o limitar qué material se ha de utilizar, y tanto el diseño del componente como el material utilizado pueden influir en la elección de la o las técnicas de fabricación. A continuación se comentan brevemente las consideraciones económicas para cada uno de estos factores.

23.2 DISEÑO DE COMPONENTES

Una parte del coste de un componente se asocia con su diseño. En este contexto, el diseño de los componentes comprende la especificación de tamaño, forma y configuración, que afectan al rendimiento de los componentes en servicio. Por ejemplo, si estarán sometidos a esfuerzos mecánicos, será necesario un análisis del estado o la distribución de tensiones. Los planos detallados de un componente se elaboran, normalmente, por ordenador, utilizando software creado para esta función específica.

Un componente es, a menudo, parte de un complejo dispositivo o sistema que consiste en un gran número de componentes (p. ej., un televisor, un automóvil, un reproductor/grabador de DVD, etc.). Así, el diseño debe tener en cuenta la contribución de cada componente al funcionamiento eficaz del sistema completo.

El coste aproximado de un producto se determina a partir del diseño, incluso antes de la fabricación del producto. Por tanto, un diseño creativo y una selección de materiales apropiada pueden tener un impacto significativo más adelante.

El diseño de componentes es un proceso muy iterativo que implica numerosos compromisos y compensaciones. En ingeniería se ha de tener en cuenta que el diseño óptimo de un componente puede no ser posible debido a las limitaciones del sistema.

23.3 MATERIALES

En términos económicos, los materiales se deben seleccionar con la combinación de propiedades adecuada y más económica, que también puede incluir consideraciones de disponibilidad. Una vez que se ha seleccionado una familia de materiales que satisfagan las restricciones de diseño, las comparaciones de costes de los distintos materiales candidatos se pueden hacer según coste por pieza o elemento. El precio del material se indica, generalmente, por unidad de masa. El volumen del componente se puede determinar a partir de sus dimensiones y geometría, y se convierte luego en masa utilizando la densidad del material. Además, durante los procesos de fabricación hay, por lo general, algunos desperdicios inevitables de material que también se deben tener en cuenta en estos cálculos. Los precios relativos de una amplia variedad de materiales de ingeniería se proporcionan en el Apéndice C.

23.4 TÉCNICAS DE FABRICACIÓN

Como se ha comentado, la elección del proceso de fabricación está influenciada tanto por la selección de materiales como por el diseño. El proceso de fabricación se compone normalmente de operaciones primarias y secundarias. *Operaciones primarias* son aquellas que convierten la materia prima en una parte reconocible (fusión y moldeo, conformado de plásticos, compactación de polvos, etc.), mientras que las *operaciones secundarias* son las que se utilizan posteriormente para producir piezas acabadas (p. ej., tratamientos térmicos, soldadura, esmerilado, pintura, decoración). Las principales consideraciones de costes, para

Apéndice A El Sistema Internacional de Unidades (SI)

En el *Sistema Internacional* las unidades se clasifican en dos grandes grupos: básicas y derivadas. Las básicas son unidades fundamentales y no se pueden reducir. En la Tabla A.1 se recogen las principales unidades básicas relacionadas con la ciencia e ingeniería de materiales.

Las unidades derivadas se expresan en términos de unidades básicas, utilizando signos matemáticos para multiplicaciones y divisiones. Por ejemplo, las unidades SI para la densidad son kilogramos por metro cúbico (kg/m^3). Algunas unidades derivadas tienen nombres y símbolos especiales; por ejemplo, se utiliza N para denotar el newton (la unidad de fuerza), que es equivalente a $1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$. En la Tabla A.2 se agrupan las principales unidades derivadas.

En ocasiones es necesario, o conveniente, establecer nombres y símbolos para múltiplos o submúltiplos de unidades SI. Para crear un múltiplo de una unidad SI solamente se utiliza un prefijo, uno solo, que se indica en el numerador. Estos prefijos y sus correspondientes símbolos se indican en la Tabla A.3. Los símbolos de todas las unidades utilizadas en este libro, sean o no SI, se proporcionan al principio de este libro.

Tabla A.1

Unidades básicas del SI

| Cantidad | Nombre | Símbolo |
|---------------------------|-----------|---------|
| Longitud | metro | m |
| Masa | kilogramo | kg |
| Tiempo | segundo | s |
| Corriente eléctrica | amperio | A |
| Temperatura termodinámica | kelvin | K |
| Cantidad de sustancia | mol | mol |

Tabla A.2

Algunas unidades SI derivadas

| Unidad | Nombre | Fórmula | Símbolo especial |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------|------------------|
| Área | metro cuadrado | m ² | — |
| Volumen | metro cúbico | m ³ | — |
| Velocidad | metro por segundo | m/s | — |
| Densidad | kilogramo por metro cúbico | kg/m ³ | — |
| Concentración | mol por metro cúbico | mol/m ³ | — |
| Fuerza | newton | kg·m/s ² | N |
| Energía | julio/joule | kg·m ² /s ² , N·m | J |
| Tensión | pascal | kg·m/s ² , N·m ² | Pa |
| Deformación | — | m/m | — |
| Potencia, flujo radiante | vatio/watt | kg·m ² /s ² , J/s | W |
| Viscosidad | pascal-segundo | kg/m·s | Pa·s |
| Frecuencia (de un fenómeno periódico) | hercio/hertz | s ⁻¹ | Hz |
| Carga eléctrica | culombio/coulomb | A·s | C |
| Potencial eléctrico | voltio/volt | kg·m ² /s ² ·C | V |
| Capacidad | faradio/farad | s ² ·C ² /kg·m ² | F |
| Resistencia eléctrica | ohmio/ohm | kg·m ² /s·C ² | Ω |
| Flujo magnético | weber | kg·m ² /s·C | Wb |
| Densidad de flujo magnético | tesla | kg/s·C, Wb/m ² | (T) ^a |

^aT es un símbolo especial aprobado en SI pero no se ha utilizado en este texto, ya que se ha considerado el nombre tesla en lugar del símbolo.

Tabla A.3

Prefijos de múltiplos y submúltiplos SI

| Factor de multiplicación | Prefijo | Símbolo |
|--------------------------|---------|---------|
| 10 ⁹ | giga | G |
| 10 ⁶ | mega | M |
| 10 ³ | kilo | k |
| 10 ⁻² | centi | c |
| 10 ⁻³ | mili | m |
| 10 ⁻⁶ | micro | μ |
| 10 ⁻⁹ | nano | n |
| 10 ⁻¹² | pico | p |

B Propiedades de materiales de ingeniería seleccionados

| | |
|------------------------------------------------|-----|
| B.1: Densidad | 828 |
| B.2 Módulo elástico | 831 |
| B.3 Coeficiente de Poisson | 835 |
| B.4 Resistencia y ductilidad | 836 |
| B.5 Tenacidad de fractura en deformación plana | 841 |
| B.6 Coeficiente lineal de dilatación térmica | 843 |
| B.7 Conductividad térmica | 846 |
| B.8 Calor específico | 849 |
| B.9 Resistividad eléctrica | 852 |
| B.10 Composiciones de aleaciones metálicas | 855 |

Este apéndice recopila propiedades de, aproximadamente, 100 materiales de uso común en ingeniería. Cada tabla proporciona valores de una propiedad particular para los materiales seleccionados; también se incluye una relación de composiciones de las diversas aleaciones metálicas consideradas (Tabla B.10). Los datos están tabulados por tipos de materiales (metales y aleaciones: grafito, cerámicos y materiales semiconductores; polímeros; fibras y composites).

Cada valor está expresado bien como un rango típico de valores o como un único valor. En alguna ocasión se indica (*min*) para expresar que el valor citado es un valor mínimo.

Tabla B.1

Valores de densidad a temperatura ambiente para diversos materiales de ingeniería

| Material | Densidad | |
|---------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | g/cm ³ | lb _m /in. ³ |
| METALES Y ALEACIONES | | |
| Aceros al carbono y de baja aleación | | |
| Acero A36 | 7,85 | 0,283 |
| Acero 1020 | 7,85 | 0,283 |
| Acero 1040 | 7,85 | 0,283 |
| Acero 4140 | 7,85 | 0,283 |
| Acero 4340 | 7,85 | 0,283 |
| Aceros inoxidables | | |
| Acero inoxidable 304 | 8,00 | 0,289 |
| Acero inoxidable 316 | 8,00 | 0,289 |
| Acero inoxidable 405 | 7,80 | 0,282 |
| Acero inoxidable 440A | 7,80 | 0,282 |
| Acero inoxidable 17-7PH | 7,65 | 0,276 |

Tabla B.1
(Continuación)

| Material | Densidad | |
|------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| | g/cm ³ | lb _m /in. ³ |
| Fundiciones de hierro | | |
| Fundiciones grises | | |
| • Grado G1800 | 7,30 | 0,264 |
| • Grado G3000 | 7,30 | 0,264 |
| • Grado G4000 | 7,30 | 0,264 |
| Fundiciones dúctiles | | |
| • Grado 60-40-18 | 7,10 | 0,256 |
| • Grado 80-55-06 | 7,10 | 0,256 |
| • Grado 120-90-02 | 7,10 | 0,256 |
| Aleaciones de aluminio | | |
| Aleación 1100 | 2,71 | 0,0978 |
| Aleación 2024 | 2,77 | 0,100 |
| Aleación 6061 | 2,70 | 0,0975 |
| Aleación 7075 | 2,80 | 0,101 |
| Aleación 356,0 | 2,69 | 0,0971 |
| Aleaciones de cobre | | |
| C11000 (cobre electrolítico) | 8,89 | 0,321 |
| C17200 (cobre al berilio) | 8,25 | 0,298 |
| C26000 (latón de cartuchería) | 8,53 | 0,308 |
| C36000 (latón de fácil mecanizado) | 8,50 | 0,307 |
| C71500 (cobre-níquel 30 %) | 8,94 | 0,323 |
| C93200 (bronce de rodamientos) | 8,93 | 0,322 |
| Aleaciones de magnesio | | |
| Aleación AZ31B | 1,77 | 0,0639 |
| Aleación AZ91D | 1,81 | 0,0653 |
| Aleaciones de titanio | | |
| Pureza comercial (ASTM grado 1) | 4,51 | 0,163 |
| Aleación Ti-5Al-2,5Sn | 4,48 | 0,162 |
| Aleación Ti-6Al-4V | 4,43 | 0,160 |
| Metales preciosos | | |
| Oro (pureza comercial) | 19,32 | 0,697 |
| Platino (pureza comercial) | 21,45 | 0,774 |
| Plata (comercialmente pura) | 10,49 | 0,379 |
| Metales refractarios | | |
| Molibdeno (pureza comercial) | 10,22 | 0,369 |
| Tántalo (pureza comercial) | 16,6 | 0,599 |
| Tungsteno (pureza comercial) | 19,3 | 0,697 |
| Aleaciones no férricas | | |
| Níquel 200 | 8,89 | 0,321 |
| Inconel 625 | 8,44 | 0,305 |
| Monel 400 | 8,80 | 0,318 |

Apéndice C Costes y costes relativos de materiales de ingeniería seleccionados

Este apéndice contiene información de precios para el conjunto de materiales citados en el Apéndice B. La recopilación de datos de costes válidos para materiales es una tarea extremadamente difícil, lo que explica la escasez de información sobre precios de materiales en la literatura. Una razón para esto es que hay tres niveles de precios: los de fabricación, los de distribución y los de minoristas. En la mayoría de los casos se pueden citar los precios de distribución. Para algunos materiales (p. ej., cerámicos especializados, como carburo de silicio y nitruro de silicio) es necesario utilizar los precios de fabricación. Además, puede haber una variación significativa en el coste de un material específico, y hay varias razones para ello. En primer lugar, cada proveedor tiene su propio esquema de precios. Por otra parte, el coste depende de la cantidad del material adquirido y, además, de cómo fue procesado o tratado. Se ha procurado la recopilación de datos para pedidos relativamente grandes, es decir, para cantidades del orden de 900 kg (2000 lb_m) de materiales que normalmente se venden en lotes y a granel, así como también para formas/tratamientos comunes. Cuando ha sido posible, se han obtenido cotizaciones de precios de al menos tres distribuidores/fabricantes.

Esta información de precios corresponde a enero de 2007. Los datos de coste están en dólares estadounidenses por kilogramo; además, estos datos se expresan tanto como rangos de precios y también como valores únicos. La ausencia de un rango de precios (es decir, cuando sólo se cita un valor de precio único) significa o bien que la variación es pequeña o bien que, sobre la base de los datos disponibles, no es posible identificar una gama de precios. Por otra parte, en la medida en que los precios de los materiales varían con el tiempo, se ha decidido utilizar un índice de costes relativo; este índice representa el coste por unidad de masa (o promedio de costes por unidad de masa) de un material dividido por el coste promedio por unidad de masa de un material común en ingeniería: el acero al carbono A36. Aunque el precio de una materia específica varíe con el tiempo, la relación de precio entre ese material y otro probablemente cambiará más lentamente.

| Material/condición | Coste (\$US/kg) | Coste relativo |
|--------------------------------------------|-----------------|----------------|
| ACERO AL CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN | | |
| Acero A36 | | |
| • Plancha, laminado en caliente | 0,90–1,50 | 1,00 |
| • Perfil, laminado en caliente | 1,00–1,65 | 1,0 |
| Acero 1020 | | |
| • Plancha, laminado en caliente | 0,90–1,65 | 1,0 |
| • Plancha, laminado en frío | 0,85–1,40 | 0,9 |
| Acero 1040 | | |
| • Plancha, laminado en caliente | 0,90–0,95 | 0,7 |
| • Plancha, laminado en frío | 2,20 | 1,7 |
| Acero 4140 | | |
| • Barra, normalizado | 1,50–2,60 | 1,6 |
| • Grado H (redondo), normalizado | 5,00 | 3,9 |
| Acero 4340 | | |
| • Barra, recocido | 2,55 | 2,0 |
| • Barra, normalizado | 3,60 | 2,8 |

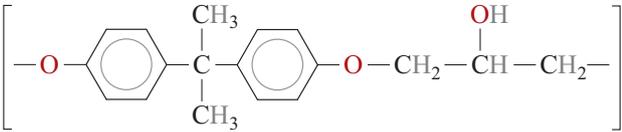
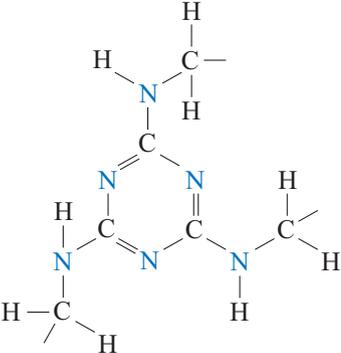
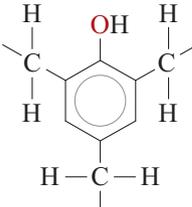
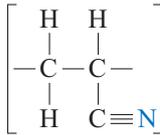
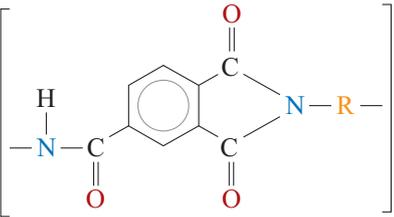
| Material/condición | Coste (\$US/kg) | Coste relativo |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| ACEROS INOXIDABLES | | |
| Acero inoxidable 304 | 6,20–9,20 | 6,0 |
| Acero inoxidable 316 | 6,20–11,70 | 7,3 |
| Acero inoxidable 17-7PH | 9,20 | 7,1 |
| FUNDICIONES DE HIERRO | | |
| Fundiciones grises (todos los grados) | 1,75–2,40 | 1,7 |
| Fundiciones dúctiles (todos los grados) | 2,00–3,20 | 2,0 |
| ALEACIONES DE ALUMINIO | | |
| Aluminio (no aleado) | 2,65–2,75 | 2,1 |
| Aleación 1100 | | |
| • Lámina, recocido | 5,30–5,50 | 4,2 |
| Aleación 2024 | | |
| • Lámina, T3 | 12,50–19,50 | 12,9 |
| • Barra, T351 | 11,00–21,00 | 13,4 |
| Aleación 5052 | | |
| • Lámina, H32 | 4,85–5,10 | 3,9 |
| Aleación 6061 | | |
| • Lámina, T6 | 6,60–8,50 | 5,7 |
| • Barra, T651 | 5,10–7,50 | 5,0 |
| Aleación 7075 | | |
| • Lámina, T6 | 11,30–14,70 | 10,0 |
| Aleación 356,0 | | |
| • Bruto de colada, gran producción | 2,70–3,35 | 2,4 |
| • Bruto de colada, producción limitada | 17,50 | 13,6 |
| • T6, producción limitada | 18,90 | 14,7 |
| ALEACIONES DE COBRE | | |
| Cobre (no aleado) | 5,60–7,00 | 4,8 |
| Aleación C11000 (cobre electrolítico), lámina | 7,60–11,60 | 7,4 |
| Aleación C17200 (cobre al berilio), lámina | 9,00–36,00 | 17,5 |
| Aleación C26000 (latón de cartuchería), lámina | 7,10–12,80 | 7,5 |
| Aleación C36000 (latón de fácil mecanizado) lámina, redondo | 7,20–10,90 | 7,0 |
| Aleación C71500 (cobre-níquel 30%), lámina | 27,00 | 21,0 |
| Aleación C93200 (bronce de rodamientos) | | |
| • Barra | 9,70 | 7,5 |
| • Bruto de colada, producción limitada | 23,00 | 17,9 |
| ALEACIONES DE MAGNESIO | | |
| Magnesio (no aleado) | 3,00–3,30 | 2,4 |
| Aleación AZ31B | | |
| • Lámina (laminación) | 17,60–46,00 | 23,4 |
| • De extrusión | 9,90–14,30 | 9,4 |
| Aleación AZ91D (bruto de colada) | 3,40 | 2,6 |
| ALEACIONES DE TITANIO | | |
| Comercialmente puro | | |
| • Grado 1 ASTM, recocido | 100,00–120,00 | 85,6 |
| • Grado 2 ASTM, recocido | 90,00–160,00 | 95,9 |

| Material/condición | Coste (\$US/kg) | Coste relativo |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| Aleación Ti-5Al-2,5Sn | 110,00-120,00 | 89,3 |
| Aleación Ti-6Al-4V | 66,00-154,00 | 94,2 |
| METALES PRECIOSOS | | |
| Oro, lingotes | 18 600-20 900 | 15 300 |
| Platino, lingotes | 32 100-40 000 | 28 400 |
| Plata, lingotes | 350-450 | 313 |
| METALES REFRACTARIOS | | |
| Molibdeno, pureza comercial | 180-300 | 161 |
| Tántalo, pureza comercial | 400-420 | 318 |
| Tungsteno, pureza comercial | 225 | 175 |
| ALEACIONES NO FÉRRICAS | | |
| Níquel, pureza comercial | 25,00-34,50 | 23,7 |
| Níquel 200 | 35,00-74,00 | 46,8 |
| Inconel 625 | 59,00-88,00 | 55,5 |
| Monel 400 | 15,00-33,00 | 16,8 |
| Aleación Haynes 25 | 143,00-165,00 | 120 |
| Invar | 44,00-54,00 | 37,2 |
| Super invar | 44,00 | 34,2 |
| Kovar | 50,00-66,00 | 44,3 |
| Plomo químico | | |
| • Lingote | 1,50-2,00 | 1,4 |
| • Plancha | 2,15-4,40 | 2,5 |
| Plomo al antimonio (6%) | | |
| • Lingote | 2,30-3,90 | 2,4 |
| • Plancha | 3,10-6,10 | 3,4 |
| Estaño (pureza comercial) | 9,75-10,75 | 8,0 |
| Soldadura (60Sn-40Pb), barra | 8,10-16,50 | 9,4 |
| Zinc, pureza comercial, lingote o ánodo | 2,00-4,65 | 2,8 |
| Zirconio 702, grado reactor, plancha | 46,00-88,00 | 52,2 |
| GRAFITO, CERÁMICOS Y MATERIALES SEMICONDUCTORES | | |
| Óxido de aluminio (alúmina) | | |
| • De calcinación, 99,8% pureza, tamaño de partícula entre 0,5 y 5 µm | 1,85-2,80 | 1,8 |
| • Bolas de alúmina, 99% pureza, 1/4 in. diám. | 39,00-52,00 | 35,1 |
| • Bolas de alúmina, 96% pureza, 1/4 in. diám. | 33,00 | 25,6 |
| • Bolas de alúmina, 90% pureza, 1/4 in. diám. | 16,00 | 12,4 |
| Hormigón, mezclado | 0,05 | 0,04 |
| <i>Diamante</i> | | |
| • Sintético, 30-40 mesh, grado industrial | 7700 | 6000 |
| • Natural, en polvo, 45 µm, abrasivo de pulido | 2300 | 1800 |
| • Natural, industrial, 1/3 quilate | 50 000-85 000 | 52 400 |
| Arseniuro de galio | | |
| • Grado mecánico, obleas de 75 µm diám., ~ 625 µm espesor | 3900 | 3000 |
| • Primer grado, obleas de 75 µm diám., ~ 625 µm espesor | 6500 | 5000 |
| Vidrio, borosilicato (Pyrex), plancha | 9,20-11,30 | 7,9 |

| Material/condición | Coste (\$US/kg) | Coste relativo |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| Vidrio, sosa-cal, plancha | 0,56–1,35 | 0,7 |
| Vitrocéramica (Pyroceram), plancha | 12,65–16,55 | 11,3 |
| Grafito | | |
| • En polvo, sintético, 99+% pureza, tamaño de partícula ~ 10 µm | 1,80–7,00 | 3,1 |
| • En polvo, sintético, 99+% pureza, alta pureza, tamaño de partícula ~ 20 µm | 50,00–125,00 | 65,3 |
| Sílice fundida, plancha | 1200–1700 | 1100 |
| Silicio | | |
| • Grado de ensayo, sin dopar, obleas de 100 mm diám, ~ 425 µm espesor | 5100–9000 | 5500 |
| • Primer grado, sin dopar, obleas de 100 mm diám, ~ 425 µm espesor | 8000–14,000 | 8800 |
| Carburo de silicio | | |
| • Bolas de fase α, 1/4 in. diám, sinterizadas | 250,00 | 194 |
| Nitruro de silicio | | |
| • En polvo, tamaño submicra de partícula | 100–200 | 100 |
| • Bolas, pulido final, 0,25-0,5 in. diám., HIP | 1000–4000 | 1600 |
| Zirconia (5% mol Y ₂ O ₃), bolas de 15 mm diám. | 50–200 | 97,1 |
| POLÍMEROS | | |
| Elastómero de acrilonitrilo-butadieno (nitrilo) | | |
| • En bruto y sin procesado | 4,00 | 3,1 |
| • Lámina de extrusión (1/4-1/8 in. de espesor) | 8,25 | 6,4 |
| • Lámina de calandrado (1/4-1/8 in. de espesor) | 5,25–7,40 | 4,9 |
| Elastómero de butadieno-estireno (SBR) | | |
| • En bruto y sin procesado | 1,70 | 1,3 |
| • Lámina de extrusión (1/4-1/8 in. de espesor) | 5,05 | 3,9 |
| • Lámina de calandrado (1/4-1/8 in. de espesor) | 3,25–3,75 | 2,7 |
| Elastómero de silicona | | |
| • En bruto y sin procesado | 9,90–14,00 | 9,5 |
| • Lámina de extrusión (1/4-1/8 in. de espesor) | 28,00–29,50 | 22,4 |
| • Lámina de calandrado (1/4-1/8 in. de espesor) | 7,75–12,00 | 7,7 |
| Epoxi (resina epoxi), en bruto | 2,20–2,80 | 1,9 |
| Nylon 6,6 | | |
| • En bruto | 3,20–4,00 | 2,8 |
| • Lámina | 12,80 | 9,9 |
| Resina fenólica, en bruto | 1,65–1,90 | 1,4 |
| Tereftalato de polibutileno (PBT) | | |
| • En bruto | 4,00–7,00 | 4,3 |
| • Lámina | 40,00–100,00 | 54,3 |
| Policarbonato (PC) | | |
| • En bruto | 3,00–4,70 | 2,9 |
| • Lámina | 10,50 | 8,2 |
| Poliéster (termoestable), en bruto | 3,10–4,30 | 2,7 |
| Poliétereter-cetona (PEEK), en bruto | 90,00–105,00 | 76,0 |

| Material/condición | Coste (\$US/kg) | Coste relativo |
|------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|
| Polietileno | | |
| • Baja densidad (LDPE), en bruto | 1,60–1,85 | 1,3 |
| • Alta densidad (HDPE), en bruto | 1,20–1,75 | 1,2 |
| • Ultra-alto peso molecular (UHMWPE), en bruto | 2,20–3,00 | 2,1 |
| Poli(tereftalato de etileno) (PET) | | |
| • En bruto | 1,50–1,75 | 1,3 |
| • Lámina | 3,30–5,40 | 3,4 |
| Poli(metacrilato de metilo) (PMMA) | | 3,1 |
| • En bruto | 2,60–5,40 | 3,1 |
| • Lámina de extrusión (1/4 in. de espesor) | 4,65–6,05 | 4,1 |
| Polipropileno (PP), en bruto | 1,05–1,70 | 1,2 |
| Poliestireno (PS), en bruto | 1,55–1,95 | 1,4 |
| Politetrafluoroetileno (PTFE) | | |
| • En bruto | 14,80–16,90 | 11,9 |
| • Barra | 21,00 | 16,3 |
| Poli(cloruro de vinilo) (PVC), en bruto | 1,10–1,85 | 1,2 |
| FIBRAS | | |
| Aramida (Kevlar 49), continua | 35,00–100,00 | 38,8 |
| Carbono (a partir de PAN), continua | | |
| • Módulo estándar | 40,00–80,00 | 48,1 |
| • Módulo intermedio | 60,00–130,00 | 69,1 |
| • Alto módulo | 220,00–275,00 | 193 |
| • Ultra alto módulo | 1750–2650 | 1700 |
| Vidrio E, continua | 1,55–2,65 | 1,6 |
| MATERIALES COMPUESTOS | | |
| Prepreg de epoxy con fibra continua de Aramida (Kevlar 49) | 75,00–100,00 | 66,8 |
| Prepreg de epoxy con fibra continua de carbono | | |
| • Módulo estándar | 49,00–66,00 | 43,1 |
| • Módulo intermedio | 75,00–240,00 | 123 |
| • Alto módulo | 120,00–725,00 | 330 |
| Prepreg de epoxy con fibra continua de vidrio E | 24,00–50,00 | 28,3 |
| Madera | | |
| • Abeto Douglas | 0,61–0,97 | 0,6 |
| • Pino Ponderosa | 1,15–1,50 | 1,0 |
| • Roble rojo | 3,35–3,75 | 2,8 |

Apéndice D Estructuras de unidades repetitivas en polímeros comunes

| Nombre químico | Estructura de unidad repetitiva |
|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Epoxy (éter diglicídico del bisfenol-A, DGEBA) |  |
| Melamina formaldehído (melamina) |  |
| Fenol-formaldehído (resina fenólica) |  |
| Poliacrilonitrilo (PAN) |  |
| Poliamida-imida (PAI) |  |

Apéndice E Temperaturas de transición vítrea y de fusión para polímeros comunes

| Polímero | Temperatura de transición vítrea [°C (°F)] | Temperatura de fusión [°C (°F)] |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------|
| Aramida | 375 (705) | ~640 (~1185) |
| Poliimida (termoplástico) | 280–330 (535–625) | <i>a</i> |
| Poliamida-imida (PAI) | 277–289 (530–550) | <i>a</i> |
| Policarbonato (PC) | 150 (300) | 265 (510) |
| Poliétereter-cetona (PEEK) | 143 (290) | 334 (635) |
| Poliacrilonitrilo (PAN) | 104 (220) | 317 (600) |
| Poliestireno (PS) | | |
| • Atáctico | 100 (212) | <i>a</i> |
| • Isotáctico | 100 (212) | 240 (465) |
| Tereftalato de polibutileno (PBT) | — | 220–267 (428–513) |
| Poli(cloruro de vinilo) (PVC) | 87 (190) | 212 (415) |
| Poli(sulfuro de fenileno) (PPS) | 85 (185) | 285 (545) |
| Poli(tereftalato de etileno) (PET) | 69 (155) | 265 (510) |
| Nylon 6,6 | 57 (135) | 265 (510) |
| Poli(metacrilato de metilo) | | |
| • Sindiotáctico | 3 (35) | 105 (220) |
| • Atáctico | 3 (35) | 45 (115) |
| Polipropileno (PP) | | |
| • Sindiotáctico | –10 (15) | 175 (347) |
| • Atáctico | –18 (0) | 175 (347) |
| Poli(cloruro de vinilideno) (PVDC) | | |
| • Atáctico | –18 (0) | 175 (347) |
| Poli(fluoruro de vinilo) | –20 (–5) | 200 (390) |
| Poli(fluoruro de vinilideno) | –35 (–30) | — |
| Policloropreno (goma de cloropreno o neopreno) | –50 (–60) | 80 (175) |
| Polisobutileno | –70 (–95) | 128 (260) |
| <i>cis</i> -Poliisopreno | –73 (–100) | 28 (80) |
| Polibutadieno | | |
| • Sindiotáctico | –90 (–130) | 154 (310) |
| • Atáctico | –90 (–130) | 120 (250) |
| Poli(etileno de alta densidad) (HDPE) | –90 (–130) | 137 (279) |
| Politetrafluoroetileno (PTFE) | –97 (–140) | 327 (620) |
| Poli(etileno de baja densidad) (LDPE) | –110 (–165) | 115 (240) |
| Poli(dimetilsiloxano) (silicona) | –123 (–190) | –54 (–65) |

^aEstos polímeros existen normalmente en un estado 95% no cristalino.

A

abrasivo. Material duro y resistente al desgaste (generalmente cerámico) que se utiliza para mecanizar, triturar o cortar otros materiales.

absorción. Fenómeno óptico por el cual la energía de un fotón de luz se asimila dentro de una sustancia, normalmente por polarización electrónica o por excitación de electrones.

acero. Aleación férrea (o basada en hierro) que contiene concentraciones apreciables de elementos de aleación (distintos de C y cantidades residuales de Mn, Si, S, y P). Estos elementos de aleación normalmente se añaden para mejorar las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión.

acero al carbono. Aleación férrea en la que el carbono es el primer elemento de aleación.

acero inoxidable. Aleación férrica muy resistente a la corrosión en diversidad de entornos. El elemento de aleación predominante es el cromo, que debe estar presente en una concentración de al menos un 11% en peso; también pueden contener otros elementos de aleación, como níquel y molibdeno.

aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA). Aceros relativamente resistentes con bajos contenidos en carbono y menos que aproximadamente un 10% en peso del total de los elementos de aleación.

adhesivo. Sustancia que une las superficies adyacentes de otros dos materiales (denominados adherentes).

aislante (eléctrico). Material no metálico que tiene una banda de valencia completa a 0 K y una banda de energía prohibida relativamente amplia. En consecuencia, la conductividad eléctrica a temperatura ambiente es muy baja, menor de aproximadamente $10^{-10} (\Omega \cdot m)^{-1}$.

aleación. Sustancia metálica que se compone de dos o más elementos.

aleación férrea. Aleación metálica en la que el hierro es el primer constituyente.

aleación hechurada. Aleación de metal relativamente dúctil y adecuada para trabajo en caliente o para trabajo en frío durante la fabricación de componentes.

aleación hipereutectoide. Para un sistema con un eutectoide, aleación para la cual la concentración de soluto es mayor que la composición del eutectoide.

aleación hipoeutectoide. Para un sistema con un eutectoide, aleación para la cual la concentración de soluto es menor que la composición del eutectoide.

aleación no férrea. Aleación metálica en que el hierro no es el principal constituyente.

alotropía. Posibilidad de la existencia de dos o más estructuras cristalinas diferentes para una sustancia (por lo general un sólido elemental).

alto polímero. Material polimérico sólido con un peso molecular mayor que 10000 g/mol, aproximadamente.

amorfo. Que tiene una estructura no cristalina.

anión. Ion cargado negativamente.

anisotrópico. Que presenta diferentes valores de una propiedad en direcciones cristalográficas distintas.

ánodo. En una celda electroquímica o par galvánico, electrodo que experimenta la oxidación, o que cede electrones.

ánodo de sacrificio. Metal activo o aleación que se corroe preferencialmente protegiendo a otro metal o aleación al cual está conectado eléctricamente.

antiferromagnetismo. Fenómeno observado en algunos materiales (por ejemplo, MnO) por el cual se produce la cancelación completa del momento magnético como resultado del acoplamiento antiparalelo de átomos o iones adyacentes. El sólido macroscópico no posee ningún momento magnético neto.

atómico. Tipo de configuración de cadena de polímero (estereoisómero) en la que los grupos laterales se colocan al azar en un lado u otro de la cadena.

austenita. Hierro cúbico centrado en las caras; acero que tiene estructura cristalina FCC.

austenización. Formación de austenita por calentamiento de una aleación férrea por encima de su temperatura crítica superior; hasta la región de fase austenítica del diagrama de fases.

autodifusión. Migración atómica en metales puros.

autointersticial. Átomo o ion ajeno que se colocada en una posición intersticial de la red.

B

bainita. Producto de transformación austenítica que se encuentra en algunos aceros y fundiciones de hierro. Se forma a temperaturas entre las que se producen transformaciones de perlita y martensita. La microestructura consiste en ferrita α con una fina dispersión de cementita.

banda de conducción. En aisladores eléctricos y semiconductores, es la banda de energía electrónica más baja que está vacía de electrones a 0 K. Los electrones de conducción son aquellos que han sido excitados a los estados que caen dentro de esta banda.

banda de energía electrónica. Serie de estados de energía de electrones que están muy próximas, con respecto a su energía.

banda de energía prohibida (*gap*) (E_g). En semiconductores y aislantes, valores de energía que se encuentran entre las bandas de valencia y de conducción; en materiales intrínsecos, los electrones no pueden tener energías dentro de este rango.

banda de valencia. En materiales sólidos es la banda de energía electrónica que contiene electrones de valencia.

bifuncional. Designación de monómeros que pueden reaccionar para formar dos enlaces covalentes con otros monómeros para crear una estructura molecular en forma de cadena bidimensional.

bronce. Aleación de cobre y estaño, rica en cobre; también hay bronce al aluminio, silicio y níquel.

Respuestas a problemas seleccionados

Capítulo 2

- 2.3 (a) $1,66 \times 10^{-24}$ g/uma;
(b) $6,022 \times 10^{23}$ átomos/g·mol

2.14

$$r_0 = \left(\frac{A}{nB} \right)^{1/(1-n)}$$

$$E_0 = - \frac{A}{\left(\frac{A}{nB} \right)^{1/(1-n)}} + \frac{B}{\left(\frac{A}{nB} \right)^{n/(1-n)}}$$

- 2.15 (c) $r_0 = 0,279$ nm, $E_0 = -4,57$ eV
2.22 70,2% para TiO₂; 2,2% para InSb

Capítulo 3

- 3.4 000, 100, 110, 010, 001, 101, 111, 011, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}1$, $1\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ y $\frac{1}{2}1\frac{1}{2}$

3.11 Dirección I: [012]

3.13 Dirección A: [0 $\bar{1}$ 1]

Dirección C: [112]

3.14 Dirección B: [2 $\bar{3}$ 2]

Dirección D: [13 $\bar{6}$]

3.15 (b) [$\bar{1}$ 10], [$\bar{1}$ 10] y [1 $\bar{1}$ 0]

3.17 Dirección A: [10 $\bar{1}$ 1]

3.23 Plano B: ($\bar{1}$ 12) o (11 $\bar{2}$)

3.24 Plano A: (322)

3.25 Plano B: (221)

3.26 (c) [010] o [0 $\bar{1}$ 0]

3.28 (b) (10 $\bar{1}$ 0)

Capítulo 4

4.1 $V_C = 6,62 \times 10^{-29}$ m³

4.7 $R = 0,136$ nm

4.10 (a) $V_C = 1,40 \times 10^{-28}$ m³;

(b) $a = 0,323$ nm, $c = 0,515$ nm

4.13 Metal B: cúbica centrada en las caras

4.15 (a) $n = 8,0$ átomos/celda unitaria;

(b) $\rho = 4,96$ g/cm³

4.18 $V_C = 8,08 \times 10^{-2}$ nm³

4.25 FEA = 0,73

4.26 (a) FCC; (b) tetraédricas; (c) la mitad

4.27 (a) tetraédrica; (b) todas

4.32 (a) $a = 0,421$ nm; (b) $a = 0,424$ nm

4.34 ρ (calculada) = 3,80 g/cm³;
 ρ (medida) = 3,80 g/cm³

4.36 (a) $\rho = 4,21$ g/cm³

4.38 Cloruro de cesio

4.40 FEA = 0,755

4.42 FEA = 0,684

4.48 (a) $\rho_a = 2,000$ g/cm³, $\rho_c = 2,301$ g/cm³;
(b) % cristalinidad = 87,9%

4.51 (a) (010) y ($\bar{1}$ 00)

4.55 (a) $DL_{100} = \frac{1}{2R\sqrt{2}}$

4.56 (b) $DL_{111}(W) = 3,65 \times 10^9$ m⁻¹

4.57 (a) $DP_{111} = \frac{1}{2R^2\sqrt{3}}$

4.58 (b) $DP_{110}(V) = 1,522 \times 10^{19}$ m⁻²

4.61 $2\theta = 81,24^\circ$

4.62 $d_{110} = 0,2862$ nm

4.64 (a) $d_{321} = 0,1520$ nm;

(b) $R = 0,2463$ nm

4.66 $d_{110} = 0,2012$ nm, $a = 0,2845$ nm

Capítulo 5

5.3 $GP = 23\,760$

5.5 (a) $\bar{M}_n = 33\,040$ g/mol; (c) $GP = 785$

5.8 (a) $C_{Cl} = 29,0$ % en peso

5.9 $L = 1254$ nm; $r = 15,4$ nm

5.16 8530 unidades repetitivas de estireno y butadieno

5.18 Propileno

5.21 f (isopreno) = 0,88, f (isobutileno) = 0,12

Capítulo 6

6.1 $N_v/N = 4,3 \times 10^{-5}$

6.3 $Q_v = 0,75$ eV/átomo

6.5 $N_s/N = 4,03 \times 10^{-6}$

6.10 Para FCC, $r = 0,41R$

6.12 (a) vacantes O²⁻; una vacante de O²⁻ por cada dos iones de Li⁺ añadido.

6.15 $C'_{Zn} = 29,4$ %at, $C'_{Cu} = 70,6$ %at.

6.16 $C_{Pb} = 10,0$ % en peso, $C_{Sn} = 90,0$ % en peso

6.18 $C'_{Sn} = 71,9$ %at, $C'_{Pb} = 28,1$ %at

Los números en *cursiva* se refieren al glosario.

A

- Abrasivos, 867
- Absorbancia, 789
- Absorción de luz:
 en metales, 790–791
 en no metales, 791–792
- Aceite, como medio de temple, 599
- Aceptores, 698
- Acero(s), 366. *Véase también* Aceros
 inoxidables
 al carbono, 406, 433, 434, 867
 altos en carbono, 434, 437–438
 bajos en carbono, 434–435
 clasificación, 406, 434
 coeficiente de Poisson, 214
 comportamiento a fatiga (1045), 308
 conductividad eléctrica, 688
 costes, 857–858
 de alta resistencia y baja aleación
 (HSLA), 435, 867
 energía de impacto, 303
 eutectoide, desarrollo de
 microestructuras, 366–368
 galvanizado, 455, 665
 límite elástico, resistencia a tracción y
 ductilidad (1020), 225
 medios en carbono, 436–437
 módulos elástico y de cizalla, 214
 para herramientas, 437
 propiedades magnéticas, 772
 propiedades como alambres (refuerzo con
 fibras), 556
 propiedades térmicas, 738
 resumen de tipos, 434–439
 sistema de denominación AISI/SAE,
 436–437
 tenacidad de fractura en deformación
 plana, 296, 841
 tratamientos térmicos, 593–603
- Aceros inoxidables, 438–439, 867. *Véase
 también* Aleaciones férricas
 austeníticos, 438–439
 automóvil de, 638
 composiciones, propiedades, y
 aplicaciones, 438
 conductividad eléctrica, 688
 endurecibles por precipitación, 438
 ferríticos, 438, 439
 martensíticos, 438, 439
 pasividad, 655
 propiedades térmicas, 738
- resistencia a la fluencia, 321
 sensibilización por soldadura, 659, 660
- Acetato de polivinilo, unidad repetitiva,
 estructura, 865
- Acetileno, 119
- Ácido acético, 120
- Ácido adípico (estructura), 625
- Ácido poliláctico, 814, 823
- Ácidos (orgánicos), 120
- Acrílicos, *véase* Poli(metacrilato de metilo)
 (PMMA)
- Acrilonitrilo, *véase* Poliacrilonitrilo (PAN)
- Acronitrilo-butadieno, caucho, 524
- Acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS), 521
- Actuador, 12, 485
- Adhesivos, 526, 867
 y enlaces secundarios, 39
- Aditivos, polímero, 625–627, 633
- Adsorción, 164
- Agotamiento, en semiconductores
 extrínsecos, 699
- Agrietamiento inducido por hidrógeno, 662
- Agrietamiento por tensión de hidrógeno,
 662
- Agua:
 como ambiente de corrosión, 664
 como medio de temple, 598, 599
 de mar, como ambiente de corrosión, 664
 desalinización de, 200
 diagrama de fase (presión-temperatura),
 329, 334, 382, 384
 dilatación por congelación, 40
 energía de enlace y temperatura de
 fusión, 32
 enlace de hidrógeno en, 39, 40
- Aire, como medio de enfriamiento, 598
- AISI/SAE, sistema de denominación de
 aceros, 436
- Aislantes (eléctricos), 867. *Véase también*
 Materiales dieléctricos
 cerámicos y polímeros como, 712–714,
 722
 color, 797–798
 definición, 683
 estructura de banda de energía
 electrónica, 684–685, 686–687
 translucidez y opacidad, 799–800
- Akermanita, 90
- Álabes de turbina, 321
- Alambres, 556
- Alargamiento porcentual, 224
- materiales seleccionados, 836–841
 metales seleccionados, 225
 polímeros seleccionados, 497
- Alcohol de polivinilo, unidad repetitiva,
 estructura, 865
- Alcohol metílico, 120, 625
- Alcoholes, 120
- Aldehídos, 120
- Aleaciones, 7, 433, 867. *Véase también*
 Soluciones sólidas
 composiciones de algunas, 855–856
 costes, 857–859
 de baja dilatación, 741
 en relojes de pulsera, 741
 definición, 149
 ecuaciones de densidad, 156
 ecuaciones del peso atómico, 156
 endurecimiento, *véase* Endurecimiento
 de metales
 especificación de composición, 154–155
 para aplicaciones de alta temperatura,
 320–321
 tenacidad de fractura, valores, 841–842
 tratables térmicamente, 446
 valores de calor específico, 738, 849–850
 valores de coeficiente lineal de dilatación
 térmica, 738, 843–844
 valores de conductividad térmica, 738,
 846–847
 valores de densidad, 828–830
 valores de ductilidad, 836–839
 valores de límite elástico, 225, 836–839
 valores de módulo de elasticidad, 214,
 830–832
 valores de resistencia a tracción, 225,
 836–839
 valores de resistividad eléctrica, 852–853
 valores del coeficiente de Poisson, 214,
 835–836
- Aleaciones de aluminio, 447–449
 comportamiento a la fatiga, 308
 endurecimiento por precipitación, 607
 esquema de denominación del
 tratamiento, 448
 propiedades y aplicaciones, 449
 tenacidad de fractura en deformación
 plana, 296
- Aleaciones de cobre, 446–447
 propiedades y aplicaciones de, 447
- Aleaciones de cobre-berilio, 446, 447
 diagrama de fase, 637

