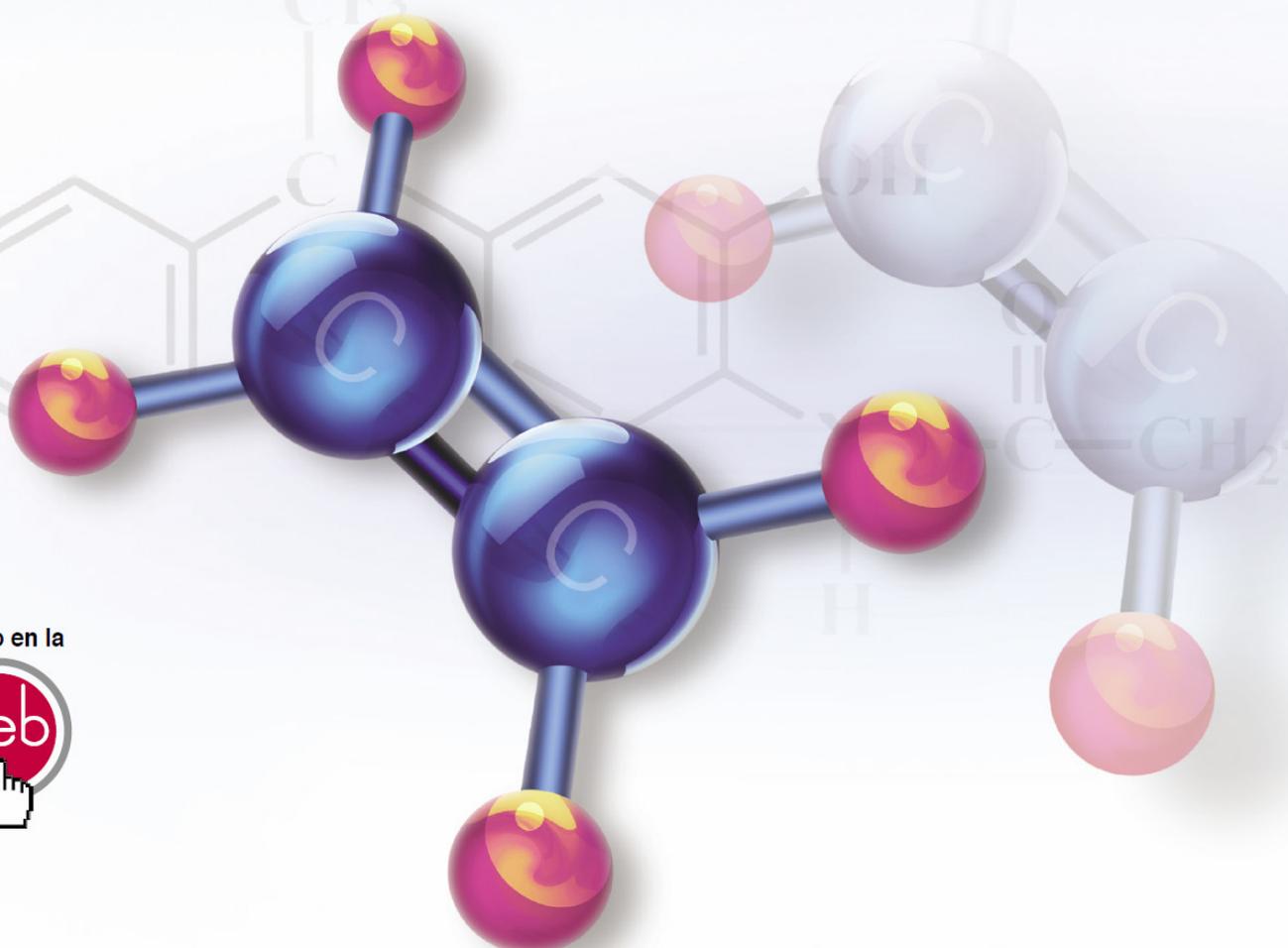


# CIENCIA DE MATERIALES

APLICACIONES EN INGENIERÍA

**JAMES NEWELL**



Apoyo en la



 **Alfaomega**

*Ciencia de Materiales*  
*Aplicaciones en Ingeniería*



# *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería*

---

James Newell

*Rowan University*



**Corrección técnica:**  
Ing. Raúl Gilberto Valdez Navarro  
Facultad de Ingeniería - Departamento de Materiales  
y Manufactura, UNAM

**Formación:**  
Editec

**Al cuidado de la edición:**  
Luz Angeles Lomeli Díaz  
*lalomeli@alfaomega.com.mx*

**Gerente editorial:**  
Marcelo Grillo Giannetto  
*mgrillo@alfaomega.com.mx*

Datos catalográficos

Newell, James  
Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería  
Primera Edición

Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-607-707-114-3

Formato: 20 x 25.5 cm

Páginas: 368

### **Ciencia de materiales. Aplicaciones en Ingeniería**

James Newell

ISBN: 978-0-471-75365-0 edición original en inglés "Essentials of modern materials science and engineering" publicada por John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.

Derechos reservados © 2009 John Wiley & Sons, Inc.

Primera edición: Alfaomega Grupo Editor, México, diciembre 2010

© 2011 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.

Pitágoras 1139, Col. Del Valle, 03100, México D.F.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana  
Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.mx>

E-mail: [atencionalcliente@alfaomega.com.mx](mailto:atencionalcliente@alfaomega.com.mx)

**ISBN: 978-607-707-114-3**

#### **Derechos reservados:**

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

#### **Nota importante:**

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Edición autorizada para su venta en el continente americano y España

#### **Impreso en México. Printed in Mexico.**

##### **Empresas del grupo:**

**México:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. – Pitágoras 1139, Col. Del Valle, México, D.F. – C.P. 03100.  
Tel.: (52-55) 5575-5022 – Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396  
E-mail: [atencionalcliente@alfaomega.com.mx](mailto:atencionalcliente@alfaomega.com.mx)

**Colombia:** Alfaomega Colombiana S.A. – Carrera 15 No. 64 A 29, Bogotá, Colombia,  
Tel.: (57-1) 2100122 – Fax: (57-1) 6068648 – E-mail: [cliente@alfaomega.com.co](mailto:cliente@alfaomega.com.co)

**Chile:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. – Dr. La Sierra 1437, Providencia, Santiago, Chile  
Tel.: (56-2) 235-4248 – Fax: (56-2) 235-5786 – E-mail: [agechile@alfaomega.cl](mailto:agechile@alfaomega.cl)

**Argentina:** Alfaomega Grupo Editor Argentino, S.A. – Paraguay 1307 P.B. Of. 11, C.P. 1057, Buenos Aires,  
Argentina, – Tel./Fax: (54-11) 4811-8352, 4811 7183 y 4811 0887 – E-mail: [ventas@alfaomegaeditor.com.ar](mailto:ventas@alfaomegaeditor.com.ar)



Este libro está dedicado a mi hija, Jessica Lauren Newell, cuya sobresaliente paciencia y amor incondicional hicieron que valieran la pena las largas noches y fines de semana de mi trabajo en este libro.

# ACERCA DEL AUTOR

El doctor Newell nació en Turtle Creek, Pennsylvania (suburbio de Pittsburgh). Obtuvo el grado de Licenciado en Ingeniería Química y Biomédica de la Carnegie-Mellon University en 1988, la Maestría en Ingeniería Química de Penn State en 1990, y el Doctorado en Ingeniería Química por la Clemson University en 1994. Su tesis se concentró en la conversión de PBO a fibra de carbono, y recibió el premio de la Carbon Society's Mrozowski por la mejor tesis en 1993. Después de terminar su doctorado, se quedó en Clemson durante un año como profesor asistente visitante antes de aceptar un puesto como profesor en la Universidad de North Dakota en 1995. Se mudó a la Rowan University como profesor asociado en 1998 y fue promovido a profesor de tiempo completo en 2004. Empezó a fungir como asociado interino para Asuntos Académicos en 2007.



El doctor Newell ha publicado más de 30 artículos en *Chemical Engineering Education*, *High-Performance Polymers*, *Carbon*, *International Journal of Engineering Education*, *Journal of SMET Education*, *Recent Research Development in Applied Polymer Science*, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, *Journal of Applied Polymer Science* y *Advances in Engineering Education*; autor de la sección de fibras de carbono para la *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, 3a edición, y co-autor de un capítulo del libro de texto sobre la rotación de los precursores de la fibra de carbono. También fungió como testigo experto en una demanda a nivel nacional respecto al defecto de los chalecos a prueba de balas. Su trabajo ha sido presentado en conferencias internacionales en España, Argentina, Austria, Inglaterra, Australia y Estados Unidos. En 2001, recibió el premio Raymond W. Fallen por parte de The American Society for Engineering Education (ASEE) por sus contribuciones a la educación de la ingeniería. En 1997, fue nombrado el Nuevo Miembro de la Facultad Sobresaliente por la Sección North Midwest Section de ASEE. Sus actuales actividades de investigación incluyen la examinación de las relaciones de estructura-propiedad en compuestos de alto desempeño, mejorando los materiales de balística, y desarrollando equipos de ingeniería metacognoscitiva.

El doctor Newell es un ávido admirador del béisbol, admirador de los Steelers de toda la vida y lector voraz. Su libro favorito es *A Prayer for Owen Meany* de John Irving. Disfruta pasar tiempo con su esposa, Heidi, su hija Jessica (quien nació el 17 de enero de 2000) y sus tres gatos: Dakota, Bindi y Smudge.

# P R E F A C I O

## *¿Por qué debe usar este libro?*

- Es *práctico y aplicable*. Es nuestro objetivo que los alumnos estén preparados para tomar decisiones informadas sobre selección de materiales después de completar el curso y usar este texto.
- Está *equilibrado*. Se presentan una variedad de materiales para proporcionar un amplio espectro de materiales disponibles para los ingenieros.
- Es *visual*. El fuerte uso de los apoyos visuales de este libro ayuda a los alumnos a entender los conceptos mejor que sencillamente leyendo acerca de éstos.

## *Filosofía*

El autor ha enseñado ciencia de los materiales desde hace 12 años. Al no haber encontrado un texto que pudiera adecuarse completamente a su curso y a sus alumnos, desarrolló este texto más pequeño y más concentrado, adecuado para:

- Programas de ingeniería (incluyendo las ingenierías aeroespacial, biológica, química, civil, eléctrica, industrial y mecánica y otras) que ofrecen sólo un curso de un semestre o de un trimestre de ciencia de los materiales.
- Cobertura balanceada y adecuada de metales, polímeros, compuestos y áreas de importancia que incluyen biomateriales y nanomateriales.
- Enfoque en los asuntos fundamentales que son factores para la selección de materiales y diseño incluyendo ética, consideraciones de los ciclos de vida y economía.
- Enseñanza de las propiedades de los materiales, y manejo de la variabilidad en la medición, dejando a los alumnos preparados para medir las propiedades de los materiales y para interpretar los datos.

Este libro inicia con cuatro temas fundamentales:

- Las propiedades de un material están determinadas por su estructura. El procesamiento puede alterar esa estructura en formas específicas y predecibles.
- El comportamiento de los materiales se fundamenta en la ciencia y es entendible.
- Las propiedades de todos los materiales cambian con el tiempo, con el uso y con la exposición a las condiciones ambientales.
- Cuando se seleccionan los materiales, se deben llevar a cabo pruebas suficientes y apropiadas como para asegurar que el material permanecerá adecuado durante toda la vida razonable del producto.

## *Público*

Este texto asume que los alumnos están al menos familiarizados con los enlaces químicos básicos y la tabla periódica. Pero es un curso de materiales introduc-

torio, así que no habrá ecuaciones diferenciales, teoría de precolación; física cuántica detallada, termodinámica estadística u otros tópicos más avanzados.

### *Enfoque en conceptos clave y fundamentos*

Este libro está diseñado como una introducción al campo, no como una guía completa de comprensión de todo el conocimiento de la ciencia de los materiales. En vez de ahondar en grandes detalles en muchas áreas, el libro proporciona los conceptos claves y los fundamentos que los alumnos necesitan comprender sobre la ciencia de los materiales y puedan tomar decisiones informadas. Un ejemplo de la filosofía se encuentra en la sección de ensayo de los materiales. Aunque existen variaciones incontables en las técnicas de ensayo, el capítulo se enfoca en los principios operativos y la propiedad a ser medida, en lugar de que los alumnos se concentren en la exposición de variaciones y excepciones. Ese material está más allá del alcance de la mayoría de los cursos introductorios.

### *Economía, medio ambiente, ética y ciclo de vida*

La importancia de la economía en la toma de decisiones y la consideración del ciclo de vida completo de los productos son los temas que se mencionan a través del libro y aparecen en los problemas de tarea en casi todos los capítulos. Los íconos en los márgenes identifican áreas del libro con este enfoque:

 ECONOMÍA	 MEDIO AMBIENTE
 ÉTICA	 ANIMACIONES

### *Pedagogía*

#### TONO DE CONVERSACIÓN

El libro está escrito en tono de conversación, diseñado para facilitarle a los alumnos el aprendizaje. Cuando el autor hizo un piloto del texto en sus clases de ciencia de los materiales, los comentarios anónimos de sus alumnos incluían declaraciones como “No necesité leerlo cinco veces para empezar a entenderlo”.

#### OBJETIVOS DE APRENDIZAJE

Los objetivos de aprendizaje detallados en el inicio de cada capítulo proporcionan objetivos específicos del capítulo. Resaltan lo que debería ser capaz de hacer si realmente entiende el material.

#### RESUMEN DEL CAPÍTULO

Un resumen al final de cada capítulo recapitula los objetivos de aprendizaje.

## PROBLEMAS DE TAREA

Los problemas de tarea al final de cada capítulo son una mezcla de preguntas numéricas (por ejemplo, calcular la resistencia a la tracción de una viga de 0.509 pulg<sup>2</sup>) y preguntas cualitativas abiertas (por ejemplo, comparar y contrastar las ventajas y desventajas de los rellenos hechos de compuestos dentales con aquellos hechos de amalgama) que requieren un entendimiento más profundo y explicaciones más detalladas que son más difíciles de copiar.

## *Cobertura de tópicos y organización*

El primer capítulo es una introducción a las clases de materiales y una cobertura breve de las cuestiones que impactan en la selección y diseño de materiales (química, sustentabilidad e ingeniería verde, economía y así sucesivamente). El capítulo 2 se concentra en la estructura de los materiales (cristalografía) y cómo los defectos impactan tales estructuras. El capítulo 3 introduce a las propiedades materiales fundamentales de los materiales y los ensayos básicos utilizados para medir dichas propiedades. Los capítulos 4 a 7 introducen a las clases principales de los materiales, incluyendo nuevos tópicos necesarios para entender la ciencia de refuerzo y la consideración de las aplicaciones comerciales. El capítulo 8 se dedica a las propiedades electrónicas y ópticas de los materiales. Aunque los materiales comentados en este capítulo son metales, polímeros, cerámicos y compuestos, poseen propiedades eléctricas u ópticas únicas que generan aplicaciones comerciales significativas, y, como tal, garantizan la cobertura individual. El capítulo 9 trata de la nueva área de la biología y los biomateriales. Este capítulo introduce el concepto de bio-compatibilidad, y examina cómo los biomateriales modernos se utilizan para reemplazar o reforzar las funciones de los materiales biológicos.

## *Sitio web*

El sitio web que acompaña a este texto ubicado en [www.alfaomega.virtual.com.mx](http://www.alfaomega.virtual.com.mx) es un recurso valioso para alumnos e instructores.

### SITIO DE ASISTENCIA AL ALUMNO



**Animaciones:** ideas clave que se representan mejor de forma electrónica, en lugar de una representación bidimensional de un libro de texto, se desarrollaron como animaciones. Este ícono en el margen identifica cuándo una animación está disponible para más detalles.

### SITIO DE ASISTENCIA AL INSTRUCTOR

**Manual de soluciones del instructor:** las soluciones completas de todos los problemas de tarea en el texto.

**Galería de imagen:** las ilustraciones y tablas del texto, adecuadas para uso en plantillas de lectura.

**Plantillas de lectura:** notas de lectura desarrolladas por el autor.

Los recursos del instructor sólo están disponibles para los instructores que adopten este libro para su curso. Visite la sección del sitio web para registrarse y obtener una contraseña.

# RECONOCIMIENTOS

Quiero agradecer a un grupo especial de alumnos quienes participaron en la crítica de este texto, los problemas de tarea y el contenido de este libro. Me pareció que si iba a escribir un libro para ayudar a los alumnos, debería involucrar a los alumnos en cada uno de los pasos de esta creación. Fui muy afortunado al tener un grupo dedicado de alumnos de Ingeniería Química, Civil, Eléctrica y Mecánica. Matthew Abdallah, Mike Bell, Dean Dodaro, Donna Johnson, Laura Kuczynski, Sarah Miller, Blanca Ortiz, Kevin Pavon, Jessica Prince, Jennifer Roddy y Jason Worth, todos ellos contribuyeron mucho y sus esfuerzos son apreciados. Quiero agradecer también a los doctores Michael Grady y Will Riddell, quienes ofrecieron una valiosa retroalimentación en las primeras versiones de este manuscrito.

No hay forma de agradecer suficientemente al maravilloso grupo de profesionales de Wiley. Mark Owens, Elle Wagner, Lauren Sapira y Sujin Hong que son un grupo talentoso que nunca se cansó de responder a mis muchas preguntas y proporcionarme la ayuda necesaria. Quiero agradecer a Joe Hayton, mi primer editor, por ayudarme con la concepción de este libro, y mi nueva editora, Jenny Welter, por sus muchas contribuciones y ayudarme a llevarlo con bien hasta el final. Soy increíblemente afortunado de haber trabajado con dos profesionales talentosos y dedicados.

Quiero extender un agradecimiento especial a mi esposa, la doctora Heidi L. Newell, por revisar esmeradamente múltiples borradores del texto y por recordarme constantemente que estaba escribiendo para alumnos de segundo grado en licenciatura.

Finalmente, quiero agradecer a los siguientes revisores:

Marwan Al-Haik, *University of New Mexico*

Philip J. Guichelaar, *Western Michigan University*

Oscar Perales-Perez, *University of Puerto Rico*

Jud Ready, *Georgia Institute of Technology*

John R. Schlup, *Kansas State University*

Chad Ulven, *North Dakota State University*

James Newell

# C O N T E N I D O   B R E V E

<i>Introducción</i>	1
<i>Estructura de los materiales</i>	2
<i>Medición de las propiedades mecánicas</i>	3
<i>Metales</i>	4
<i>Polímeros</i>	5
<i>Materiales cerámicos y de carbono</i>	6
<i>Compuestos</i>	7
<i>Materiales electrónicos y ópticos</i>	8
<i>Biomateriales y materiales biológicos</i>	9

# CONTENIDO

## 1

### *Introducción* 2

---

#### ¿POR QUÉ ESTUDIAR CIENCIA DE LOS MATERIALES? 4

##### 1.1 Generalidades de la Ciencia de los Materiales 4

#### ¿QUÉ PROBLEMAS IMPACTAN LA SELECCIÓN DE LOS MATERIALES Y EL DISEÑO? 4

##### 1.2 Consideraciones de las propiedades para aplicaciones específicas 5

##### 1.3 Impacto de las propiedades de enlace de los materiales 10

##### 1.4 Cambios de las propiedades a través del tiempo 17

##### 1.5 Impacto de la economía en la toma de decisiones 18

##### 1.6 Sustentabilidad e ingeniería verde 18

#### ¿QUÉ ELECCIONES ESTÁN DISPONIBLES? 21

##### 1.7 Clases de materiales 21

### *Estructura de los materiales* 30

---

#### ¿CÓMO ESTÁN ARREGLADOS LOS MATERIALES? 32

##### 2.1 Introducción 32

##### 2.2 Niveles de orden 33

##### 2.3 Parámetros de la red cristalina y factores de paquete atómico 36

##### 2.4 Estimaciones de densidad 40

##### 2.5 Planos cristalográficos 41

##### 2.6 Índices de Miller 43

#### ¿CÓMO SE MIDEN LOS CRISTALES? 45

##### 2.7 Difracción de rayos X 45

##### 2.8 Microscopía 52

#### ¿CÓMO SE FORMAN Y CRECEN LOS CRISTALES? 53

##### 2.9 Nucleación y crecimiento del grano 53

## 2

¿QUÉ TIPOS DE DEFECTOS SE PRESENTAN EN LOS CRISTALES?  
¿QUÉ AFECTAN? 54

2.10 Defectos puntuales 54

2.11 Dislocaciones 55

2.12 Deslizamiento 56

2.13 Trepado de la dislocación 59

¿QUÉ NUEVOS DESARROLLOS SE HAN LOGRADO CON LOS  
CRISTALES Y LAS ESTRUCTURAS DE LOS CRISTALES? 60

2.14 Monocristales y nanocristales 60

# 3

## *Medición de las propiedades mecánicas* 66

---

¿CÓMO SE MIDEN LAS PROPIEDADES? 68

3.1 Normas ASTM 68

¿QUÉ PROPIEDADES SE PUEDEN MEDIR Y QUÉ INDICAN? 69

3.2 Ensayo de tracción 69

3.3 Ensayo de compresión 79

3.4 Ensayo de plegado 80

3.5 Ensayo de dureza 80

3.6 Ensayo de fluencia 83

3.7 Ensayo de impacto 84

¿SE OBTENDRÁ EL MISMO RESULTADO CADA VEZ QUE SE LLEVE  
A CABO UN ENSAYO ESPECÍFICO? 86

3.8 Error y reproducibilidad en las mediciones 86

¿POR QUÉ LOS MATERIALES FALLAN BAJO TENSIÓN? 91

3.9 Fracturas mecánicas 91

¿CÓMO CAMBIAN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS CON EL PASO  
DEL TIEMPO? 94

3.10 Ensayo de fatiga 95

3.11 Estudios de envejecimiento acelerado 96

# 4

## *Metales* 104

---

### ¿CÓMO TRABAJAR CON LOS METALES? 106

4.1 Operaciones de conformado 106

### ¿QUÉ VENTAJAS OFRECEN LAS ALEACIONES? 110

4.2 Aleaciones y diagramas de fase 110

4.3 Acero al carbono 118

4.4 Transiciones de fase 127

4.5 Endurecimiento por edad (endurecimiento por precipitación) 131

4.6 Cobre y sus aleaciones 132

4.7 Aluminio y sus aleaciones 135

### ¿QUÉ LIMITANTES TIENEN LOS METALES? 137

4.8 Corrosión 137

### ¿QUÉ LES SUCEDE A LOS METALES DESPUÉS DE SU VIDA COMERCIAL? 141

4.9 Reciclaje de metales 141

# 5

## *Polímeros* 148

---

### ¿QUÉ SON LOS POLÍMEROS? 150

5.1 Terminología de los polímeros 150

5.2 Tipos de polímeros 153

### ¿CÓMO SE FORMAN LAS CADENAS DE POLÍMEROS? 161

5.3 Polimerización por adición 162

5.4 Polimerización por condensación 163

5.5 Importancia de las distribuciones del peso molecular 165

### ¿QUÉ INFLUYE EN LAS PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS? 167

5.6 Constitución 167

5.7 Configuración 169

5.8 Conformación 173

5.9 Aditivos 176

¿CÓMO SE PROCESAN LOS POLÍMEROS EN PRODUCTOS COMERCIALES? 177

5.10 Procesamiento de polímeros 177

¿QUÉ LES SUCEDE A LOS POLÍMEROS CUANDO SE DESECHAN? 181

5.11 Reciclaje de polímeros 181



## 6

### *Materiales cerámicos y de carbono* 188

---

¿QUÉ SON LOS MATERIALES CERÁMICOS? 190

6.1 Estructuras cristalinas en los cerámicos 190

¿CUÁLES SON LOS USOS INDUSTRIALES DE LOS CERÁMICOS? 198

6.2 Abrasivos 198

6.3 Vidrios 201

6.4 Cementos 204

6.5 Refractarios 209

6.6 Productos estructurales de arcilla 210

6.7 Cerámico blanco 210

6.8 Cerámicos avanzados 212

¿QUÉ LES SUCEDE A LOS MATERIALES CERÁMICOS AL FINAL DE SUS VIDAS ÚTILES? 213

6.9 Reciclaje de materiales cerámicos 213

¿EL GRAFITO ES UN POLÍMERO O UN CERÁMICO? 214

6.10 Grafito 214

¿OTROS MATERIALES DE CARBONO OFRECEN PROPIEDADES INUSUALES? 215

6.11 Diamante 215

6.12 Fibras de carbono 216

6.13 Fullerenos (buckyballs) y nanotubos de carbono 219

## *Compuestos* 224

---

### ¿QUÉ SON LOS MATERIALES COMPUESTOS Y CÓMO SE HACEN? 226

- 7.1 Clases de compuestos 226
- 7.2 Compuestos reforzados con fibras 227
- 7.3 Compuestos de partículas 237
- 7.4 Compuestos laminares 242

### ¿QUÉ LES SUCEDE A LOS COMPUESTOS OBSOLETOS? 243

- 7.5 Reciclaje de materiales compuestos 243

## *Materiales electrónicos y ópticos* 246

---

### ¿CÓMO FLUYEN LOS ELECTRONES A TRAVÉS DE LOS METALES? 248

- 8.1 Conductividad en los metales 248
- 8.2 Resistividad eléctrica 253

### ¿QUÉ SUCEDE CUANDO NO HAY ELECTRONES LIBRES? 254

- 8.3 Aislantes 254
- 8.4 Semiconducción intrínseca 254
- 8.5 Semiconducción extrínseca 256

### ¿CÓMO OPERAN LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS? 258

- 8.6 Diodos 258
- 8.7 Transistores 259
- 8.8 Circuitos integrados 260
- 8.9 Comportamiento dieléctrico y condensadores 261

### ¿QUÉ OTROS COMPORTAMIENTOS ELÉCTRICOS DESPLIEGAN ALGUNOS MATERIALES? 262

- 8.10 Materiales ferroeléctricos y piezoeléctricos 262

¿QUÉ SON LAS PROPIEDADES ÓPTICAS Y POR QUÉ IMPORTAN? 263

8.11 Propiedades ópticas 263

8.12 Aplicaciones de materiales ópticos 267

# 9

## *Biomateriales y materiales biológicos* 272

---

¿QUÉ CLASES DE MATERIALES INTERACTÚAN CON LOS SISTEMAS BIOLÓGICOS? 274

9.1 Biomateriales, materiales biológicos y biocompatibilidad 274

¿QUÉ MATERIALES BIOLÓGICOS PROPORCIONAN SOPORTE ESTRUCTURAL Y QUÉ BIOMATERIALES INTERACTÚAN CON ELLOS O LOS REEMPLAZAN? 275

9.2 Materiales biológicos y biomateriales estructurales 275

¿QUÉ BIOMATERIALES HACEN UNA FUNCIÓN NO ESTRUCTURAL EN EL CUERPO? 285

9.3 Biomateriales funcionales 285

¿CUÁLES CUESTIONES ÉTICAS SON ÚNICAS PARA LOS BIOMATERIALES? 294

9.4 Ética y biomateriales 294

APÉNDICE A: PRINCIPALES PRODUCTORES DE METALES Y POLÍMEROS 299

APÉNDICE B: PROPIEDADES DE LOS PRINCIPALES METALES Y ALEACIONES 303

APÉNDICE C: PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS COMUNES  
EXPLICACIÓN DE LOS SÍMBOLOS INUSUALES  
EN QUÍMICA 309

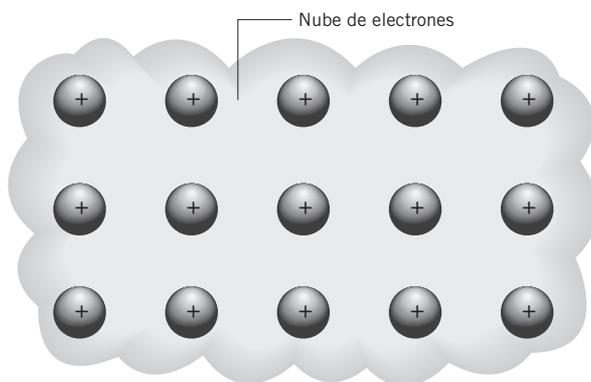
GLOSARIO 311

ÍNDICE 331

# LISTA DE ANIMACIONES

Las ideas clave representadas en forma bidimensional en el libro de texto están desarrolladas como animaciones electrónicas para su mejor comprensión.

En el libro, este ícono  identifica las animaciones que están disponibles para mayor referencia del tópico a ser comentado. Visite el sitio web del libro en [www.alfaomega.virtual.com.mx](http://www.alfaomega.virtual.com.mx) para acceder a estas animaciones.

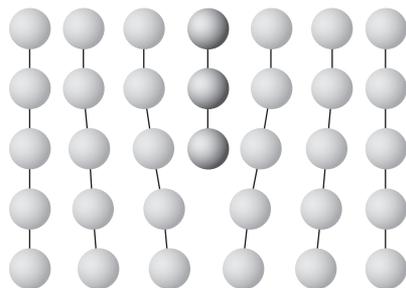


1. FIGURA 1-16 Nube de electrones (página 17)

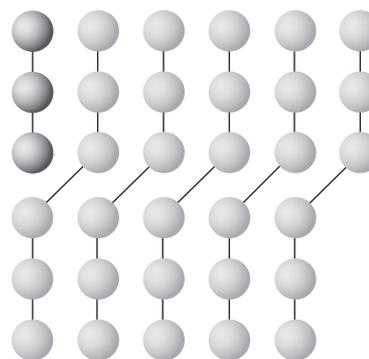


2. Nucleación homogénea que lleva al crecimiento del grano (página 53)

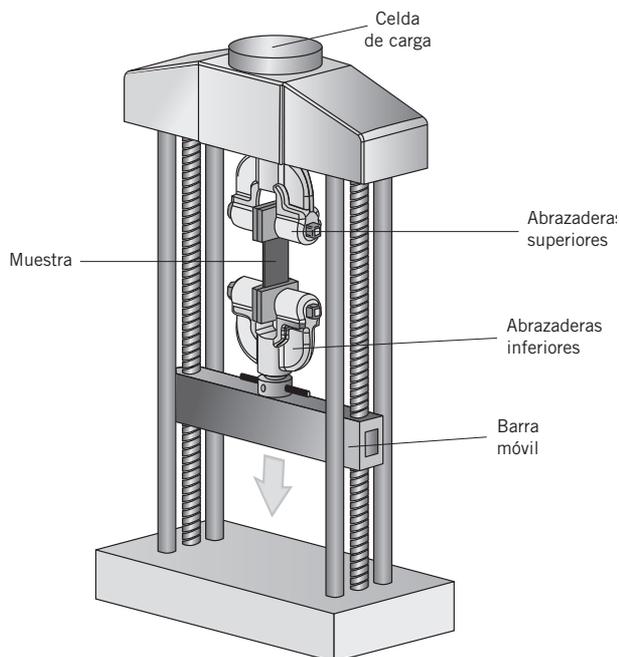
3. Nucleación heterogénea que lleva al crecimiento de grano (página 53)



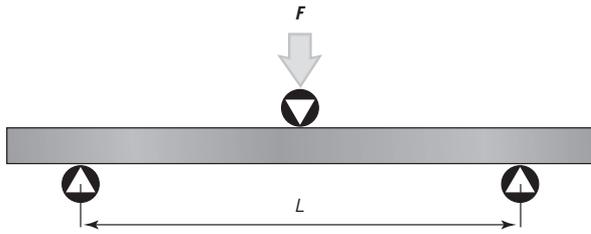
4. FIGURA 2-16 Dislocación de borde (página 56)



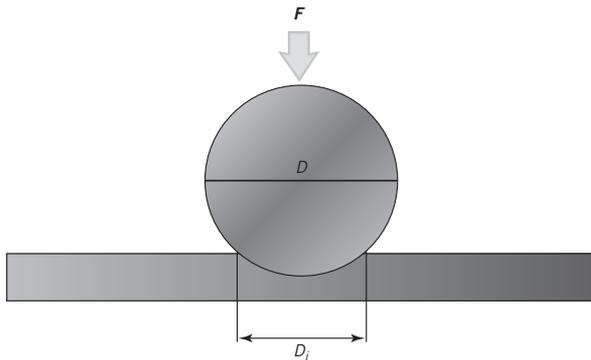
5. FIGURA 2-17 Dislocación de tornillo (página 56)



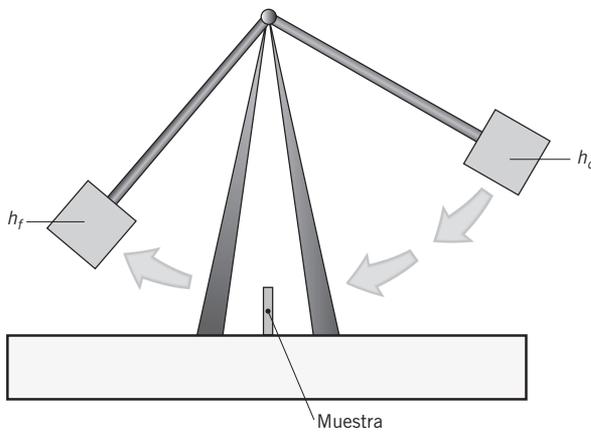
6. FIGURA 3-1 Ensayo de tracción (página 72)



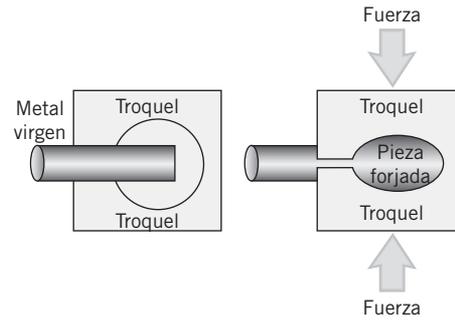
7. FIGURE 3-6 Ensayo de flexión de tres puntos (página 80)



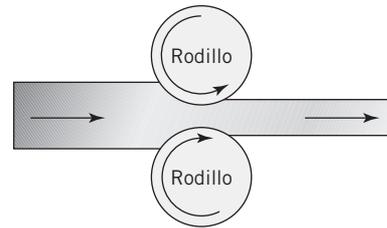
8. FIGURE 3-7 Ensayo Brinell (página 81)



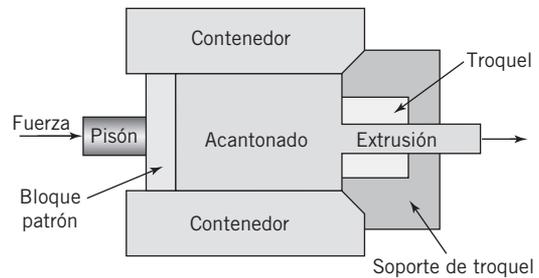
9. FIGURE 3-12 Ensayo Charpy (página 85)



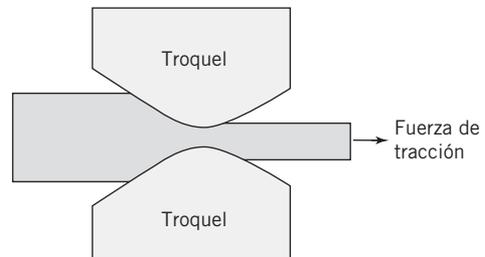
10. TABLE 4-1 Operaciones de conformado: forjado (página 107)



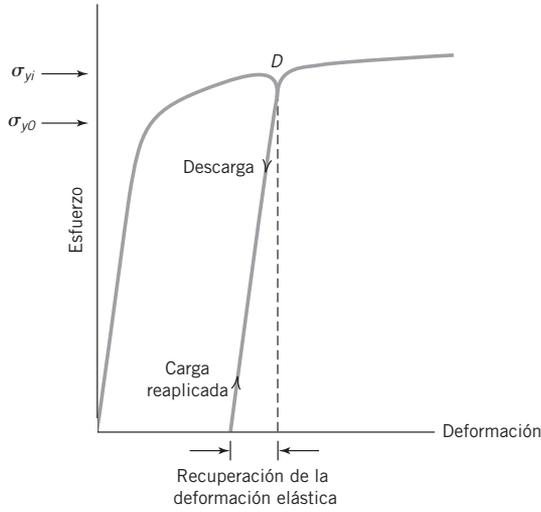
11. TABLE 4-1 Operaciones de conformado: laminado (página 107)



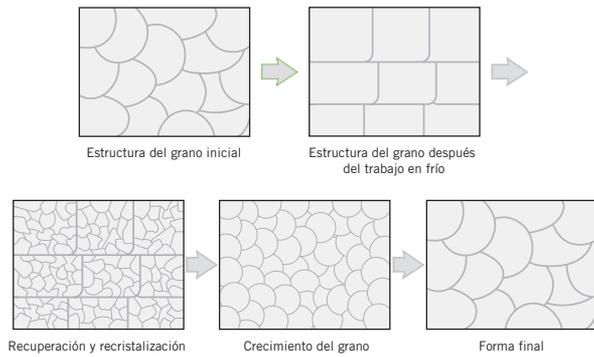
12. TABLE 4-1 Operaciones de conformado: extrusión (page 107)



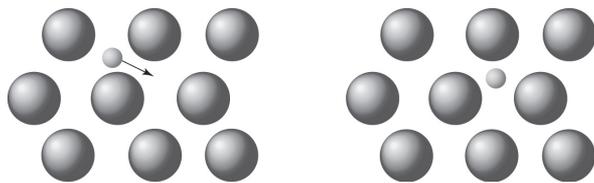
13. TABLE 4-1 Operaciones de conformado: trefilado (página 107)



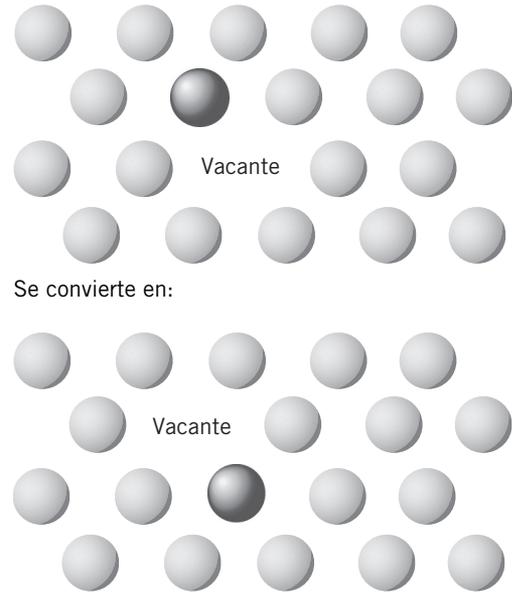
14. FIGURA 4-1 Carga-descarga (página 108)



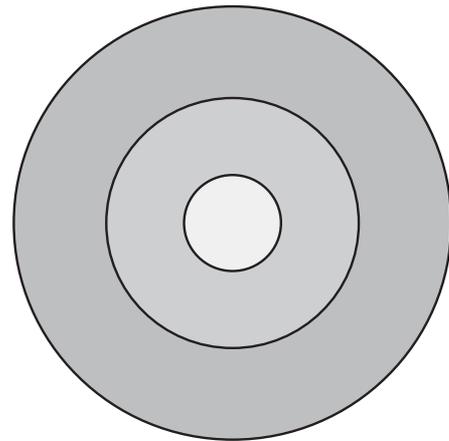
15. FIGURA 4-2 Recuperación (página 109)



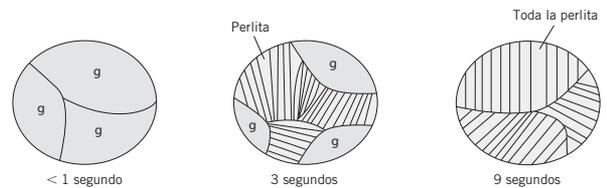
16. FIGURA 4-6 Difusión intersticial (página 115)



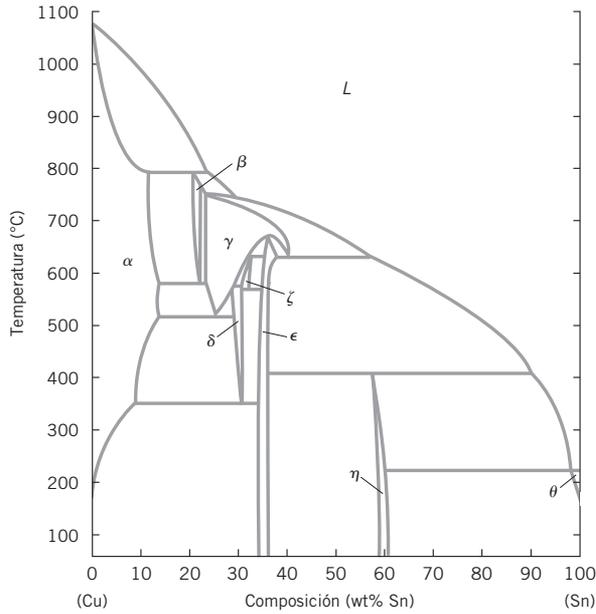
17. FIGURA 4-7 Difusión de la vacante (página 115)



18. FIGURA 4-9 Segregación (página 116)



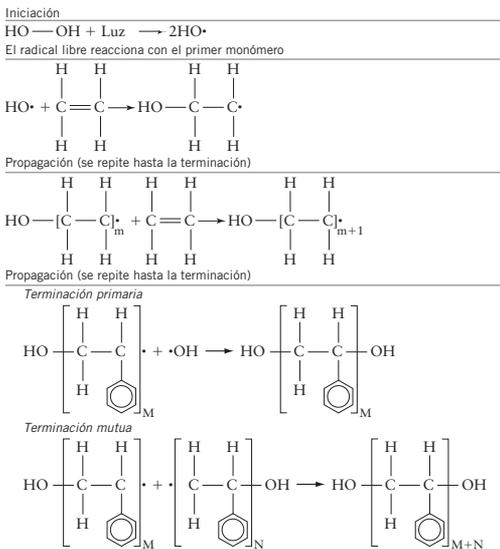
19. FIGURA 4-22 Fase de transformación y crecimiento del grano (página 129)



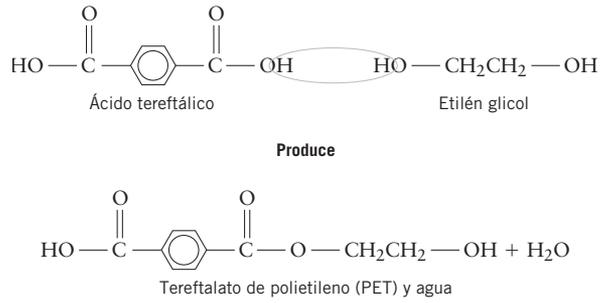
20. FIGURA 4-28 Celda electroquímica (página 134)



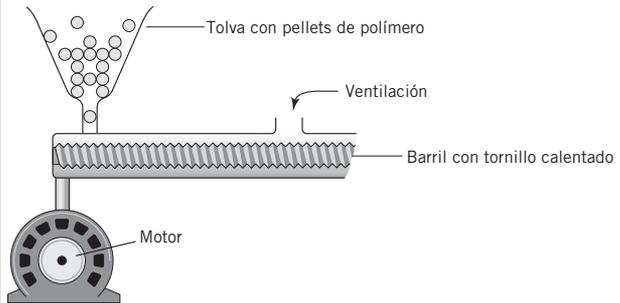
21. Movimiento del polímero cerca de la temperatura de transición vítrea (página 160)



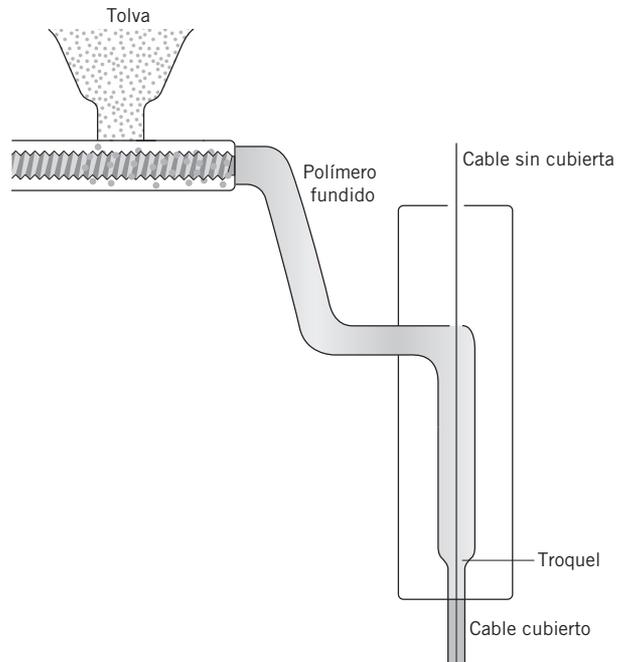
22. FIGURA 5-22 Polimerización por adición (página 162)



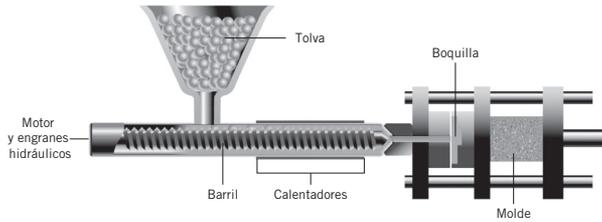
23. FIGURA 5-25 Condensación (página 165)



24. FIGURA 5-34 Extrusor (página 178)



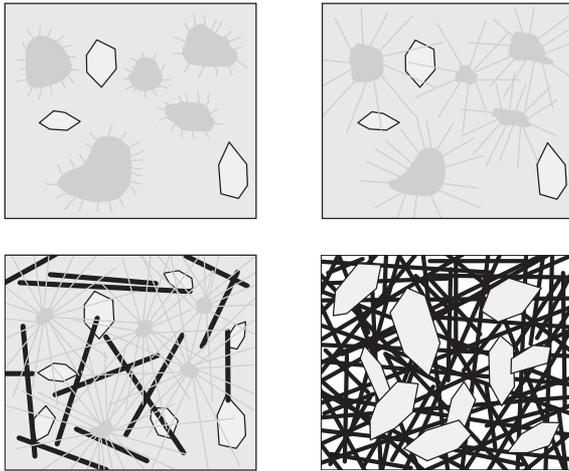
25. FIGURE 5-35 Recubrimiento de un cable (página 178)



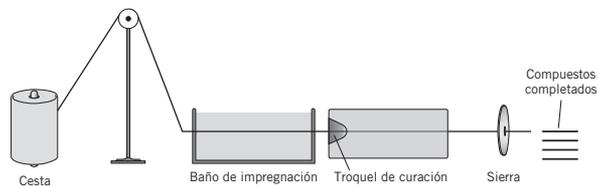
26. FIGURA 5-39 Moldeo por inyección (página 180)



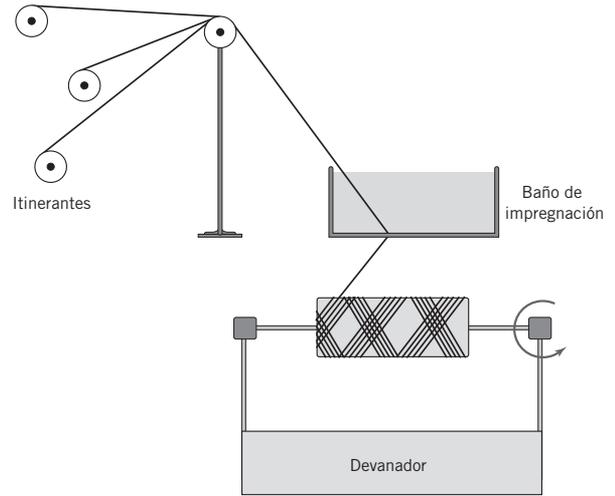
27. FIGURA 6-10 Sinterización (página 200)



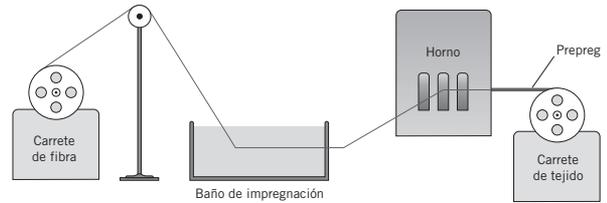
28. FIGURA 6-17 Formación de cemento (página 208)



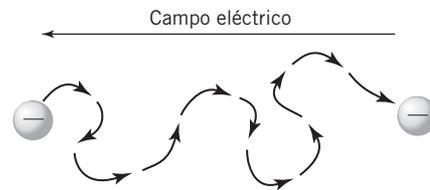
29. FIGURA 7-2 Poltrusión (página 234)



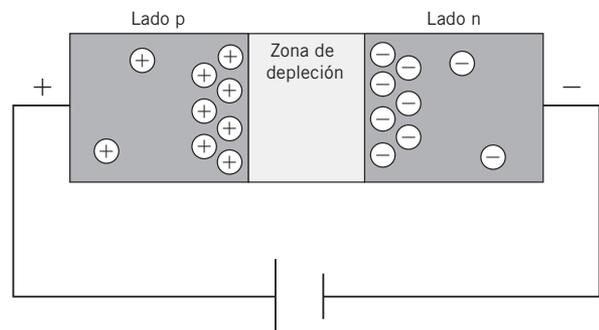
30. FIGURA 7-3 Devanado húmedo de filamentos (página 234)



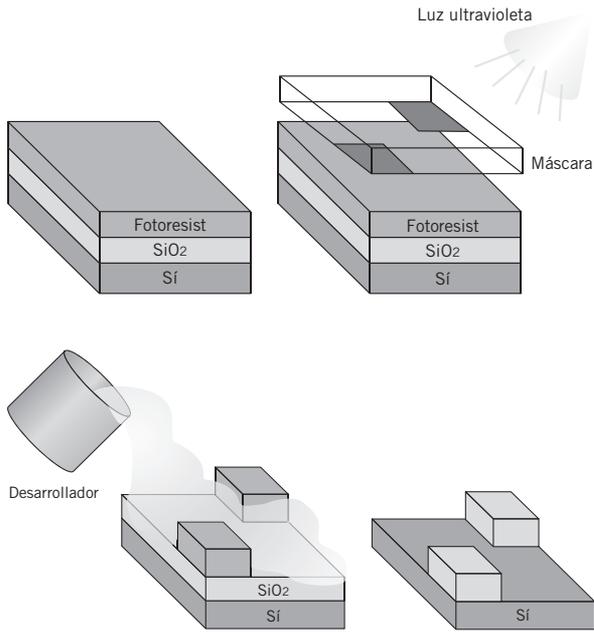
31. FIGURA 7-5 Proceso de preimpregnación (página 235)



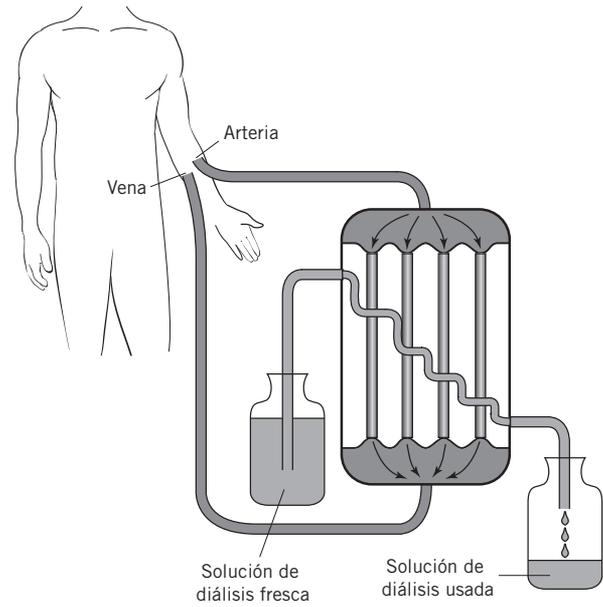
32. FIGURA 8-3 Campo eléctrico (página 251)



33. FIGURA 8-10 Polarización (página 258)



**34.** FIGURA 8-14 Fotoresist (página 261)

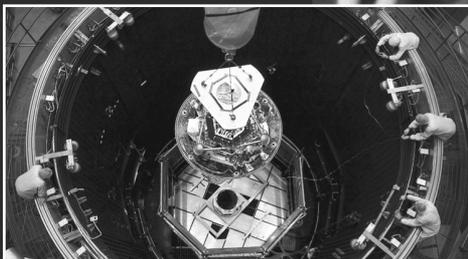


**35.** Figura 9-12 Diálisis (página 286)

# 1

## *Introducción*

*Imágenes de la NASA  
(parte inferior de  
izquierda a derecha):  
Observatorio de la Tierra  
de la NASA, Digital  
Vision/Getty Images;  
Shani Miller/Foto de  
archivo; Digital Vision/  
Getty Images*



# CONTENIDO

*¿Por qué estudiar Ciencia de los Materiales?*

1.1 Generalidades de la Ciencia de los Materiales

*¿Qué problemas impactan la selección de materiales y el diseño?*

1.2 Consideraciones de las propiedades para aplicaciones específicas

1.3 Impacto de las propiedades de enlace de los materiales

1.4 Cambios de las propiedades a través del tiempo

1.5 Impacto de la economía en la toma de decisiones

1.6 Sustentabilidad e ingeniería verde

*¿Qué elecciones están disponibles?*

1.7 Clases de materiales

## Objetivos de aprendizaje

Al finalizar este capítulo, el alumno debe ser capaz de:

- Explicar por qué se debería estudiar ciencia de los materiales.
- Evaluar las propiedades deseables para aplicaciones específicas.
- Explicar el uso y las limitaciones de la evaluación heurística como los diagramas de Ashby.
- Describir el rol de la economía en la selección de materiales.
- Explicar el significado de los cuatro números cuánticos.
- Distinguir entre el enlace primario y el secundario.
- Explicar las diferencias entre enlaces iónico, metálico y covalente y determinar qué tipo de enlace se presentará en dos átomos dados (si se conocen sus electronegatividades).
- Explicar la base física para las fuerzas dipolares, el enlace de hidrógeno y las fuerzas de Van Der Waals.
- Analizar la sustentabilidad de los materiales y el impacto de la ingeniería verde en la toma de decisiones.
- Describir las propiedades fundamentales de la mayoría de los materiales.



## ¿Por qué estudiar Ciencia de los Materiales?

### 1.1 GENERALIDADES DE LA CIENCIA DE LOS MATERIALES

El mayor objetivo de la Ciencia de los Materiales es alentar a los científicos e ingenieros para tomar elecciones informadas respecto del diseño, selección y uso de materiales para aplicaciones específicas. Cuatro principios fundamentales guían el estudio de la Ciencia de los Materiales:

1. Los principios que regulan el comportamiento de los materiales están cimentados en la ciencia y son comprensibles.
2. Las propiedades de un material específico están determinadas por su estructura. El procesamiento puede alterar esa estructura en formas específicas y predecibles.
3. Las propiedades de todos los materiales cambian a través del tiempo con el uso y con la exposición a las condiciones ambientales.
4. Cuando se selecciona un material para una aplicación específica, se deben efectuar las pruebas suficientes y adecuadas para asegurar que el material se conservará idóneo para la aplicación correspondiente durante la vida razonable del producto.

El científico o el ingeniero de materiales debe:

- Comprender las propiedades asociadas con las diversas clases de materiales.
- Saber porqué existen tales propiedades y cómo se pueden alterar para que un material sea más adecuado para una aplicación determinada.
- Ser capaz de medir las propiedades importantes de los materiales y cómo impactarán el desempeño.
- Evaluar las consideraciones económicas que finalmente regulan la mayoría de los asuntos de los materiales.
- Considerar los efectos a largo plazo que producen en el ambiente el uso de un material.

## ¿Qué problemas impactan la selección de los materiales y el diseño?

Si usted está a punto de reemplazar un sistema de tubería de cobre, ¿cómo decide si reemplazarlo por completo con cobre de nuevo, acero inoxidable, PVC o cualquier otro material?, ¿qué hará con la tubería de cobre que está removiendo?, ¿se puede reutilizar en algún otro lugar dentro de la planta?, ¿se puede vender a un centro de reciclaje o a otra planta?, ¿necesitará enterrarlo en un basurero específico? Las respuestas ideales a estas preguntas dependen de una mezcla de propiedades físicas y químicas inherentes del material. Finalmente, las decisiones estarán reguladas por los conocimientos de la persona responsable que toma las decisiones con respecto a esas propiedades y a los factores económicos.

## 1.2 CONSIDERACIONES DE LAS PROPIEDADES PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS

Para tomar una decisión informada en el diseño o la selección de un material, primero se debe saber qué propiedades son importantes para la aplicación específica, al mismo tiempo que se debe reconocer que la lista de propiedades deseadas se puede volver más extensa y más complicada según las necesidades de evolución del producto. Por ejemplo, previo a 1919, la mayoría de los automóviles no tenían parabrisas, lo cual dejaba vulnerable a los conductores respecto a la lluvia, el lodo y objetos que volaran por el camino. Cuando se seleccionó un material para fabricar los parabrisas, los diseñadores de autos pudieron elaborar una lista de propiedades deseables parecida a la siguiente:

1. Debería ser transparente. Obviamente, un parabrisas a través del cual no se puede ver tendría un valor muy poco práctico.
2. Debería ser impermeable al agua. De otra forma, el auto no podría ser conducido en la lluvia.
3. Debería ser lo suficientemente fuerte para resistir una rotura al menor impacto (pequeños pedazos de grava, piedritas, etc.)
4. Debería ser muy económico para no alterar sustancialmente el precio del auto.
5. Debería tolerar temperatura extremas, desde por debajo de cero grados en el invierno (como en Dakota del Norte) hasta los 100° F (38° C) en el verano.

La mayoría de la gente no tendría dificultad al generar esta lista y probablemente identificaría una respuesta sencilla: el vidrio. Para 1929, cerca de 90% de los nuevos automóviles contaban con vidrio. Desafortunadamente, con dificultad se completaba la lista de preguntas antes descrita, y los primeros parabrisas tuvieron problemas. Si alguna vez ha lanzado una moneda a una pecera de cristal, sabe que el vidrio refracta la luz, distorsionando la aparente posición de los objetos. Este problema fue tan significativo que algunos parabrisas terminaban por debajo del nivel de los ojos para que los conductores pudieran ver por encima del vidrio; otros venían en dos partes, así que los conductores podían abrir la parte superior y ver. El auto Franklin de 1920 que se muestra en la figura 1-1 tiene el parabrisas dividido y no tiene paneles laterales de vidrio.

En 1928, Pittsburgh Plate Glass (ahora PPG Industries) desarrolló el *proceso Pittsburgh* que hacía que el parabrisas fuera más barato y reducía dramáticamente la distorsión. Este proceso resultó de grupos de científicos e ingenieros en materiales que aplicaron su conocimiento de la refracción y la estructura del vidrio para diseñar un nuevo producto que podía reducir o eliminar el anterior problema.

Si la gente manejara con seguridad todo el tiempo, el vidrio sencillo hubiera sido una respuesta buena y suficiente. Lamentablemente, el vidrio tiende a quebrarse en filosas astillas al impacto. Durante los accidentes, los conductores generalmente se cortaban con estas astillas o, incluso peor, eran lanzados a través del parabrisas. Los ingenieros resolvieron este problema al crear láminas de vidrio en donde intercalaban capas de película entre estas hojas delgadas de vidrio como se muestra en la figura 1-2. Este fue el famoso vidrio de seguridad que redujo las cortaduras y las eyecciones de los pasajeros. Para 1966, el vidrio de seguridad fue obligatorio en todos los autos fabricados en Estados Unidos.

### | Proceso Pittsburgh |

Proceso para fabricar vidrio desarrollado en 1928 para reducir su costo y la distorsión.



FIGURA 1-1 Franklin 1920 con parabrisas dividido

*Cortesía de James Newell*

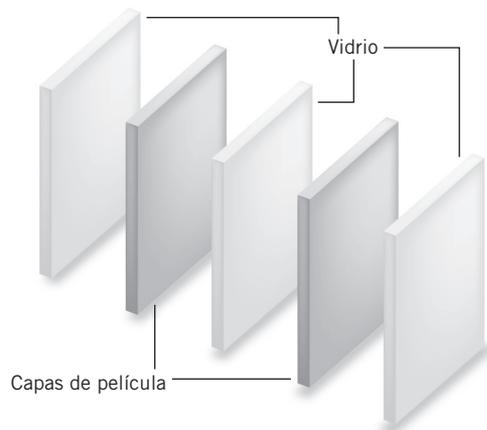


FIGURA 1-2 Esquema del vidrio de seguridad para parabrisas



FIGURA 1-3 Parabrisas curvado y polarizado en un Acura moderno

*Cortesía de James Newell*

Los científicos e ingenieros continuaron trabajando conjuntamente para mejorar la dureza y la calidad del vidrio, pero los fabricantes de autos les proporcionaron nuevas listas de las propiedades deseadas. Por ejemplo, los diseñadores de autos solicitaron paneles curvos de vidrio para los parabrisas y paneles laterales para mejorar la aerodinámica y la apariencia visual de los autos. Hasta 1934, el vidrio se producía en hojas planas. Los parabrisas curvos aparecieron por primera vez en 1934, pero no fue sino hasta finales de los años cincuenta que se desarrolló un proceso para hacer las ventanas laterales curvas más accesibles en precio, puesto que eran más pequeñas y menos uniformes en forma que los parabrisas. Las mejoras modernas incluyen vidrio de seguridad templado que se rompe en fragmentos regulares para reducir el daño así como el polarizado que permite a los conductores ver mejor mientras se reduce el reflejo y proporciona algo de privacidad como en el auto de la figura 1-3.

Por cada una de las mejoras que ocurría, los científicos e ingenieros necesitaron entender qué características del vidrio resultaron en propiedades deseable e indeseables, y cómo alterar la estructura del material para mejorar su adaptabilidad para el producto. El desarrollar este entendimiento es el punto esencial de la Ciencia de los Materiales: encontrar la necesidad, elegir el material adecuado y utilizar los conocimientos de ese material para alterar sus propiedades y adaptarlo a los requerimientos de la aplicación específica, que será diferente de las otras aplicaciones y que puede cambiar con el tiempo.

Considere otro ejemplo más moderno. El transbordador de la figura 1-4 cuenta con un sistema de protección térmica para proteger a los astronautas del calor al reingresar a la atmósfera de la Tierra. Cuando se revisaron los materiales del parabrisas, se observó que debían mantener sus propiedades en un rango de temperaturas un poco más alto a los 100° F. Durante el reingreso de la nave espacial a la Tierra aquella mantiene una velocidad de 17000 millas por hora. En el espacio, los materiales externos de la nave rápidamente pasan de temperaturas de cerca del cero absoluto a tan altas como los 3000° F.

Las losetas cerámicas a base de sílice negro altamente avanzado cubren la mayoría de la superficie de la nave y es complementada con coberturas aislantes y una segunda capa de losetas de cerámica blanca. Estos materiales proporcionan un excelente aislamiento y son ligeros, pero no proporcionan protección completa por sí solos. Al reingresar a la atmósfera terrestre, la punta de la nave y los bordes principales de las alas experimentan más calor que las otras partes. Para estas áreas, los compuestos de carbono-carbono altamente especializados



FIGURA 1-4 Transbordador espacial

*Imágenes de la NASA*

se utilizan por su capacidad única para conducir el calor en una dirección y aislarlo en otra. Estos compuestos protegen la cabina del calor mientras lo conducen alejándolo de los bordes principales de la nave.

Este sistema de protección térmica tardó años en desarrollarse, y los científicos continuamente tratan de mejorarlo. Algunos investigadores han examinado el uso de losetas metálicas especializadas, pero debido a que su peso es mayor han limitado su aplicación. Otros científicos continúan examinando las combinaciones de cerámicas avanzadas para mejorar el sistema existente.

Ya sea que se trate de algo tan común como los parabrisas o tan avanzado como un transbordador espacial, el rol de los científicos e ingenieros de materiales es fundamentalmente el mismo: examinar las propiedades deseadas para una aplicación, elegir el mejor material disponible y aplicar su conocimiento de la estructura y procesamiento de los materiales para hacerle las mejoras necesarias. Los retos específicos varían con cada aplicación. El peso es el factor más importante que el costo en lo que respecta a un transbordador espacial ya que debe escapar de la fuerza gravitacional de la Tierra, pero mucho menos en lo que se refiere a un automóvil, el cual debe permanecer suficientemente accesible para que la gente pueda adquirirlo. El desecho y/o el reciclaje son asuntos menos importantes para el transbordador espacial ya que sólo hay unas cuantas; estos factores se vuelven importantes cuando se consideran millones de autos que actualmente circulan.

El rango de materiales disponibles es enorme, y no es práctico efectuar un análisis detallado de cada uno de los materiales posibles para cada aplicación.