

# Capítulo 1 Introducción



© iStockphoto/Mark Oleksiy



© blickwinkel/Alamy



© iStockphoto/Jill Chen

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).



© iStockphoto/Mark Oleksiy



© blickwinkel/Alamy

## 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).<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Las 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.<sup>2</sup> 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.

<sup>2</sup>A 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 procesamiento 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.

Por último y, probablemente, un factor predominante sea el de la economía: ¿Cuál será el coste del producto terminado? Puede darse el caso de que un material presente el conjunto ideal de propiedades, pero que sea prohibitivamente caro. Aquí, de nuevo, es inevitable considerar algún compromiso. En el coste de una pieza terminada también se incluyen gastos asociados a la fabricación para obtener la forma deseada.

Cuanto más familiarizado esté un ingeniero o un científico con las distintas características y relaciones estructura-propiedad, así como con las técnicas del procesado de materiales, más competente y seguro se sentirá para hacer elecciones sensatas de materiales basándose en esos criterios.

## C A S O D E E S T U D I O

### Rotura de los barcos Liberty

El siguiente caso ilustra una labor que la ciencia e ingeniería de materiales debe asumir en materia de rendimiento de materiales: analizar los fallos mecánicos, determinar sus causas y proponer medidas adecuadas para evitar futuros incidentes.

El fracaso de muchos de los barcos Liberty de la Segunda Guerra Mundial<sup>3</sup> es un ejemplo bien conocido y dramático de la fractura frágil de acero que se esperaba que fuese dúctil.<sup>4</sup> Algunos de los primeros buques experimentaron daños estructurales cuando se desarrollaron grietas en sus cubiertas y cascos. Tres de ellos se partieron de manera catastrófica por la mitad cuando las grietas formadas crecieron hasta extremos críticos y luego se propagaron rápidamente por completo alrededor de las cinchas de los barcos. La Figura 1.3 muestra una de las naves que se fracturó el día después de su botadura.

Las investigaciones posteriores concluyeron que uno o más de los siguientes factores contribuyeron a cada uno de los fallos.<sup>5</sup>

- Cuando algunas aleaciones de metales, normalmente dúctiles, se enfrían hasta temperaturas relativamente bajas, se convierten en susceptibles de presentar fractura frágil, ya que experimentan una transición de dúctil a frágil tras el enfriamiento a través de un intervalo crítico de temperaturas. Las naves Liberty se construyeron con un acero que experimentó una transición dúctil-frágil. Algunos de ellos fueron des-

tinados a las frías aguas del Atlántico Norte, donde el metal dúctil experimentó transición y presentó fractura frágil cuando las temperaturas cayeron por debajo de la temperatura de transición.<sup>6</sup>

- Las esquinas de las trampillas de acceso eran cuadradas; estos rincones actuaron como puntos de concentración de esfuerzos en los que se podían formar grietas.
- Los submarinos alemanes hundían los buques de carga más rápidamente de lo que podían ser reemplazados utilizando las técnicas de construcción existentes. En consecuencia, se hizo necesario revolucionar los métodos de construcción para construir más rápidamente y en mayor número los buques de carga. Esto se logró utilizando hojas de acero prefabricadas que se ensamblaban por soldadura en lugar de hacerlo por el método tradicional de remachado. Desafortunadamente, las grietas que se generaron en las estructuras soldadas pudieron propagar sin obstáculos a lo largo de grandes distancias, lo que pudo conducir a una falla catastrófica. En una estructura remachada, en cambio, una grieta hubiera dejado de propagar una vez que hubiese alcanzado el borde de la lámina de acero.
- Operarios inexpertos introdujeron defectos de soldadura y *discontinuidades* (es decir, lugares preferentes de formación de grietas).

<sup>3</sup>Durante la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos fabricó en serie 2710 buques de carga Liberty para suministrar alimentos y materiales a los combatientes en Europa.

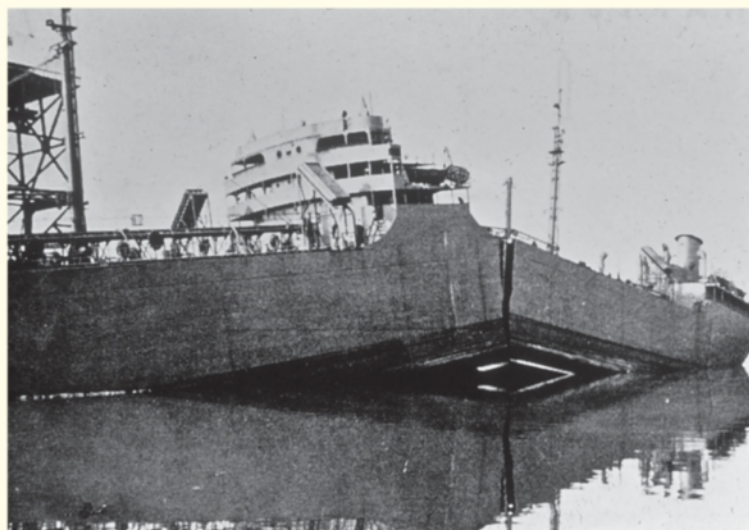
<sup>4</sup>Los metales dúctiles fallan después de presentar relativamente grandes grados de deformación permanente; sin embargo, la fractura frágil de materiales no va acompañada por ninguna, o muy poca, deformación permanente. Las fracturas frágiles pueden ocurrir muy repentinamente como consecuencia de grietas que se extienden rápidamente; la propagación de grietas suele ser mucho más lenta en los materiales dúctiles, con lo que la fractura se produce finalmente tras un tiempo. Por estas razones se prefiere, generalmente, el modo de fractura dúctil. Los conceptos de fractura dúctil y fractura frágil se discuten en las Secciones 10.3 y 10.4.

<sup>5</sup>Desde la Sección 10.2 a la 10.6 se discutirán diversos aspectos de fallos en materiales.

<sup>6</sup>Este fenómeno de transición dúctil-frágil, así como las técnicas que se utilizan para medir y aumentar el rango de temperatura crítica, se discuten en la Sección 10.6.

(continúa)





**Figura 1.3** El buque Liberty S.S. Schenectady, que en 1943 fracasó antes de salir del astillero.

(Reproducción autorizada por Earl R. Parker, *Brittle Behavior of Engineering Structures*, National Academy of Sciences, National Research Council, John Wiley & Sons, New York, 1957).

Las medidas adoptadas para corregir estos problemas incluyen las siguientes consideraciones:

- La reducción de la temperatura de transición dúctil-frágil del acero a un nivel aceptable mediante la mejora de la calidad del acero (p. ej., la reducción del contenido de impurezas de azufre y de fósforo).
- El redondeo de las esquinas de las escotillas, mediante la soldadura de bandas de refuerzo curvadas.<sup>7</sup>
- Instalación de dispositivos retenedores de fisuras, como correas remachadas y fuertes cordones de soldadura que puedan detener la propagación de grietas.
- La mejora de la técnica de soldadura y el establecimiento de códigos de soldadura.

A pesar de estos fracasos, el programa de buques Liberty fue considerado un éxito por varias razones, principalmente porque los barcos que sobrevivieron al fracaso fueron capaces de abastecer a las Fuerzas Aliadas en el escenario de operaciones, lo que, con toda probabilidad, acortó la guerra. Además, se desarrollaron aceros estructurales con resistencias a la catastrófica fractura frágil muy mejoradas. Los análisis detallados de estos fracasos avanzaron la comprensión de la formación y el crecimiento de grietas que, en última instancia, se ha convertido en la disciplina Mecánica de Fractura.

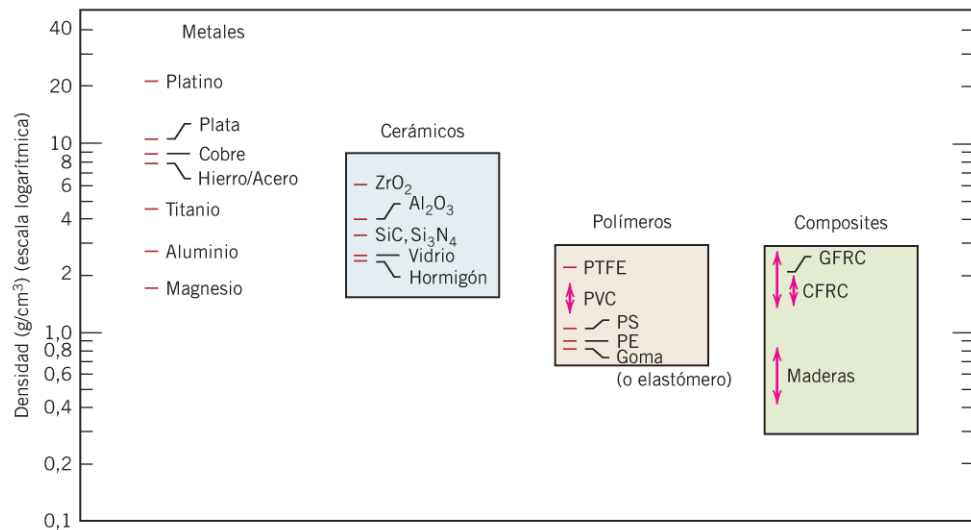
<sup>7</sup>Se puede comprobar que las esquinas de ventanas y puertas de todas las estructuras marinas y de aviones son hoy en día redondeadas.

## 1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES

Los materiales sólidos han sido convenientemente agrupados en tres categorías básicas: metales, cerámicos y polímeros, siguiendo un esquema basado principalmente en la composición química y en la estructura atómica. La mayoría de los materiales encajan en un grupo u otro. Además de estos, están los materiales compuestos que se han diseñado a partir de combinaciones de dos o más materiales diferentes. A continuación se ofrece una breve explicación de estas clasificaciones de materiales y de sus características representativas. Otra categoría es la de materiales avanzados, que son aquellos que se destinan a aplicaciones de alta tecnología, tales como semiconductores, biomateriales, materiales inteligentes y materiales de nanoingeniería; estos materiales se exponen en la Sección 1.5.

**Figura 1.4**

Gráfico de barras que muestra los valores de densidad, a temperatura ambiente, para diversos materiales metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos (composites).

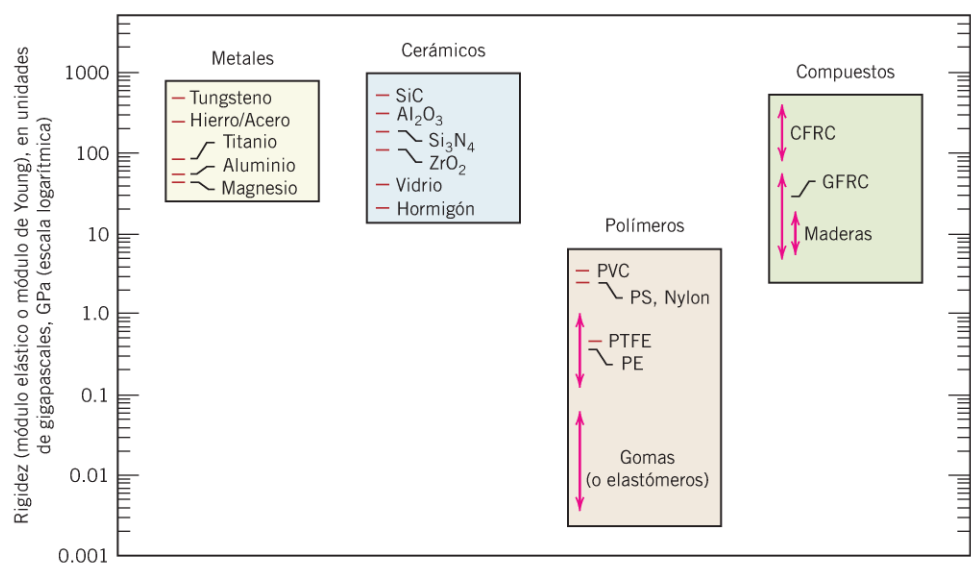


### Metales

Los *metales* se componen, mayoritariamente, de uno o más elementos metálicos (p. ej., hierro, aluminio, cobre, titanio, oro o níquel), aunque a menudo contienen también elementos no metálicos (como, por ejemplo, carbono, nitrógeno, oxígeno) en proporciones relativamente pequeñas.<sup>8</sup> Los metales y aleaciones metálicas presentan una distribución muy ordenada de sus átomos (como se explica en el Capítulo 3) y son relativamente densos en comparación con los cerámicos y polímeros (Figura 1.4). Con respecto a las características mecánicas, estos materiales son relativamente rígidos (Figura 1.5) y resistentes (Figura 1.6), aunque dúctiles (es decir, que pueden desarrollar grandes deformaciones sin romperse), y son resistentes a la fractura (Figura 1.7), lo que justifica su uso generalizado en aplicaciones estructurales. Los materiales metálicos presentan un gran número de electrones no localizados (es decir, que no están unidos a ningún átomo en particular). Muchas propiedades de los metales son directamente atribuibles a estos electrones. Así, por ejemplo, los metales son muy buenos

**Figura 1.5**

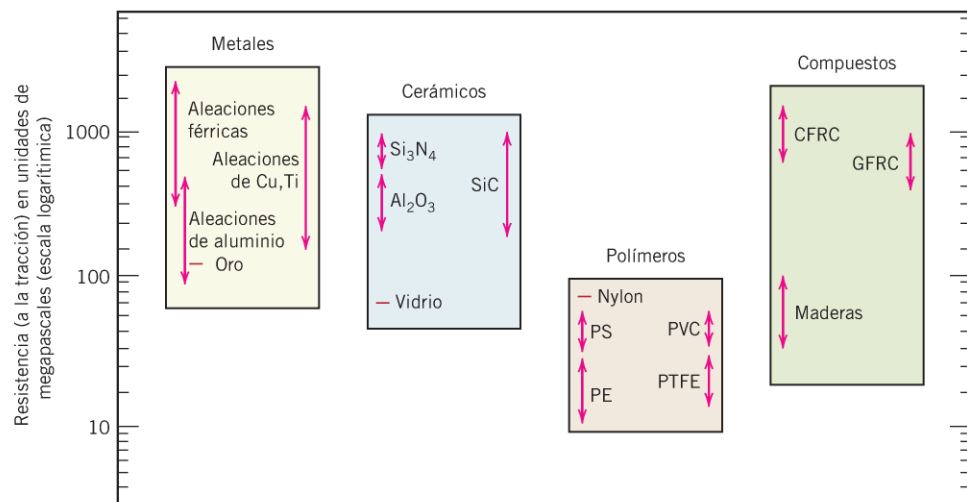
Gráfico de barras que recoge valores de rigidez (es decir, módulo elástico), a temperatura ambiente, para varios materiales metálicos, cerámicos, polímeros, y compuestos (composites).



<sup>8</sup>El término “aleación metálica” se refiere a una sustancia metálica que se compone de dos o más elementos, de los cuales uno de ellos (mayoritario) es metálico.

**Figura 1.6**

Gráfico de barras que recoge valores de resistencia a la tracción, a temperatura ambiente, para diversos materiales metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos (composites).



conductores de la electricidad (Figura 1.8) y del calor, y no son transparentes a la luz visible: una superficie metálica pulida tiene un aspecto brillante. Además, algunos metales (como Fe, Co y Ni) poseen propiedades magnéticas muy apreciadas.

En la Figura 1.9 se muestran varios objetos comunes y de uso habitual que están fabricados con materiales metálicos. La clasificación y aplicaciones de los metales y sus aleaciones se tratarán en el Capítulo 13.

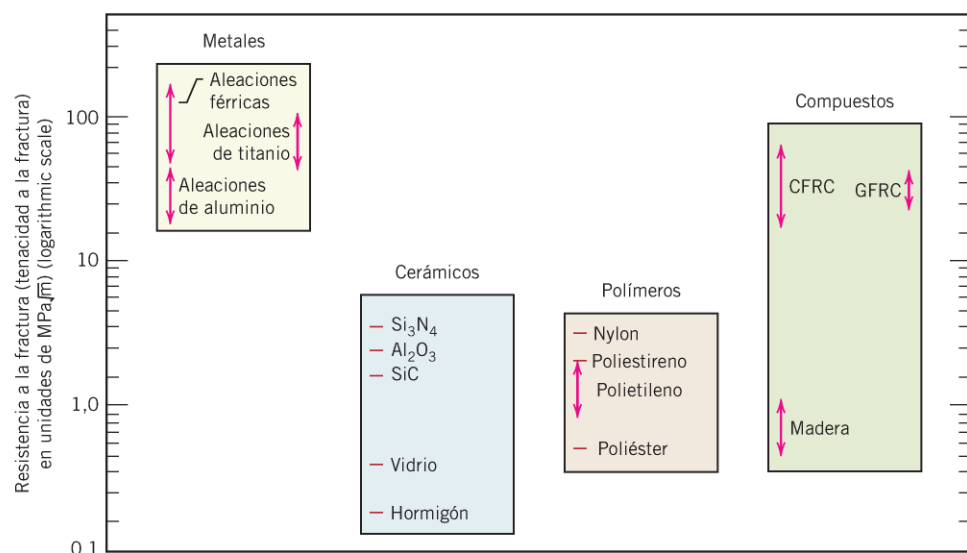
### Cerámicos

Los *materiales cerámicos* se componen de elementos metálicos y no metálicos, siendo los óxidos, nitruros y carburos las combinaciones más frecuentes. Así, por ejemplo, los materiales cerámicos comunes incluyen óxido de aluminio (o *alúmina*,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), dióxido de silicio (o *silice*,  $\text{SiO}_2$ ), carburo de silicio ( $\text{SiC}$ ), nitruro de silicio ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), y, además, todo aquello que se conoce como *cerámicos tradicionales*: compuestos de minerales de arcilla (p. ej., porcelana), así como cemento y vidrio. En cuanto a su comportamiento mecánico, los materiales cerámicos presentan valores de rigidez y resistencia comparables a los de los metales (Figuras 1.5 y 1.6). Además, son típicamente materiales de elevada dureza. Los materiales cerámicos han tenido tradicionalmente valores de fragilidad extrema (falta de ductilidad) y una elevada susceptibilidad a la fractura (Figura 1.7). Sin embargo, se han diseñado algunos materiales cerámicos

**Figura 1.7**

Gráfico de barras de resistencia a la fractura (tenacidad a fractura) a temperatura ambiente para diversos materiales metálicos, cerámicos, polímeros y compuestos (composites).

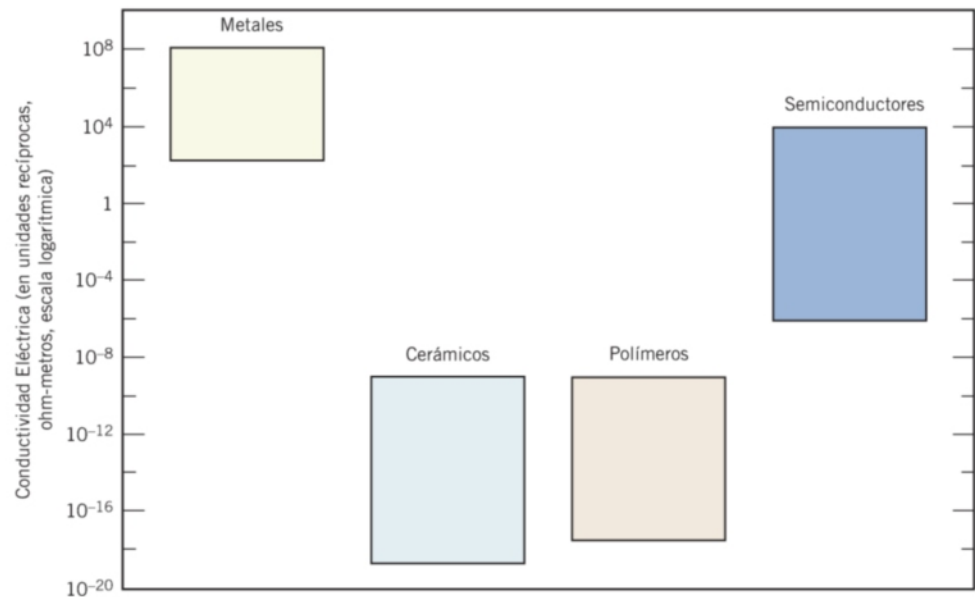
(De *Engineering Materials 1: An Introduction to Properties, Applications and Design*, tercera edición, M. F. Ashby y D. R. H. Jones, páginas 177 y 178 Copyright 2005, con permiso de Elsevier.)





**Figura 1.8**

Gráfico de barras de intervalos de conductividad eléctrica a temperatura ambiente para materiales metálicos, cerámicos, polímeros y semiconductores.



nuevos que presentan una mejor resistencia a la fractura y se utilizan para fabricar utensilios de cocina, cuberterías e, incluso, piezas de motores de automóvil. Además, los materiales cerámicos son típicamente aislantes del calor y la electricidad, dado que tienen bajos valores de conductividad (Figura 1.8) y son más resistentes a temperaturas elevadas y a ambientes agresivos que los metales y polímeros. Con respecto a sus características ópticas, los cerámicos pueden ser transparentes, translúcidos u opacos (Figura 1.2), y algunos óxidos cerámicos (como, por ejemplo,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pueden presentar comportamiento magnético.

En la Figura 1.10 se muestran varios objetos cerámicos comunes. Las características, los tipos y las aplicaciones de esta clase de materiales también se comentan en el Capítulo 14.

### Polímeros

Los materiales polímeros incluyen plásticos comunes y cauchos o gomas. Muchos de ellos son compuestos orgánicos, con base química de carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos (como O, N y Si). Por otro lado, presentan estructuras moleculares muy grandes, a menudo en forma de cadenas, con una estructura principal de átomos de carbono. Algunos polímeros comunes y familiares son polietileno (PE), nylon, policloruro de vinilo (PVC), policarbonato (PC), poliestireno (PS) y gomas de silicona. Estos materiales suelen tener densidades bajas (Figura 1.4) y características mecánicas que, generalmente, son diferentes a las de materiales cerámicos y metálicos, en tanto que no son ni tan rígidos ni tan resistentes



**Figura 1.9** Objetos de uso común fabricados con materiales metálicos. De izquierda a derecha: cubiertos (tenedor y cuchillo), tijeras, monedas, engranaje, alianza, tuerca y tornillo.

**Figura 1.10** Objetos de uso común elaborados con materiales cerámicos: tijeras, taza de porcelana, ladrillo, baldosa y jarrón de vidrio.



© William D. Callister, Jr.

(Figuras 1.5 y 1.6). Sin embargo, gracias a estas bajas densidades, muchas veces sus valores de rigidez y resistencia específicas (relativas a la densidad) son comparables a las de metales y cerámicos. Además, muchos polímeros son extremadamente dúctiles y flexibles (plásticos), lo que significa que pueden adoptar formas complejas con relativa facilidad. Generalmente son materiales químicamente inertes en un gran número de entornos y una desventaja importante de los polímeros es su tendencia a ablandarse y/o descomponerse a temperaturas moderadas, lo que, en ocasiones, limita su uso. Por último, poseen valores muy bajos de conductividad eléctrica y no son magnéticos (Fig. 1.8).

La Figura 1.11 muestra diversos artículos, fabricados con materiales plásticos, que resultan familiares para la lectura. Los capítulos 5 y 15 están dedicados a las estructuras, propiedades, aplicaciones, y procesamiento de materiales polímeros.

**Figura 1.11** Diversos objetos de uso común de plástico: cubiertos (cuchara, tenedor, cuchillo), bolas de billar, casco de bicicleta, dados, rueda de cortador de césped (estructura de plástico con neumático de caucho) y envase.



© William D. Callister, Jr.

## CASO DE ESTUDIO

## Envases de bebidas gaseosas

Un elemento de uso común que presenta interesantes requisitos de materiales sería un envase para bebidas carbonatadas. El material utilizado para esta aplicación debe satisfacer las siguientes restricciones: (1) proporcionar una barrera al paso de dióxido de carbono, que está bajo presión en el recipiente; (2) ser no tóxico, no reactivo con la bebida, y, preferiblemente, reciclable; (3) ser relativamente fuerte y resistir, sin dañarse, una caída desde una altura moderada, lleno de bebida; (4) ser económico, incluyendo los costes de fabricación de la forma final; (5) ser transparente, conservando claridad óptica; y (6) poderse fabricar en diferentes colores y/o adornados con etiquetas decorativas.

Para fabricar envases de bebidas carbónicas se utilizan materiales de los tres grupos básicos: metal (aluminio, acero), cerámica (vidrio) y polímero (poliéster) (véanse las imágenes de la portada del capítulo). Todos estos materiales cumplen los requisitos de que no son tóxicos y no son reactivos con las bebidas. Además, cada material tiene sus pros y

sus contras. Por ejemplo, una aleación de aluminio es relativamente fuerte (aunque se abolla fácilmente), representa una buena barrera a la difusión de dióxido de carbono, es fácilmente reciclable, permite enfriar la bebida rápidamente y permite el pintado de etiquetas en su superficie. Sin embargo, las latas son ópticamente opacas y relativamente caras de producir. El vidrio es impermeable al paso de dióxido de carbono, es un material relativamente barato y puede ser reciclado, pero se agrieta y fractura con facilidad, además de que las botellas de vidrio son relativamente pesadas. Así, se ha de considerar que el plástico es relativamente fuerte, puede ser ópticamente transparente, es barato y ligero y es reciclable, aunque no sea tan impermeable al paso de dióxido de carbono como el aluminio y el vidrio. Por ejemplo, se puede comprobar que las bebidas carbónicas en envases de aluminio y vidrio conservan el gas durante períodos largos, mientras que en botellas de plástico de dos litros la bebida se desgasifica en poco tiempo.

## Materiales compuestos o composites

Un *material compuesto*, o *composite*, se compone de dos (o más) materiales individuales que provienen de las categorías previamente comentadas: metales, cerámicas y polímeros. El objetivo del diseño de un material compuesto es lograr una combinación de propiedades que no se aprecia en cualquier material individual y también para incorporar las mejores características de cada uno de los materiales componentes. Un gran número de compuestos están constituidos por diferentes combinaciones de metales, cerámicas y polímeros. Además, algunos materiales de origen natural son materiales compuestos, por ejemplo, madera y hueso. Sin embargo, la mayoría de los que se consideran actualmente son compuestos sintéticos (elaborados artificialmente).

Uno de los compuestos más comunes y conocidos es el que se fabrica con fibra de vidrio, incorporada dentro de un material polimérico (normalmente una resina epoxi o de poliéster).<sup>9</sup> Las fibras de vidrio son relativamente resistentes y rígidas, mientras que el polímero es más flexible. Así, el producto resultante es relativamente rígido, resistente (Figuras 1.5 y 1.6) y flexible, además de presentar valores bajos de densidad (Figura 1.4).

Otro material tecnológicamente importante es el que se obtiene reforzando una matriz de polímero con fibra de carbono (CFRP, *Carbon Fiber Reinforced Polymer*). Estos materiales son más rígidos y más resistentes que los materiales reforzados con fibra de vidrio (Figuras 1.5 y 1.6) pero más caros. Los *composites* CFRP se utilizan en numerosas aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales, así como en equipamiento deportivo de alta tecnología (p. ej., bicicletas, palos de golf, raquetas de tenis, esquís/tablas de snowboard) y recientemente en parachoques de automóviles. El fuselaje del nuevo Boeing 787 está hecho principalmente de compuestos CFRP.

El capítulo 16 está dedicado a la discusión de los materiales compuestos.

<sup>9</sup>Los materiales compuestos con fibra de vidrio se conocen como “Fiberglass” o GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*).



## 1.5 MATERIALES AVANZADOS

Los *materiales avanzados* son materiales de alta tecnología destinados a aplicaciones especiales. Por *alta tecnología*, se entiende dispositivos o productos que funcionen utilizando principios relativamente complejos y sofisticados, incluyendo equipos electrónicos (cámaras de vídeo, reproductores de CD/DVD), ordenadores, sistemas de fibra óptica, naves espaciales, aviones y cohetes militares. Estos materiales avanzados son típicamente materiales tradicionales cuyas propiedades se han mejorado, aunque también se encuentran productos de nuevo desarrollo, como materiales de alto rendimiento. Por otra parte, incluyen materiales de todo tipo (metales, cerámicas, polímeros) y suelen ser caros. Los materiales avanzados incluyen semiconductores, biomateriales, y lo que se denominan *materiales del futuro* (es decir, materiales inteligentes y materiales de nanoingeniería), que se presentan a continuación. Las propiedades y aplicaciones de algunos de estos materiales avanzados, como, por ejemplo, los materiales que se utilizan para los láseres, circuitos integrados, almacenamiento de información magnética, pantallas de cristal líquido (LCD) y de fibra óptica, también se comentan en los capítulos siguientes.

### Semiconductores

Los *semiconductores* tienen propiedades eléctricas intermedias entre las de conductores eléctricos (materiales metálicos) y aislantes (cerámicos y polímeros), véase la Figura 1.8. Además, las características eléctricas de estos materiales son extremadamente sensibles a la presencia de concentraciones mínimas de átomos de impurezas, por lo cual se ha de controlar muy cuidadosamente la presencia de impurezas en regiones espaciales muy pequeñas. Los semiconductores han hecho posible la fabricación de circuitos integrados, lo que ha revolucionado totalmente la electrónica y la informática (por no hablar de nuestra vida) en las últimas tres décadas.

### Biomateriales

Los *biomateriales* se emplean en componentes implantados en el cuerpo humano para reemplazar partes enfermas o dañadas. Estos materiales no deben producir sustancias tóxicas y deben ser compatibles con los tejidos del cuerpo (es decir, no debe causar reacciones biológicas adversas). Todos los materiales anteriores (metales, cerámicas, polímeros, materiales compuestos y semiconductores) se pueden usar como biomateriales.

### Materiales Inteligentes

Los *materiales inteligentes* son un nuevo grupo de materiales técnicos que se están desarrollando y van a tener una influencia significativa en muchas de nuestras tecnologías. El adjetivo *inteligente* hace referencia a que estos materiales son capaces de detectar cambios en su entorno y responder a estos cambios en modos predeterminados, emulando el comportamiento de organismos vivos. Además, este concepto *inteligente* se está extendiendo a sistemas más sofisticados que constan de combinaciones de materiales inteligentes y tradicionales.

Los componentes de un material inteligente (o sistema inteligente) incluyen algún tipo de sensor (que detecta una señal de entrada) y un actuador (que realiza una función de respuesta y de adaptación). Los actuadores pueden inducir cambios de forma, posición, frecuencia natural, o de características mecánicas en respuesta a cambios de temperatura, campos eléctricos y/o campos magnéticos.

Se utilizan habitualmente cuatro tipos de materiales en la elaboración de actuadores: aleaciones con memoria de forma, cerámicos piezoeléctricos, materiales magnetostrictivos y fluidos electro/magnetorreológicos. Las *aleaciones con memoria de forma* son metales que, después de haber sido deformado, vuelven a su forma original mediante una variación de temperatura (véase el apartado de Materiales de Importancia en la sección 12.9). Los *cerámicos piezoeléctricos* se expanden y contraen en respuesta a un campo eléctrico aplicado (o tensión). A la inversa, también generan un campo eléctrico cuando se alteran sus dimensiones (véase la Sección 19.25). El comportamiento de los materiales *magnetostrictivos* es análogo a la de los piezoeléctricos, excepto en que son sensibles a los campos magnéticos. Por último, los *fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos* son líquidos que experimentan cambios drásticos en la viscosidad frente a la acción de campos eléctricos y magnéticos, respectivamente.

Los dispositivos/materiales utilizados como sensores incluyen fibras ópticas (Sección 22.14), materiales piezoeléctricos (incluidos algunos polímeros), y sistemas microelectromecánicos (MEMS, Sección 14.17).

Un ejemplo de sistema inteligente es el que se utiliza en helicópteros para reducir en la cabina el ruido aerodinámico creado por los álabes del rotor. La inserción de sensores piezoeléctricos permite el seguimiento de las tensiones y deformaciones en los álabes; las señales procedentes de estos sensores, alimentan un dispositivo de adaptación, controlado por ordenador, de cancelación de ruido.

### Nanomateriales

Una nueva clase de materiales que tienen propiedades fascinantes y que constituye una gran promesa tecnológica es la de los *nanomateriales*, que incluye a materiales de cualquiera de los cuatro tipos básicos, metales, cerámicas, polímeros o materiales compuestos. Sin embargo, a diferencia de los otros grupos de materiales, en este caso la distinción no se realiza en base a su composición química, sino más bien por su tamaño; el prefijo *nano* denota que las dimensiones de estas entidades estructurales son del orden de un nanómetro ( $10^{-9}$  m). Como regla general, presentan constituyentes de menos de 100 nanómetros (nm, equivalente al diámetro de aproximadamente 500 átomos).

Con anterioridad a la llegada de los nanomateriales, el procedimiento general utilizado por los científicos para comprender la química y la física de los materiales consistía en comenzar por el estudio de estructuras grandes y complejas para luego investigar los bloques fundamentales de estas estructuras, más pequeños y más simple. Este enfoque se denomina *ciencia de arriba a abajo*. Sin embargo, con el desarrollo de los microscopios de fuerza atómica (AFM, *Atomic Force Microscopy*) (Sección 6.12), que permiten la observación de átomos y moléculas individuales, ha sido posible diseñar y construir nuevas estructuras de constituyentes a nivel atómico (esto es, “materiales de diseño”). Esta capacidad de organizar átomos permite desarrollar propiedades mecánicas, eléctricas, magnéticas, y otras que no serían posibles de ningún otro modo, cambiando el enfoque tradicional por uno *de abajo hacia arriba*, y el estudio de las propiedades de estos materiales se denomina *nanotecnología*.<sup>10</sup>

Algunas de las características físicas y químicas que presentan la materia pueden experimentar cambios drásticos cuando el tamaño de partícula se aproxima a las dimensiones atómicas. Por ejemplo, materiales que son opacos en el dominio macroscópico pueden llegar a ser transparente en nanoescala; algunos sólidos se convierten en líquidos, materiales químicamente estables se convierten en combustible y aisladores eléctricos se convierten en conductores. Además, las propiedades pueden depender del tamaño de la nanoescala en este dominio. Algunos de estos efectos tienen su origen en la mecánica cuántica, mientras que otros están relacionados con *fenómenos de superficie* (la proporción de átomos ubicados en lugares de la superficie de una partícula se incrementa drásticamente a medida que su tamaño disminuye).

Debido a estas propiedades únicas e inusuales, los nanomateriales están abriéndose paso en aplicaciones electrónicas, biomédicas, deportivas, producción de energía y otras aplicaciones industriales. Algunas de ellas se analizan en este texto, como por ejemplo:

- Convertidores catalíticos para automóviles (recuadro Contenidos Innovadores, Capítulo 6)
- Nanocarbonos-fullerenos, nanotubos de carbono y grafeno (Sección 14.17)
- Partículas de negro de carbón como refuerzo para neumáticos de automóviles (Sección 16.2)
- Nanocompuestos (Sección 16.16)
- Partículas magnéticas nanométricas que se utilizan para unidades de disco duro (Sección 21.11)
- Partículas magnéticas que almacenan datos en cintas magnéticas (Sección 21.11)

<sup>10</sup>Una sugerencia legendaria y profética en cuanto a las posibilidades de los materiales de nanoingeniería la propuso Richard Feynman en su conferencia de la Sociedad Americana de Física, en 1959 titulada “*There’s Plenty of Room at the Bottom*”.

Cada vez que se desarrolla un nuevo material se deben considerar las posibles interacciones o toxicidad para los seres vivos. Las nanopartículas pequeñas tienen una relación superficie-volumen excesivamente grande, lo que puede inducir elevada reactividad química. Aunque la seguridad de los nanomateriales es relativamente inexplorada, existe la preocupación de que puedan ser absorbidos por el cuerpo a través de la piel, los pulmones y el tracto digestivo a tasas relativamente altas, y que algunos de estos materiales, si se hallan presentes en concentraciones suficientes, puedan plantear riesgos para la salud, tales como daños en el ADN o riesgos de desarrollar cáncer de pulmón.

## 1.6 NECESIDAD DE MATERIALES MODERNOS

A pesar del enorme progreso que se ha logrado en la disciplina de la ciencia e ingeniería de los materiales en los últimos años, siguen apareciendo retos tecnológicos que incluyen el desarrollo de materiales más sofisticados y especializados, así como la consideración de los impactos ambientales de la producción de materiales. Así pues, es apropiado hacer algunos comentarios en relación a estos temas con el fin de proporcionar una perspectiva completa.

La energía nuclear resulta prometedora, pero las soluciones a los numerosos problemas subyacentes involucran necesariamente a los materiales, tales como combustibles, estructuras de contención e instalaciones para la eliminación de los residuos radiactivos.

El transporte supone cantidades significativas de energía, de modo que la reducción del peso de los vehículos de transporte (automóviles, aviones, trenes, etc.), así como el aumento de las temperaturas de funcionamiento de los motores, mejorará la eficiencia del combustible. Nuevos materiales estructurales de alta resistencia y baja densidad están pendientes de desarrollo, así como materiales que tengan la capacidad de soportar mayores temperaturas, para su uso en componentes de motores.

Por otra parte, existe una necesidad manifiesta de encontrar nuevas fuentes de energía económicas para utilizar los recursos actuales de manera más eficiente. Los materiales, sin duda jugarán un papel importante en esta evolución. Por ejemplo, la conversión directa de la energía solar en energía eléctrica ya es conocida, pero las células solares emplean algunos materiales bastante complejos y costosos. Para asegurar una tecnología viable, deben desarrollarse materiales que sean altamente eficientes en este proceso de conversión pero mucho menos costosos.

La célula de combustible de hidrógeno es otra tecnología de conversión de energía muy atractiva y viable que tiene la ventaja de ser no contaminante. Actualmente se está implementando en baterías para dispositivos electrónicos y es una alternativa prometedora como fuente de energía para automóviles. Es necesario desarrollar nuevos materiales para pilas de combustible más eficientes y para mejores catalizadores relacionados con la producción de energía mediante celdas de hidrógeno.

Por otra parte, la calidad del medio ambiente depende de la capacidad para controlar la contaminación del aire y el agua. Las técnicas de control de la contaminación emplean materiales diversos. Además, es necesario mejorar procesos de procesamiento/refinado de materiales para evitar la contaminación ambiental y la afectación del paisaje por la extracción de materias primas. Además, en algunos procesos de fabricación de materiales, se producen sustancias tóxicas, y debe considerarse el impacto ecológico de su eliminación.

Muchos de los materiales que utilizamos son derivados de recursos no renovables, es decir, no susceptibles de ser regenerados. Entre ellos están la mayoría de los polímeros, cuya materia prima principal es el petróleo, y algunos metales. Estos recursos no renovables se están agotando poco a poco, lo que requiere (1) el descubrimiento de nuevas reservas, (2) el desarrollo de nuevos materiales con propiedades comparables pero con menos impacto ambiental adverso y (3) el aumento de los esfuerzos de reciclaje y el desarrollo de nuevas tecnologías de reciclaje. Como consecuencia, cada vez es más importante tener en cuenta el análisis del ciclo de vida en el proceso de producción, que contempla el proceso global de fabricación, así como el impacto ambiental y los factores ecológicos asociados a dicho material o componente.

Las funciones que se desempeñan desde la ciencia e ingeniería de materiales en relación con estos temas, así como otras cuestiones ambientales y sociales, se analizan con más detalle en el Capítulo 23.



## RESUMEN

## Ciencia e ingeniería de los materiales

- Hay seis clasificaciones diferentes de propiedades de materiales que determinan su aplicabilidad: propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas, magnéticas, ópticas y químicas.
- Un aspecto clave de la ciencia de materiales es la investigación de las relaciones existentes entre la estructura y las propiedades de los materiales. Por estructura, nos referimos a la distribución de los constituyentes internos en los materiales. En términos de sus dimensiones, los elementos estructurales incluyen (de menor a mayor) los niveles subatómico, atómico, microscópico y macroscópico.
- En cuanto al diseño, producción y utilización de los materiales, hay cuatro elementos a considerar: procesamiento, estructura, propiedades y comportamiento en servicio. Para un material, el comportamiento en servicio depende de sus propiedades, que a su vez son una función de su o sus estructuras; además, las estructuras vienen determinadas por el procesamiento del material.
- En la selección de materiales hay tres criterios: las condiciones de servicio a las que estará expuesto el material, el deterioro de las propiedades del material durante su uso y el coste del componente fabricado.

## Clasificación de los materiales

- Sobre la base de la composición química y de su estructura atómica, los materiales se clasifican en tres categorías generales: metales (elementos metálicos), cerámicos (compuestos de elementos metálicos y no metálicos) y polímeros (compuestos formados por carbono, hidrógeno y otros elementos no metálicos). Además de estas categorías tenemos los materiales compuestos, que se componen al menos de dos tipos de materiales diferentes.

## Materiales avanzados

- Otra categoría a destacar es la de los materiales avanzados que se utilizan en aplicaciones de alta tecnología. Entre ellos se encuentran los semiconductores (que tienen conductividad eléctrica intermedia entre la de los conductores y la de los aislantes), los biomateriales (que deben ser compatible con los tejidos del cuerpo), los materiales inteligentes (aquellos que reaccionan y responden a cambios en su entorno de manera predeterminada) y los nanomateriales (aquellos que tienen características estructurales del orden de nanómetros, algunos de los cuales pueden ser diseñados a nivel atómico o molecular).

## REFERENCIAS

- Ashby, M. F. y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties, Applications, and Design*, 4th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, England, 2012.
- Ashby, M. F. y D. R. H. Jones, *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures and Processing*, 4th edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, England, 2012.
- Ashby, M. F., H. Shercliff y D. Cebon, *Materials Engineering, Science, Processing and Design*, Butterworth-Heinemann, Oxford, England, 2007.
- Askeland, D. R., P. P. Fulay y W. J. Wright, *The Science and Engineering of Materials*, 6th edition, Cengage Learning, Stamford, CT, 2011.
- Baillie, C. y L. Vanasupa, *Navigating the Materials World*, Academic Press, San Diego, CA, 2003.
- Douglas, E. P., *Introduction to Materials Science and Engineering: A Guided Inquiry*, Pearson Education, Upper Saddle River, NJ, 2014.
- Fischer, T., *Materials Science for Engineering Students*, Academic Press, San Diego, CA, 2009.
- Jacobs, J. A. y T. F. Kilduff, *Engineering Materials Technology*, 5th edition, Prentice Hall PTR, Paramus, NJ, 2005.
- McMahon, C. J., Jr., *Structural Materials*, Merion Books, Philadelphia, PA, 2004.
- Murray, G. T., C. V. White y W. Weise, *Introduction to Engineering Materials*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
- Schaffner, J. P., A. Saxena, S. D. Antolovich, T. H. Sanders, Jr. y S. B. Warner, *The Science and Design of Engineering Materials*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1999.
- Shackelford, J. F., *Introduction to Materials Science for Engineers*, 7th edition, Prentice Hall PTR, Paramus, NJ, 2009.
- Smith, W. F. y J. Hashemi, *Foundations of Materials Science and Engineering*, 5th edition, McGraw-Hill, New York, NY, 2010.
- Van Vlack, L. H., *Elements of Materials Science and Engineering*, 6th edition, Addison-Wesley Longman, Boston, MA, 1989.
- White, M. A., *Physical Properties of Materials*, 2nd edition, CRC Press, Boca Raton, FL, 2012.

## CUESTIONES Y PROBLEMAS

---

- 1.1** Seleccionar uno o más de los siguientes elementos o dispositivos modernos y llevar a cabo una búsqueda en Internet con el fin de determinar qué material o materiales específicos se considerarían y qué propiedades específicas de esos materiales permiten que el elemento o dispositivo funcione correctamente. Por último, escribir un breve informe sobre los datos hallados.

Teléfono celular o móvil/baterías de cámaras digitales  
 Pantallas de teléfonos celulares o móviles  
 Células solares  
 Palas de aerogeneradores  
 Pilas de combustible  
 Bloques de motor del automóvil (que no sean de fundición de hierro).

Carrocerías de automóviles (exceptuando las aleaciones de acero)

Espejos de un telescopio espacial

Chalecos antibalas militares

Equipamiento deportivo

Balones de fútbol

Pelotas de básquet

Bastones de esquí

Botas de esquí

Tablas de snowboard

Tablas de surf

Palos de golf

Pelotas de golf

Kayaks

Cuadros ligeros de bicicleta