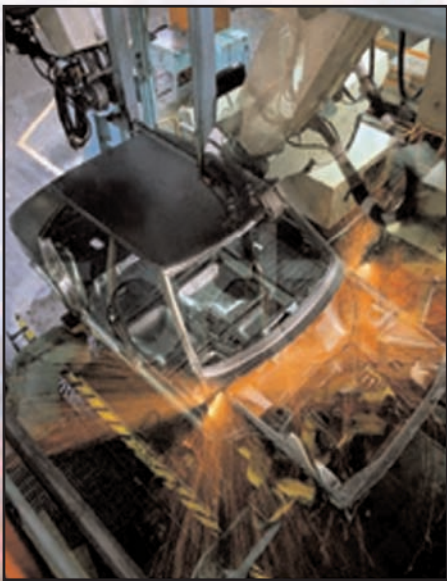


MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN



S. Kalpakjian • S. R. Schmid

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7

Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 1328

Authorized translation from the English language edition, entitled *Manufacturing engineering and technology, 5th edition* by *Serope Kalpakjian and Steven Schmid*, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2006. All rights reserved.

ISBN 0-13-148965-8

Traducción autorizada de la edición en idioma inglés, *Manufacturing engineering and technology, 5a edición* por *Serope Kalpakjian y Steven Schmid*, publicada por Pearson Education, Inc., publicada como Prentice Hall, Copyright © 2006. Todos los derechos reservados.

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo

e-mail: luis.cruz@pearsoned.com

Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón

Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Vice President and Editorial Director, ECS: *Marcia J. Horton*

Executive Editor: *Eric Svendsen*

Associate Editor: *Dee Bernhard*

Executive Managing Editor: *Vince O'Brien*

Managing Editor: *David A. George*

Production Editor: *Rose Kernan*

Director of Creative Services: *Paul Belfanti*

Creative Director: *Heather Scott*

Cover Designer: *John Christiana*

Art Editor: *Xiaohong Zhu*

Manufacturing Manager: *Alexis Heydt-Long*

Manufacturing Buyer: *Lisa McDowell*

Senior Marketing Manager: *Holly Stark*

QUINTA EDICIÓN 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Atacomulco 500, 5° piso

Col. Industrial Atoto

53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México

E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.

Prentice Hall es una marca registrada de Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de esta publicación pueden reproducirse, registrarse o transmitirse, por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea electrónico, mecánico, fotoquímico, magnético o electroóptico, por fotocopia, grabación o cualquier otro, sin permiso previo por escrito del editor.

El préstamo, alquiler o cualquier otra forma de cesión de uso de este ejemplar requerirá también la autorización del editor o de sus representantes.



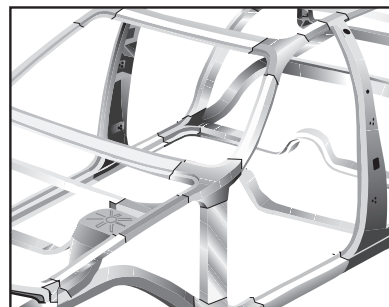
ISBN 10: 970-26-1026-5

ISBN 13: 978-970-26-1026-7

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 - 11 10 09 08

Metales y aleaciones no ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones



CAPÍTULO 6

Una extensa variedad de metales y aleaciones no ferrosas, que van del aluminio al zinc, son indispensables para una amplia variedad de aplicaciones en ingeniería. En este capítulo se describen:

- Métodos de producción para metales no ferrosos.
- Propiedades físicas y mecánicas de los metales y aleaciones no ferrosas y su importancia.
- Aplicaciones para estas aleaciones.
- Aleaciones con memoria de forma, aleaciones amorfas y nanomateriales y sus usos únicos.

6.1 Introducción

Los metales y las aleaciones no ferrosas cubren una amplia gama, desde los metales más comunes (como el aluminio, cobre y magnesio) hasta aleaciones de alta temperatura y alta resistencia (como el tungsteno, tantalio y molibdeno). Aunque por lo general cuestan más que los metales ferrosos (tabla 6.1), los metales y aleaciones no ferrosas tienen aplicaciones importantes debido a propiedades como la resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, baja densidad y facilidad de fabricación (tabla 6.2). Ejemplos típicos de sus aplicaciones son el aluminio para los utensilios de cocina y los fuselajes de los aviones, el alambre de cobre empleado en electricidad, la tubería de cobre para suministro de agua residencial, el zinc para láminas metálicas galvanizadas que se utilizan en carrocerías de automóviles, el titanio para álabes de turbinas de motores de propulsión e implantes ortopédicos, y el tantalio para motores de cohetes.

Un motor a propulsión de turboventilador para el avión Boeing 757 contiene en general los siguientes metales y aleaciones no ferrosas: 38% de Ti, 37% de Ni, 12% de Cr, 6% de Co, 5% de Al, 1% de Nb y 0.02% de Ta. Sin estos materiales, no podría diseñarse, fabricarse, y accionarse un motor de propulsión (fig. 6.1) con los niveles de potencia y eficiencia requeridos.

En este capítulo se presentan las propiedades generales, los métodos de producción y las importantes aplicaciones de ingeniería para los metales y aleaciones no ferrosas. Las propiedades de manufactura de estos materiales (como la formabilidad, maquinabilidad y soldabilidad) se describen en varios capítulos a lo largo de este texto.

- 6.1 Introducción 169
- 6.2 Aluminio y sus aleaciones 170
- 6.3 Magnesio y sus aleaciones 174
- 6.4 Cobre y sus aleaciones 176
- 6.5 Níquel y sus aleaciones 178
- 6.6 Superalloys 179
- 6.7 Titanio y sus aleaciones 180
- 6.8 Metales y aleaciones refractarias 181
- 6.9 Berilio 183
- 6.10 Zirconio 183
- 6.11 Aleaciones de baja fusión 183
- 6.12 Metales preciosos 185
- 6.13 Aleaciones con memoria de forma 185
- 6.14 Aleaciones amorfas (vidrios metálicos) 186
- 6.15 Espumas metálicas 186
- 6.16 Nanomateriales 186

EJEMPLO:

- 6.1 Un automóvil totalmente de aluminio 174

TABLA 6.1

Costo aproximado por unidad de volumen para metales forjables y plásticos, en relación con el costo del acero al carbono			
Oro	60,000	Aleaciones de magnesio	2–4
Plata	600	Aleaciones de aluminio	2–3
Aleaciones de molibdeno	200–250	Aceros de baja aleación de alta resistencia	1.4
Níquel	35	Hierro fundido gris	1.2
Aleaciones de titanio	20–40	Acero al carbono	1
Aleaciones de cobre	5–6	Nailons, acetales y hule de silicio*	1.1–2
Aleaciones de zinc	1.5–3.5	Otros plásticos y elastómeros*	0.2–1
Aceros inoxidables	2–9		

*Como compuestos moldeables.

Nota: Los costos varían significativamente según la cantidad de compra, oferta y demanda, forma y tamaño, además de otros factores.

TABLA 6.2

Características generales de los metales y aleaciones no ferrosas	
Material	Características
Aleaciones no ferrosas	Más costosas que los aceros y plásticos; amplia gama de propiedades mecánicas, físicas y eléctricas; buena resistencia a la corrosión; aplicaciones a alta temperatura.
Aluminio	Alta relación resistencia-peso; alta conductividad térmica y eléctrica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Magnesio	El metal más ligero; buena relación resistencia-peso.
Cobre	Alta conductividad eléctrica y térmica; buena resistencia a la corrosión; buenas propiedades de manufactura.
Superalaciones	Buena resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas; pueden ser aleaciones a base de hierro, cobalto y níquel.
Titanio	La más alta relación resistencia-peso de todos los metales; buena resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.
Metales refractarios	Molibdeno, niobio (columbio), tungsteno y tantalio; alta resistencia a temperaturas elevadas.
Metales preciosos	Oro, plata y platino; generalmente tienen buena resistencia a la corrosión.

6.2 | Aluminio y sus aleaciones

Las propiedades que favorecen la selección del **aluminio** (Al) y sus aleaciones son su alta relación de resistencia-peso, resistencia a la corrosión de muchos productos químicos, alta conductividad térmica y eléctrica, atoxicidad, reflectividad, apariencia y formabilidad y maquinabilidad; además, son no magnéticos. Los usos principales del aluminio y sus aleaciones, en orden decreciente de consumo, se dan en contenedores y empaques (latas y papel aluminio), edificios y otros tipos de construcción, transporte (aplicaciones en aviones y naves aeroespaciales, autobuses, automóviles, carros de ferrocarril y artículos marinos), aplicaciones eléctricas (como conductor eléctrico económico y no magnético), productos de consumo durables (artículos domésticos, utensilios de cocina y muebles) y herramientas portátiles (tablas 6.3 y 6.4). Casi todo el cableado para transmisión de alto voltaje se fabrica con aluminio. El 82% de los componentes estructurales (de soporte de carga) del avión Boeing 747, y 70% del Boeing 777, son de aluminio.

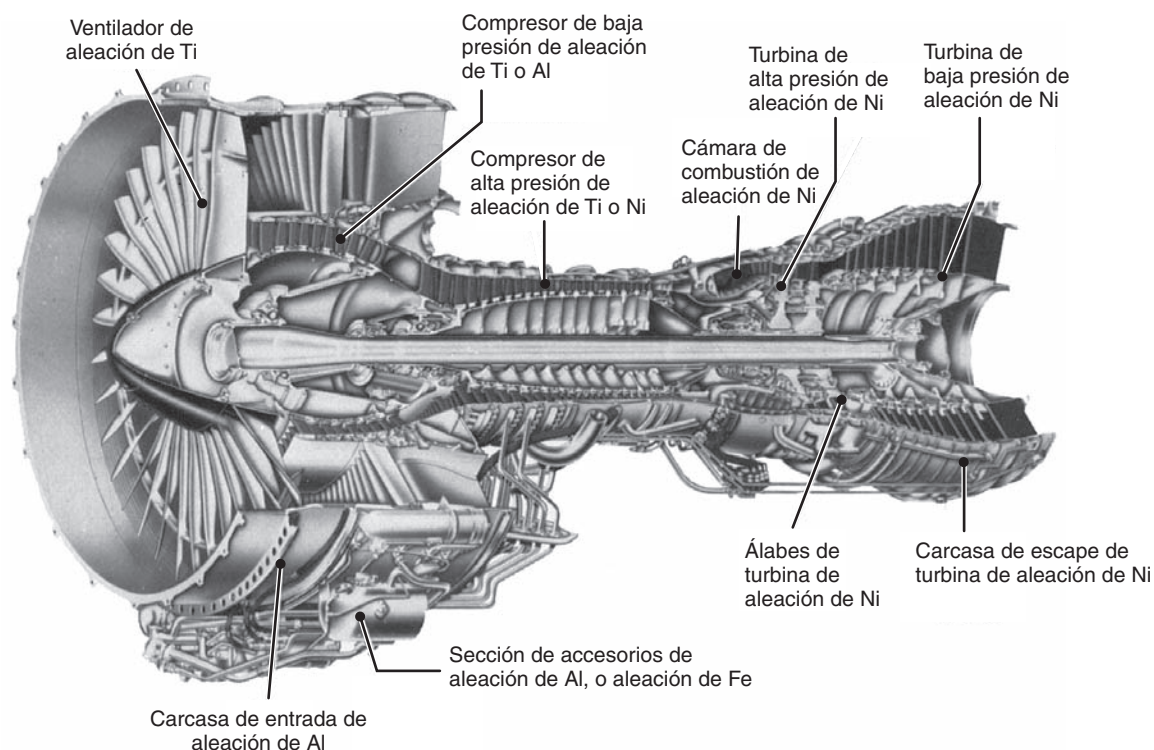


FIGURA 6.1 Sección transversal de un motor de propulsión (PW2037) mostrando diversos componentes y las aleaciones utilizadas para fabricarlos. *Fuente:* Cortesía de United Aircraft Pratt & Whitney.

TABLA 6.3

Propiedades de aleaciones seleccionadas de aluminio a temperatura ambiente

Aleación (UNS)	Temple	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
1100 (A91100)	O	90	35	35–45
1100	H14	125	120	9–20
2024 (A92024)	O	190	75	20–22
2024	T4	470	325	19–20
3003 (A93003)	O	110	40	30–40
3003	H14	150	145	8–16
5052 (A95052)	O	190	90	25–30
5052	H34	260	215	10–14
6061 (A96061)	O	125	55	25–30
6061	T6	310	275	12–17
7075 (A97075)	O	230	105	16–17
7075	T6	570	500	11

Existen aleaciones de aluminio disponibles como productos laminados, esto es, como productos forjables a los que se dan diferentes formas mediante laminado, extrusión, embutido y forjado (capítulos 13 a 15). Existen lingotes de aluminio para fundición, al

TABLA 6.4

Propiedades de manufactura y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de aluminio seleccionadas				
Aleación	Características*			Aplicaciones típicas
	Resistencia a la corrosión	Maquinabilidad	Soldabilidad	
1100	A	C–D	A	Trabajo de lámina metálica, artículos huecos producidos por rechazado, recipientes.
2024	C	B–C	B–C	Ruedas para camiones, productos para máquinas roscadoras, estructuras para aeronaves.
3003	A	C–D	A	Utensilios de cocina, equipo químico, recipientes a presión, trabajos de láminas metálicas, artículos para constructores, tanques de almacenamiento.
5052	A	C–D	A	Trabajos de láminas metálicas, tubos hidráulicos y artículos domésticos; autobuses, camiones y usos marinos.
6061	B	C–D	A	Estructuras de trabajo pesado donde se necesita resistencia a la corrosión; camiones y estructuras marinas, carros de ferrocarril, muebles, ductos, pasamanos en puentes, tubería hidráulica.
7075	C	B–D	D	Aeronaves y otras estructuras, llaves, accesorios hidráulicos.

*A = excelente; D = deficiente

igual que aluminio en forma de polvo para aplicaciones de metalurgia de polvos (capítulo 17). La mayoría de las aleaciones de aluminio se pueden maquinar, formar y soldar con relativa facilidad.

Existen dos tipos de aleaciones forjables de aluminio:

1. Aleaciones que se pueden *endurecer mediante trabajo en frío* y que no se pueden tratar térmicamente.
2. Aleaciones que se pueden *endurecer mediante tratamiento térmico*.

Denominación de las aleaciones de aluminio forjable. Las aleaciones de aluminio forjable se identifican mediante cuatro dígitos más la **severidad de temple** que muestra la condición del material. (Ver también el Sistema de Numeración Unificado en esta sección). El primer dígito identifica el principal elemento de aleación.

- 1xxx—Aluminio comercialmente puro. Excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, buena capacidad de trabajo, baja resistencia, no tratable térmicamente.
- 2xxx—Cobre. Alta relación resistencia-peso, baja resistencia a la corrosión, tratable térmicamente.
- 3xxx—Manganeso. Buena capacidad de trabajo, resistencia moderada, por lo general no tratable térmicamente.
- 4xxx—Silicio. Punto de fusión más bajo, forma una película de óxido de color gris oscuro a negro, en general no tratable térmicamente.
- 5xxx—Magnesio. Buena resistencia a la corrosión y soldabilidad, resistencia de moderada a elevada, no tratable térmicamente.
- 6xxx—Magnesio y silicio. Resistencia media; buena formabilidad, maquinabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión; tratable térmicamente.
- 7xxx—Zinc. Resistencia de moderada a muy elevada, tratable térmicamente.
- 8xxx—Otro elemento.

El segundo dígito en estas denominaciones indica modificaciones a la aleación. Para la serie 1xxx, el tercero y cuarto dígitos representan la cantidad mínima de aluminio en la aleación. Por ejemplo, 1050 indica un mínimo de 99.50% de Al y 1090 indica un mínimo de 99.90% de Al. En otras series, el tercero y cuarto dígitos identifican las diferentes aleaciones en el grupo y no tienen importancia numérica. Una lata de aluminio pa-

ra bebidas puede tener las siguientes aleaciones de aluminio, todas en la condición H19 (que es el mayor estado de trabajo en frío): 3004 o 3104 para el cuerpo de la lata, 5182 para la tapa y 5042 para la pestaña. Estas aleaciones se seleccionan por sus características de manufactura y por su economía.

Denominación de las aleaciones de aluminio fundido. Las denominaciones para las aleaciones de aluminio fundido también constan de cuatro dígitos. El primer dígito indica el grupo principal de la aleación, como sigue:

- 1xx.x—Aluminio (99.00% mínimo)
- 2xx.x—Aluminio-cobre
- 3xx.x—Aluminio-silicio (con cobre y/o magnesio)
- 4xx.x—Aluminio-silicio
- 5xx.x—Aluminio-magnesio
- 6xx.x—Serie no utilizada
- 7xx.x—Aluminio-zinc
- 8xx.x—Aluminio-estaño

En la serie 1xx.x, el segundo y tercer dígitos indican el contenido mínimo de aluminio, al igual que el tercero y cuarto dígitos en el aluminio forjable. Para las otras series, el segundo y tercer dígitos no tienen importancia numérica. El cuarto dígito (a la derecha del punto decimal) indica la forma del producto.

Denominaciones de temple. Las denominaciones de temple tanto para el aluminio forjable como para el fundido son las siguientes:

- F—Como se fabrica (mediante trabajo en frío o en caliente, o por fundición).
- O—Recocido (desde el estado de trabajado en frío o fundido).
- H—Endurecido por deformación mediante trabajo en frío (sólo para productos forjados).
- T—Tratado térmicamente.
- W—Sólo tratado con soluciones (temple inestable).

Sistema Unificado de Numeración. Al igual que los aceros, ahora se identifica internacionalmente el aluminio y otros metales no ferrosos y sus aleaciones mediante el Sistema Unificado de Numeración (UNS, por sus siglas en inglés), que consta de una letra que indica la clase general de la aleación, seguida de cinco dígitos que indican su composición química. Por ejemplo, A es para el aluminio, C para el cobre, N para las aleaciones de níquel, P para los metales preciosos y Z para el zinc. En la denominación UNS, la aleación de aluminio forjable 2024 es A92024.

Producción. El aluminio se produjo por primera vez en 1825. Es el elemento metálico más abundante, pues constituye casi 8% de la corteza terrestre, y su producción se encuentra en segundo lugar, sólo detrás de la del acero. El principal mineral para el aluminio es la *bauxita*, un óxido hidratado (que contiene agua) de aluminio e incluye diversos óxidos. Después de lavarlo para retirar la arcilla y la suciedad, el mineral se tritura y se trata con sosa cáustica caliente (hidróxido de sodio) para retirar impurezas. De esta solución se extrae la alúmina (óxido de aluminio) y después se disuelve en un baño fundido de fluoruro de sodio y fluoruro de aluminio de 940 °C a 980 °C (1725 °F a 1800 °F). Después, la mezcla se somete a electrólisis con corriente directa. El aluminio metálico se forma en el cátodo (polo negativo), mientras que en el ánodo (polo positivo) se libera oxígeno. El *aluminio comercialmente puro* tiene hasta 99.99% de Al; en la industria también se le conoce como aluminio de “cuatro nueves”. El proceso de su producción consume una gran cantidad de electricidad, lo que contribuye de modo significativo al costo del aluminio.

Aluminio poroso. Se han producido bloques de aluminio 37% más ligeros que el aluminio sólido y con una permeabilidad (*microporosidad*) uniforme. Esta característica permite usarlos en aplicaciones donde debe mantenerse un vacío o una presión diferencial. Ejemplos de ello son la sujeción al vacío de soportes para ensamble y automatización y el formado o termoformado de plásticos al vacío (sección 19.6). Estos bloques tienen entre 70% y 90% de aluminio; el resto es resina epóxica. Se pueden maquinar con relativa facilidad y pueden unirse mediante adhesivos.

EJEMPLO 6.1 Un automóvil totalmente de aluminio

El uso del aluminio en automóviles y camiones ligeros ha aumentado con firmeza: en 1990 no había en producción vehículos con estructuras de aluminio en ninguna parte del mundo; pero en 1997 ya había siete de ellos, incluyendo el Plymouth Prowler y el Audi A8 (fig. 6.2). Con ahorros de peso hasta de 47% respecto de los vehículos de acero, estos carros utilizan menos combustible, producen menos contaminación y son reciclables.

Tenían que desarrollarse nuevas aleaciones y otras metodologías de diseño y manufactura. Por ejemplo, debían refinarse procedimientos de soldadura y unión con adhesivos, optimizarse el diseño del marco estructural y desarrollarse nuevos diseños de herramental (para permitir dar forma al aluminio). Debido a estas nuevas tecnologías, los ahorros ambientales deseados pudieron realizarse sin disminuir el desempeño o la seguridad. De hecho, el Audi A8 es el primer automóvil de lujo que obtiene una clasificación de cinco estrellas doble (la mayor seguridad) tanto para el conductor como para el pasajero del asiento delantero en el New Car Assessment Program (Programa de Evaluación de Automóviles Nuevos) de la National Highway Transportation Safety Administration (NHSTA) en Estados Unidos.

6.3 | Magnesio y sus aleaciones

El **magnesio** (Mg) es el metal de ingeniería más ligero que existe y tiene buena capacidad de amortiguamiento de las vibraciones. Sus aleaciones se utilizan en aplicaciones estructurales y no estructurales en cualquier lugar donde el peso es de suma importancia. El magnesio también es un elemento de aleación en diversos metales no ferrosos.

Las aleaciones de magnesio suelen utilizarse en aeronaves y componentes de misiles, equipo para manejo de materiales, herramientas portátiles de potencia, escaleras, equipajes, bicicletas, artículos deportivos y componentes ligeros en general. Estas aleaciones se encuentran disponibles como fundiciones (estructuras para cámaras fundidas a presión) o como productos forjables (barras y formas extruidas, forjas, placas y hojas laminadas). También se utilizan en maquinaria para impresión y textil, a fin de minimizar las fuerzas de inercia en componentes de alta velocidad (sección 3.2).

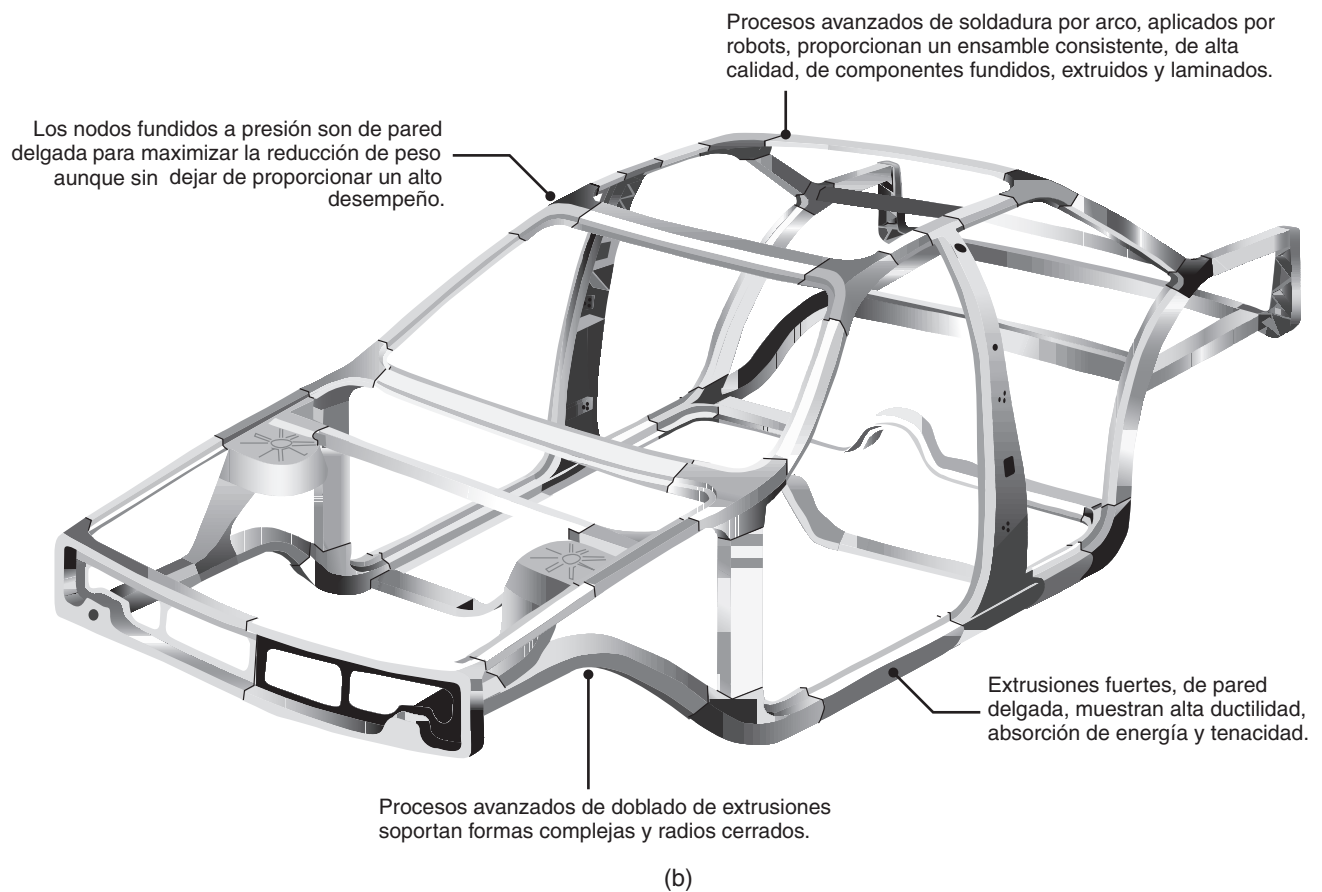
Debido a que en su forma pura no es suficientemente fuerte, el magnesio se alea con diversos elementos (tabla 6.5) para obtener propiedades específicas, en particular una alta relación de resistencia a peso. Varias aleaciones de magnesio tienen buenas características de colabilidad, formado y maquinado. Como estas aleaciones se oxidan rápidamente (son *pirofóricas*), existe el riesgo de que se incendien y deben tomarse precauciones al maquinarlas, rectificarlas o fundirlas en arena. Sin embargo, durante su uso normal los productos fabricados con magnesio y sus aleaciones no presentan mayor riesgo de incendio.

Denominación de las aleaciones de magnesio. Las aleaciones de magnesio se denominan como sigue:

- Una o dos letras como prefijo, que indican los principales elementos de aleación.
- Dos o tres números, que indican el porcentaje de los principales elementos de aleación redondeados al decimal más próximo.



(a)



(b)

FIGURA 6.2 (a) Automóvil Audi A8; la estructura de su carrocería es toda de aluminio. (b) Estructura de carrocería de aluminio; muestra diversos componentes fabricados por procesos de extrusión, formado de lámina y fundición. Fuente: Cortesía de ALCOA, Inc.

- c. Una letra del alfabeto (excepto las letras I y O), que indican la aleación normalizada con variaciones menores en la composición.
- d. Un símbolo para el temple del material, que sigue el sistema utilizado para las aleaciones de aluminio.

TABLA 6.5

Propiedades y formas típicas de aleaciones forjables de magnesio seleccionadas										
Aleación	Composición (%)					Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Formas típicas
	Al	Zn	Mn	Zr	Th					
AZ31 B	3.0	1.0	0.2	—	—	F	260	200	15	Extrusiones
						H24	290	220	15	Láminas y placas
AZ80A	8.5	0.5	0.2	—	—	T5	380	275	7	Extrusiones y forjas
HK31A	—	—	—	0.7	3	H24	255	200	8	Láminas y placas
ZK60A	—	5.7	—	0.55	—	T5	365	300	11	Extrusiones y forjas

Por ejemplo, considérese la aleación AZ91C-T6:

- Los principales elementos de aleación son el aluminio (A a 9%, redondeado) y zinc (Z a 1%).
- La letra C, la tercera del alfabeto, indica que esta aleación fue la tercera normalizada (después de la A y la B, que fueron la primera y segunda aleaciones que se normalizaron, respectivamente).
- T6 indica que esta aleación fue tratada con solución y se envejeció artificialmente.

Producción. El magnesio es el tercer elemento metálico más abundante (2%) en la corteza terrestre, después del hierro y el aluminio. La mayor parte proviene del agua de mar, que contiene 0.13% de magnesio en forma de cloruro de magnesio. Producido por primera vez en 1808, el magnesio metálico se puede obtener por electrólisis o por reducción térmica. En el *método electrolítico*, el agua de mar se mezcla con cal (hidróxido de calcio) en tanques de asentamiento. El hidróxido de magnesio se precipita en el fondo y se filtra y mezcla con ácido clorhídrico. Esta solución se somete a electrólisis (como se hace con el aluminio); la operación produce magnesio metálico, que después se funde en lingotes para su procesamiento y formado posterior. En el *método de reducción térmica*, la roca mineral que contiene magnesio (dolomita, magnesita y otras rocas) se separa con agentes reductores (como ferrosilicio en polvo y una aleación de hierro y silicio) calentando la mezcla en una cámara al vacío. Como resultado de esta reacción se forman vapores de magnesio, que se condensan en cristales de magnesio. Luego estos cristales se funden, refinan y vierten en lingotes para procesarlos y darles distintas formas.

6.4 Cobre y sus aleaciones

Producido por primera vez hacia el año 4000 a.C., el **cobre** (Cu, del latín *cuprum*) y sus aleaciones tienen propiedades similares a las del aluminio y sus aleaciones. Además, se encuentran entre los mejores conductores de electricidad y calor (tablas 3.1 y 3.2) y tienen buena resistencia a la corrosión. Se pueden procesar fácilmente por medio de diversas técnicas de formado, maquinado, fundido y unión.

Con frecuencia, las aleaciones de cobre son atractivas para aplicaciones en las que se requiere una combinación de cualidades eléctricas, mecánicas, no magnéticas, de resistencia a la corrosión, de conductividad térmica y de resistencia al desgaste. Por ejemplo, componentes eléctricos y electrónicos, resortes, cartuchos para armas pequeñas, plomería, intercambiadores de calor, artículos marinos y bienes de consumo (como utensilios de cocina, joyería y otros objetos decorativos). Aunque el aluminio es el material más común para matrices en el moldeo de polímeros por inyección (sección 19.3), a menudo se utiliza cobre porque tiene mejores propiedades térmicas. El cobre puro

también se puede utilizar como lubricante sólido en las operaciones de formado de metal caliente.

Las aleaciones de cobre pueden adquirir una amplia variedad de propiedades mediante la adición de elementos de aleación y por tratamiento térmico para mejorar sus características de manufactura. Las aleaciones más comunes de cobre son los latones y bronce. El **latón** (aleación de cobre y zinc) es una de las primeras aleaciones desarrolladas y tiene numerosas aplicaciones, incluyendo objetos decorativos (tabla 6.6). El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (tabla 6.7). Existen otros bronce, como el *bronce de aluminio* (aleación de cobre y aluminio) y bronce de estaño. El **cobre-berilio** (o **bronce de berilio**) y el **bronce de fósforo** tienen buena resistencia y dureza en aplicaciones como resortes y rodamientos. Otras aleaciones importantes de cobre son los *cuproníqueles* y los *níqueles de plata*.

Denominación de las aleaciones de cobre. En el Sistema Unificado de Numeración, el cobre se identifica con la letra C. Por ejemplo, el bronce para cartuchos es C26200, que reemplaza la obsoleta numeración de tres dígitos de CDA 262 (por Copper Development Association). Además de identificarse por su composición, el cobre y sus aleaciones se conocen por varios nombres (tablas 6.5 y 6.6). Las denominaciones de temple (como *1/2 duro*, *extra duro*, *extra elástico*, etc.) se basan en la reducción de porcentaje mediante el trabajado en frío (como laminado o estirado).

Producción. El cobre se encuentra en varios tipos de minerales, siendo los más comunes las menas de sulfuros. En general, las menas son de bajo grado (aunque algunos contienen hasta 15% de Cu) y se obtienen de minas a cielo abierto. Primero se tritura el mineral y después se le da forma de lodo (mezcla acuosa con partículas sólidas insolubles). El lodo se muele hasta obtener partículas finas en molinos de bolas (cilindros giratorios con bolas metálicas dentro para triturar el mineral, ver fig. 17.6). Después se agregan productos químicos y aceite y se agita la mezcla. Las partículas minerales for-

TABLA 6.6

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones forjables de cobre y latones seleccionadas					
Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Cobre electrolítico tenaz (C11000)	99.90 Cu, 0.04 O	220–450	70–365	55–4	Tubos de bajada, canales, techados, juntas, radiadores automotores, barras de autobuses, clavos, rodillos de impresión, remaches.
Latón rojo, 85% (C23000)	85.0 Cu, 15.0 Zn	270–725	70–435	55–3	Forro para medio ambiente, <i>conduits</i> , zócalos, sujetadores, extintores de incendio, tubería para condensadores e intercambiadores de calor.
Latón para cartuchos, 70% (C26000)	70.0 Cu, 30.0 Zn	300–900	75–450	66–3	Núcleos de radiadores y tanques, cubiertas para luces de destello, soportes para lámparas, sujetadores, candados, bisagras, componentes de municiones, accesorios de plomería.
Latón libre maquinado (C36000)	61.5 Cu, 3.0 Pb, 35.5 Zn	340–470	125–310	53–18	Engranajes, piñones, partes de máquinas roscadoras automáticas de alta velocidad.
Latón naval (C46400 a C46700)	60.0 Cu, 39.25 Zn, 0.75 Sn	380–610	170–455	50–17	Aeronaves; tambores tensores, bolas, pernos; accesorios marinos; flechas para impulsores, remaches, vástagos de válvulas, placas de condensadores.

TABLA 6.7

Propiedades y aplicaciones típicas de bronce forjables seleccionadas					
Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Bronce arquitectónico (C38500)	57.0 Cu, 3.0 Pb, 40.0 Zn	415 (extruido)	140	30	Extrusiones arquitectónicas, marquenas, remates, juntas, travesaños, bisagras.
Bronce al fósforo, 5% A (C51000)	95.0 Cu, 5.0 Sn, trazas de P	325–960	130–550	64–2	Fuelles, discos para embragues, pasadores de retención, diafragmas, sujetadores, brochas de alambre, equipo químico, maquinaria textil.
Bronce al fósforo libre maquinado (C54400)	88.0 Cu, 4.0 Pb, 4.0 Zn, 4.0 Sn	300–520	130–435	50–15	Rodamientos, bujes, engranes, piñones, flechas, rondanas de empuje, partes para válvulas.
Bronce de bajo silicio, B (C65100)	98.5 Cu, 1.5 Si	275–655	100–475	55–11	Líneas de presión hidráulica, pernos, accesorios marinos, <i>conduits</i> eléctricos, tubería para intercambiadores de calor.
Níquel plata, 65–10 (C74500)	65.0 Cu, 25.0 Zn, 10.0 Ni	340–900	125–525	50–1	Remaches, tornillos, sujetadores para diapositivas, artículos huecos, placas de equipo.

man una espuma, que se raspa y se seca. Tradicionalmente, el concentrado seco de cobre (del cual casi un tercio es cobre) se **funde** y se refina; a este proceso se le llama **pirometalurgia**, ya que se utiliza calor para refinar el metal. En aplicaciones como los conductores eléctricos, el cobre posteriormente se refina mediante electrólisis hasta obtener una pureza de 99.95% cuando menos (*cobre electrolítico libre de oxígeno*). Una técnica más reciente para procesar el cobre es la **hidrometalurgia**, un proceso que comprende reacciones químicas y electrolíticas.

6.5 | Níquel y sus aleaciones

El **níquel** (Ni) es un metal blanco plateado descubierto en 1751 y uno de los principales elementos de aleación, ya que imparte resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión. Se utiliza con amplitud en aceros inoxidables y en aleaciones con base de níquel (también llamadas **superalaleaciones**). Las aleaciones de níquel se utilizan en aplicaciones de alta temperatura (como componentes de motores a reacción, cohetes y plantas nucleares de potencia), equipos de manejo de alimentos y de procesamiento químico, monedas y aplicaciones marinas. Debido a que el níquel es magnético, sus aleaciones también se utilizan en aplicaciones electromagnéticas, por ejemplo, los solenoides. El principal uso del níquel como metal ocurre en la electrodeposición de partes para mejorar su apariencia y su resistencia a la corrosión y al desgaste. Las aleaciones de níquel tienen una alta resistencia y resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas. Los elementos de aleación en el níquel son el cromo, cobalto y molibdeno. El comportamiento de las aleaciones de níquel en el maquinado, formado, fundido y soldado se puede modificar mediante otros elementos de aleación.

Se han desarrollado varias aleaciones de níquel con una amplia gama de resistencias a diferentes temperaturas (tabla 6.8). Aunque aún se utilizan mucho los nombres comerciales, las aleaciones de níquel se identifican hoy en el sistema UNS con la letra N. Así, el Hastelloy G ahora es N06007. El **Monel** es una aleación níquel-cobre. El **Inconel** es una aleación níquel-cromo con una resistencia a la tensión de hasta 1400 MPa (200 ksi). El **Hastelloy** (una aleación níquel-cromo) tiene buena resistencia a la corrosión

TABLA 6.8

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de níquel seleccionadas (todos son nombres comerciales)					
Tipo y número UNS	Composición nominal (%)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50mm (%)	Aplicaciones típicas
Níquel 200 (recocido)	Ninguna	380–550	100–275	60–40	Industria química y de procesamiento de alimentos, equipo aeroespacial, partes electrónicas.
Duranickel 301 (endurecido por envejecimiento)	4.4 Al, 0.6 Ti	1300	900	28	Resortes, equipo para extrusión de plásticos, moldes para vidrios, diafragmas.
Monel R-405 (laminado en caliente)	30 Cu	525	230	35	Productos para máquinas para tornillos, partes para medidores de agua.
Monel K-500 (endurecido por envejecimiento)	29 Cu, 3 Al	1050	750	30	Flechas para bombas, vástagos de válvulas, resortes.
Inconel 600 (recocido)	15 Cr, 8 Fe	640	210	48	Partes para turbinas de gas, equipo para tratamiento térmico, partes electrónicas, reactores nucleares.
Hastelloy C-4 (tratado con solución y enfriado)	16 Cr, 15 Mo	785	400	54	Partes que requieren estabilidad en alta temperatura y resistencia al agrietamiento por esfuerzo-corrosión.

y alta resistencia a temperaturas elevadas. El **Nichrome** (una aleación de níquel, cromo y hierro) tiene alta resistencia eléctrica y una fuerte resistencia a la oxidación, y se utiliza para elementos calefactores eléctricos. El **Invar** y el **Kovar** (aleaciones de hierro y níquel) tienen una sensibilidad relativamente baja a la temperatura (sección 3.6).

Producción. Las principales fuentes de níquel son minerales de sulfuros y óxidos, que tienen bajas concentraciones del metal. El níquel metálico se produce mediante procesos preliminares de sedimentación y térmicos, seguidos de electrólisis; esta secuencia rinde 99.95% de níquel puro. Aunque también hay cantidades significativas en el lecho marino, la minería submarina aún no es económica.

6.6 | Superalaciones

Las *superalaciones* son importantes en las aplicaciones de alta temperatura, de ahí que también se les conozca como **aleaciones resistentes al calor** o de **alta temperatura**. En general, las superalaciones tienen buena resistencia a la corrosión, a la fatiga mecánica y térmica, al impacto mecánico y térmico, a la termofluencia y a la erosión a temperaturas elevadas. Las superalaciones se aplican principalmente en motores a reacción y en turbinas de gas, motores reciprocantes, motores de cohetes, herramientas y matrices para trabajo en caliente de los metales, así como en las industrias nuclear, química y petroquímica. En general, las superalaciones se identifican mediante nombres comerciales o con sistemas especiales de numeración, y se encuentran disponibles en varias formas. La mayoría de las superalaciones tienen una temperatura máxima de servicio de alrededor de 1000 °C (1800 °F) en aplicaciones estructurales. Las temperaturas pueden llegar a 1200 °C (2200 °F) para componentes de rodamientos sin carga.

TABLA 6.9

Propiedades y aplicaciones típicas de superaleaciones base níquel seleccionadas a 870 °C (1600 °F) (todos son nombres comerciales)					
Aleación	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Astroloy	Forjable	770	690	25	Forjas para uso en alta temperatura
Hastelloy X	Forjable	255	180	50	Parte de lámina de motores de propulsión
IN-100	Fundido	885	695	6	Álabes y ruedas para motores de propulsión
IN-102	Forjable	215	200	110	Partes para sobrecalentadores y motores de propulsión
Inconel 625	Forjable	285	275	125	Motores y estructuras de aviones, equipo para procesamiento químico
Inconel 718	Forjable	340	330	88	Partes para motores de propulsión y cohetes
MAR-M 200	Fundido	840	760	4	Álabes para motores de propulsión
MAR-M 432	Fundido	730	605	8	Ruedas para turbinas fundidas integralmente
René 41	Forjable	620	550	19	Partes para motores de propulsión
Udimet 700	Forjable	690	635	27	Partes para motores de propulsión
Waspaloy	Forjable	525	515	35	Partes para motores de propulsión

Hay superaleaciones de base hierro, de base cobalto o de base níquel.

- Las superaleaciones de base hierro generalmente contienen de 32% a 67% de Fe, de 15% a 22% de Cr y de 9% a 38% de Ni. Las aleaciones comunes en este grupo son la serie *Incoloy*.
- Las superaleaciones de base cobalto por lo general contienen de 35% a 65% de Co, de 19% a 30% de Cr y hasta 35% de Ni. No son tan fuertes como las superaleaciones de base níquel, pero mantienen su resistencia a mayores temperaturas.
- Las superaleaciones de base níquel son las más comunes y se encuentran disponibles en una amplia variedad de composiciones (tabla 6.9). La proporción de níquel es de 38% a 76%. También contienen hasta 27% de Cr y 20% de Co. Las aleaciones comunes en este grupo son las series del *Hastelloy*, *Inconel*, *Nimonic*, *René*, *Udimet*, *Astroloy* y *Waspaloy*.

6.7 Titanio y sus aleaciones

El **titanio** (Ti, nombrado así en honor del gigante griego Titán) es un metal blanco plateado que fue descubierto en 1791, pero no se produjo comercialmente sino hasta la década de 1950. Aunque es costoso, su alta relación resistencia-peso y su resistencia a la corrosión a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas lo hace atractivo para muchas aplicaciones, como aeronaves, motores de propulsión (ver fig. 6.1), autos de carreras, palos de golf, componentes químicos, petroquímicos y marinos, cascos de submarinos, placas de blindaje y biomateriales, como implantes ortopédicos (tabla 6.10). Se han desarrollado aleaciones de titanio para servicio a 550 °C (1000 °F) por largos periodos y de hasta 750 °C (1400 °F) para lapsos más cortos.

El titanio no aleado, conocido como *titanio comercialmente puro*, tiene una excelente resistencia a la corrosión, para aplicaciones donde la resistencia pasa a segundo término. El aluminio, vanadio, molibdeno, manganeso y otros elementos de aleación le imparten propiedades como mejor capacidad de trabajo, resistencia y templeabilidad.

TABLA 6.10

Propiedades y aplicaciones típicas de aleaciones de titanio seleccionadas a diferentes temperaturas									
Composición nominal (%)	UNS	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)	Temp. (°C)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)
99.5 Ti	R50250	Recocido	330	240	30	55	300	150	95
5 Al, 2.5 Sn	R54520	Recocido	860	810	16	40	300	565	450
6 Al, 4 V	R56400	Recocido	1000	925	14	30	300	725	650
13 V, 11 Cr, 3 Al	R58010	Solución + Envejecimiento	1175	1100	10	20	300	980	900
		Solución + Envejecimiento	1275	1210	8	—	425	1100	830

Las propiedades y características de manufactura de las aleaciones de titanio son extremadamente sensibles a pequeñas variaciones en los elementos de aleación y residuales. Por lo tanto, es importante controlar la composición y el procesamiento, y sobre todo prevenir la contaminación de la superficie con hidrógeno, oxígeno o nitrógeno durante el proceso; estos elementos provocan fragilización del titanio y, en consecuencia, reducen su tenacidad y ductilidad.

La estructura cúbica centrada en el cuerpo del titanio (titanio beta) se da en temperaturas mayores a 880 °C (1600 °F) y es dúctil, mientras que su estructura hexagonal de empaquetamiento compacto (titanio alfa) es frágil y muy sensible a la corrosión por esfuerzo. Se pueden obtener otras estructuras (alfa, cercano a alfa, alfa-beta y beta) mediante aleación y tratamiento térmico, a fin de optimizarlo para aplicaciones específicas. Los **intermetálicos de aluminio de titanio** (TiAl y Ti₃Al) tienen mayor rigidez y menor densidad que las aleaciones convencionales de titanio y pueden soportar mayores temperaturas.

Producción. Primero, los minerales que contienen titanio se reducen a tetracloruro de titanio en un horno de arco y después se convierten en cloruro de titanio en una atmósfera clorada. Este compuesto se reduce luego a titanio metálico mediante destilación y lixiviado (disolución). Esta secuencia forma *titanio esponja*, que después se prensa como palanquillas, se funde y se vierte en lingotes para procesarlo y darle varias formas. La complejidad de estas operaciones termoquímicas de pasos múltiples (*proceso Kroll* desarrollado en las décadas de 1940 y 1950) aumenta de modo considerable el costo del titanio. En la actualidad hay nuevos desarrollos en procesos de extracción electroquímica para reducir tanto el número de pasos comprendidos como el consumo de energía y así bajar el costo de producción.

6.8 Metales y aleaciones refractarias

Existen cuatro **metales refractarios**: molibdeno, niobio, tungsteno y tantalio. Se les llama *refractarios* por su elevado punto de fusión. Aunque se descubrieron hace unos 200 años y se han utilizado como elementos importantes de aleación en aceros y superaleaciones, su uso en la ingeniería no comenzó sino hasta 1940. Más que la mayoría de los otros metales y aleaciones, estos metales mantienen su resistencia a temperaturas elevadas. Por lo tanto, son de gran importancia y uso en motores de cohetes, turbinas de gas y otras aplicaciones aeroespaciales; en las industrias electrónica, de potencia nuclear y química; y como materiales para herramientas y matrices. La gama de temperaturas para algunas

de estas aplicaciones es de entre 1100 °C y 2200 °C (2000 °F a 4000 °F), por lo que la resistencia y la oxidación son las mayores preocupaciones.

6.8.1 Molibdeno

El **molibdeno** (Mo) es un metal blanco plateado descubierto en el siglo XVIII; tiene un alto punto de fusión, elevado módulo de elasticidad, buena resistencia al impacto térmico y gran conductividad eléctrica y térmica. Se utiliza más que cualquier otro metal refractario en cohetes a base de propulsores sólidos, motores a reacción, estructuras de panel, componentes electrónicos, elementos calefactores y matrices para fundición a presión. Los principales elementos de aleación del molibdeno son el titanio y el zirconio. Por sí mismo es un elemento importante de aleación en los aceros aleados colados y forjados y en las aleaciones resistentes al calor; les imparte resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión. Una limitación importante de las aleaciones de molibdeno es su baja resistencia a la oxidación a temperaturas superiores a 500 °C (950 °F), por lo que requiere cubiertas protectoras.

Producción. La principal fuente de molibdeno es el mineral *molibdenita* (bisulfuro de molibdeno), que primero se procesa y se concentra; después se reduce por reacción, al principio con oxígeno y luego con hidrógeno. También se utilizan técnicas de metalurgia de polvos a fin de producir lingotes, para procesarlo y darle diversas formas.

6.8.2 Niobio (columbio)

El **niobio** (Nb, llamado así en honor de Niobe, la hija del mítico rey griego Tántalo) fue identificado por primera vez en 1801; también se le conoce como **columbio** (por su mineral fuente, *columbita*). Posee buena ductilidad y formabilidad y tiene mayor resistencia a la oxidación que otros metales refractarios. Con diversos elementos de aleación se pueden producir aleaciones de niobio con resistencia moderada y buenas características de fabricación, las cuales se utilizan en cohetes y misiles, superconductores, y en aplicaciones nucleares y químicas. El niobio también es un elemento de aleación en diferentes aleaciones y superaleaciones. Se procesa a partir de minerales, por reducción y refinación, y a partir de polvo mediante mezcla y formado en lingotes.

6.8.3 Tungsteno

El **tungsteno** (W, por wolframio, su nombre europeo, y de su mineral fuente, *wolframita*; en sueco *tung* significa “pesado” y *sten* significa “piedra”) se identificó por primera vez en 1781; es el más abundante de todos los metales refractarios y tiene el punto de fusión más elevado (3410 °C, 6170 °F). En consecuencia, se caracteriza por su alta resistencia a temperaturas elevadas. Sin embargo, posee alta densidad (por lo que se usa para equilibrar pesos y como contrapeso en sistemas mecánicos, incluyendo los relojes automáticos de pulso), es frágil a bajas temperaturas y ofrece una pobre resistencia a la oxidación. El tungsteno imparte resistencia y dureza a los aceros a temperaturas elevadas.

Las aleaciones de tungsteno se utilizan en aplicaciones que implican temperaturas superiores a 1650 °C (3000 °F), como los recubrimientos en gargantas de toberas en misiles, en las partes más calientes de los motores de propulsión y en cohetes, cortacircuitos, electrodos de soldadura, herramental para maquinado por descarga eléctrica y electrodos de bujías para motores. El filamento de alambre en los focos (sección I.1) se fabrica con tungsteno puro mediante técnicas de metalurgia de polvos y estirado de cable. El carburo de tungsteno, con cobalto como aglutinante para las partículas de carburo, es uno de los materiales más importantes para herramientas de corte y matrices. El tungsteno se procesa a partir de concentrados minerales mediante descomposición química y luego se reduce. Después se procesa con técnicas de metalurgia de polvos en una atmósfera de hidrógeno.

6.8.4 Tantalio

Identificado en 1802, el **tantalio** (Ta, llamado así en honor del rey griego Tántalo) se caracteriza por su alto punto de fusión (3000 °C, 5425 °F), elevada densidad, buena ductilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo, tiene una resistencia pobre a los productos químicos a temperaturas superiores a 150 °C (300 °F). Se utiliza mucho en capacitores electrolíticos y en diversos componentes en las industrias eléctrica, electrónica y química; también se emplea en aplicaciones térmicas, como hornos e intercambiadores de calor resistentes a los ácidos. Numerosas aleaciones con base en tantalio se usan de muchas formas en misiles y aeronaves. También sirve como elemento de aleación. Se procesa por medio de técnicas similares a las utilizadas para procesar niobio.

6.9 Berilio

De color gris acero, el **berilio** (Be, del mineral *berilo*) tiene una alta relación resistencia-peso. El berilio no aleado se utiliza en toberas de cohetes, estructuras espaciales y misiles, discos de frenos para aeronaves e instrumentos de precisión y espejos. Se emplea en aplicaciones nucleares y de rayos X debido a su baja absorción de neutrones. También es un elemento de aleación, y sus aleaciones de cobre y níquel se utilizan en diversas aplicaciones, entre ellas resortes (*cobre-berilio*), contactos eléctricos y herramientas que no producen chispas para emplearlas en ambientes explosivos, como las minas, y en la producción de polvos metálicos (sección 17.2). El berilio y su óxido son tóxicos; no deben inhalarse el polvo ni los humos que produce.

6.10 Zirconio

El **zirconio** (Zr) tiene apariencia plateada; buena resistencia y ductilidad a temperaturas elevadas y buena resistencia a la corrosión debido a una película de óxido adherente. Este elemento se utiliza en componentes electrónicos y en reactores nucleares de potencia por su baja absorción de neutrones.

6.11 Aleaciones de baja fusión

Las aleaciones de baja fusión se llaman así por sus puntos de fusión relativamente bajos. Los principales metales incluidos en esta categoría son el plomo, zinc, estaño y sus aleaciones.

6.11.1 Plomo

El **plomo** (Pb, por *plumbum*, la raíz de la palabra “plomero”) tiene alta densidad, resistencia a la corrosión (en virtud de la capa estable de óxido de plomo que se forma para proteger su superficie), blando, baja resistencia, ductilidad y buena capacidad de trabajo. La aleación con diversos elementos (como el antimonio y el estaño) realiza sus propiedades deseables y lo hace adecuado para tubería, tubos colapsables, aleaciones para cojinetes, fundas para cables, tejados y baterías de almacenamiento plomo-ácido. El plomo también se utiliza para amortiguar sonido y vibraciones, como protección contra radiaciones de rayos X, municiones, pesos y en la industria química.

Los artefactos de plomo más antiguos conocidos se fabricaron alrededor del año 3000 a.C. Algunos tubos fabricados por los romanos e instalados en los baños romanos en Bath, Inglaterra, hace dos milenios, aún se encuentran en uso. El plomo también es un elemento de aleación en *soldaduras blandas*, acero y aleaciones de cobre; promueve la re-

sistencia a la corrosión y la maquinabilidad. Se usa además como lubricante sólido en las operaciones de formado del metal caliente. Sin embargo, debido a su toxicidad, la contaminación ambiental por plomo (que provoca envenenamiento) constituye una preocupación importante; se están haciendo esfuerzos para reemplazar el plomo con otros elementos (como *soldaduras blandas sin plomo*). La fuente mineral básica para el plomo es la *galena* (PbS). Se extrae de minas, se funde y refina mediante tratamientos químicos.

6.11.2 Zinc

El **zinc** (Zn) tiene un color blanco azulado y es el cuarto metal más utilizado en la industria, después del hierro, el aluminio y el cobre. Aunque se sabía de su existencia desde la antigüedad, el zinc no se desarrolló sino hasta el siglo XVIII. Tiene dos usos principales: (1) para galvanizar hierro, láminas de acero y alambre, y (2) como base de aleación para fundición.

En el **galvanizado**, el zinc sirve como ánodo y protege el acero (cátodo) de ataques corrosivos en caso de que el recubrimiento se raye o agujere. También se utiliza como elemento de aleación; el latón, por ejemplo, es una aleación de cobre y zinc. Elementos de aleación importantes en las aleaciones a base de zinc son el aluminio, cobre y magnesio, que imparten resistencia y proveen control dimensional durante el colado del metal. Las aleaciones de base zinc se usan ampliamente en la fundición a presión para fabricar productos como bombas de combustible y parrillas de automóviles, componentes para electrodomésticos como aspiradoras y lavadoras, equipo de cocina, diversas partes para maquinaria y equipo de fotograbado. Se usa también en las aleaciones superplásticas que tienen buenas características de formabilidad, por su capacidad de sufrir grandes deformaciones sin fallar. Un ejemplo de aleación superplástica de zinc es una lámina de grano muy fino, de 78% de Zn-22% de Al, que se puede formar mediante métodos utilizados para formar plásticos o metales.

Producción. En la naturaleza hay muchos minerales que contienen zinc. La principal fuente es el sulfuro de zinc, también llamado *zincblenda*. Primero se calcina al aire y se convierte en óxido de zinc; después se reduce a zinc mediante electrólisis (con ácido sulfúrico) o por calentamiento en un horno con carbón (lo que hace que se separe el zinc fundido).

6.11.3 Estaño

Aunque se utiliza en pequeñas cantidades, el **estaño** (Sn, del latín *stannum*) es un metal importante. El uso más extendido de este metal, de un blanco plateado brillante, es como cubierta protectora de láminas de acero (*lámina estañada*) para fabricar contenedores (*latas estañadas*) de alimentos y otros productos. La baja resistencia al corte de los recubrimientos de estaño sobre láminas de acero mejora su desempeño en el embutido profundo y en general en el trabajo de prensado. A diferencia de los aceros galvanizados, si el recubrimiento se agujera o se destruye, el acero se corroe porque el estaño es catódico con respecto a este último.

El estaño no aleado se utiliza en material de recubrimiento para plantas de destilación de agua y como capa fundida de metal sobre la que se fabrican placas de vidrio (sección 18.3). Las aleaciones de base estaño (también llamadas **metales blancos**) por lo general contienen cobre, antimonio y plomo. Los elementos de aleación aportan dureza, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. El estaño es un elemento de aleación en las aleaciones dentales y de bronce (aleación cobre-estaño), titanio y zirconio. Las aleaciones estaño-plomo son materiales comunes en las soldaduras blandas, con una amplia gama de composiciones y puntos de fusión.

Debido a sus mínimos coeficientes de fricción (resultantes de su baja resistencia al corte y baja adhesión), algunas aleaciones de estaño se utilizan como materiales para bujes de extremos de flechas. A estas aleaciones se les llama **babbitts** (en honor de I. Babbitt,

1799-1862) y contienen estaño, cobre y antimonio. El **pewter** es una aleación de estaño, cobre y antimonio. Se desarrolló en el siglo XV y se ha utilizado para accesorios de mesa, artículos huecos y objetos decorativos. Los tubos de los órganos musicales se fabrican con aleaciones de estaño. El mineral de estaño más importante es la *casiterita* (óxido de estaño), que es de grado bajo. El mineral se extrae de minas, se concentra mediante diversas técnicas y se funde, refina y vacía en lingotes para su procesamiento posterior.

6.12 Metales preciosos

Los metales *preciosos* (costosos) más importantes, también llamados **metales nobles**, se describen a continuación.

- El **oro** (Au, de *aurum*) es blando y dúctil, además de tener buena resistencia a la corrosión a cualquier temperatura. Las aplicaciones típicas incluyen joyería, acuñado, reflectores, láminas para decoración, trabajo dental, electrodeposición, contactos y terminales eléctricas.
- La **plata** (Ag, de *argentum*) es un metal dúctil que tiene la mayor conductividad eléctrica y térmica (tabla 3.1). Sin embargo, desarrolla una película de óxido que afecta sus características superficiales y apariencia. Suele aplicarse en artículos de mesa, joyería, acuñado, electrodeposición, película fotográfica, contactos eléctricos, soldaduras blandas, recubrimientos para rodamientos, equipo para alimentos y productos químicos. La *plata sterling* es una aleación de plata y 7.5% de cobre.
- El **platino** (Pt) es un metal blanco-grisáceo blando, dúctil, que tiene buena resistencia a la corrosión incluso a temperaturas elevadas. Las aleaciones de platino se utilizan en contactos eléctricos, electrodos de bujías, catalizadores para controlar la contaminación automotriz, filamentos, boquillas y matrices para la extrusión de fibras de vidrio (sección 18.3), termopares, joyería, industria electroquímica y trabajos dentales.

6.13 Aleaciones con memoria de forma

Las *aleaciones con memoria de forma* son únicas, ya que después de ser deformadas plásticamente a temperatura ambiente, proceso en el que adquieren diversas formas, regresan a su configuración original mediante calentamiento. Por ejemplo, una pieza de alambre recto fabricada con este material se puede enrollar dándole la apariencia de un resorte helicoidal; cuando se calienta con un cerillo, el resorte se desenrolla y regresa a su forma original recta. Las aleaciones con memoria de forma pueden utilizarse para generar movimiento o fuerza en actuadores sensibles a la temperatura. Su comportamiento también puede ser *reversible*, esto es, la figura puede cambiar una y otra vez al aplicar y retirar el calor. Una aleación típica con memoria de forma es 55% de Ni-45% de Ti (*Nitinol*). Otras aleaciones como ésta son cobre-aluminio-níquel, cobre-zinc-aluminio, hierro-manganeso-silicio y titanio-níquel-hafnio. Las aleaciones con memoria de forma por lo general tienen buena ductilidad, resistencia a la corrosión y alta conductividad eléctrica.

Las aleaciones con memoria de forma se aplican en sensores, armaduras para anteojos, *stents*, relevadores, bombas, interruptores, conexiones, abrazaderas, sujetadores y sellos. Como ejemplo, se ha desarrollado una válvula de níquel-titanio contra quemaduras para proteger a la gente en lavabos, tinas y regaderas. Se instala directamente en el sistema de tubería y reduce el flujo del agua a un goteo 3 segundos después de que la temperatura del líquido llega a 47 °C (116 °F). Los nuevos desarrollos incluyen películas delgadas de aleaciones con memoria de forma depositadas sobre sustratos de silicio pulido para usarlas en dispositivos microelectromecánicos (MEMS) (ver capítulo 29).

6.14 | Aleaciones amorfas (vidrios metálicos)

Las aleaciones metálicas que, a diferencia de los metales, no tienen una estructura cristalina de largo alcance se llaman *aleaciones amorfas*; no tienen límites de granos y los átomos se empaquetan apretadamente y al azar. La estructura amorfa se obtuvo a finales de la década de 1960 mediante la **solidificación extremadamente rápida** de la aleación fundida (sección 11.5). Debido a que su estructura se parece a la de los vidrios, a estas aleaciones también se les llama *vidrios metálicos*. Contienen hierro, níquel y cromo, que se alean con carbono, fósforo, boro, aluminio y silicio. Se encuentran disponibles como alambre, cintas, tiras y en polvo. Se aplican como insertos en la placa frontal de las cabezas de los palos de golf; esta aleación se compone de zirconio, berilio, cobre, titanio y níquel, y se fabrica mediante fundición a presión. Se aplican también en los bates huecos de aluminio para béisbol recubiertos con un *compósito* de metal amorfo mediante rocío térmico, y se dice que mejoran el bate.

Las aleaciones amorfas muestran una excelente resistencia a la corrosión, buena ductilidad, alta resistencia y una muy baja pérdida por histéresis magnética. Esta última propiedad se utiliza en la fabricación de núcleos de acero magnético para transformadores, generadores, motores, balastos para lámparas, amplificadores magnéticos y aceleradores lineales. La baja pérdida por histéresis magnética mejora la eficiencia; sin embargo, sus costos de fabricación son significativos. Se están desarrollando aceros amorfos cuya resistencia es dos veces superior a la de los aceros de alta resistencia, con aplicaciones potenciales en grandes estructuras; no obstante, sus costos son prohibitivos. Una aplicación importante de las superaleaciones de polvos solidificados rápidamente es la consolidación en formas cercanas a las finales para partes utilizadas en motores aeroespaciales.

6.15 | Espumas metálicas

Las *espumas metálicas* son estructuras materiales en las que el metal constituye sólo de 5% a 20% del volumen de la estructura. Generalmente fabricadas con aleaciones de aluminio (aunque también de titanio o de tantalio), las espumas metálicas se pueden producir inyectando aire en el metal fundido y extrayendo la espuma que se forma en la superficie; esta espuma se solidifica después. Otros métodos para producir espuma metálica incluyen (a) la deposición química de vapor (sección 34.6) en una red de espuma de polímero o de carbono, y (b) dopando metales fundidos o en polvo (capítulo 17) con hidruro de titanio (TiH_2), que después libera hidrógeno en forma de gas a las temperaturas elevadas de fundición o de sinterización.

Las espumas metálicas tienen combinaciones únicas de proporciones resistencia-densidad y rigidez-densidad, aunque estas proporciones no son tan altas como las de los metales base por sí mismos. Sin embargo, son muy ligeras y, por lo tanto, resultan materiales atractivos para aplicaciones aeroespaciales. Debido a su porosidad, las espumas metálicas también se aplican en filtros e implantes ortopédicos.

6.16 | Nanomateriales

Existen desarrollos importantes que comprenden la producción de materiales con granos, fibras, películas y compósitos que tienen partículas de 1 a 100 nm de tamaño. Investigados a principios de la década de 1980, y por lo general llamados *nanomateriales*, poseen ciertas propiedades que con frecuencia son superiores a las de los materiales tradicionales y comercialmente existentes. Estas características incluyen la resistencia, dureza, ductilidad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión adecuadas para aplicaciones estruc-

turales (cargas dinámicas) y no estructurales, combinadas con propiedades eléctricas, magnéticas y ópticas, únicas.

Un nanomaterial puede estar compuesto por cualquier combinación de elementos químicos. Entre las composiciones más importantes están los carburos, óxidos, nitruros, metales y aleaciones, polímeros orgánicos y varios compósitos. Los métodos de síntesis incluyen la condensación por gas inerte, síntesis de plasma, electrodeposición, síntesis sol-gel y aleación mecánica o molino de bolas.

Los polvos sintetizados se consolidan en materiales en masa mediante diversas técnicas, como la compactación y la sinterización. Están disponibles en varias formas y tienen diversos nombres, como materiales nanocristalinos, nanoestructurados, de nanofase, nanopolvos, nanofibras, nanoalambres, nanotubos y nanopelículas. Debido a que la síntesis de estos productos se efectúa a niveles atómicos, se controla estrictamente su pureza (del orden de 99.9999%), su homogeneidad y la uniformidad de su microestructura; por consiguiente, también se pueden controlar con precisión sus propiedades mecánicas, físicas y químicas.

Entre las aplicaciones actuales y potenciales de los nanomateriales se encuentran las siguientes:

- a. Herramientas de corte e insertos fabricados con carburos y otros cerámicos nanocristalinos.
- b. Cerámicas de nanofase, que son dúctiles y maquinables.
- c. Polvos para procesamiento de metalurgia de polvos.
- d. Chips para computadoras de siguiente generación que utilizan materiales nanocristalinos de inicio, con muy alta pureza, mejor conductividad térmica e interconexiones más durables.
- e. Pantallas planas para computadoras portátiles y televisiones fabricadas mediante síntesis de fósforo nanocristalino, a fin de mejorar la resolución de la pantalla.
- f. Electrodo para bujías, *ignitores* y combustibles para cohetes, implantes médicos, sensores de alta sensibilidad, catalizadores para eliminación de contaminantes, magnetos de alta potencia y baterías de gran energía y densidad.

RESUMEN

- Los metales y las aleaciones no ferrosas cubren una amplia gama de materiales. Pueden estar constituidos por aluminio, magnesio y cobre y sus aleaciones, que tienen una amplia variedad de aplicaciones. Para servir a temperaturas más elevadas pueden contener níquel, titanio, aleaciones refractarias (molibdeno, niobio, tungsteno, tantalio) y superaleaciones. Otras categorías de materiales no ferrosos incluyen aleaciones de baja fusión (plomo, zinc, estaño) y metales preciosos (oro, plata y platino).
- Las aleaciones no ferrosas tienen una amplia variedad de propiedades deseables, como resistencia, tenacidad, dureza y ductilidad; resistencia a alta temperatura, termofluencia y oxidación; una extensa gama de propiedades físicas, térmicas y químicas; y elevadas proporciones resistencia-peso y rigidez-peso (en particular para el aluminio y el titanio). Se les puede dar tratamiento térmico a fin de aportarles ciertas propiedades. Como en todos los materiales, la selección de un material no ferroso para una aplicación en particular requiere considerar muchos factores, incluyendo requerimientos de diseño y servicio, efectos de largo plazo, afinidad química con otros materiales, ataques del medio ambiente y costo.
- Las aleaciones con memoria de forma, las aleaciones amorfas (vidrios metálicos) y los nanomateriales tienen algunas propiedades que son superiores a las de los materiales convencionales. Cada uno tiene varias aplicaciones únicas en el diseño y la manufactura de productos.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

6.32 Debido al número de procesos que implica fabricarlas, el costo de las materias primas para metales depende de su condición (laminado en caliente o en frío), forma (placa, lámina, barra, tubo) y tamaño. Investigue la bibliografía técnica y listas de precios (o póngase en contacto con proveedores) y elabore una lista que indique el costo de 100 kg de los materiales no ferrosos descritos en este capítulo, según su disponibilidad en diferentes condiciones, formas y tamaños.

6.33 Los materiales descritos en este capítulo tienen numerosas aplicaciones. Investigue la bibliografía disponible y liste varios productos específicos y sus aplicaciones, indicando los tipos de materiales utilizados en ellos.

6.34 Nombre varios productos que no se habrían desarrollado hasta sus etapas avanzadas (como los encontramos hoy en día) si no se hubieran desarrollado aleaciones con alta resistencia mecánica, alta resistencia a la corrosión y a la termofluencia (todas a temperaturas elevadas).

6.35 Suponga que es el gerente de ventas de una compañía que produce metales no ferrosos. Elija cualquiera de los metales y aleaciones descritos en este capítulo y prepare un folleto, incluyendo algunas ilustraciones, para que su personal lo utilice como apoyo en su contacto con clientes potenciales.

6.36 Revise varios productos y componentes metálicos y sugiera de qué materiales están hechos. Justifique sus suposiciones. Si indica dos o más posibilidades, explique su razonamiento.

6.37 Dé aplicaciones para (a) metales amorfos, (b) metales preciosos, (c) aleaciones de baja fusión, y (d) nanomateriales.

6.38 Describa las ventajas de fabricar productos con materiales multicapas. (Por ejemplo, aluminio unido al fondo de ollas de acero inoxidable).

6.39 Describa aplicaciones y diseños que utilicen aleaciones con memoria de forma.

6.40 A la Edad de Bronce se le conoce así porque los metales más duros conocidos en esa época eran bronce. Por lo tanto, las herramientas, armas y armaduras se fabricaban con bronce. Investigue las fuentes geográficas de los metales necesarios para fabricar bronce e identifique las fuentes conocidas en ese periodo. (*Nota:* ¿Explica esto el interés de los griegos por las islas británicas?).

6.41 Las tapas de las latas de aluminio para bebidas se fabrican con aleación 5182, mientras que los fondos se elaboran con aleación 3004. Estudie las propiedades de estas aleaciones y explique por qué se utilizan en estas aplicaciones.

6.42 Consiga especímenes de cobre puro, aluminio puro y aleaciones de cobre y de aluminio. Efectúe ensayos de tensión en cada uno de ellos, grafique los diagramas esfuerzo-deformación y evalúe los resultados.

6.43 Comente sus observaciones respecto de los tipos de materiales utilizados en secciones particulares del motor de propulsión mostrado en la figura 6.1.

6.44 Revise diversos electrodomésticos pequeños o grandes en su casa e identifique los metales y las aleaciones que crea que se han utilizado en su construcción.

6.45 Consulte la bibliografía técnica reciente y comente las tendencias en el uso de materiales metálicos en (a) vehículos militares, (b) equipo para deportes, (c) equipo médico, (d) aplicaciones automotrices y (e) aeronaves.