

6

METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 6.1 Aleaciones y diagramas de fase
 - 6.1.1 Aleaciones
 - 6.1.2 Diagramas de fase
- 6.2 Metales ferrosos
 - 6.2.1 El diagrama de fase hierro-carbono
 - 6.2.2 Producción de hierro y acero
 - 6.2.3 Aceros
 - 6.2.4 Hierros colados
- 6.3 Metales no ferrosos
 - 6.3.1 El aluminio y sus aleaciones
 - 6.3.2 El magnesio y sus aleaciones
 - 6.3.3 El cobre y sus aleaciones
 - 6.3.4 El níquel y sus aleaciones
 - 6.3.5 El titanio y sus aleaciones
 - 6.3.6 El zinc y sus aleaciones
 - 6.3.7 El plomo y el estaño
 - 6.3.8 Metales refractarios
 - 6.3.9 Metales preciosos
- 6.4 Superalaciones
- 6.5 Guía para el procesamiento de metales

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

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

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

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

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

6.1 ALEACIONES Y DIAGRAMAS DE FASE

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

6.1.1 Aleaciones

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

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

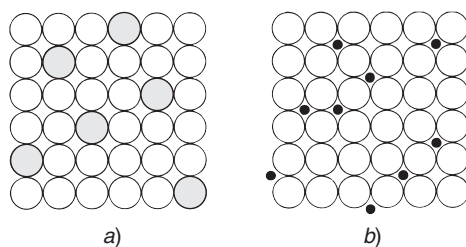


FIGURA 6.1 Dos formas de soluciones sólidas: a) solución sólida sustitucional, y b) solución sólida intersticial.

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

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

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

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

6.1.2 Diagramas de fase

Como se utiliza en este texto, el término ***diagrama de fase*** es un medio gráfico de representar las fases de un sistema de aleación metálica como una función de la composición y la temperatura. El análisis del diagrama se limitará a sistemas de aleaciones que consisten en dos elementos a presiones atmosféricas. Este tipo de diagrama se denomina ***diagrama de fase binaria***. En otros textos sobre la ciencia de los materiales se estudian otras formas de los diagramas de fase, por ejemplo en la referencia [5].

El sistema de aleación cobre-níquel El modo mejor de presentar el diagrama de fase es con un ejemplo. En la figura 6.2 se ilustra uno de los casos más sencillos, el sistema de la aleación Cu-Ni. En el eje horizontal se grafica la composición, y en el vertical la

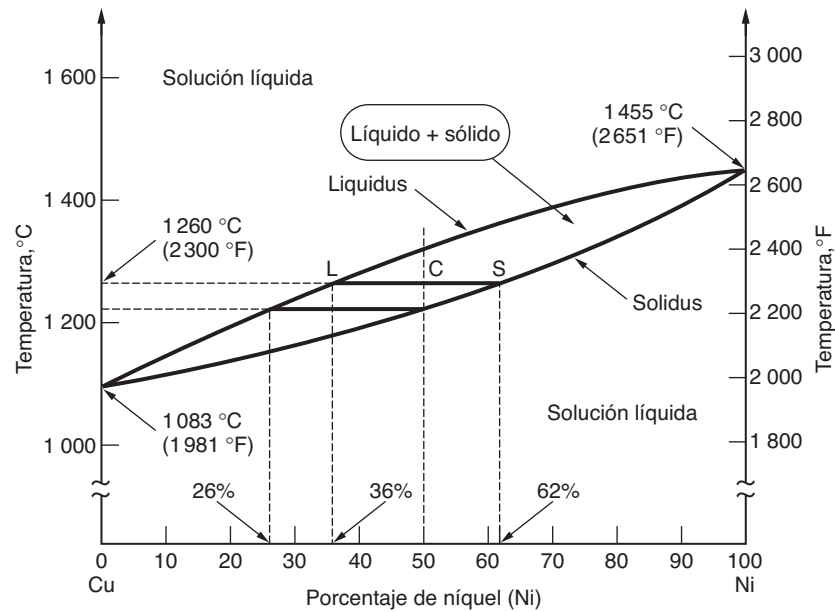


FIGURA 6.2 Diagrama de fase para el sistema de la aleación cobre-níquel.

temperatura. Así, cualquier punto del diagrama indica la composición conjunta y la fase o fases presentes a la temperatura dada. El cobre puro se funde a 1 083 °C (1 981 °F), y el níquel puro a 1 455 °C (2 651 °F). Las composiciones de la aleación entre estos extremos muestran fusión gradual que comienza en el solidus y en el liquidus conforme la temperatura se incrementa.

El sistema cobre-níquel es una aleación de solución sólida a través de todo el rango de composiciones. En cualquier punto de la región por debajo de la línea de solidus, la aleación es una solución sólida; en este sistema no hay fases sólidas intermedias. Sin embargo, hay una mezcla de fases en la región delimitada por las líneas de solidus y de liquidus. Recuerde el lector que en el capítulo 4 se dijo que el solidus es la temperatura a la que el metal sólido comienza a fundirse conforme la temperatura aumenta, y el liquidus es la temperatura en que termina la fusión. Ahora se ve en el diagrama de fase que esas temperaturas varían con la composición. Entre el solidus y el liquidus, el metal es una mezcla sólida-líquida.

Determinación de las composiciones químicas de las fases Aunque la composición conjunta de la aleación está dada por su posición en el eje x, las composiciones de las fases líquida y sólida no son las mismas. Es posible determinar dichas composiciones por medio del diagrama de fase si se dibuja una línea horizontal a partir de la temperatura de interés. Los puntos de la intersección de la línea horizontal con las de solidus y de liquidus indican las composiciones de las fases sólida y líquida presentes, respectivamente. Tan sólo se hacen las proyecciones verticales desde esos puntos de intersección hacia el eje x y se leen las composiciones correspondientes.

Ejemplo 6.1 Determinación de composiciones a partir del diagrama de fase

Para ilustrar el procedimiento, suponga que se desea analizar las composiciones de las fases líquida y sólida presentes en el sistema cobre-níquel, para una composición agregada de 50% de níquel y a una temperatura de 1 260 °C (2 300 °F).

Solución: Se dibuja una línea horizontal a la temperatura dada, como se muestra en la figura 6.2. La línea interseca la de solidus en una composición de 62% de níquel, lo que indica la composición de la fase sólida. La intersección con la línea de liquidus ocurre en una composición de 36% de Ni, que corresponde al análisis de la fase líquida.

Conforme se reduce la temperatura de la aleación 50-50 de Cu-Ni, se alcanza la línea de solidus alrededor de 1 221 °C (2 230 °F). Si se aplica el mismo procedimiento que se utilizó en el ejemplo, se encuentra que la composición del metal sólido es de 50% de níquel, y la composición del último remanente líquido que queda por solidificarse tiene alrededor de 26% de níquel. ¿Cómo puede ser, se preguntará el lector, que la última onza de metal fundido tenga una composición tan diferente de la del metal sólido al que se integra? La respuesta es que el diagrama de fase supone que se permite que prevalezcan condiciones de equilibrio. En realidad, al diagrama de fase binaria a veces se le llama diagrama de equilibrio, debido a dicha suposición. Lo que significa es que se da el tiempo suficiente para que el metal sólido cambie en forma gradual su composición por difusión, para alcanzar la composición indicada por el punto de intersección a lo largo de la línea de liquidus. En la práctica, cuando una aleación se solidifica (por ejemplo, en una fundición), en la masa sólida ocurre una **segregación** debido a condiciones de no equilibrio. El primer líquido que se solidifica tiene una composición rica en el elemento metálico con el punto de fusión más alto. Después, conforme más metal se solidifica, su composición es diferente de la del primero que se solidificó. A medida que en una masa sólida aumentan los puntos de formación de núcleos, las composiciones se distribuyen dentro de la masa, en función de la temperatura y el tiempo del proceso en que ocurrió la solidificación. La composición conjunta es el promedio de la distribución.

Determinación de las cantidades de cada fase A partir del diagrama de fase, también se puede determinar las cantidades de cada fase presentes a una temperatura dada. Esto se hace por medio de la **regla de la palanca inversa**: 1) sobre la misma línea horizontal de antes, que indica la composición conjunta a una temperatura dada, se mide la distancia entre la composición agregada y los puntos de intersección con las líneas de liquidus y de solidus, y se identifican las distancias como CL y CS, respectivamente (véase de nuevo la figura 6.2), 2) la proporción de fase líquida presente está dada por

$$L \text{ Proporción por fase} = \frac{CS}{(CS + CL)} \quad (6.1)$$

3) la proporción de fase sólida presente está dada por

$$S \text{ Proporción por fase} = \frac{CL}{(CS + CL)} \quad (6.2)$$

Ejemplo 6.2 Determinación de las proporciones de cada fase

Determine las proporciones de fases líquida y sólida para la composición de 50% de níquel del sistema cobre-níquel a la temperatura de 1 260 °C (2 300 °F).

Solución: Con la misma línea horizontal de la figura 6.2 para el ejemplo anterior, se miden las distancias CS y CL y resultan ser de 10 mm y 12 mm, respectivamente. Así, la proporción de la fase líquida es de $10/22 = 0.45$ (45%) y la proporción de la fase sólida es de $12/22 = 0.55$ (55%).

Las proporciones dadas por las ecuaciones (6.1) y (6.2) están dadas en peso, igual que los porcentajes del diagrama de fase. Observe que las proporciones se basan en la distancia al lado opuesto de la fase de interés; de ahí el nombre de regla de la palanca inversa. Puede verse la lógica de esto si se toma el caso extremo cuando, por ejemplo, $CS = 0$; en ese punto, la proporción de la fase líquida es cero porque se ha alcanzado la línea de solidus y por ello la aleación está por completo solidificada.

Los métodos para determinar las composiciones químicas de las fases y las cantidades en cada una de éstas se aplican tanto a la región sólida del diagrama de fase como a la región liquidus-solidus. Estos métodos pueden emplearse donde sea que haya regiones en el diagrama de fase en que haya dos de ellas presentes. Cuando sólo está presente una

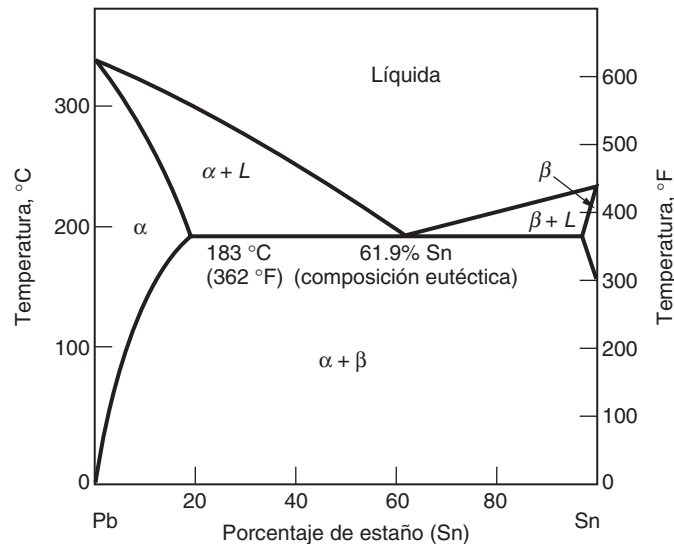


FIGURA 6.3 Diagrama de fase para el sistema de aleación estaño-plomo.

fase (véase la figura 6.2, se trata de toda la región sólida) la composición de la fase es su composición agregada en condiciones de equilibrio; y la regla de la palanca inversa no se aplica puesto que sólo hay una fase.

El sistema de la aleación estaño-plomo Un diagrama de fase más complicado es el del sistema Sn-Pb, que se muestra en la figura 6.3. Las aleaciones estaño-plomo se utilizan mucho como material de soldadura (véase la sección 32.2) de conexiones eléctricas. El diagrama de fase presenta varias características que no aparecen en el de Cu-Ni ya visto. Una característica es la presencia de dos fases sólidas, alfa (α) y beta (β). La fase α es una solución sólida de estaño en plomo en el lado izquierdo del diagrama, y la fase β es una solución sólida de plomo en estaño, que ocurre sólo a temperaturas elevadas alrededor de 200 °C (375 °F) en el lado derecho del diagrama. Entre esas soluciones sólidas queda una mezcla de las dos fases sólidas, $\alpha + \beta$.

Otra característica de interés en el sistema estaño-plomo es la manera en que difiere la fusión para composiciones diferentes. El estaño puro se funde a 232 °C (449 °F), y el plomo puro a 327 °C (621 °F). Las aleaciones de estos elementos se funden a temperaturas más bajas. El diagrama muestra dos líneas de liquidus que comienzan en los puntos de fusión de los metales puros hasta alcanzar una composición de 61.9% de estaño. Ésta es la composición eutéctica para el sistema estaño-plomo. En general, una **aleación eutéctica** es una composición particular en un sistema de aleación para la que el solidus y liquidus están a la misma temperatura. La **temperatura eutéctica** correspondiente, el punto de fusión de la composición eutéctica, es de 183 °C (362 °F), en este caso. La temperatura eutéctica siempre es el punto de fusión más bajo para un sistema de aleación (el término **eutéctico** se deriva de la palabra griega eutektos, que significa que se funde con facilidad).

Los métodos para determinar el análisis químico de las fases y las proporciones de éstas presentes, se aplican con facilidad al sistema Sn-Pb igual que se hizo en el de Cu-Ni. En realidad, esos métodos son aplicables en cualquier región que contenga dos fases, inclusive sólidas. La mayoría de los sistemas de aleación se caracteriza por la existencia de fases sólidas y composiciones eutécticas múltiples, por lo que es frecuente que los diagramas de fase de ellos sean similares al del estaño-plomo. Por supuesto, muchos sistemas de aleación son considerablemente más complejos. Uno de ellos se estudiará más adelante, cuando se vea las aleaciones de hierro y carbono.

6.2 METALES FERROSOS

Los metales ferrosos se basan en el hierro, uno de los metales más antiguamente conocidos por el hombre (véase la nota histórica 6.1). Las propiedades y otros datos relacionados con el hierro se presentan en la tabla 6.1a). Los metales ferrosos de importancia en la ingeniería son aleaciones de hierro y carbono. Se dividen en dos grupos principales: acero y hierro fundido. Juntos constituyen aproximadamente el 85% de las toneladas de metal en Estados Unidos [5]. Se comenzará el estudio de los metales ferrosos con el examen del diagrama de fase hierro-carbono.

Nota histórica 6.1 Hierro y acero

El hierro se descubrió en algún momento durante la Edad de Bronce. Es probable que se haya encontrado entre las cenizas de las fogatas hechas cerca de depósitos de mineral de hierro. El uso del metal creció hasta que finalmente superó al bronce en importancia. Por lo general se afirma que la Edad de Hierro data de alrededor de 1200 a.C., aunque se han encontrado artefactos hechos de hierro en la gran pirámide de Gizeh, en Egipto, que data de 2900 a.C. En Israel se han encontrado calderas para fundir hierro que se remontan a 1300 a.C. En la antigua Asiria (norte de Irak) se fabricaban carros, espadas y herramientas de hierro alrededor del año 1000 a.C. Los romanos heredaron el trabajo del hierro de sus provincias, sobre todo de Grecia, y perfeccionaron la tecnología para que alcanzara niveles nuevos, difundiéndola por Europa. Las civilizaciones antiguas aprendieron que el hierro era más duro que el bronce y adoptaba un filo más agudo y fuerte.

Durante la Edad Media, en Europa, la invención del cañón creó la primera demanda real de hierro; sólo entonces superó por fin en uso al cobre y bronce. Asimismo, la estufa de hierro fundido, aparato de los siglos XVII y XVIII, incrementó de manera significativa la demanda de hierro (véase la nota histórica 11.3).

En el siglo XIX, industrias tales como la ferroviaria, naviera, construcción, maquinaria y militar, generaron un crecimiento impresionante de la demanda de hierro y acero en Europa y el Continente Americano. Aunque podían producirse cantidades grandes de **arrabio** (crudo) por medio de **altos hornos**, el proceso subsecuente para producir hierro forjado y acero era lento. La necesidad de mejorar la

productividad de estos metales vitales fue la “madre de la invención”. En Inglaterra, Henry Bessemer inventó el proceso de soplar aire a través del hierro fundido, lo que condujo al **convertidor Bessemer** (patentado en 1856). En Francia, Pierre y Emile Martin construyeron el primer **horno de hogar abierto**, en 1864. Estos métodos permitieron producir hasta 15 toneladas en un solo lote (colada), incremento sustancial respecto de los métodos anteriores.

En Estados Unidos, la expansión de los ferrocarriles después de la Guerra Civil generó una demanda enorme de acero. En las décadas de 1880 y 1890, se usaron por vez primera cantidades significativas de vigas de acero para la construcción. Los rascacielos se basaron en ellas.

Cuando se dispuso de electricidad en abundancia, hacia finales del siglo XIX, esta fuente de energía se usó para fabricar acero. El primer **horno eléctrico** comercial para producir acero funcionó en Francia en 1899. Hacia 1920, se había convertido en el proceso principal para hacer aceros aleados.

Justo antes de iniciar la Segunda Guerra Mundial comenzó el uso de oxígeno puro para fabricar acero en varios países europeos y en Estados Unidos. Después de la guerra, trabajos realizados en Austria culminaron en la creación del **horno de oxígeno básico** (BOF). Ésta se volvió la tecnología moderna para producir acero, y alrededor de 1970 superó al método de hogar abierto. El convertidor Bessemer había sido superado por el método de corazón abierto hacia 1920 y a partir de 1971 dejó de ser un proceso comercial para fabricar acero.

TABLA 6.1 Datos básicos de los elementos metálicos: a) hierro.

Símbolo: Fe	Mineral principal: Hematita (Fe ₂ O ₃)
Número atómico: 26	Elementos de aleación: Carbono; también cromo, manganeso, níquel, molibdeno, vanadio y silicio.
Gravedad específica: 7.87	Aplicaciones comunes: construcción, maquinaria, automotriz, vías y equipo ferroviario.
Estructura cristalina: BCC	
Temperatura de fusión: 1 539 °C (2 802 °F)	
Módulo de elasticidad: 209 000 MPa (30 × 10 ⁶ lb/in ²)	

Recopilada a partir de las referencias [5], [9], [10] y de otras fuentes.

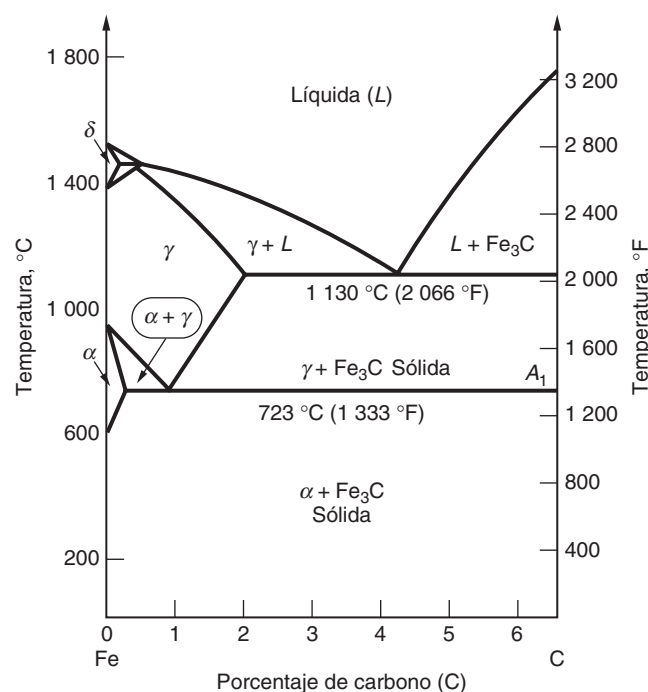
6.2.1 El diagrama de fase hierro-carbono

En la figura 6.4 se presenta el diagrama de fase del hierro-carbono. El hierro puro se funde a 1 539 °C (2 802 °F). Durante la elevación de la temperatura a partir de la del ambiente, pasa por varias transformaciones de fase sólida, como se aprecia en el diagrama. Al comenzar a temperatura ambiente la fase es alfa (α), también llamada **ferrita**. A 912 °C (1 674 °F), la ferrita se transforma en gama (γ), denominada **austenita**. Ésta, a su vez, se convierte en delta (δ) a 1 394 °C (2 541 °F), en la que permanece hasta que se funde. Las tres fases son distintas; la alfa y delta tienen estructuras reticulares BCC (véase la sección 2.3), y entre ellas está la gama con FCC. El video clip sobre tratamiento térmico describe el diagrama de fase hierro-carbono y cómo se utiliza para dar resistencia al acero.

El hierro, como producto comercial, se encuentra disponible con varios niveles de pureza. El **hierro electrolítico** es el más puro, con cerca de 99.99%, se usa en investigación y otros propósitos en los que se requiere al metal puro. El **hierro de lingote** contiene alrededor de 0.1% de impurezas (inclusive cerca de 0.01% de carbono), y se usa en aplicaciones en las que se necesitan ductilidad o resistencia a la corrosión elevadas. El **hierro forjado** contiene un 3% de escoria pero muy poco carbono, y se le da forma con facilidad en operaciones de formado en caliente, como la forja.

Los límites de solubilidad del carbono en el hierro son bajos en la fase de ferrita, sólo cerca de 0.022% a 723 °C (1 333 °F). En la de austenita puede disolverse cerca de 2.1% de carbono a una temperatura de 1 130 °C (2 066 °F). Esta diferencia de solubilidades entre la alfa y la gama origina oportunidades para dar resistencia por medio de tratamiento térmico, pero eso se deja para más adelante. Aun sin tratamiento térmico, la resistencia del hierro se incrementa en forma notable conforme el contenido de carbono aumenta, y se ingresa a la región en la que el metal toma el nombre de acero. Con más precisión, el **acero** se define como una aleación de hierro-carbono que contiene entre 0.02% y 2.1% de carbono; por supuesto, los aceros también pueden contener otros elementos de aleación.

FIGURA 6.4 Diagrama de fase para el sistema hierro-carbono, hasta 6% de carbono.



Con 4.3% de carbono, en el diagrama se observa una composición eutéctica. Existe una característica similar en la región sólida del diagrama con 0.77% de carbón y 723 °C (1 333 °F). Ésta se denomina **composición eutectoide**. Los aceros por debajo de este nivel de carbono se conocen como **aceros hipoeutectoides**, y por arriba de ese nivel, de 0.77% a 2.1%, se les llama **aceros hipereutectoides**.

Además de las fases mencionadas, otra fase es notable en el sistema de la aleación hierro-carbono. Ésta es la del Fe_3C , también llamada de **cementita**, que es una fase intermedia: un compuesto metálico de hierro y carbono que es duro y frágil. A temperatura ambiente y en condiciones de equilibrio, las aleaciones de hierro-carbono forman un sistema de dos fases con niveles de carbono apenas por arriba de cero. El contenido de carbono de los aceros varía entre esos niveles bajos y cerca de 2.1%. Por arriba de 2.1% de C y hasta 4% o 5%, la aleación se define como **hierro colado**.

6.2.2 Producción de hierro y acero

Este estudio de la producción de hierro y acero comienza con los yacimientos de mineral de hierro y otras materias primas que se requieren. Después se estudia la producción de hierro, en la que éste se reduce de los minerales, y la fabricación de acero, en la que se refina para obtener la pureza y composición (aleación) que se desean. Luego se consideran los procesos de fundición que se efectúan en la acería.

Yacimientos* de hierro y otras materias primas El mineral principal que se usa para producir hierro y acero es la hematita (Fe_2O_3). Otros minerales de hierro son la **magnetita** (Fe_3O_4), **siderita** (FeCO_3) y la **limonita** ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) donde el valor de x es de alrededor de 1.5). Los yacimientos de hierro contienen de 50% a alrededor de 70% de hierro, en función de su ley** (la hematita contiene casi 70% de hierro). Además, hoy día se utilizan mucho los desechos de hierro y acero para producir hierro y acero.

Otras materias primas necesarias para reducir hierro de las menas son el coque y la roca caliza. El **coque** es un combustible de carbono alto que se produce por medio de calentar durante varias horas carbón bituminoso en una atmósfera escasa en oxígeno, para luego rociarle agua en torres de enfriamiento especiales. El coque desempeña dos funciones en el proceso de reducción: 1) es un combustible que suministra el calor para las reacciones químicas, y 2) produce monóxido de carbono (CO) para reducir el mineral de hierro. La **caliza** es una roca que contiene proporciones grandes de carbonato de calcio (CaCO_3). La caliza se utiliza en el proceso como fundente con el cual reaccionar y retirar las impurezas tales como escoria del hierro fundido.

Fabricación de hierro Para producir hierro, se coloca una carga de mineral, coque y caliza en la parte superior de un alto horno. Un **alto horno** es una cámara refractaria recta con diámetro de 9 a 11 m (30 a 35 ft) en su parte más ancha, y altura de 40 m (125 ft), en el que se fuerzan gases calientes dentro de la parte baja de la cámara a tasas elevadas para llevar a cabo la combustión y reducción del hierro. En las figuras 6.5 y 6.6 se ilustra un alto horno común y algunos de sus detalles técnicos. La carga desciende con lentitud desde la parte superior del horno hacia su base y se calienta a temperaturas de alrededor de 1 650 °C (3 000 °F). La combustión del coque se lleva a cabo con gases calientes (CO , H_2 , CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 y combustibles) que pasan hacia arriba a través de las capas de la carga de material. El gas CO tiene un efecto reductor en el mineral de hierro; la reacción (simplificada) se escribe como sigue (se usa hematita como el mineral de inicio):



* La palabra inglesa *ore* se traduce en el ambiente de la geología como mena, que es el material que se extrae de un yacimiento y que contiene el mineral de interés. En otras profesiones, *ore* se traduce como yacimiento, pero esto no es exacto porque de un yacimiento se extrae la mena. (N. del t.)

** Ley es el contenido de mineral en una mena. (N. del t.)

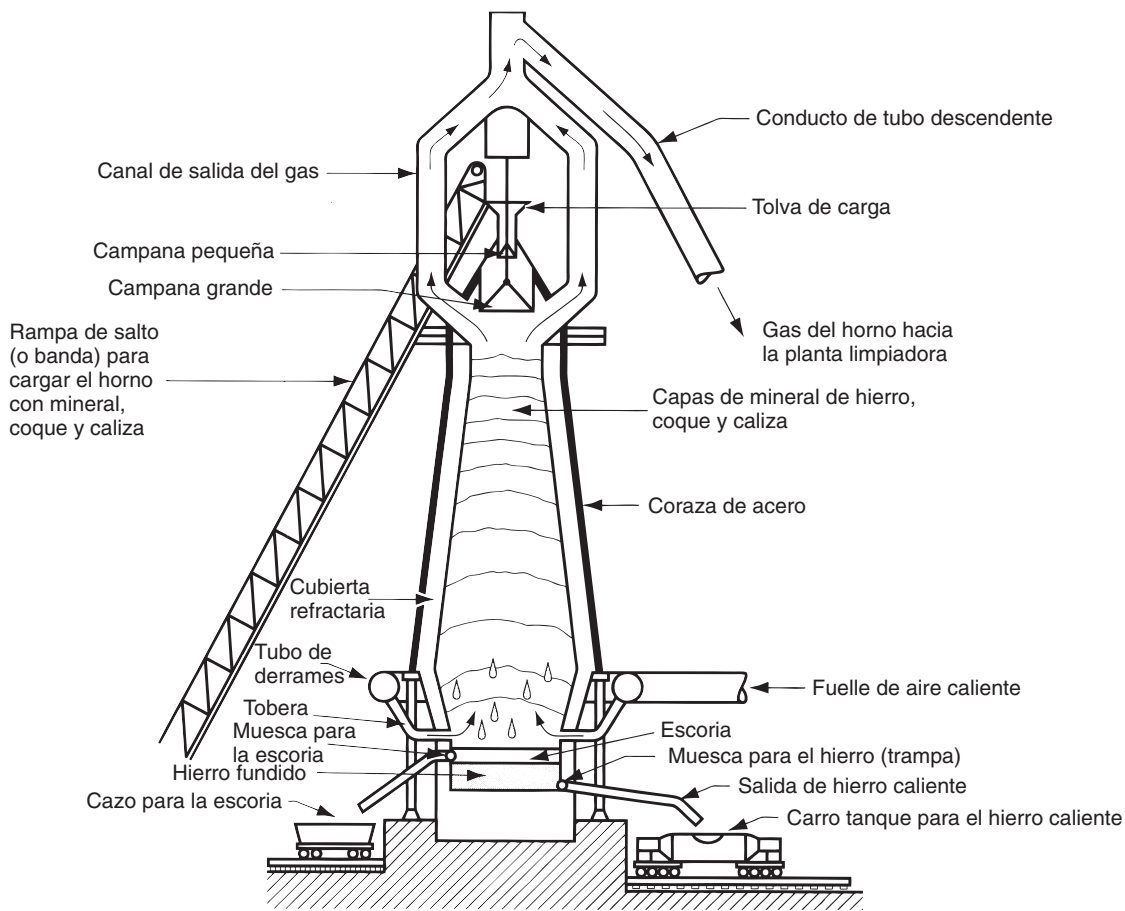
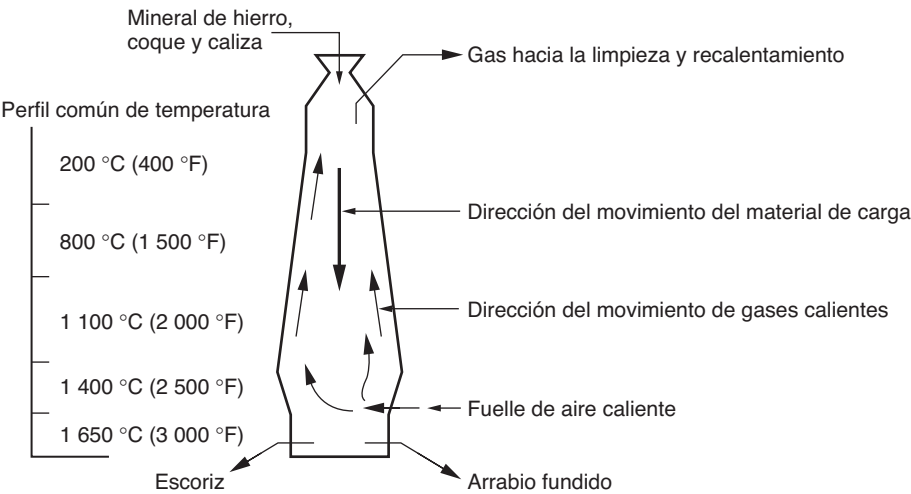


FIGURA 6.5 Sección transversal de un alto horno para fabricar hierro en la que se muestran los componentes principales.

FIGURA 6.6 Diagrama esquemático que indica detalles de la operación de un alto horno.



El dióxido de carbono reacciona con el coque para formar monóxido de carbono:



que entonces realiza la reducción final del FeO a hierro:



El hierro fundido gotea y se colecta en la base del alto horno. Éste se lleva periódicamente a carros tanque para hierro fundido a fin de transferirlo a las operaciones siguientes de fabricación de acero.

El papel que juega la caliza se resume como sigue. En primer lugar, la caliza se reduce a cal (CaO) por calentamiento, así:



La cal se combina con impurezas tales como sílice (SiO_2), azufre, (S) y alúmina (Al_2O_3) en reacciones que producen una escoria fundida que flota sobre el hierro.

Es instructivo notar que se requieren aproximadamente siete toneladas de materias primas para producir una tonelada de hierro. Las proporciones de los ingredientes son las siguientes: 2.0 ton de mineral de hierro, 1.0 ton de coque, 0.5 ton de caliza, y (aquí la estadística es sorprendente) 3.5 ton de gases. Una proporción significativa de los subproductos se recicla.

El hierro colectado en la base del alto horno llamado **hierro de primera fundición** (arrabio) contiene más del 4% de C, más otras impurezas: 0.3%–1.3% de Si, 0.5–2.0% de Mn, 0.1–1.0% de P, y 0.02–0.08% de S [9]. Se requiere más refinación del metal para obtener tanto hierro fundido como acero. Para convertir el arrabio en hierro fundido gris es común emplear un horno llamado cubilote (véase la sección 11.4.1). Para el acero, las composiciones deben controlarse estrechamente y las impurezas llevarse a niveles mucho más bajos.

Fabricación de acero Desde la mitad del siglo XIX, se han inventado cierto número de procesos para refinar hierro de primera fundición y obtener acero. Hoy día, los dos más importantes son el horno de oxígeno básico (BOF) y el eléctrico. Ambos se emplean para producir aceros al carbono y aleados.

El **horno de oxígeno básico** produce alrededor del 70% del acero de Estados Unidos. El BOF es una adaptación del convertidor Bessemer. Mientras que el proceso Bessemer utiliza aire que pasa a través del arrabio fundido para quemar las impurezas, el proceso de oxígeno básico utiliza oxígeno puro. En la figura 6.7 se presenta un diagrama del BOF convencional durante la mitad de una colada. El recipiente común del BOF mide cerca de 5 m (16 ft) de diámetro interno y procesa de 150 a 200 toneladas en una sola colada.

En la figura 6.8 se muestra la secuencia para fabricar acero en un BOF. En las plantas siderúrgicas integradas se transfiere el arrabio desde el alto horno al BOF en carros de ferrocarril llamados carros cuchara de hierro caliente. En la práctica moderna, al hierro fundido se agrega chatarra de acero por cerca del 30% de una carga normal del BOF. También se agrega cal (CaO). Después de la carga, se inserta la lanceta en el recipiente de modo que su punta se encuentre a 1.5 m (5 ft) por arriba de la superficie del hierro fundido. Se sopla O_2 a alta velocidad desde la lanceta, lo que provoca combustión y calentamiento en la superficie del recipiente del metal fundido. El carbono disuelto en el hierro y otras impurezas tales como silicio, manganeso y fósforo se oxidan. Las reacciones son



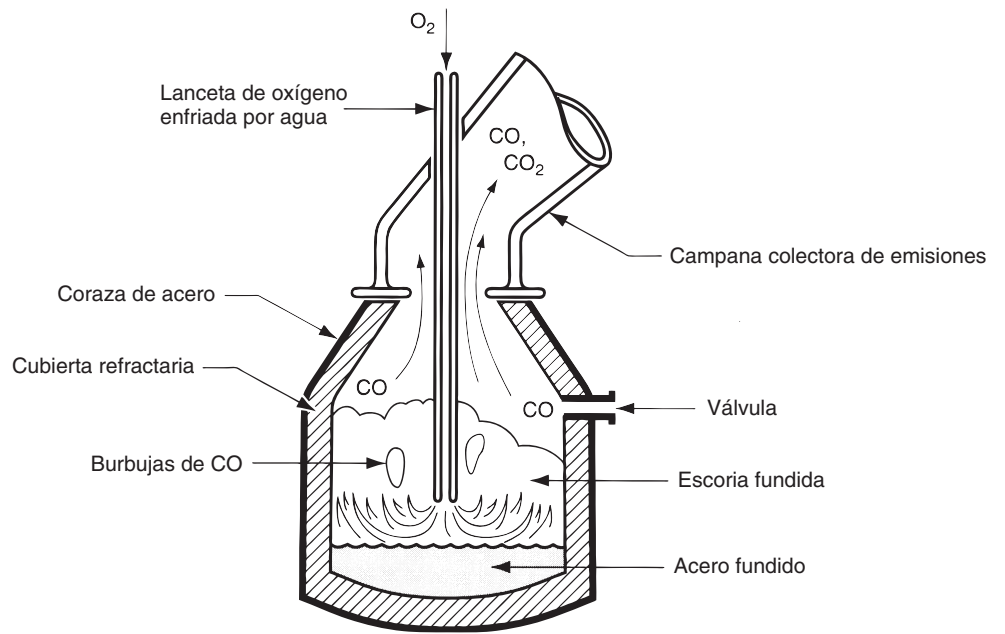
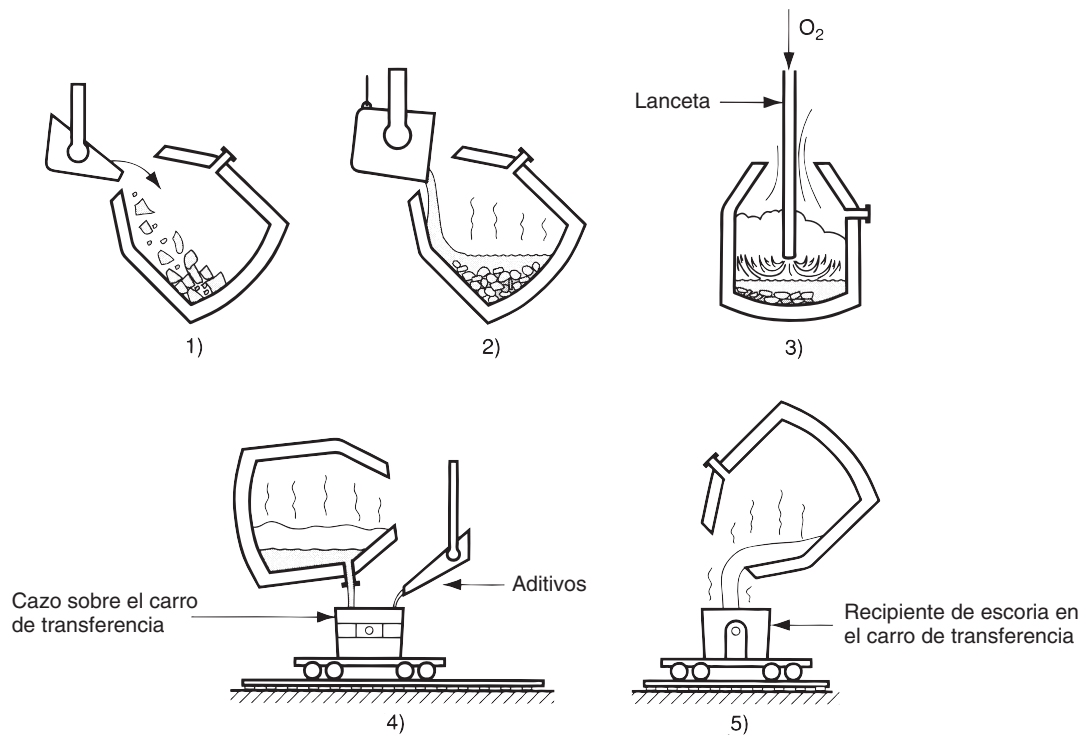


FIGURA 6.7 Horno de oxígeno básico que muestra el recipiente BOF durante el procesamiento de una colada.

FIGURA 6.8 Secuencia BOF durante un ciclo de procesamiento: 1) carga de chatarra y 2) arrabio; 3) soplado (véase la figura 6.7); 4) extracción del acero fundido; y 5) vaciado de la escoria.



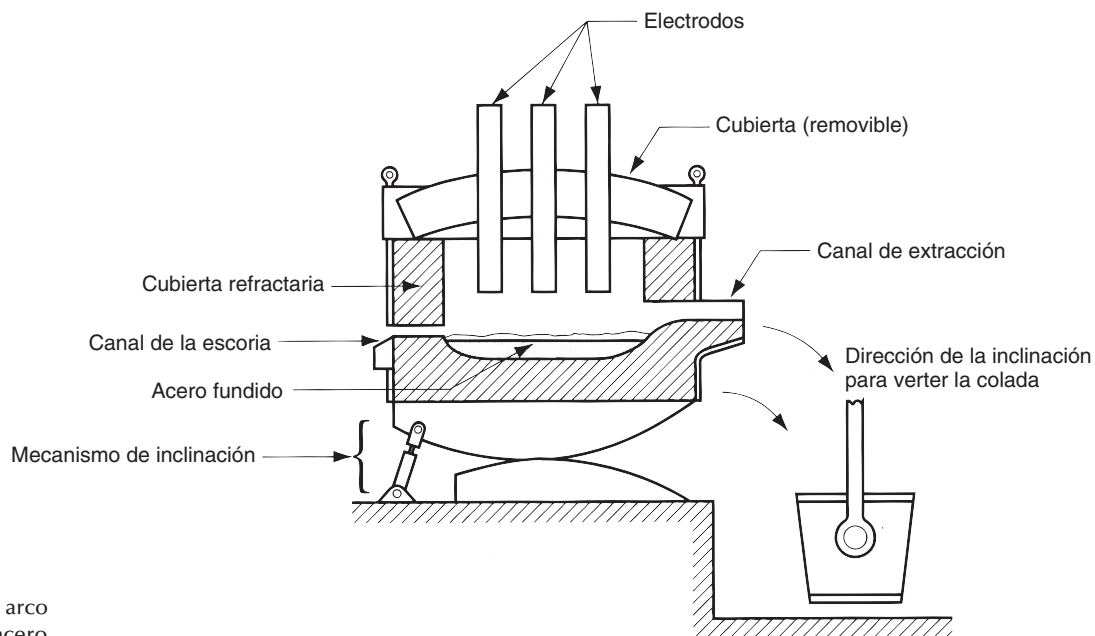


FIGURA 6.9 Horno de arco eléctrico para fabricar acero.

Los gases de CO y CO_2 que se producen en la primera reacción, escapan a través de la boca del recipiente del BOF y se captan en la campana de emisiones; los productos de las otras tres reacciones se retiran como escoria, con el uso de cal como elemento fundente. Durante el proceso, el contenido de C en el hierro disminuye en forma casi lineal con el tiempo, lo que permite un control muy predecible de los niveles de carbono en el acero. Después de refinarlo al nivel que se desea, el acero fundido se extrae; a la colada se vierten ingredientes de aleación y otros aditivos; después se extrae la escoria. En 20 min es posible procesar una colada de 200 ton de acero, aunque el ciclo completo (tiempo desde la introducción hasta la extracción) toma 45 min, aproximadamente.

Los avances recientes de la tecnología del proceso de oxígeno básico incluyen el uso de boquillas en fondo del recipiente, a través de las cuales se inyecta oxígeno en el hierro fundido. Con esto se logra una mejor mezcla que con la lanceta BOF convencional, lo que da como resultado tiempos más cortos de procesamiento (una reducción de cerca de 3 min), menor contenido de carbono y producciones más grandes.

El **horno de arco eléctrico** produce alrededor del 30% del acero de Estados Unidos. Aunque originalmente se usaba arrabio como la carga para este tipo de horno, hoy día las materias primas principales son chatarra de hierro y de acero. Los hornos de arco eléctrico se encuentran disponibles en varios diseños; el tipo de arco directo que se muestra en la figura 6.9 es el más económico actualmente. Estos hornos tienen cubiertas removibles para cargarlos desde arriba; la extracción se lleva a cabo por medio de la inclinación del horno completo. En el horno se carga chatarra de hierro y de acero seleccionadas por sus composiciones, junto con ingredientes de aleación y caliza (fundente), y se calientan por medio de un arco eléctrico que va de grandes electrodos a la carga de metal. La fundición total requiere cerca de 2 horas; el tiempo de introducción a extracción es de 4 horas. Es común que las capacidades de los hornos eléctricos varíen entre 25 y 100 toneladas por colada. Los hornos de arco eléctrico destacan por la mejor calidad del acero pero su costo por tonelada producida es mayor, en comparación con el del BOF. Por lo general, el horno de arco eléctrico se asocia con la producción de aceros de aleación, aceros para herramientas y aceros inoxidables.

Fundición de lingotes Los aceros producidos por hornos BOF o eléctricos se solidifican para procesarlos posteriormente, ya sea como lingotes fundidos o por fundición continua. Los **lingotes** de acero son fundiciones discretas y grandes que pesan menos desde 1 ton hasta 300 ton (el peso de la colada total). Los moldes de los lingotes están hechos de hierro

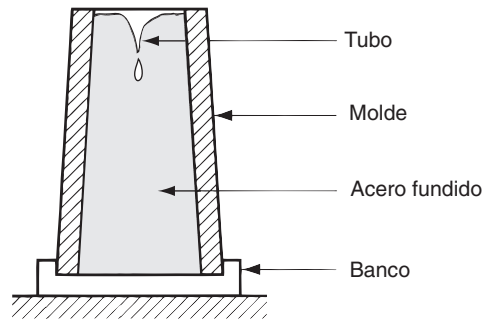


FIGURA 6.10 Molde de lingote común de fondo amplio, del tipo que se utiliza para fabricar acero.

al alto carbono y están abiertos arriba o abajo para retirar la colada solidificada. En la figura 6.10 se ilustra un **molde de fondo amplio**. La sección transversal puede ser cuadrada, rectangular o redonda, y su perímetro por lo general es corrugado para incrementar el área superficial a fin de que se enfríe más rápido. El molde se coloca en una plataforma denominada **banc** o **escabel**; después de solidificarse, el molde se eleva, y deja la fundición sobre el banco.

En el capítulo sobre los principios de la fundición (capítulo 10) se describe el proceso de solidificación de los lingotes, así como de otros tipos de fundidos. Debido a que los lingotes son fundidos grandes, el tiempo que se requiere para la solidificación, así como para la contracción asociada, es significativo. La porosidad ocasionada por la reacción del carbono y el oxígeno para formar CO durante el enfriamiento y la solidificación es un problema que debe enfrentarse en la fundición del lingote. Esos gases se liberan del acero fundido debido a su solubilidad reducida con la disminución de la temperatura. Es frecuente que los aceros fundidos sean tratados para limitar o impedir la evolución de CO gaseoso durante la solidificación. El tratamiento involucra agregar elementos tales como el Si y Al que reaccionan con el oxígeno disuelto en el acero fundido, de modo que éste no se encuentre disponible para la reacción del CO. Así, la estructura del acero sólido está libre de poros y otros defectos causados por la formación de gas.

Fundición o colada continua La fundición o colada continua se aplica mucho en la producción de aluminio y cobre, pero es mucho más destacada en la de acero. El proceso consiste en remplazar los lingotes fundidos porque la productividad se incrementa en forma notable. La fundición de lingotes es un proceso discreto. Como los moldes son relativamente grandes, el tiempo de solidificación es significativo. El tiempo para que se solidifique un lingote grande de acero puede ser de 10 a 12 horas. El uso de un fundido continuo reduce el tiempo de solidificación en un orden de magnitud.

El proceso de fundición continua, también llamado **fundición de filamento**, se ilustra en la figura 6.11. El acero fundido se vierte desde un recipiente hacia un contenedor temporal llamado **cacerola**, que dosifica el metal hacia uno o más moldes de fundición continua. El acero comienza a solidificarse en las regiones exteriores conforme viaja hacia abajo a través del molde enfriado por agua. Un rocío de agua acelera el proceso de enfriamiento. Mientras está caliente y es plástico, el metal se cambia de orientación vertical a horizontal. Entonces se corta en secciones o se alimenta en forma continua a un laminador (véase la sección 21.1) en el que se le da forma de lámina o bloque de acero u otras secciones transversales.

6.2.3 Aceros

El **acero** es una aleación de hierro que tiene un contenido de carbono que varía entre 0.02% y 2.11%. Es frecuente que también incluya otros ingredientes de aleación: manganeso, cromo, níquel y molibdeno; pero es el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Existen cientos de composiciones de acero disponibles en el comercio. Aquí, para propósitos de organización se agrupan en las categorías siguientes: 1) aceros al carbón simples, 2) aceros bajos de aleación, 3) aceros inoxidables y 4) aceros para herramientas.

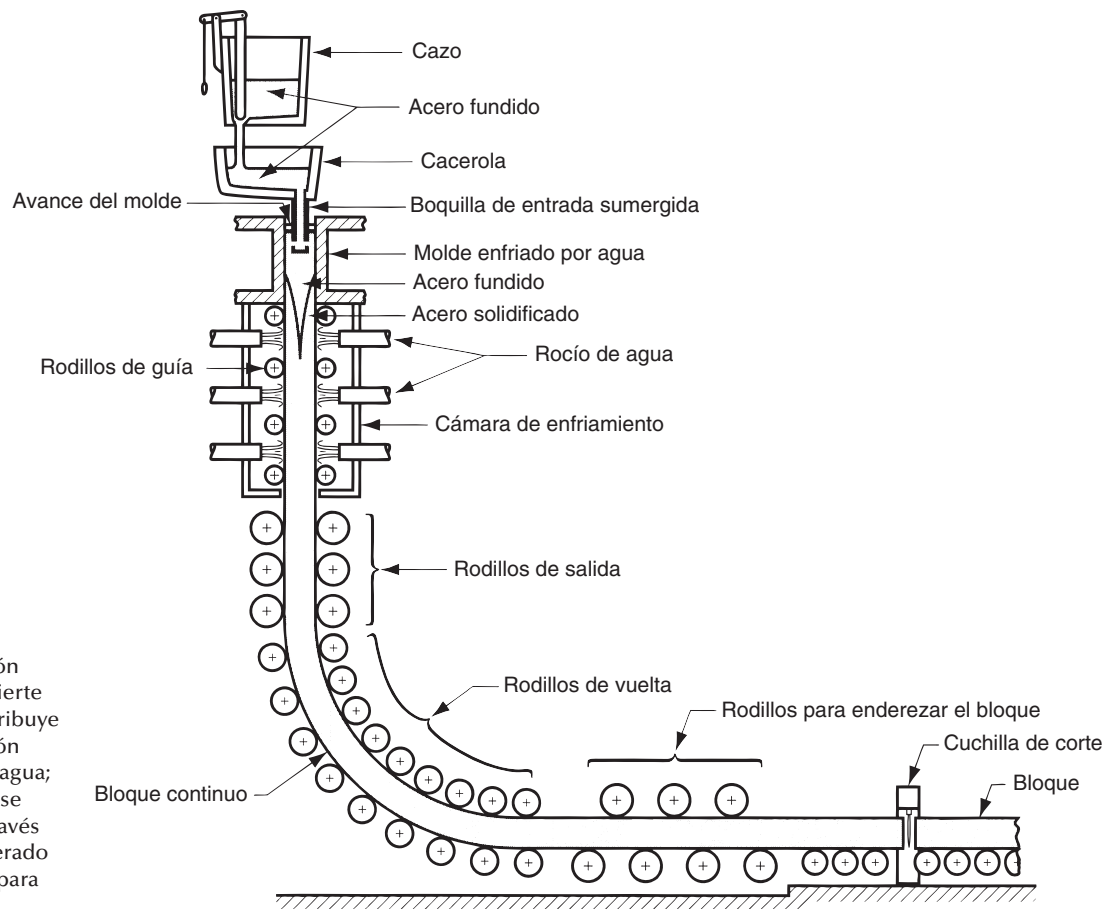
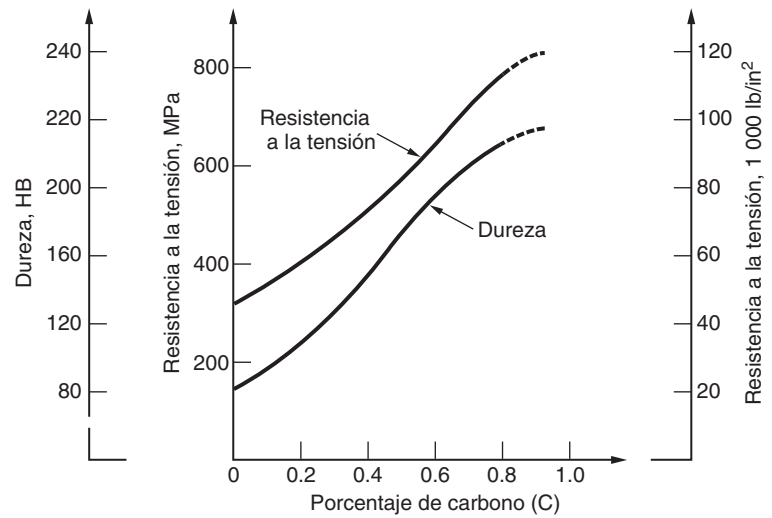


FIGURA 6.11 Fundición continua; el acero se vierte en la cacerola y se distribuye a un molde de fundición continua enfriado por agua; se solidifica conforme se mueve hacia abajo a través del molde. Se ha exagerado el espesor del bloque para mayor claridad.

FIGURA 6.12 Resistencia a la tensión y dureza, como función del contenido de carbono en un acero al carbono simple (rolado en caliente).



Aceros al carbono Estos aceros contienen carbono como elemento principal de la aleación, y sólo pequeñas cantidades de otros elementos (lo normal es alrededor de 0.5% de manganeso). La resistencia de los aceros simples al carbono se incrementa con el contenido de éste; en la figura 6.12 se presenta una gráfica común de esa relación.

De acuerdo con un esquema de nomenclatura creado por el American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), los aceros simples al carbono se especifican por medio de un sistema numérico de cuatro dígitos: 10XX, donde el 10 indica que el acero es al carbono simple, y XX señala el porcentaje de carbono en centésimas de puntos porcentuales. Por ejemplo, un acero 1020 contiene 0.20% de C. Es común que los aceros simples al carbono se clasifiquen en tres grupos, de acuerdo con su contenido de carbono:

1. **Aceros al bajo carbono.** Contienen menos del 0.20% de C y son por mucho los más utilizados. Las aplicaciones normales son en las piezas automotrices de lámina, placa de acero para la fabricación y vías férreas. Es relativamente fácil dar forma a estos aceros, lo cual los hace de uso muy difundido en aplicaciones que no requieren una resistencia elevada. Por lo general, también los aceros fundidos caen en este rango de carbono.
2. **Aceros al medio carbono.** Su contenido de carbono varía entre 0.20% y 0.50%, y se especifican para aplicaciones que requieren una resistencia mayor que las de los aceros al bajo carbono. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria y piezas de motores tales como cigüeñales y rodillos de transmisión.
3. **Aceros al alto carbono.** Contienen carbono en cantidades superiores a 0.50% y se especifican para aplicaciones que necesitan resistencias aún mayores y también rigidez y dureza. Algunos ejemplos son resortes, herramientas y hojas de corte y piezas resistentes al desgaste.

El contenido creciente de carbono da resistencia y dureza al acero, pero reduce su ductilidad. Asimismo, los aceros al alto carbono pueden ser tratados para formar martensita, lo que los hace muy duros y fuertes (véase la sección 27.2).

Aceros de baja aleación Son aleaciones de hierro-carbono que contienen elementos adicionales en cantidades que totalizan menos de 5% del peso. Debido a estas adiciones, los aceros de baja aleación tienen propiedades mecánicas superiores a las de los simples al carbono para aplicaciones dadas. Las propiedades superiores por lo general significan más resistencia, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste, tenacidad y combinaciones más deseables de éstas. Es frecuente que se requiera tratamiento térmico para lograr propiedades mejoradas.

Los elementos comunes de aleación que se agregan al acero son cromo, manganeso, molibdeno, níquel y vanadio, a veces en forma individual pero por lo general en combinaciones. Es frecuente que estos elementos formen soluciones sólidas con hierro y compuestos metálicos con carbono (carburos), lo que supone que hay suficiente carbono presente para efectuar la reacción. Los efectos de los ingredientes principales de la aleación se resumen como sigue:

- El **cromo** (Cr) mejora la resistencia, dureza, resistencia al desgaste y dureza en caliente. Es uno de los ingredientes de aleación más eficaces para incrementar la templabilidad (véase la sección 27.2.3). En proporciones significativas, el Cr mejora la resistencia a la corrosión.
- El **manganeso** (Mn) mejora la resistencia y dureza del acero. Cuando éste se encuentra caliente, la templabilidad mejora con el aumento de manganeso. Debido a estos beneficios, el manganeso es un ingrediente que se usa mucho en las aleaciones de acero.
- El **molibdeno** (Mo) incrementa la tenacidad y dureza en caliente. También mejora la templabilidad y forma carburos que dan resistencia al desgaste.
- El **níquel** (Ni) mejora la resistencia y la tenacidad. Incrementa la dureza pero no tanto como los otros elementos de las aleaciones del acero. En cantidades significativas mejora la resistencia a la corrosión y es el otro ingrediente principal (además del cromo) de ciertos tipos de acero inoxidable.

TABLA 6.2 Designaciones AISI-SAE de los aceros.

Código	Nombre del acero	Análisis químico nominal, %							
		Cr	Mn	Mo	Ni	V	P	S	Si
10XX	Al carbono		0.4				0.04	0.05	
11XX	Resulfurado		0.9				0.01	0.12	0.01
12XX	Resulfurado, refosforado		0.9				0.10	0.22	0.01
13XX	Manganeso		1.7				0.04	0.04	0.3
20XX	Aceros al níquel		0.5		0.6		0.04	0.04	0.2
31XX	Níquel-cromo	0.6			1.2		0.04	0.04	0.3
40XX	Molibdeno		0.8	0.25			0.04	0.04	0.2
41XX	Cromo-molibdeno	1.0	0.8	0.2			0.04	0.04	0.3
43XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.7	0.25	1.8		0.04	0.04	0.2
46XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	1.8		0.04	0.04	0.3
47XX	Ni-Cr-Mo	0.4	0.6	0.2	1.0		0.04	0.04	0.3
48XX	Níquel-molibdeno		0.6	0.25	3.5		0.04	0.04	0.3
50XX	Cromo	0.5	0.4				0.04	0.04	0.3
52XX	Cromo	1.4	0.4				0.02	0.02	0.3
61XX	Cr-vanadio	0.8	0.8			0.1	0.04	0.04	0.3
81XX	Ni-Cr-Mo	0.4	0.8	0.1	0.3		0.04	0.04	0.3
86XX	Ni-Cr-Mo	0.5	0.8	0.2	0.5		0.04	0.04	0.3
88XX	Ni-Cr-Mo	0.5	0.8	0.35	0.5		0.04	0.04	0.3
92XX	Silicio-manganeso		0.8				0.04	0.04	2.0
93XX	Ni-Cr-Mo	1.2	0.6	0.1	3.2		0.02	0.02	0.3
98XX	Ni-Cr-Mo	0.8	0.8	0.25	1.0		0.04	0.04	0.3

Fuente: [9].

- El **vanadio** (V) inhibe el crecimiento de granos durante el procesamiento a temperaturas elevadas, lo cual mejora la resistencia y tenacidad del acero. También forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

En la tabla 6.2 se presentan las designaciones AISI-SAE de muchos aceros de baja aleación, las que indican el análisis químico nominal. Como antes, el contenido del carbono está especificado por el término XX expresado en 1/100% de carbono. Para que esté completa, se incluyen aceros al carbono (10XX). Para dar una idea de las propiedades que tienen algunos de estos aceros, se compiló la tabla 6.3, que enlista el tratamiento a que se sujeta el acero para darle fortalecimiento a su resistencia y ductilidad.

Los aceros de baja aleación no sueldan con facilidad, en especial con niveles de carbono medios y altos. Desde la década de 1960 la investigación ha estado dirigida al desarrollo de aceros al bajo carbono y baja aleación, que tengan razones mejores de resistencia/peso que los aceros al carbono simples, pero que suelden mejor que los de baja aleación. Los productos creados a partir de esos trabajos son los **aceros de alta resistencia y baja aleación** (HSLA). Por lo general tienen un contenido bajo de carbono (en el rango de 0.10 a 0.30% de C) más cantidades relativamente pequeñas de ingredientes de aleación (generalmente alrededor del 3% del total, de elementos tales como Mn, Cu, Ni y Cr). Los aceros HSLA están rolados en caliente en condiciones controladas diseñadas para proporcionar mejor resistencia en comparación con los aceros simples al carbono, pero sin sacrificar la facilidad de darles forma o soldarlos. La resistencia se les da por medio de una aleación de solución sólida: el tratamiento térmico no es factible debido a su bajo contenido de carbono. En la tabla 6.3 se enlista un acero HSLA, junto con sus propiedades (la química es: 0.12 C, 0.60 Mn, 1.1 Ni, 1.1 Cr, 0.35 Mo y 0.4 Si).

Aceros inoxidables Los **aceros inoxidables** constituyen un grupo de aceros altamente aleados diseñados para proporcionar gran resistencia a la corrosión. El elemento principal de la aleación del acero inoxidable es el cromo, por lo general arriba del 15%. El cromo de la aleación forma una película de óxido impermeable, delgada, que en una atmósfera oxidante protege a la superficie de la corrosión. El níquel es otro ingrediente de aleación que se emplea

TABLA 6.3 Tratamientos y propiedades mecánicas de aceros seleccionados.

Código	Tratamiento ^a	Resistencia a la tensión		Elongación, %
		MPa	lb/in ²	
1010	HR	304	44 000	47
1010	CD	366	53 000	12
1020	HR	380	55 000	28
1020	CD	421	61 000	15
1040	HR	517	75 000	20
1040	CD	587	85 000	10
1055	HT	897	130 000	16
1315	Ninguno	545	79 000	34
2030	Ninguno	566	82 000	32
3130	HT	697	101 000	28
4130	HT	890	129 000	17
4140	HT	918	133 000	16
4340	HT	1 279	185 000	12
4815	HT	635	92 000	27
9260	HT	994	144 000	18
HSLA	Ninguno	586	85 000	20

Recopilada a partir de las referencias [5], [9] y otras fuentes.

^a HR = rolado en caliente; CD = estirado en frío; HT = tratamiento térmico que involucra calentamiento y enfriamiento por inmersión, seguidos de templado para producir martensita templada (véase la sección 27.2).

en ciertos aceros inoxidable para incrementar la protección contra la corrosión. El carbono se utiliza para dar resistencia y endurecer el metal; sin embargo, el contenido creciente de carbono tiene el efecto de reducir la protección contra la corrosión debido a que el carburo de cromo se forma para reducir la cantidad de Cr disponible en la aleación.

Además de la resistencia a la corrosión, los aceros inoxidable se destacan por su combinación de resistencia y ductilidad. Aunque estas propiedades son deseables en muchas aplicaciones, por lo general hacen a dichas aleaciones difíciles de trabajar en la manufactura. Asimismo, los aceros inoxidable son significativamente más caros que los aceros al carbono o los de baja aleación.

Los aceros inoxidable se dividen por tradición en tres grupos que reciben su nombre por la fase predominante presente en la aleación a temperatura ambiente:

1. **Inoxidables austeníticos.** Su composición normal es de alrededor de 18% de Cr y 8% de Ni, y son los más resistentes a la corrosión de los tres grupos. Debido a esa composición, a veces se les identifica como inoxidable 18-8. No son magnéticos y son muy dúctiles, pero muestran un endurecimiento por trabajo significativo. El níquel tiene el efecto de agrandar la región austenítica en el diagrama de fase de hierro-carbono, lo que los hace estables a temperatura ambiente. Los aceros inoxidable austeníticos se emplean para fabricar equipo de procesamiento químico y de alimentos, así como piezas de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión.
2. **Inoxidables ferríticos.** Contienen de 15% a 20% de cromo, poco carbono y nada de níquel. Esto produce una fase de ferrita a temperatura ambiente. Los aceros inoxidable ferríticos son magnéticos y menos dúctiles y resistentes a la corrosión que los austeníticos. Las piezas fabricadas con ellos van desde utensilios de cocina hasta componentes de motores a reacción.
3. **Inoxidables martensíticos.** Tienen un contenido de carbono más elevado que los ferríticos, lo que permite que se les dé resistencia por medio de tratamiento térmico (véase la sección 27.2). Tienen hasta 18% de Cr pero nada de Ni. Son fuertes, duros y resistentes a la fatiga, pero por lo general no tan resistentes a la corrosión como los de los otros dos grupos. Los productos más comunes incluyen instrumentos de corte y quirúrgicos.

La mayor parte de aceros inoxidable reciben su nombre con un esquema de numeración de la AISI, de tres dígitos. El primero indica el tipo general y los últimos dos dan el grado específico dentro del tipo. La tabla 6.4 enlista los aceros inoxidable más comunes con sus composiciones normales y propiedades mecánicas.

TABLA 6.4 Composiciones y propiedades mecánicas de aceros inoxidable seleccionados.

Tipo	Análisis químico, %						Resistencia a la tensión		
	Fe	Cr	Ni	C	Mn	Otro ^a	MPa	lb/in ²	Elongación, %
Austenítico									
301	73	17	7	0.15	2		620	90 000	40
302	71	18	8	0.15	2		515	75 000	40
304	69	19	9	0.08	2		515	75 000	40
309	61	23	13	0.20	2		515	75 000	40
316	65	17	12	0.08	2	2.5 Mo	515	75 000	40
Ferrítico									
405	85	13	—	0.08	1		415	60 000	20
430	81	17	—	0.12	1		415	60 000	20
Martensítico									
403	86	12	—	0.15	1		485	70 000	20
403 ^b	86	12	—	0.15	1		825	120 000	12
416	85	13	—	0.15	1		485	70 000	20
416 ^b	85	13	—	0.15	1		965	140 000	10
440	81	17	—	0.65	1		725	105 000	20
440 ^b	81	17	—	0.65	1		1 790	260 000	5

Recopilado a partir de la referencia [9].

^a Todos los grados de la tabla contienen cerca de 1% (o menos) de silicio más cantidades pequeñas (muy por debajo del 1%) de fósforo y azufre y otros elementos tales como aluminio.

^b Tratado térmicamente.

Los aceros inoxidable tradicionales se crearon a principios del siglo xx. Desde entonces, se han creado varias aleaciones de acero que tienen buena resistencia a la corrosión y otras propiedades deseables. Éstas también se clasifican como aceros inoxidable; la lista continúa así:

4. **Aceros inoxidable de precipitación.** Tienen una composición química típica de 17% de Cr y 7% de Ni, con cantidades pequeñas adicionales de elementos de aleación tales como aluminio, cobre, titanio y molibdeno. La característica que los distingue del resto de los inoxidable es que pueden fortalecerse por medio de endurecimiento por precipitación (véase la sección 27.3). A temperaturas elevadas mantienen su fuerza y resistencia a la corrosión, lo que hace que estas aleaciones sean apropiadas para aplicaciones aeroespaciales.
5. **Inoxidables dúplex.** Poseen una estructura que es una mezcla de austenita y ferrita en cantidades aproximadamente iguales. Su resistencia a la corrosión es similar a los grados austeníticos y muestran resistencia mejorada al agrietamiento por esfuerzo-corrosión. Las aplicaciones incluyen intercambiadores de calor, bombas y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Aceros para herramientas Los aceros para herramientas son una clase (por lo general) altamente aleada diseñada para su uso en herramientas de corte industriales, troqueles y moldes. Para desempeñarse en esas aplicaciones deben poseer resistencia elevada, dureza, dureza en caliente, resistencia al desgaste y tenacidad a los impactos. Para obtener estas propiedades los aceros para herramienta se tratan térmicamente. Las razones principales para los niveles altos de elementos de aleación son: 1) dureza mejorada, 2) distorsión reducida durante el tratamiento con calor, 3) dureza en caliente, 4) formación de carburos metálicos duros para que sean resistentes a la abrasión, y 5) tenacidad mejorada.

Los aceros para herramientas se dividen en tipos de acuerdo con la aplicación y composición. La AISI utiliza un esquema de clasificación que incluye un prefijo de una letra para identificar el acero para herramienta. En la lista de la tabla 6.5 que sigue, se mencionan esos tipos de acero, se identifica el prefijo y se presentan algunas composiciones comunes.

TABLA 6.5 Aceros para herramienta con el prefijo de identificación de AISI, con ejemplos de composición y valores comunes de dureza.

AISI	Ejemplo	Análisis químico, % ^a							Dureza, HRC
		C	Cr	Mn	Mo	Ni	V	W	
T	T1	0.7	4.0				1.0	18.0	65
M	M2	0.8	4.0		5.0		2.0	6.0	65
H	H11	0.4	5.0		1.5		0.4		55
D	D1	1.0	12.0		1.0				60
A	A2	1.0	5.0		1.0				60
O	O1	0.9	0.5	1.0				0.5	61
W	W1	1.0							63
S	S1	0.5	1.5					2.5	50
P	P20	0.4	1.7		0.4				40 ^b
L	L6	0.7	0.8		0.2	1.5			45 ^b

^a Composición porcentual redondeada a la décima más cercana.^b Dureza estimada.

- T, M Aceros para herramientas de alta velocidad.** Se usan como herramientas de corte en procesos de maquinado (véase la sección 23.22). Se formulan para que tengan gran resistencia al desgaste y dureza en caliente. Los aceros de alta velocidad originales (HSS) se crearon alrededor de 1900. Permitieron incrementos muy grandes en la velocidad de corte en comparación con herramientas que se usaban con anterioridad; de ahí su nombre. Las dos designaciones AISI indican el elemento principal de la aleación: T por el tungsteno y M por el molibdeno.
- H Aceros de herramientas para trabajos en caliente.** Están pensados para usarse con troqueles de trabajos en caliente para forjado, extrusión y moldes para fundición.
- D Aceros de herramientas para trabajos en frío.** Son aceros para troqueles que se emplean en operaciones de trabajo en frío, tales como moldear láminas metálicas, extrusión en frío y ciertas operaciones de forja. La designación D es por dado (*die*). Se relacionan de cerca con las designaciones de AISI A y O, que son para endurecimiento con aire (*air*) y aceite (*oil*). Proporcionan buena resistencia al desgaste y una distorsión baja.
- W Aceros para herramienta de endurecimiento por agua.** Tienen contenido elevado de carbono con poco o nada de otros elementos de aleación. Sólo pueden endurecerse por enfriamiento por inmersión rápido en agua. Se emplean mucho debido a su bajo costo, pero se limitan a aplicaciones de temperatura baja. Una aplicación común son los troqueles de cabezales en frío.
- S Aceros de herramientas resistentes a los golpes.** Están hechos para usarse en aplicaciones en las que se requiere mucha tenacidad, como en muchos cortes de lámina metálica, punzonado y operaciones de doblado.
- P Aceros para moldes.** Se utilizan para fabricar moldes para plásticos y caucho.
- L Aceros para herramientas de baja aleación.** Por lo general se reservan para aplicaciones especiales.

Los aceros para herramientas no son los únicos materiales para ellas. Los aceros al carbono, de baja aleación e inoxidables se emplean para muchas aplicaciones de herramientas y troqueles. Los hierros colados y ciertas aleaciones no ferrosas también son apropiados para algunas aplicaciones de herramientas. Además, varios materiales cerámicos (por ejemplo, Al_2O_3) se usan como inserciones cortantes de alta velocidad, abrasivos y otro tipo de herramientas.

6.2.4 Hierros colados

El **hierro colado** es una aleación de hierro que contiene de 2.1% a 4% de carbono, y de 1% a 3% de silicio. Su composición lo hace muy apropiado como metal de fundición. En

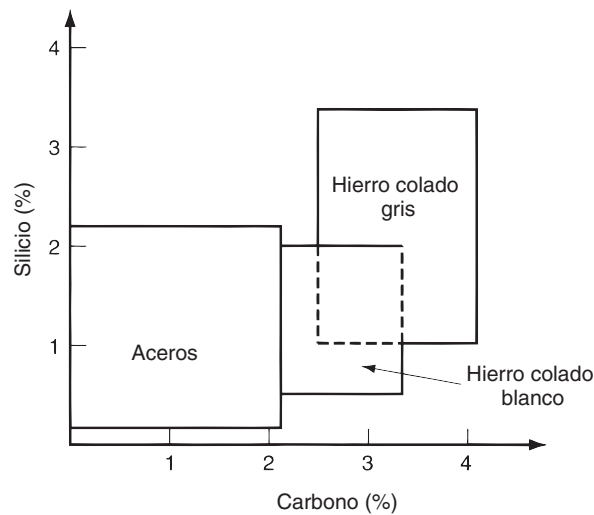


FIGURA 6.13 Composiciones de carbono y silicio para hierros colados, en comparación con los aceros (la mayor parte de éstos tienen un contenido relativamente bajo; los aceros de fundición tienen el contenido de Si más alto). El hierro dúctil se forma por medio de un tratamiento especial de fusión y vaciado de hierro fundido gris, y el maleable se elabora con tratamiento térmico del hierro colado blanco.

realidad, el peso en toneladas de los artículos de hierro colado es varias veces el de todas las demás piezas de metales fundidos combinados (con excepción de los lingotes que se fabrican durante la producción de acero y que posteriormente son rolados en forma de barras, láminas y otras formas similares). El peso total en toneladas del hierro colado ocupa el segundo lugar, pero sólo con respecto al acero entre todos los metales.

Entre los diversos tipos de hierro colado, el más importante es el gris. Otros tipos incluyen el hierro dúctil, el hierro colado blanco, el hierro maleable y varios hierros colados de aleaciones. Las composiciones comunes de los hierros colados gris y blanco se muestran en la figura 6.13, donde se indica su relación con el acero fundido. Los hierros dúctiles y los maleables poseen químicas similares a las de los hierros gris y blanco, respectivamente, pero resultan de tratamientos especiales que se describirán más adelante. En la tabla 6.6 se presenta una lista de las composiciones químicas de los tipos principales, así como de sus propiedades mecánicas.

Hierro colado gris Éste tiene el tonelaje mayor entre los hierros colados. Tiene una composición que va de 2.5% a 4% de carbono y de 1% a 3% de silicio. Esta química da como resultado la formación de escamas de grafito (carbono) distribuidas en todo el cuerpo fundido hasta que se solidifica. La estructura ocasiona que la superficie del metal adquiera un color

TABLA 6.6 Composiciones y propiedades químicas de hierros colados seleccionados.

Tipo	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		
	Fe	C	Si	Mn	Otro ^a	MPa	lb/in ²	Elongación, %
Hierros colados grises								
ASTM Clase 20	93.0	3.5	2.5	0.65		138	20 000	0.6
ASTM Clase 30	93.6	3.2	2.1	0.75		207	30 000	0.6
ASTM Clase 40	93.8	3.1	1.9	0.85		276	40 000	0.6
ASTM Clase 50	93.5	3.0	1.6	1.0	0.67 Mo	345	50 000	0.6
Hierros dúctiles								
ASTM A395	94.4	3.0	2.5			414	60 000	18
ASTM A476	93.8	3.0	3.0			552	80 000	3
Hierro colado blanco								
Bajo C	92.5	2.5	1.3	0.4	1.5Ni, 1Cr, 0.5Mo	276	40 000	0
Hierros maleables								
Ferrítico	95.3	2.6	1.4	0.4		345	50 000	10
Perlítico	95.1	2.4	1.4	0.8		414	60 000	10

Recopilado a partir de la referencia [9]. Los hierros colados se identifican con varios sistemas. Se ha intentado indicar el grado del hierro colado en particular con el empleo de la identificación más común para cada tipo.

^a Los hierros colados también contienen fósforo y azufre, por lo general menos de 0.3%.

gris cuando se fractura, de donde adquiere su nombre. La dispersión de las escamas de grafito es responsable de dos propiedades atractivas: 1) buen amortiguamiento a la vibración, que es deseable en los motores y otra clase de maquinaria, y 2) cualidades de lubricación interna, lo que hace maquinable al metal fundido.

La resistencia del hierro colado gris abarca un rango significativo. La American Society for Testing of Materials (ASTM) usa un método de clasificación para el hierro colado gris hecho para proporcionar una especificación para la resistencia a la tensión (TS) mínima de varias clases: el hierro colado gris de Clase 20 tiene una TS de 20 000 lb/in², la Clase 30 tiene una TS de 30 000 lb/in², y así sucesivamente, hasta llegar a 70 000 lb/in² (véase la tabla 6.6 para la TS equivalente en unidades métricas). La resistencia a la compresión del hierro colado gris es significativamente mayor que a la tensión. Las propiedades de la pieza fundida se pueden controlar hasta cierto grado por medio del tratamiento térmico. La ductilidad del hierro colado gris es muy baja; es un material relativamente frágil. Los productos hechos de hierro colado gris incluyen bloques y cárteres de motores automotrices, carcasas de motor y bases para máquinas herramientas.

Hierro dúctil Este es un hierro con la composición del gris en el que el metal fundido recibe tratamiento químico antes de vaciarlo para ocasionar la formación de esferoides de grafito en lugar de escamas. Esto da como resultado un hierro más dúctil y fuerte, de ahí su nombre. Las aplicaciones incluyen componentes de maquinaria que requieren resistencia elevada y buena resistencia al desgaste.

Hierro colado blanco Este hierro colado tiene menos carbono y silicio que el gris. Se forma por un enfriamiento más rápido del metal fundido después del vertido, lo que hace que el carbono permanezca en combinación química con el hierro en forma de cementita (Fe_3C), en vez de precipitarse de la solución en forma de escamas. Cuando se fractura, la superficie adquiere una apariencia cristalina blanca que le da su nombre al hierro. Debido a la cementita, el hierro fundido blanco es duro y frágil, y su resistencia al desgaste es excelente. La resistencia es buena, con un valor común de TS de 276 MPa (40 000 lb/in²). Estas propiedades hacen que el hierro colado blanco sea apropiado para aplicaciones en las que se requiere resistencia al desgaste. Un buen ejemplo son las zapatas de los frenos de un ferrocarril.

Hierro maleable Cuando las piezas fundidas de hierro colado blanco se tratan térmicamente para separar el carbono de la solución y formar agregados de grafito, el metal que resulta se llama hierro maleable. La microestructura nueva posee ductilidad sustancial (hasta 20% de elongación), una diferencia significativa con el metal a partir del cual se transformó. Los productos comunes hechos de hierro colado maleable, incluyen ajustes y bisagras para tubos, ciertos componentes de máquina y piezas de equipo ferroviario.

Hierros de aleaciones fundidas Los hierros colados pueden estar aleados para buscar propiedades y aplicaciones especiales. Estas aleaciones de hierro colado se clasifican como sigue: 1) tipos tratables térmicamente que pueden endurecerse por medio de la formación de martensita; 2) tipos resistentes a la corrosión, cuyos elementos de aleación incluyen níquel y cromo, y 3) tipos resistentes al calor que contienen proporciones elevadas de níquel para tener dureza en caliente y resistencia a la oxidación por alta temperatura.

6.3 METALES NO FERROSOS

Los metales no ferrosos incluyen elementos y aleaciones metálicas que no se basan en el hierro. Los metales más importantes de la ingeniería en el grupo de los no ferrosos son el aluminio, el cobre, el magnesio, el níquel, el titanio y el zinc, así como sus aleaciones.

Aunque los metales no ferrosos como grupo no igualan la resistencia de los aceros, ciertas aleaciones no ferrosas tienen resistencia a la corrosión o relaciones resistencia/peso que las hacen competitivas ante los aceros para aplicaciones con esfuerzos moderados a

TABLA 6.1 (continuación); b) Aluminio.

Símbolo:	Al	Mineral principal:	Bauxita (mezcla impura de Al_2O_3 y $\text{Al}(\text{OH})_3$).
Número atómico:	13	Elementos de aleación:	Cobre, manganeso, silicio y zinc.
Gravedad específica:	2.7	Aplicaciones comunes:	Contenedores (latas de aluminio), láminas para envolturas, conductores eléctricos, vajijas y cacerolas, piezas para construcción, aeroespaciales automotrices y otros usos en los que el poco peso es importante.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	660 °C (1 220 °F)		
Módulo de elasticidad:	69 000 MPa (10×10^6 lb/in ²)		

altos. Además, muchos de los metales no ferrosos tienen propiedades adicionales a las mecánicas que los hacen ideales para aplicaciones en las que el acero sería inapropiado. Por ejemplo, el cobre tiene una de las resistividades más bajas entre los metales, y se usa ampliamente para fabricar conductores eléctricos. El aluminio es un conductor térmico excelente, y sus aplicaciones incluyen intercambiadores de calor y trastos de cocina. También es uno de los metales a los que se le da forma con mayor facilidad y por esa razón se le valora mucho. El zinc tiene un punto de fusión relativamente bajo, por lo que se le utiliza de manera amplia en las operaciones de fundición a troquel. Los metales no ferrosos comunes tienen su propia combinación de propiedades que los hacen atractivos para una variedad de aplicaciones. En las siguientes nueve secciones se estudian aquellos que son los más importantes en lo comercial y tecnológico.

6.3.1 El aluminio y sus aleaciones

El aluminio y el magnesio son metales ligeros y por esta característica es frecuente que se les especifique en aplicaciones de ingeniería. Ambos elementos abundan en nuestro planeta, el aluminio en la tierra y el magnesio en el mar, aunque ninguno se extrae con facilidad de su estado natural.

En la tabla 6.1b) se enlistan las propiedades y otros datos del aluminio. Entre los metales principales es un recién llegado relativamente hablando, pues data apenas de fines del siglo XIX (véase la nota histórica 6.2). El estudio en esta sección incluye lo siguiente: 1) una descripción breve de la forma en que se produce el aluminio, y 2) un análisis de las propiedades y sistema de nomenclatura para el metal y sus aleaciones.

Nota histórica 6.2 Aluminio

En 1807, el químico inglés Humphrey Davy, en la creencia de que el mineral **alúmina** (Al_2O_3) tenía una base metálica, trató de extraer el metal. No tuvo éxito, pero, de cualquier modo, estaba convencido lo suficiente como para dar al metal el nombre de **aluminum**, el que después cambió por **aluminio**. En 1825, el físicoquímico danés Hans Orsted finalmente tuvo éxito en separar el metal. Observó que “parecía estaño”. En 1845, el físico alemán Friedrich Wohler fue el primero en determinar la gravedad específica, ductilidad y varias otras propiedades del aluminio.

El proceso electrolítico moderno para producir aluminio se basa en el trabajo concurrente pero independiente de

Charles Hall, en Estados Unidos, y de Paul Heroult, en Francia, alrededor de 1886. En 1888, Hall y un grupo de empresarios iniciaron la empresa Pittsburgh Reduction Co. Ese mismo año se produjo el primer lingote de aluminio con el proceso de fusión electrolítica. La demanda de aluminio creció. La necesidad de cantidades grandes de electricidad en el proceso de producción llevó a la compañía a reubicarse en las cataratas del Niágara, en 1895, donde se disponía de energía hidroeléctrica a costo muy bajo. En 1907, la compañía cambió su nombre por el de Aluminum Company of America (Alcoa). Fue el único productor de aluminio en Estados Unidos hasta la Segunda Guerra Mundial.

Producción de aluminio El mineral principal de aluminio es la **bauxita**, que consiste por mucho en óxido de aluminio hidratado ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) y otros óxidos. La extracción del aluminio a partir de la bauxita se resume en tres pasos: 1) lavado y trituración del mineral

TABLA 6.7a) Nomenclatura de aleaciones de aluminio forjado y fundido.

Grupo de aleación	Código para forjado	Código para fundido
Aluminio, pureza de 99,0% o mayor	1XXX	1XX.X
Aleaciones de aluminio, por elemento(s) principal(es)		
Cobre	2XXX	2XX.X
Manganeso	3XXX	
Silicio + cobre o magnesio		3XX.X
Silicio	4XXX	4XX.X
Magnesio	5XXX	5XX.X
Magnesio y silicio	6XXX	
Zinc	7XXX	7XX.X
Estaño		8XX.X
Otros	8XXX	9XX.X

para obtener polvos finos; 2) proceso Bayer, en el que la bauxita se convierte en alúmina pura (Al_2O_3); y 3) electrólisis, en el que la alúmina se separa en aluminio y oxígeno gaseoso (O_2). El **proceso Bayer**, llamado así en honor del químico alemán que lo creó, involucra una solución de polvo de bauxita en sosa cáustica acuosa (NaOH) a presión, seguida de precipitación de Al_2O_3 puro de la solución. La alúmina es importante en el comercio por sí misma, como material cerámico de uso en la ingeniería (véase el capítulo 7).

La **electrólisis** para separar el Al_2O_3 en sus elementos constitutivos requiere de disolver el precipitado en un baño de fundición de criolita (Na_3AlF_6) y sujetar la solución a una corriente directa entre las placas de un horno electrolítico. El electrólito se disocia para formar aluminio en el cátodo y oxígeno gaseoso en el ánodo.

Propiedades y esquema de nomenclatura El aluminio tiene mucha conductividad eléctrica y térmica, y su resistencia a la corrosión es excelente debido a la formación de una película superficial de óxido, delgada y dura. Es un metal muy dúctil y es notable la capacidad que tiene para adquirir la forma deseada. El aluminio puro tiene resistencia relativamente baja, pero se puede alear y tratar térmicamente para competir con ciertos aceros, en especial cuando el peso es una consideración importante.

El sistema de nomenclatura para el aluminio es un código numérico de cuatro dígitos. El sistema tiene dos partes, una para el aluminio forjado y otra para los aluminios fundidos. La diferencia es que para estos últimos se emplea un punto decimal después del tercer dígito. En la tabla 6.7a) se presentan las designaciones.

Debido a que en las propiedades de las aleaciones de aluminio influyen mucho el endurecimiento por trabajo y el tratamiento térmico, además del código de composición, debe designarse el templado (tratamiento para dar resistencia, si lo hubiera). En la tabla 6.7b) se presentan las designaciones principales de templado. Esta designación se agrega al número precedente de cuatro dígitos, separado por un símbolo como superíndice, para indicar el tratamiento o la ausencia de él; por ejemplo, 1 060 °F. Por supuesto, los tratamientos de templado que especifican endurecimiento por deformación no se aplican a las aleaciones fundidas. En la tabla 6.8 se dan algunos ejemplos de las diferencias notables en las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio que resultan de los distintos tratamientos.

6.3.2 El magnesio y sus aleaciones

El magnesio (Mg) es el más ligero de los metales estructurales. Su gravedad específica y otros datos básicos se presentan en la tabla 6.1c). El magnesio y sus aleaciones se encuentran disponibles tanto en forma forjada como fundida. Es relativamente fácil de maquinar. Sin embargo, en todo procesamiento del magnesio, las partículas pequeñas del metal (tales como astillas metálicas pequeñas procedentes del corte) se oxidan con rapidez, por lo que debe tenerse cuidado para evitar el peligro de incendio.

TABLA 6.7b) Nomenclatura del templado para aleaciones de aluminio.

Templado	Descripción
F	Como se fabrica, sin tratamiento especial.
H	Endurecido por deformación (aluminios forjados). La H va seguida de dos dígitos, el primero de los cuales indica un tratamiento térmico, si lo hubiera; y el segundo, el grado de endurecimiento por trabajo restante; por ejemplo: H1X No hubo tratamiento térmico después del endurecimiento por deformación, y X = 1 a 9, que indica el grado de endurecimiento por trabajo. H2X Recocido parcialmente, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente en el producto. H3X Estabilizado, y X = grado de endurecimiento por trabajo remanente. Estabilizado significa calentar ligeramente por arriba de la temperatura de uso que se prevé.
O	Recocido para liberar el endurecimiento por deformación y mejorar la ductilidad; reduce la resistencia a su nivel mínimo.
T	Tratamiento térmico para producir templados estables diferentes de F, H u O. Va seguido de un dígito para indicar un tratamiento específico; por ejemplo: T1 = enfriado a partir de una temperatura elevada, envejecido en forma natural. T2 = enfriado desde una temperatura elevada, trabajado en frío, envejecido en forma natural. T3 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo natural. T4 = solución tratada térmicamente y envejecida naturalmente. T5 = enfriado desde una temperatura alta, envejecido en forma artificial. T6 = solución tratada térmicamente y envejecida en forma artificial. T7 = solución tratada térmicamente y sobrenvejecida o estabilizada. T8 = solución tratada térmicamente, trabajada en frío, envejecida de modo artificial. T9 = solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío. T10 = enfriada desde una temperatura elevada, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
W	Solución con tratamiento térmico, aplicada a aleaciones que se endurecen por el envejecimiento en su uso; es un templado inestable.

TABLA 6.8 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio seleccionadas.

Código	Composición normal, % ^a						Templado	Resistencia a la tensión		Elongación
	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si		MPa	lb/in ²	
1050	99.5		0.4			0.3	O	76	11 000	39
							H18	159	23 000	7
1100	99.0		0.6			0.3	O	90	13 000	40
							H18	165	24 000	10
2024	93.5	4.4	0.5	1.5	0.6	0.5	O	185	27 000	20
							T3	485	70 000	18
3004	96.5	0.3	0.7	1.0	1.2	0.3	O	180	26 000	22
							H36	260	38 000	7
4043	93.5	0.3	0.8			5.2	O	130	19 000	25
							H18	285	41 000	1
5050	96.9	0.2	0.7	1.4	0.1	0.4	O	125	18 000	18
							H38	200	29 000	3
6063	98.5		0.3	0.7		0.4	O	90	13 000	25
							T4	172	25 000	20

Recopilado a partir de la referencia [10].

^a Además de los elementos que se enlistan, la aleación puede contener indicios de otros elementos tales como el cobre, magnesio, manganeso, vanadio y zinc.

TABLA 6.1 (continuación) c) Magnesio.

Símbolo: Mg	Se extrae de: MgCl ₂ del agua marina, por electrólisis.
Número atómico: 12	Elementos de aleación: Véase la tabla 6.9.
Gravedad específica: 1.74	Aplicaciones comunes: Aeroespacial, misiles, bicicletas, sierras de cadena domésticas, equipajes y otras aplicaciones en las que el peso ligero es un requerimiento principal.
Estructura cristalina: HCP	
Temperatura de fusión: 650 °C (1 202 °F)	
Módulo de elasticidad: 48 000 MPa (7 × 10 ⁶ lb/in ²)	

TABLA 6.9 Letras del código para identificar los elementos en las aleaciones de magnesio.

A	aluminio (Al)	H	torio (Th)	M	manganeso (Mn)	Q	plata (Ag)	T	estaño (Sn)
E	metales de las tierras raras	K	zirconio (Zr)	P	plomo (Pb)	S	silicio (Si)	Z	zinc (Zn)

Producción del magnesio El agua de mar contiene alrededor de 0.13% de MgCl_2 y es la fuente de la mayor parte del magnesio que se produce en forma comercial. Para extraerlo, se mezcla una cantidad de agua marina con una lechada de cal, es decir, hidróxido de calcio (Ca(OH)_2). La reacción resultante precipita el hidróxido de magnesio (Mg(OH)_2) que se asienta y se retira como pasta aguada. Después, se filtra esta pasta aguada a fin de incrementar el contenido de Mg(OH)_2 para luego mezclarlo con ácido clorhídrico (HCl), que reacciona con el hidróxido para formar un concentrado de MgCl_2 , mucho más concentrado que el del agua marina original. Se utiliza electrólisis para descomponer la sal en magnesio (Mg) y cloro gaseoso (Cl_2). Después se funde el magnesio en lingotes para su procesamiento posterior. El cloro se recicla para formar más MgCl_2 .

Propiedades y esquema de nomenclatura Como metal puro, el magnesio es relativamente suave y carece de la resistencia suficiente para la mayor parte de las aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, se puede alea y tratar térmicamente para que alcance resistencias comparables a las de las aleaciones del aluminio. En particular, su relación resistencia-peso es una ventaja en los aviones y componentes de misiles.

El esquema de nomenclatura del magnesio usa un código alfanumérico de tres a cinco caracteres. Los primeros dos son letras que identifican los elementos principales de la aleación (pueden especificarse hasta dos elementos en el código, en orden decreciente de porcentaje, o en forma alfabética si los porcentajes son iguales). En la tabla 6.9 se enlistan dichas letras del código. Las letras van seguidas de un número de dos dígitos que indican, respectivamente, las cantidades de dos ingredientes de aleación al porcentaje más cercano. Finalmente, el último símbolo es una letra que indica cierta variación en la composición, o tan sólo el orden cronológico en el que se estandarizó para su disponibilidad comercial. Las aleaciones de magnesio también requieren la especificación del templado, y para ellas se emplea el mismo esquema básico que para el aluminio que se presentó en la tabla 6.7b).

En la tabla 6.10 se dan algunos ejemplos de aleaciones de magnesio, que ilustran el esquema de nomenclatura e indican su resistencia a la tensión y ductilidad.

6.3.3 El cobre y sus aleaciones

El cobre (Cu) es uno de los metales más antiguos que se conocen (véase la nota histórica 6.3). Los datos básicos del elemento cobre se presentan en la tabla 6.1d).

TABLA 6.10 Composiciones y propiedades mecánicas de aleaciones de magnesio seleccionadas.

Código	Composición normal, %						Proceso	Resistencia a la tensión		Elongación
	Mg	Al	Mn	Si	Zn	Otro		MPa	lb/in ²	
AZ10A	98.0	1.3	0.2	0.1	0.4		Trabajado	240	35 000	10
AZ80A	91.0	8.5			0.5		Forjado	330	48 000	11
HM31A	95.8		1.2			3.0 Th	Trabajado	283	41 000	10
ZK21A	97.1				2.3	6 Zr	Trabajado	260	38 000	4
AM60	92.8	6.0	0.1	0.5	0.2	0.3 Cu	Fundido	220	32 000	6
AZ63A	91.0	6.0			3.0		Fundido	200	29 000	6

Recopilado a partir de la referencia [10].

Nota histórica 6.3 Cobre

El cobre fue uno de los primeros metales que usaron las culturas humanas (el oro fue el otro). Es probable que el descubrimiento del metal ocurriera alrededor de 6000 a.C. En esa época, el cobre se encontró en estado metálico libre. Los antiguos pueblos fabricaron implementos y armas por medio del golpeo del metal (forja en frío). Al ser golpeado, el cobre se hacía más fuerte (endurecimiento por deformación); esto y su color rojo atractivo lo hacían valioso para las primeras civilizaciones.

Alrededor de 4000 a.C, se descubrió que el cobre podría fundirse para que adoptara formas útiles.

Después se vio que mezclado con estaño podía fundirse y trabajarse con más facilidad que como metal puro. Esto llevó a que se extendiera el uso del bronce y posteriormente se diera el nombre de Edad de Bronce, a la época que transcurrió aproximadamente desde 2000 a.C. al periodo de Cristo.

Para los romanos antiguos, la isla de Chipre era casi la única fuente de cobre. Llamaban al metal **aes cyprium** (mineral de Chipre). Este nombre se abrevió a **Cyprium** y después a **Cuprium**. De ahí deriva el símbolo químico Cu.

Producción de cobre En los tiempos antiguos, el cobre existía en la naturaleza como elemento libre. Hoy día, esos depósitos naturales son más difíciles de encontrar y el metal se extrae de minerales que en su mayoría son sulfuros, como la **calcopirita** (CuFeS_2). El mineral se tritura (véase la sección 17.1.1), se concentra por flotación y después se **aparta** (se derrite o funde, con frecuencia con una reacción química para separar el metal del mineral). El cobre resultante se denomina **cobre ampollado**, que tiene una pureza de 98% y 99%. Se emplea electrólisis para obtener niveles de pureza más elevados apropiados para el uso comercial.

Propiedades y esquema de nomenclatura El cobre puro tiene un color rojizo o rosa distintivo, pero su propiedad de ingeniería más notable es su resistividad eléctrica baja, uno de los elementos con la más baja. Debido a esta propiedad, y a su abundancia relativa en la naturaleza, el cobre puro comercial se usa mucho como conductor eléctrico (aquí se debe decir que la conductividad del cobre disminuye de manera significativa si se agregan elementos de aleación). El Cu también es un conductor térmico excelente. El cobre es uno de los metales nobles (el oro y la plata también lo son), por lo que es resistente a la corrosión. Todas esas propiedades se combinan para que el cobre sea uno de los metales más importantes.

En contraparte, la resistencia y dureza del cobre son relativamente bajas, en especial si se toma en cuenta el peso. En consecuencia, para mejorar la resistencia (así como por otras razones), es frecuente que el cobre se alee. El **bronce** es una aleación de cobre y estaño (es común el 90% de Cu y 10% de Sn), que hoy se usa todavía a pesar de su antigüedad. Se han desarrollado aleaciones de bronce adicionales, con base en otros elementos distintos del estaño; entre éstos se hallan bronce de aluminio, y bronce de silicio. El **latón** es otra aleación de cobre que resulta familiar, compuesta de cobre y zinc (es común que contenga 65% de cobre y 35% de zinc). La aleación de cobre con mayor resistencia es la del berilio-cobre (con sólo el 2% de berilio). Puede tratarse térmicamente para obtener resistencias a la tensión de 1 035 MPa (150 000 lb/in²). Las aleaciones de Be-Cu se usan para hacer resortes.

La nomenclatura de las aleaciones de cobre se basa en el Unified Numbering System for Metals and Alloys (UNS), que emplea un número de cinco dígitos precedido de la letra

TABLA 6.1 (continuación); d) Cobre.

Símbolo:	Cu	Mineral del que se extrae:	Varios: por ejemplo, calcopirita (CuFeS_2).
Número atómico:	29	Elementos de aleación:	Estaño (bronce), zinc (latón), aluminio, silicio, níquel y berilio.
Gravedad específica:	8.96	Aplicaciones comunes:	Conductores y componentes eléctricos, municiones (latón), vasijas y cacerolas, joyería, plomería, aplicaciones marinas, intercambiadores de calor, resortes (Be-Cu).
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 083 °C (1 981 °F)		
Módulo de elasticidad:	110 000 MPa (16×10^6 lb/in ²)		

TABLA 6.11 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de cobre seleccionadas.

Código	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		Elongación, %
	Cu	Be	Ni	Sn	Zn	MPa	lb/in ²	
C10100	99.99					235	34 000	45
C11000	99.95					220	32 000	45
C17000	98.0	1.7	a			500	70 000	45
C24000	80.0				20.0	290	42 000	52
C26000	70.0				30.0	300	44 000	68
C52100	92.0			8.0		380	55 000	70
C71500	70.0		30.0			380	55 000	45
C71500 ^b	70.0		30.0			580	84 000	3

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Cantidades pequeñas de Ni y Fe + 0.3 Co.

^b Tratado térmicamente para dar más resistencia.

C (de cobre). Las aleaciones se procesan en formas fraguadas y fundidas, y el sistema de nomenclatura incluye ambas. En la tabla 6.11 se presentan algunas aleaciones de cobre con sus composiciones y propiedades mecánicas.

6.3.4 El níquel y sus aleaciones

En muchos aspectos, el níquel (Ni) es similar al hierro. Es magnético y su módulo de elasticidad es virtualmente el mismo que el del hierro y el acero. Sin embargo, es mucho más resistente a la corrosión y las propiedades de alta temperatura de sus aleaciones por lo general son superiores. Debido a sus características de resistencia a la corrosión, se usa mucho como elemento de aleación en el acero, como en los aceros inoxidables, y como metal de recubrimiento de otros metales, como el acero al carbono.

Producción de níquel El mineral de níquel más importante es la *pentlandita* ((Ni,Fe)₉S₈). Para extraer el níquel, primero se tritura el mineral mezclado con agua. A fin de separar los sulfuros de los demás minerales de la mena se utilizan técnicas de flotación. Después, se calienta el sulfuro de níquel para quemar algo del azufre, y luego se funde con el fin de eliminar hierro y silicio. Se refina más en un convertidor del tipo Bessemer para obtener sulfuro de níquel (NiS) de alta concentración. Después se aplica electrólisis para recuperar níquel de alta pureza a partir del compuesto. En ocasiones, los minerales de níquel se mezclan con otros de cobre, en cuyo caso la técnica de recuperación que se acaba de describir también produce cobre.

Aleaciones de níquel Las aleaciones de níquel tienen importancia comercial por sí mismas, y son notables por su resistencia a la corrosión y desempeño a altas temperaturas. En la tabla 6.12 se dan la composición, resistencia a la tensión y ductilidad de algunas aleaciones de níquel. Además, cierto número de superaleaciones se basan en el níquel (véase la sección 6.4).

TABLA 6.1 (continuación); e) Níquel.

Símbolo:	Ni	Mineral del que se extrae:	Pentlandita ((Fe, Ni) ₉ S ₈).
Número atómico:	28	Elementos de aleación:	Cobre, cromo, hierro, aluminio.
Gravedad específica:	8.90	Aplicaciones comunes:	Ingrediente de las aleaciones del acero inoxidable, metal para recubrir acero, aplicaciones que requieren resistencia a las temperaturas elevadas y a la corrosión.
Estructura cristalina:	FCC		
Temperatura de fusión:	1 453 °C (2 647 °F)		
Módulo de elasticidad:	209 000 MPa (30 × 10 ⁶ lb/in ²)		

TABLA 6.12 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de níquel.

Código	Composición normal, %							Resistencia a la tensión		
	Ni	Cr	Cu	Fe	Mn	Si	Otro	MPa	lb/in ²	Elongación, %
270	99.9		a	a				345	50 000	50
200	99.0		0.2	0.3	0.2	0.2	C, S	462	67 000	47
400	66.8		30.0	2.5	0.2	0.5	C	550	80 000	40
600	74.0	16.0	0.5	8.0	1.0	0.5		655	95 000	40
230	52.8	22.0		3.0	0.4	0.4	b	860	125 000	47

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Indicios.

^b Otros ingredientes de aleación en grado 230: 5% Co, 2% Mo, 14% W, 0.3% Al, 0.1% C.

6.3.5 El titanio y sus aleaciones

El titanio (Ti) es abundante en la naturaleza, constituye cerca del 1% de la corteza terrestre (el 8% corresponde al aluminio, el que abunda más). La densidad del titanio está entre la del aluminio y la del hierro; éste y otros datos se presentan en la tabla 6.1f). En las últimas décadas su importancia ha crecido debido a sus aplicaciones aeroespaciales, en las que se aprovechan su peso ligero y razón resistencia-peso buena.

Producción de titanio Los minerales principales del titanio son el **rutilo**, que está formado por 98% a 99% de TiO_2 , y la **ilmenita**, que es una combinación de FeO y TiO_2 . El rutilo es preferible como mena debido a su mayor contenido de Ti. En la recuperación del metal a partir de sus minerales, el TiO_2 se convierte en tetracloruro de titanio (TiCl_4) por medio de hacer reaccionar al compuesto con cloro gaseoso. A esto sigue una secuencia de etapas de destilación para eliminar las impurezas. Luego se reduce el TiCl_4 muy concentrado a titanio metálico, con una reacción con magnesio; esto se conoce como **proceso Kroll**. Como agente reductor también puede usarse sodio. En cualquier caso, debe mantenerse una atmósfera inerte para impedir que el O_2 , N_2 o H_2 contaminen al Ti por su gran afinidad con esos gases. El metal resultante se emplea para fundir lingotes del metal y sus aleaciones.

Propiedades del titanio El coeficiente de expansión térmica del titanio es relativamente bajo entre los metales. Es más rígido y fuerte que el aluminio, y a altas temperaturas conserva buena resistencia. El titanio puro es reactivo, lo que da problemas durante el procesamiento, en especial en estado fundido. Sin embargo, a temperatura ambiente forma una película delgada de óxido (TiO_2) adhesivo que recubre y proporciona una resistencia excelente contra la corrosión.

Estas propiedades han dado lugar a dos áreas principales de aplicación del titanio: 1) en estado puro comercial, el Ti se emplea para hacer componentes resistentes a la corrosión, tales como elementos marinos e implantes ortopédicos; y 2) las aleaciones de titanio se emplean como componentes de resistencia elevada en temperaturas que van de la del ambiente a 550 °C (1 000 °F), en especial en las que se aprovecha su excelente razón resis-

TABLA 6.1 (continuación); f) Titanio.

Símbolo:	Ti	Minerales principales	
Número atómico:	22	de los que se extrae:	Rutilo (TiO_2) e ilmenita (FeTiO_3)
Gravedad específica:	4.51	Elementos de aleación:	Aluminio, estaño, vanadio, cobre y magnesio.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Componentes de motores a reacción, otras aplicaciones aeroespaciales, implantes ortopédicos.
Temperatura de fusión:	1 668 °C (3 034 °F)		
Módulo de elasticidad:	117 000 MPa (17×10^6 lb/in ²)		

TABLA 6.13 Composición y propiedades mecánicas de aleaciones de titanio seleccionadas.

Código ^a	Composición normal, %						Resistencia a la tensión		Elongación, %
	Ti	Al	Cu	Fe	V	Otro	MPa	lb/in ²	
R50250	99.8			0.2			240	35 000	24
R56400	89.6	6.0		0.3	4.0	^b	1 000	145 000	12
R54810	90.0	8.0			1.0	1 Mo, ^b	985	143 000	15
R56620	84.3	6.0	0.8	0.8	6.0	2 Sn, ^b	1 030	150 000	14

Recopilada a partir de las referencias [1] y [10].

^a United Numbering System (UNS).

^b Indicios de C, H, O.

tencia-peso. Estas aplicaciones recientes incluyen componentes de aeronaves y misiles. Algunos de los elementos de aleación que se utilizan con el titanio incluyen aluminio, manganeso, estaño y vanadio. En la tabla 6.13 se presentan algunas composiciones y propiedades mecánicas de varias de sus aleaciones.

6.3.6 El zinc y sus aleaciones

En la tabla 6.1g) se enlistan los datos básicos del zinc. Su punto de fusión bajo lo hace atractivo como metal de fundición. También da protección contra la corrosión cuando se le usa como recubrimiento del acero o hierro; el **acero galvanizado** es acero recubierto con zinc.

Producción de zinc La blenda de zinc o **esfalerita** es el mineral principal del zinc; contiene sulfuro de zinc (ZnS). Otras menas importantes de zinc incluyen la **smithsonita**, que es carbonato de zinc (ZnCO₃), y **hemimorfato**, que es silicato hidroso de zinc (Zn₄Si₂O₇OH·H₂O).

La esfalerita debe concentrarse (o **beneficiarse**, en el argot metalúrgico) debido a la cantidad tan pequeña de sulfuro de zinc que contiene. Esto se lleva a cabo por medio de triturar, en primer lugar, al mineral, luego se muele con agua en un molino de balines (véase la sección 17.1.1) para crear una pasta aguada. En presencia de un agente espumante, la pasta aguada se agita de modo que las partículas de mineral flotan en la superficie y se pueden retirar (se separan de los minerales pesados de la parte inferior). Después, el sulfuro de zinc más concentrado se calienta a 1 260 °C (2 300 °F), de modo que con la reacción se forma óxido de zinc (ZnO).

Hay varios procesos termoquímicos para recuperar el zinc de ese óxido, todos los cuales lo reducen por medio de carbono. El carbono se combina con el oxígeno del ZnO para formar CO y CO₂, lo que libera Zn en forma de vapor que se condensa para producir el metal deseado.

También se usa mucho un proceso electrolítico, responsable de alrededor de la mitad de la producción mundial de zinc. Dicho proceso también comienza con la preparación de ZnO, que se mezcla con ácido sulfúrico diluido (H₂SO₄), seguido de electrólisis para separar la solución de sulfato de zinc (ZnSO₄) resultante y producir el metal puro.

TABLA 6.1 (continuación); g) Zinc.

Símbolo:	Zn	Módulo de elasticidad:	90 000 MPa (13 × 10 ⁶ lb/in ²) ^a .
Número atómico:	30	Mineral principal:	Esfalerita (ZnS).
Gravedad específica:	7.13	Elementos de aleación:	Aluminio, magnesio y cobre.
Estructura cristalina:	HCP	Aplicaciones comunes:	Acero y hierro galvanizados, fundición a troquel, elemento de aleación del latón.
Temperatura de fusión:	419 °C (786 °F)		

^a El zinc se agrieta, por lo cual es difícil de medir su módulo de elasticidad; por esta razón, algunas tablas de propiedades omiten el valor de *E* para el zinc.

TABLA 6.14 Composición, resistencia a la tensión y aplicaciones de aleaciones de zinc seleccionadas.

Código ^a	Composición normal, %					Resistencia a la tensión		Aplicación
	Zn	Al	Cu	Mg	Fe	MPa	lb/in ²	
Z33520	95.6	4.0	0.25	0.04	0.1	283	41 000	Fundición a troquel
Z35540	93.4	4.0	2.5	0.04	0.1	359	52 000	Fundición a troquel
Z35635	91.0	8.0	1.0	0.02	0.06	374	54 000	Aleación de fundición
Z35840	70.9	27.0	2.0	0.02	0.07	425	62 000	Aleación de fundición
Z45330	98.9		1.0	0.01		227	33 000	Aleación rolada

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a UNS – United Numbering System para metales.

Aleaciones y aplicaciones del zinc Las aleaciones del zinc se utilizan mucho en fundición a troquel para producir componentes en masa para las industrias automotriz y de aparatos. Otra aplicación mayor del zinc se tiene en el acero galvanizado. Como el nombre lo sugiere, se crea una celda galvánica en el acero galvanizado (el Zn es el ánodo y el acero el cátodo) que lo protege del ataque de la corrosión. Por último, el tercer uso importante del zinc es para producir latón. Como ya se dijo, esa aleación consiste en cobre y zinc, en la razón de 2/3 de Cu y 1/3 de Zn, aproximadamente. El latón se estudió en el análisis del cobre. En la tabla 6.14 se enlistan varias aleaciones de zinc, con datos sobre su composición, resistencia a la tensión y aplicaciones.

6.3.7 El plomo y el estaño

Es frecuente que el plomo (Pb) y el estaño (Sn) se estudien juntos debido a sus temperaturas de fusión bajas, y porque forman aleaciones para soldar que se emplean para hacer conexiones eléctricas. En la figura 6.3 se presenta el diagrama de fase del sistema estaño-plomo. Los datos básicos para ambos metales se enlistan en la tabla 6.1*h*).

El plomo es un metal denso con punto de fusión bajo; otras de sus propiedades son resistencia baja, poca dureza (la palabra “suave” es apropiada para describirlo), ductilidad alta y buena resistencia a la corrosión. Además de su empleo como soldadura, las aplicaciones del plomo y sus aleaciones incluyen las siguientes: tubos para plomería, rodamientos, municiones, metales tipográficos, protección contra rayos X, baterías de almacenamiento y amortiguamiento de vibraciones. También se utiliza mucho en productos químicos y pinturas. Los elementos de aleación principales para el plomo son estaño y antimonio.

El estaño tiene un punto de fusión aún más bajo que el del plomo; otras propiedades incluyen resistencia baja, poca dureza y ductilidad buena. El uso más temprano del estaño fue para hacer bronce, aleación que consistía en cobre y estaño creada alrededor de 3000 a.C. en Mesopotamia y Egipto. El bronce aún es una aleación de importancia comercial (aunque su importancia relativa ha declinado a lo largo de 5 000 años). Otros usos del estaño son para recubrir contenedores de lámina de acero (“latas de estaño”) para almacenar comida y, por supuesto, como metal de soldadura.

TABLA 6.1 (continuación); *h*) Plomo y estaño.

	Plomo	Tin = Estaño
Símbolo:	Pb	Sn
Número atómico:	82	50
Gravedad específica:	11.35	7.30
Estructura cristalina:	FCC	HCP
Temperatura de fusión:	327 °C (621 °F)	232 °C (449 °F)
Módulo de elasticidad:	21 000 MPa (3×10^6 lb/in ²)	42 000 MPa (6×10^6 lb/in ²).
Mineral del que se extrae:	Galena (PbS)	Casiterita (SnO ₂).
Elementos comunes de aleación:	Estaño, antimonio	Plomo, cobre
Aplicaciones comunes:	Véase el texto	Bronce, soldadura, latas de estaño.

TABLA 6.1 (continuación); i) metales refractarios.

	Molibdeno	Tungsteno
Símbolo:	Mo	W
Número atómico:	42	74
Gravedad específica:	10.2	19.3
Estructura cristalina:	BCC	BCC
Temperatura de fusión:	2 619 °C (4 730 °F)	3 400 °C (6 150 °F)
Módulo de elasticidad:	324 000 MPa (47×10^6 lb/in ²)	407 000 MPa (59×10^6 lb/in ²).
Minerales principales:	Molibdenita (MoS ₂)	Scheelita (CaWO ₄), wolframita ((Fe,Mn)WO ₄).
Elementos de aleación:	Véase el texto	^a
Aplicaciones:	Véase el texto	Filamentos luminosos, piezas para motores a reacción, equipos para WC.

^a El tungsteno se emplea como metal puro e ingrediente de aleaciones, pero pocas de éstas se basan en el W.

6.3.8 Metales refractarios

Los **metales refractarios** son aquellos capaces de soportar temperaturas elevadas. Los más importantes de este grupo son el molibdeno y el tungsteno; véase la tabla 6.1i). Otros metales refractarios son el columbio (Cb) y el tantalio (Ta). En general, estos metales y sus aleaciones pueden conservar una resistencia y dureza elevadas a temperaturas altas.

El molibdeno tiene un punto de fusión alto y es relativamente denso, rígido y fuerte. Se usa como metal puro (99.9% + % Mo) y como aleación. La aleación principal es TZM, que contiene cantidades pequeñas de titanio y zirconio (menos de 1% del total). El Mo y sus aleaciones poseen buena resistencia a alta temperatura, y a esto se deben sus tantas aplicaciones, que incluyen escudos contra el calor, elementos de calefacción, electrodos para soldadura por resistencia, troqueles para trabajos a altas temperaturas (por ejemplo, moldes para fundición a troquel) y piezas para motores de cohete y a reacción. Además de estas aplicaciones, el molibdeno también se emplea mucho como ingrediente de aleación de otros metales, como aceros y superaleaciones.

El tungsteno (W) tiene el punto de fusión más alto de todos los metales puros y es uno de los más densos. Es también el más rígido y duro de todos los metales puros. Su aplicación más conocida es el filamento de los focos incandescentes. Es común que las aplicaciones del tungsteno se caractericen por temperaturas de operación elevadas, tales como elementos para cohetes y motores a reacción, y electrodos de soldadura con arco. También se utiliza mucho como elemento de aleaciones de aceros para herramientas, resistentes al calor, y para el carburo de tungsteno (véase la sección 7.3.2).

Una desventaja grande tanto del Mo como del W es su propensión a oxidarse a temperaturas elevadas, por arriba de los 600 °C (1 000 °F), con lo que se perjudican sus propiedades de alta temperatura. Con el fin de superar esta deficiencia, deben emplearse recubrimientos protectores para estos metales en las aplicaciones de alta temperatura, o bien operar las piezas metálicas en un vacío. Por ejemplo, el filamento de tungsteno debe energizarse en el vacío interior de los focos.

6.3.9 Metales preciosos

Los metales preciosos, también llamados **metales nobles** debido a que son inactivos en cuanto a la química, incluyen el oro, platino y plata. Son metales atractivos, disponibles en cantidades limitadas, y a través de la historia de las civilizaciones se han empleado para acuñar monedas y respaldar el papel moneda. También se les usa mucho en joyería y aplicaciones similares que aprovechan su alto valor. Como grupo, los metales preciosos poseen densidad elevada, ductilidad buena, conductividad eléctrica alta, resistencia a la corrosión y temperaturas de fusión moderadas; véase la tabla 6.1j.

TABLA 6.1 (continuación); j) los metales preciosos.

	Oro	Platino	Plata
Símbolo:	Au	Pt	Ag
Número atómico:	79	78	47
Gravedad específica:	19,3	21,5	10,5
Estructura cristalina:	FCC	FCC	FCC
Temperatura de fusión:	1 063 °C (1 945 °F)	1 769 °C (3 216 °F)	961 °C (1 762 °F)
Minerales principales:	a	a	a
Elementos de aleación:	b	b	b
Aplicaciones:	Véase el texto	Véase el texto	Véase el texto

^a Todos los metales preciosos se obtienen de depósitos en los que el metal puro está mezclado con otros minerales y metales. La plata también se extrae del mineral *argentita* (Ag₂S).

^b Los metales preciosos por lo general no se alean.

El **oro** (Au) es uno de los metales más pesados; es suave y se le da forma con facilidad, y posee un color amarillo distintivo que le agrega valor. Además de la moneda y joyería, sus aplicaciones incluyen contactos eléctricos (debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión), trabajos dentales y recubrimiento de metales comunes para fines decorativos.

El **platino** (Pt) es el único metal (entre los comunes) cuya densidad es mayor que la del oro. Aunque no se usa tanto como éste, sus aplicaciones son diversas e incluyen la joyería, termopares, contactos eléctricos y equipo catalítico para el control de la contaminación de los automóviles.

La **plata** (Ag) es menos cara por unidad de peso que el oro o el platino. No obstante, su atractivo lustre “plateado” la hace un metal muy valioso para monedas, joyería y vajillas (que incluso adoptan el nombre del metal: “platería”). También se emplea como relleno en trabajos dentales. La plata tiene la conductividad eléctrica más elevada que cualquier metal, lo que la hace útil para contactos en aplicaciones electrónicas. Por último, debe mencionarse que el cloruro de plata y otros haluros del metal sensibles a la luz son la base de la fotografía.

6.4 SUPERALEACIONES

Las superaleaciones constituyen una categoría que encuadra a los metales ferrosos y no ferrosos. Algunas de ellas están basadas en el hierro, mientras otras lo están en el níquel y el cobalto. En realidad, muchas de las superaleaciones contienen cantidades sustanciales de tres o más metales, en lugar de un solo metal base más elementos de aleación. No obstante que el tonelaje de estos metales no es significativo en comparación con la mayoría de los demás metales que se han estudiado en este capítulo, tienen importancia comercial porque son muy caros; y también la tienen en cuanto a tecnología por lo que hacen.

Las **superaleaciones** son un grupo de aleaciones de alto rendimiento diseñadas para satisfacer requerimientos muy exigentes de fortaleza y resistencia a la degradación de su superficie (corrosión y oxidación) a varias temperaturas de uso. Para estos metales, la resistencia a la temperatura ambiente convencional no es un criterio importante, y la mayoría de ellos tiene propiedades al respecto que son buenas pero no extraordinarias. Lo que los distingue es su desempeño ante temperaturas elevadas; las propiedades mecánicas de interés son su resistencia a la tensión, dureza en caliente, resistencia al agrietamiento, y a la corrosión a temperaturas muy elevadas. Es frecuente que las temperaturas de operación estén en la cercanía de los 1 100 °C (2 000 °F). Estos metales se emplean mucho en sistemas de turbinas de gas, motores a reacción y de cohetes, turbinas de vapor, y plantas de energía nuclear, en los que la eficiencia de operación se incrementa con las temperaturas elevadas.

TABLA 6.15 Algunas composiciones comunes de las superaleaciones.

Superalación	Análisis químico, % ^a							
	Fe	Ni	Co	Cr	Mo	W	Nb	Otros ^b
Basada en el hierro								
Incoloy 802	46	32		21				< 1
Haynes 556	29	20	20	22	3			6
Basada en el níquel								
Incoloy 807	25	40	8	21		5		1
Inconel 718	18	53		19	3		5	1
Rene 41		55	11	19	1			3
Hastelloy S	1	67		16	15			1
Nimonic 75	3	76		20				< 1
Basada en el cobalto								
Stellite 6B	3	3	53	30	2	5		4
Haynes 188	3	22	39	22		14		
L-605		10	53	20		15		2

Recopilada a partir de la referencia [10].

^a Composición dada al porcentaje más cercano; los porcentajes menores que 1 se indican como <1.

^b Otros elementos incluyen: carbono, tungsteno, manganeso y silicio.

Por lo general, las superaleaciones se dividen en tres grupos, de acuerdo con su constituyente principal: hierro, níquel o cobalto.

- **Aleaciones basadas en el hierro.** Como ingrediente principal tienen hierro, aunque en ciertos casos éste es menor de 50% de la composición total.
- **Aleaciones basadas en el níquel.** Por lo general tienen mejor resistencia a las temperaturas altas que los aceros aleados. El níquel es el metal base. Los elementos principales de la aleación son el cromo y el cobalto; otros menores son el aluminio, titanio, molibdeno, niobio (Nb) y hierro. Algunos nombres familiares en este grupo son los de Inconel, Hastelloy y Rene 41.
- **Aleaciones basadas en el cobalto.** Tienen al cobalto (alrededor del 40%) y cromo (quizá el 20%) como sus componentes principales. Otros elementos de la aleación incluyen al níquel, molibdeno y tungsteno.

En prácticamente todas las superaleaciones, inclusive las basadas en hierro, el darle resistencia se lleva a cabo mediante endurecimiento por precipitación. Las superaleaciones con base en el hierro no usan la formación de martensita para obtener su resistencia. En la tabla 6.15 se presentan las composiciones comunes para algunas de las aleaciones, en tanto que las propiedades de resistencia de ellas a temperaturas ambiente y elevada se muestran en la tabla 6.16.

6.5 GUÍA PARA EL PROCESAMIENTO DE METALES

Se dispone de una variedad amplia de procesos de manufactura para dar forma a los metales, mejorar sus propiedades, ensamblarlos y darles un acabado estético y protector.

Dar forma, ensamblar y procesos de acabado Los metales reciben su forma por medio de todos los procesos básicos, inclusive fundición, metalurgia de polvos, procesos de deformación y remoción de material. Además, las piezas metálicas se unen para formar ensambles por procesos tales como soldadura autógena, soldadura dura y soldadura suave, y sujeción mecánica. El tratamiento térmico se lleva a cabo para mejorar las propiedades. Y es común que los procesos de acabado se utilicen para mejorar la apariencia de las piezas metálicas o para dar protección contra la corrosión. Estas operaciones de acabado incluyen

TABLA 6.16 Propiedades de resistencia de las superaleaciones a temperatura ambiente y a 870 °C (1 600 °F).

Superaleación	Resistencia a la tensión a temperatura ambiente		Resistencia a la tensión a 870 °C (1 600 °F)	
	MPa	lb/in ²	MPa	lb/in ²
Basada en el hierro				
Incoloy 802	690	100 000	195	28 000
Haynes 556	815	118 000	330	48 000
Basada en el níquel				
Incoloy 807	655	95 000	220	32 000
Inconel 718	1 435	208 000	340	49 000
Rene 41	1 420	206 000	620	90 000
Hastelloy S	845	130 000	340	50 000
Nimonic 75	745	108 000	150	22 000
Basada en el cobalto				
Stellite 6B	1 010	146 000	385	56 000
Haynes 188	960	139 000	420	61 000
L-605	1 005	146 000	325	47 000

Recopilada a partir de la referencia [9].

la galvanoplastia y la pintura. En la tabla 6.17 se da un resumen de las muchas tecnologías de procesamiento que se describen en este libro.

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de los metales Las propiedades mecánicas de los metales se alteran por medio de cierto número de técnicas. En el estudio de los distintos metales se ha hecho referencia a algunas de éstas. Los métodos para mejorar las propiedades mecánicas de los metales se agrupan en tres categorías: 1) aleación, 2) trabajo en frío, y 3) tratamiento térmico. La **aleación** se ha estudiado en todo el capítulo presente y es una técnica importante para dar resistencia a los metales. Al **trabajo en frío** se había hecho referencia como endurecimiento por deformación; su efecto es incrementar la resistencia y reducir la ductilidad. El grado en que estas propiedades mecánicas se ven afectadas depende de la cantidad de deformación y del exponente de endurecimiento por deformación en la curva de flujo, descrita por la ecuación (3.10). El trabajo en frío se utiliza tanto en metales puros como en aleaciones. Se realiza durante la deformación del elemento de trabajo a través de uno de los procesos para dar forma, por ejemplo rolado, forjado o extrusión. Entonces, el dar resistencia a los metales ocurre como subproducto de la operación de darles forma.

El **tratamiento térmico** se refiere a varios tipos de ciclos de calentamiento y enfriamiento que se ejecutan sobre un metal para cambiar en forma benéfica sus propiedades. Operan con la alteración de la microestructura básica del metal, que a su vez determina las propiedades mecánicas. Algunas de las operaciones de tratamiento térmico sólo son apli-

TABLA 6.17 Procesos de la manufactura de metales.

Proceso	Capítulo	Proceso	Capítulo
Fundición	10 y 11	Tratamiento térmico	27
Metalurgia de polvos	16	Limpieza y tratamientos superficiales	28
Procesos de formado:	18	Procesos de recubrimiento	29
Forjado	19	Procesos de ensamblado	
Laminado	20	Soldadura autógena	30 y 31
Procesos de remoción de material:		Soldadura dura y soldadura suave	32
Maquinado convencional	21 y 22	Ensamblado mecánico	33
Procesos abrasivos	25		
Procesos no tradicionales	26		

cables a cierto tipo de metales; por ejemplo, el tratamiento térmico del acero para formar martensita es algo especializado, toda vez que la martensita es exclusiva del acero. En el capítulo 27 se describen los tratamientos térmicos.

REFERENCIAS

- [1] Baucchio, M. (ed.). *ASM Metals Reference Book*, 3a. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1993.
- [2] Brick, R. M., Pense, A. W. y Gordon, R. B. *Structure and Properties of Engineering Materials*, 4a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1977.
- [3] Carnes, R. y Maddock, G., "Tool Steel Selection", *Advanced Materials & Processes*, junio de 2004, pp. 37-40.
- [4] *Encyclopaedia Britannica*, vol. 21, *Macropaedia*. Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1990, en la sección: Industries, Extraction and Processing.
- [5] Flinn, R. A. y Trojan, P. K. *Engineering Materials and Their Applications*, 5a. ed. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1995.
- [6] Guy, A. G. y Hren, J. J. *Elements of Physical Metallurgy*, 3a. ed. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1974.
- [7] Hume-Rothery, W., Smallman, R. E. y Haworth, C. W. *The Structure of Metals and Alloys*. Institute of Materials, Londres, Inglaterra, 1988.
- [8] Lankford, W. T., Jr., Samways, N. L., Craven, R. F. y McGannon, H. E. *The Making, Shaping, and Treating of Steel*, 10a. ed. United States Steel Co., Pittsburgh, Pennsylvania, 1985.
- [9] *Metals Handbook*, 10a. ed., vol. 1, *Properties and Selection: Iron, Steels, and High Performance Alloys*. ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
- [10] *Metals Handbook*, 10a. ed., vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, Metals Park, Ohio, 1990.
- [11] Moore, C. y Marshall, R. I. *Steelmaking*. The Institute for Metals, The Bourne Press, Ltd., Bournemouth, U. K., 1991.
- [12] Wick, C. y Veilleux, R. F. (eds.). *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed., vol. 3, *Materials, Finishing, and Coating*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1985.

PREGUNTAS DE REPASO

- 6.1. ¿Cuáles son algunas de las propiedades generales que distinguen a los metales de los materiales cerámicos y polímeros?
- 6.2. ¿Cuáles son los dos grupos principales de metales? Defínalos.
- 6.3. ¿Qué es una aleación?
- 6.4. ¿Qué es una solución sólida en el contexto de las aleaciones?
- 6.5. Diga la diferencia entre una solución sólida sustitucional y otra intersticial.
- 6.6. ¿Qué es una fase intermedia en el contexto de las aleaciones?
- 6.7. El sistema cobre-níquel es un sistema de aleación sencillo, como lo indica su diagrama de fase. ¿Por qué es tan sencillo?
- 6.8. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como acero a una aleación de hierro-carbono?
- 6.9. ¿Cuál es el rango de los porcentajes de carbono que definen como hierro colado a una aleación de hierro-carbono?
- 6.10. Identifique algunos de los elementos comunes de aleación, además del carbono, en los aceros de baja aleación.
- 6.11. ¿Cuáles son algunos de los mecanismos por medio de los que los elementos de aleación diferentes del carbono dan resistencia al acero?
- 6.12. ¿Cuál es el mecanismo por el que el carbono da resistencia al acero en ausencia de tratamiento térmico?
- 6.13. ¿Cuál es el elemento de aleación predominante en todos los aceros inoxidables?
- 6.14. ¿Por qué se llama así el acero inoxidable austenítico?
- 6.15. Además del alto contenido de carbono, ¿qué otros elementos de aleación son característicos del hierro colado?
- 6.16. Identifique algunas de las propiedades por las que es notable el aluminio.
- 6.17. ¿Cuáles son algunas de las propiedades más destacadas del magnesio?
- 6.18. ¿Cuál es la propiedad del cobre más importante para la ingeniería y que determina la mayor parte de sus aplicaciones?
- 6.19. ¿Cuáles elementos se alean por tradición con el cobre para formar a) bronce, y b) latón?
- 6.20. ¿Cuáles son las aplicaciones más importantes del níquel?
- 6.21. ¿Cuáles son las propiedades más notables del titanio?
- 6.22. Mencione algunas de las aplicaciones importantes del zinc.
- 6.23. ¿Cuál es la aleación importante que se forma con plomo y estaño?
- 6.24. a) Mencione los metales refractarios importantes. b) ¿Qué significa el término refractario?
- 6.25. a) Diga los cuatro metales nobles principales. b) ¿Por qué se les llama metales nobles?
- 6.26. Las superaleaciones se dividen en tres grupos básicos, de acuerdo con el metal base que se utiliza en la aleación. Mencione los grupos.
- 6.27. ¿Qué es lo que tienen de especial las superaleaciones? ¿Qué las distingue de las demás?
- 6.28. ¿Cuáles son los tres métodos básicos por medio de los cuales puede darse resistencia a los metales?