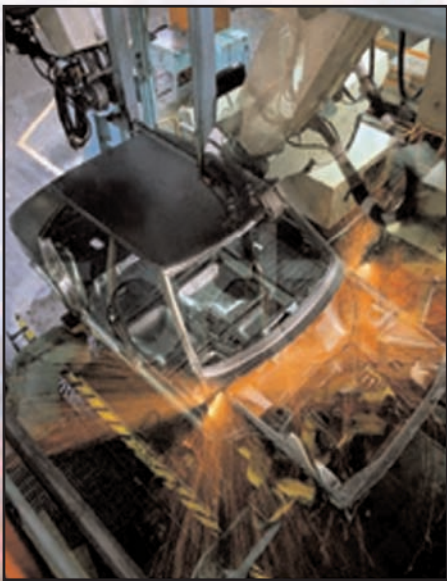


MANUFACTURA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

QUINTA EDICIÓN



S. Kalpakjian • S. R. Schmid

Datos de catalogación bibliográfica

KALPAKJIAN, SEROPE

Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta edición

PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008

ISBN: 978-970-26-1026-7

Área: Ingeniería

Formato: 21 × 27 cm

Páginas: 1328

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

ISBN 0-13-148965-8

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

Esta edición en español es la única autorizada.

Edición en español

Editor: Luis Miguel Cruz Castillo
e-mail: luis.cruz@pearsoned.com

Editora de desarrollo: Claudia Celia Martínez Amigón
Supervisor de producción: José D. Hernández Garduño

Edición en inglés

Vice President and Editorial Director, ECS: *Marcia J. Horton*
Executive Editor: *Eric Svendsen*
Associate Editor: *Dee Bernhard*
Executive Managing Editor: *Vince O'Brien*
Managing Editor: *David A. George*
Production Editor: *Rose Kernan*
Director of Creative Services: *Paul Belfanti*
Creative Director: *Heather Scott*
Cover Designer: *John Christiana*
Art Editor: *Xiaohong Zhu*
Manufacturing Manager: *Alexis Heydt-Long*
Manufacturing Buyer: *Lisa McDowell*
Senior Marketing Manager: *Holly Stark*

QUINTA EDICIÓN 2008

D.R. © 2008 por Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
Atacomulco 500, 5° piso
Col. Industrial Atoto
53519 Naucalpan de Juárez, Edo. de México
E-mail: editorial.universidades@pearsoned.com

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

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

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

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



ISBN 10: 970-26-1026-5

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

Impreso en México. *Printed in Mexico.*

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

Procesos y equipo para la fundición de metales

P A R T E



Como se describe en el resto de este libro, existen diferentes métodos para transformar los metales en productos útiles. Uno de los procesos más antiguos es la **fundición**, que básicamente consiste en vaciar metal fundido en la cavidad de un molde, donde (al solidificarse) adquiere la forma de la cavidad. La fundición se utilizó por primera vez alrededor del año 4000 a.C. para fabricar ornamentos, puntas de cobre para flechas y otros objetos. Es posible fundir una amplia variedad de productos y producir formas intrincadas de una sola pieza, incluyendo las que tienen cavidades internas, como los monobloques de motores. En la figura II.1 se muestran componentes fundidos de un automóvil común, producto que se utilizó en la introducción de la parte I para ilustrar la selección y el uso de varios materiales. En la figura II.2 se muestran los procesos de fundición desarrollados a lo largo de los años.

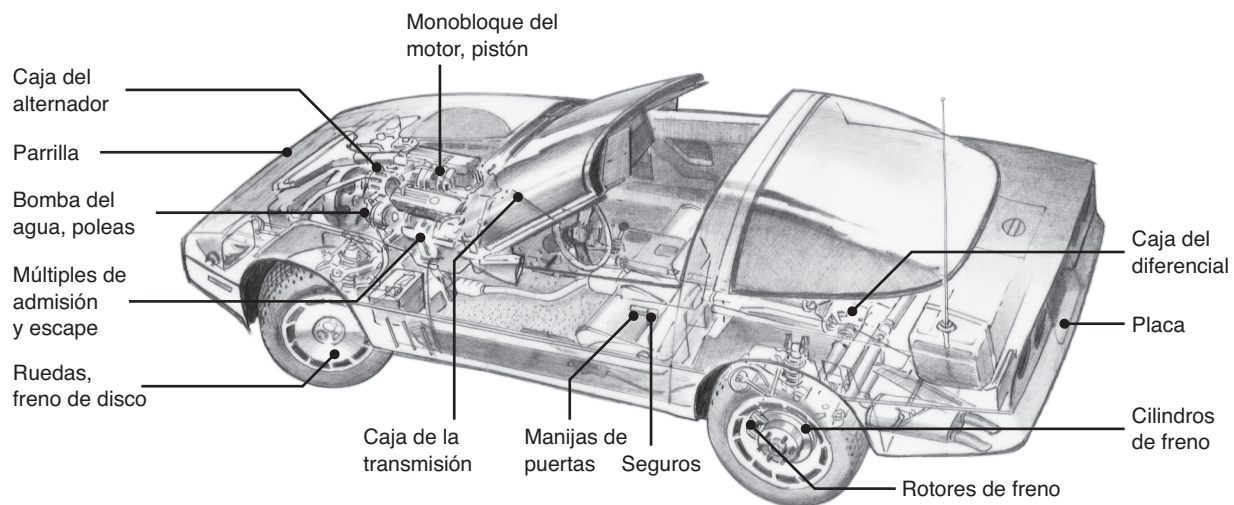


FIGURA II.1 Partes fundidas en un automóvil común.

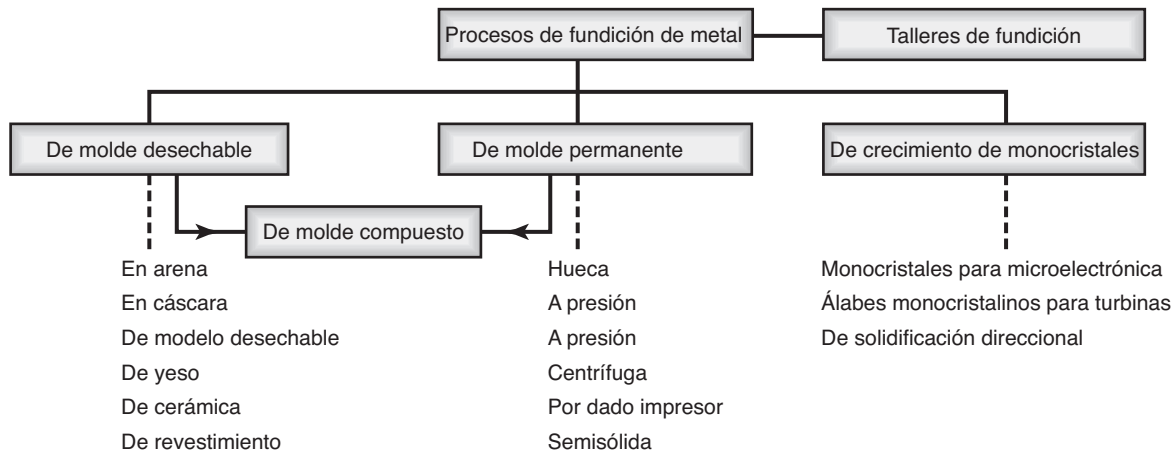


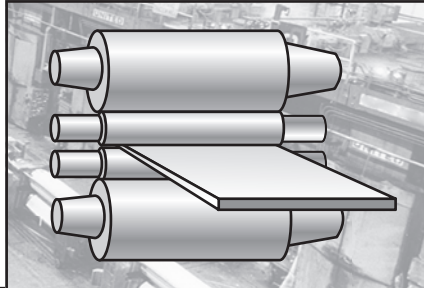
FIGURA II.2 Diagrama de los procesos de fundición de metales descritos en la parte II.

Al igual que toda la manufactura, cada proceso de fundición tiene sus características, aplicaciones, ventajas, limitaciones y costos. Estos procesos se seleccionan con mayor frecuencia que otros métodos de manufactura por las siguientes razones:

- La fundición puede producir formas complejas con cavidades internas o secciones huecas.
- Se pueden producir partes grandes de una sola pieza.
- La fundición puede utilizar materiales cuyo proceso por otros medios es difícil o no económico.
- El proceso de fundición es competitivo frente a otros procesos de manufactura.

Casi todos los metales se pueden fundir en la forma final deseada (o muy cerca de ella), a menudo con operaciones menores de acabado. Esta capacidad coloca a la fundición entre las tecnologías más importantes de la *manufactura de forma neta*, junto con el forjado *de forma neta* (capítulo 14), el estampado de lámina metálica (capítulo 16) y la metalurgia de polvos y el moldeo por inyección de metales (capítulo 17). Con la ayuda de técnicas modernas de procesamiento y el control de la composición química, las propiedades mecánicas de las fundiciones pueden igualar las de otros procesos de manufactura.

Fundamentos de la fundición de metales



CAPÍTULO 10

Utilizada por primera vez hace alrededor de seis mil años, la fundición continúa siendo un importante proceso de manufactura para producir partes muy pequeñas (o muy grandes). Para entender los aspectos fundamentales de este proceso, en este capítulo se describen:

- Los mecanismos de solidificación en los metales y sus aleaciones.
- La importancia de los patrones de solidificación en la fundición.
- Las características del flujo del fluido y de la transferencia de calor en los moldes y sus efectos.
- El papel de los gases y de la contracción en la formación de defectos en la fundición.

10.1 | Introducción

El proceso de **fundición** consta de estos pasos básicos: (a) se vacía metal fundido en un molde con la forma de la parte a manufacturar, (b) se deja solidificar, y (c) se retira la parte del molde. Al igual que todos los otros procesos de manufactura, entender los fundamentos de la fundición es esencial para producir fundiciones económicas y de buena calidad, así como establecer técnicas apropiadas para el diseño de los moldes y las prácticas correspondientes.

Los siguientes son factores que es importante considerar en las operaciones de fundición:

- El flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde.
- La solidificación y el enfriamiento del metal dentro del molde.
- La influencia del tipo de material del molde.

En este capítulo se describe la relación entre los muchos factores involucrados en la fundición. Primero se analiza el flujo del metal fundido dentro de la cavidad del molde, en términos de las características de diseño del molde y del flujo del fluido. La solidificación y el enfriamiento de los metales dentro del molde son afectados por varios factores, incluyendo las propiedades metalúrgicas y térmicas del metal. El tipo de molde también es importante, ya que afecta la velocidad de enfriamiento del metal. Finalmente, se describen las circunstancias que inciden en la formación de defectos.

En los capítulos 11 y 12 se describen procesos industriales de fundición de metales, consideraciones de diseño y materiales para fundición. La fundición de cerámicas y de plásticos, que comprenden métodos y procedimientos similares a los de los metales, se abordan en los capítulos 18 y 19, respectivamente.

10.1	Introducción	261
10.2	Solidificación de los metales	262
10.3	Flujo del fluido	267
10.4	Fluidez del metal fundido	270
10.5	Transferencia de calor	272
10.6	Defectos	275

EJEMPLOS:

10.1	Tiempos de solidificación para varias formas	274
10.2	Fundición de pistones automovilísticos de aluminio	279

10.2 Solidificación de los metales

Una vez que se vacía el metal fundido en un **molde**, se solidifica y enfría a la temperatura ambiente; durante estos procesos ocurre una serie de eventos que influyen en gran medida en el tamaño, forma, uniformidad y composición química de los granos formados a lo largo de la fundición, que a su vez influyen en sus propiedades generales. Los factores importantes que afectan estos eventos son el tipo de metal, las propiedades térmicas del metal y del molde, la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la fundición y la forma del molde.

10.2.1 Metales puros

Debido a que un metal puro tiene un punto de fusión (o de solidificación) claramente definido, se solidifica a una temperatura constante, como se muestra en la figura 10.1. Por ejemplo, el aluminio puro se solidifica a 660°C (1220°F), el hierro a 1537°C (2798°F) y el tungsteno a 3410°C (6170°F). (Ver también la tabla 3.1 y la fig. 4.4). Luego que la temperatura del metal fundido desciende a su punto de solidificación, permanece constante mientras se disipa su *calor latente de fusión*. El *frente de solidificación* (interfaz sólido-líquido) se mueve a través del metal fundido de las paredes del molde hacia el centro. El metal solidificado, llamado fundición, se saca del molde y se enfría a la temperatura ambiente.

En la figura 10.2a se muestra la estructura del grano de la fundición de un metal puro en un molde cuadrado. En las paredes del molde, que se encuentran a la temperatura ambiente, o al menos mucho más frías que el metal fundido, el metal se enfría con rapidez y produce una **capa superficial** solidificada, o *cáscara*, de finos granos equiaxiales. Éstos crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor a través del molde; los que tienen una orientación favorable crecen de manera preferencial y se les llama **granos columnares** (fig. 10.3). Conforme la fuerza impulsora de la transferencia de calor se reduce, alejándose de las paredes, los granos se vuelven equiaxiales y gruesos; los que tienen orientaciones sustancialmente diferentes ven bloqueado su crecimiento posterior. A

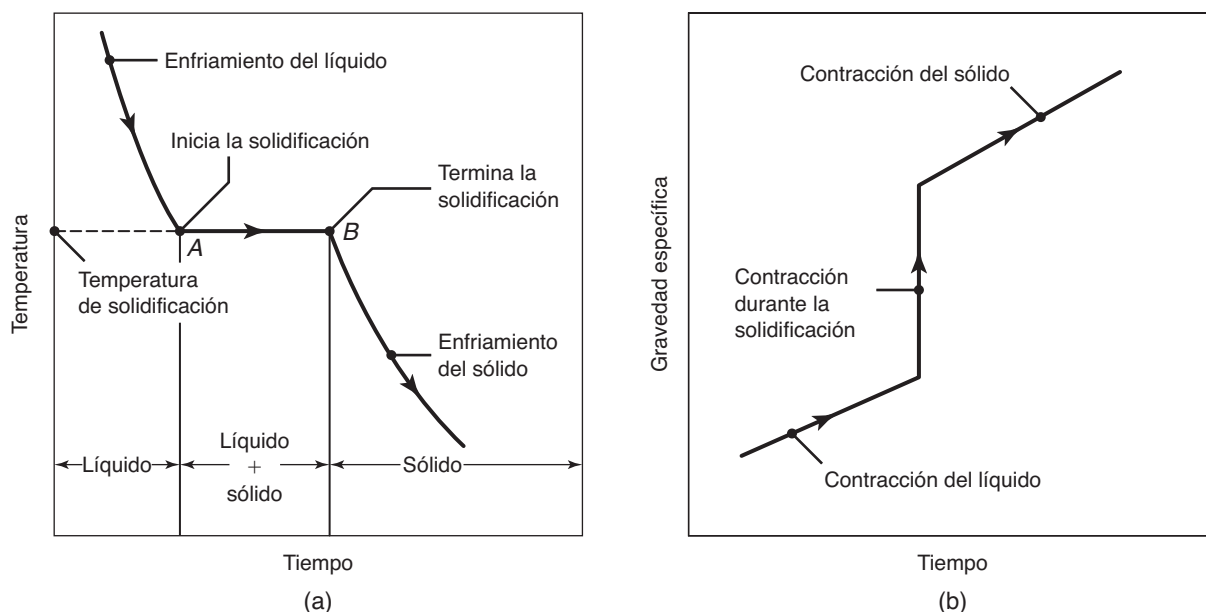


FIGURA 10.1 (a) Temperatura como función del tiempo de solidificación de los metales puros. Observe que la solidificación ocurre a temperatura constante. (b) Densidad, como función del tiempo.

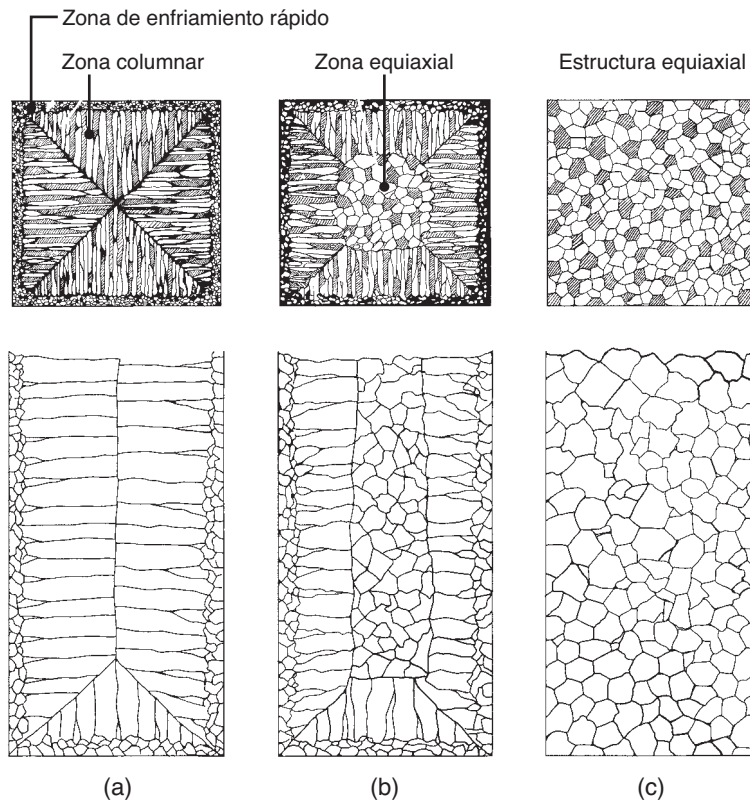


FIGURA 10.2 Esquema de tres estructuras de metales fundidos solidificados en un molde cuadrado: (a) metales puros; (b) aleaciones de solución sólida; y (c) estructura obtenida utilizando agentes nucleantes. *Fuente:* G. W. Form, J. F. Wallace, J. L. Walker y A. Cibula.

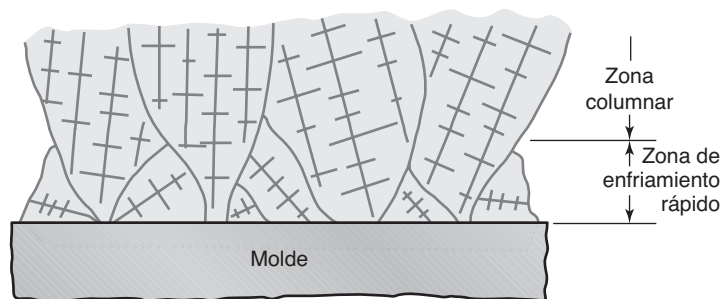


FIGURA 10.3 Desarrollo de una textura preferida en una pared fría del molde. Observe que los únicos granos orientados favorablemente crecen alejándose de la superficie del molde.

tal desarrollo de los granos se le conoce como **nucleación homogénea**, lo que significa que los granos (cristales) crecen sobre sí mismos, a partir de la pared del molde.

10.2.2 Aleaciones

La solidificación en las aleaciones comienza cuando la temperatura desciende por debajo del liquidus (T_L) y termina cuando alcanza el solidus, T_S (fig. 10.4). En este intervalo

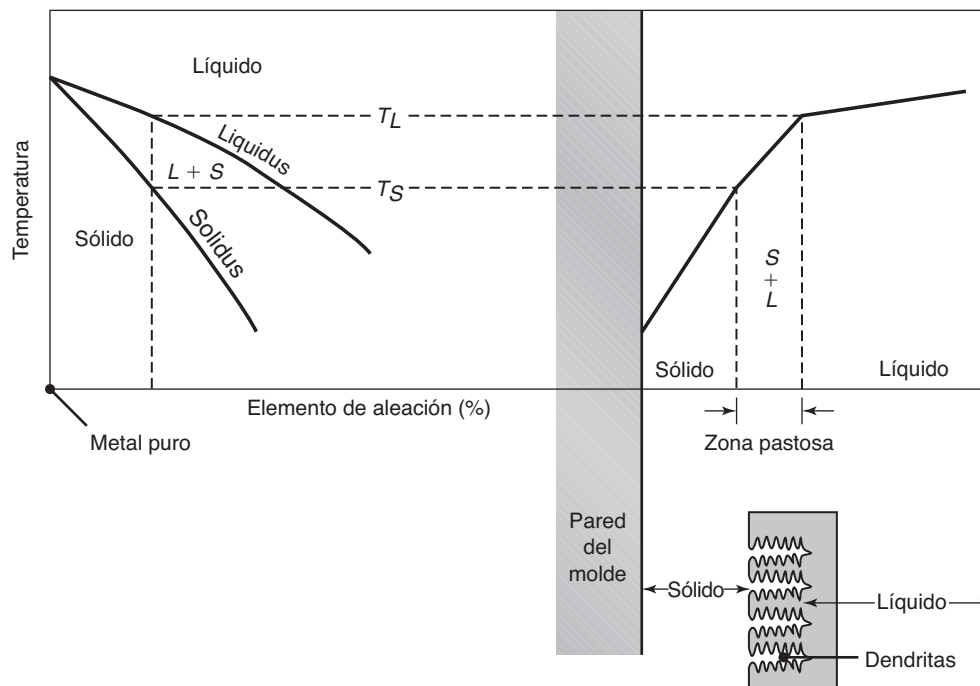


FIGURA 10.4 Esquema de la solidificación de una aleación y distribución de la temperatura en el metal que se solidifica. Observe la formación de dendritas en la zona pastosa.

de temperaturas, la aleación se encuentra en un estado *blando* o *pastoso* que consiste en **dendritas columnares** (del griego *dendron*, que significa “parecido a”, y *drys*, que significa “árbol”). Obsérvese la presencia de metal líquido entre los brazos de las dendritas. Éstas tienen brazos y ramas tridimensionales (brazos secundarios) que se entrelazan al final, como se puede ver en la figura 10.5. Es importante (aunque complejo) el estudio de las estructuras dendríticas porque contribuyen a factores dañinos como las variaciones en la composición, segregación y microporosidad dentro de una parte fundida.

El ancho de la **zona pastosa** (donde coinciden las fases líquida y sólida) es un factor importante durante la solidificación. Esta zona se describe en términos de una diferencia de temperatura, conocida como **rango de solidificación** o de **congelamiento**, de la siguiente manera:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S \quad (10.1)$$

En la figura 10.4 se puede ver que los metales puros tienen un rango de solidificación próximo a cero y que el frente de solidificación se mueve como un frente plano sin formar una zona pastosa. Las *eutécticas* (sección 4.3) se solidifican de manera similar, con un frente casi plano. El tipo de estructura desarrollado después de la solidificación depende de la composición del eutéctico. En aleaciones con un diagrama de fases casi simétrico, por lo general la estructura es laminar, con dos o más fases sólidas presentes, dependiendo del sistema de aleación. Cuando la porción volumétrica de la fase menor de la aleación baja de 25%, la estructura suele volverse fibrosa. Estas condiciones son particularmente importantes para los hierros fundidos.

Para las aleaciones, un *rango de solidificación corto* por lo común comprende una diferencia de temperatura de menos de 50 °C (90 °F), y un *rango de solidificación largo*, más de 110 °C (200 °F). En general, las fundiciones ferrosas tienen zonas pastosas estrechas, mientras que en las aleaciones de aluminio y de magnesio dichas zonas son amplias. Por lo tanto, estas aleaciones se encuentran en un estado pastoso durante la mayor parte del proceso de solidificación.

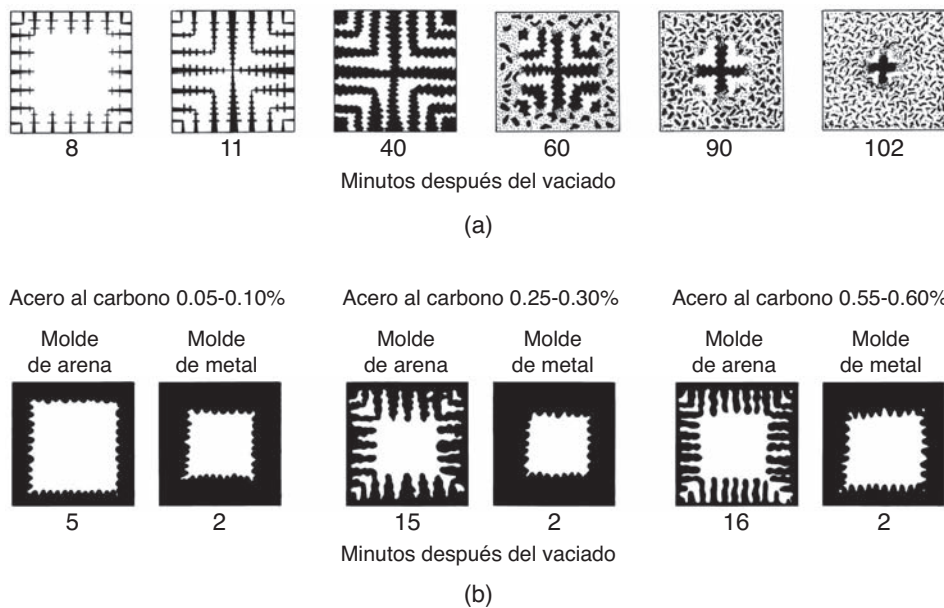


FIGURA 10.5 (a) Patrones de solidificación para el hierro fundido en una fundición cuadrada de 180 mm (7 pulgadas). Observe que después de 11 minutos de enfriamiento, las dendritas se alcanzan una a otra, pero la fundición todavía es pastosa en el interior. Son necesarias dos horas para que esta fundición se solidifique totalmente. (b) Solidificación de aceros al carbono en molde de arena y en molde de enfriamiento rápido (metálico). Observe la diferencia en los patrones de solidificación conforme aumenta el contenido de carbono. *Fuente:* H. F. Bishop y W. S. Pellini.

Efectos de las velocidades de enfriamiento. Las velocidades de enfriamiento bajas (del orden de 10^2 K/s), o los tiempos locales de solidificación largos, producen estructuras dendríticas *gruesas* con un gran espaciamiento entre los brazos de las dendritas. Si las velocidades de enfriamiento son mayores (del orden de 10^4 K/s) o los tiempos locales de solidificación cortos, la estructura se vuelve *más fina*, con un espaciamiento menor entre los brazos de las dendritas. Para velocidades de enfriamiento superiores (desde 10^6 hasta 10^8 K/s) las estructuras que se desarrollan son *amorfas*, como se describe en la sección 6.14.

Las estructuras desarrolladas y el tamaño del grano resultante afectan las propiedades de la fundición. Al disminuir el tamaño del grano aumentan la resistencia y la ductilidad de la aleación fundida, se reduce la microporosidad (huecos por contracción entre las dendritas) en la fundición y reduce su tendencia al agrietamiento (*agrietamiento en caliente*, ver fig. 10.12) durante la solidificación. La falta de uniformidad del tamaño del grano y de su distribución produce fundiciones con *propiedades anisotrópicas*.

Un criterio que define la cinética de la interfaz líquido-sólido es la relación G/R , donde G es el *gradiente térmico* y R la *velocidad* a la que se mueve dicha interfaz. Los valores típicos de G van de 10^2 a 10^3 K/m, y para R de 10^{-3} a 10^{-4} m/s. Las estructuras tipo dendrítico (fig. 10.6a y b) comúnmente tienen una relación G/R en el intervalo de 10^5 a 10^7 , mientras que las relaciones de 10^{10} a 10^{12} producen una interfaz líquido-sólido no dendrítica de frente plano (fig. 10.7).

10.2.3 Relaciones estructura-propiedad

Debido a que se espera que todas las fundiciones posean ciertas propiedades que satisfagan los requerimientos de diseño y servicio, las relaciones entre las propiedades y las estructuras desarrolladas durante la solidificación son aspectos importantes de la fundición.

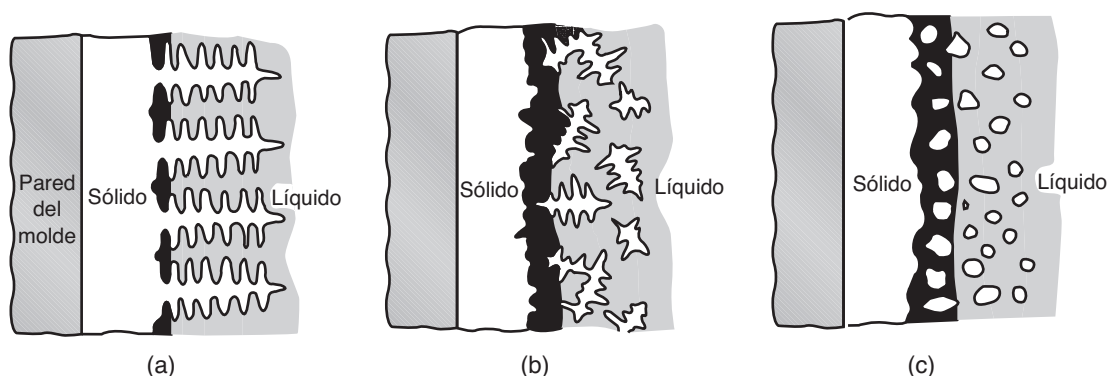


FIGURA 10.6 Esquema de tres tipos básicos de estructuras fundidas: (a) dendrítica columnar; (b) dendrítica equiaxial; y (c) equiaxial no dendrítica. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

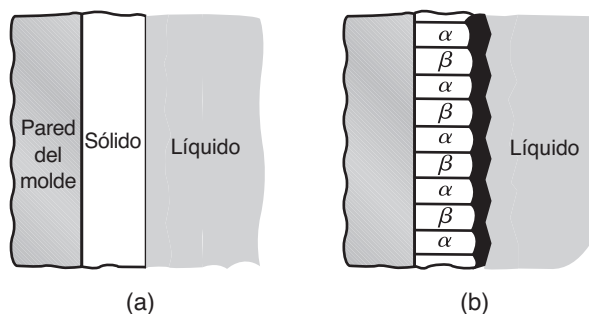


FIGURA 10.7 Esquema de estructuras fundidas en: (a) un frente plano, monofásico, y (b) un frente plano, bifásico. *Fuente:* Cortesía de D. Apelian.

En esta sección se describen estas relaciones en términos de la morfología de las dendritas y la concentración de los elementos de aleación en diferentes regiones del metal.

Las composiciones de las dendritas y del metal líquido se presentan en el *diagrama de fases* de la aleación en particular. Si la aleación se enfría de manera muy lenta, cada dendrita desarrolla una composición uniforme; sin embargo, en las condiciones normales (más rápidas) de enfriamiento, se forman **dendritas con núcleo**. Éstas tienen una composición superficial distinta de la de sus centros, diferencia que se conoce como *gradiente de concentración*. La superficie de la dendrita tiene una concentración de elementos de aleación mayor que la de su núcleo, debido al rechazo del soluto desde el núcleo hacia la superficie durante la solidificación de la dendrita (**microsegregación**). El sombreado más oscuro en el líquido interdendrítico, cerca de las raíces de la dendrita que se muestra en la figura 10.6, indica que estas regiones poseen una mayor concentración de soluto; la microsegregación en estas regiones es mucho más pronunciada que en otras.

Existen varios tipos de **segregación**. En contraste con la microsegregación, la **macrosegregación** implica diferencias de composición a lo largo de la propia fundición. En situaciones en las que el frente de solidificación se aleja de la superficie de una fundición como un frente plano (fig. 10.7), los constituyentes con punto de fusión más bajo de la aleación que se está solidificando son empujados hacia el centro (**segregación normal**). En consecuencia, los elementos de aleación de dicha fundición se concentran más en el centro que en la superficie. En las estructuras dendríticas, como las que se encuentran en las aleaciones de soluciones sólidas (fig. 10.2b), ocurre lo contrario: el centro de la fun-

dición tiene menos elementos de aleación (**segregación inversa**) que la superficie. La razón es que el metal líquido (que tiene una mayor concentración de dichos elementos) entra en las cavidades desarrolladas al contraerse por solidificación los brazos de las dendritas, que se han solidificado antes.

Otra forma de segregación se debe a la gravedad. La **segregación por gravedad** describe el proceso en que las inclusiones o los compuestos de mayor densidad se hunden y los elementos más ligeros (como el antimonio en una aleación antimonio-plomo) flotan en la superficie.

En la figura 10.2b se muestra una estructura típica de fundición de una aleación de soluciones sólidas, con una zona interna de granos equiaxiales. Esta zona interna se puede extender a través de la fundición, como se muestra en la figura 10.2c, agregando un **inoculante** (*agente nucleante*) en la aleación. Éste induce la nucleación de los granos a través del metal líquido (**nucleación heterogénea**).

Debido a la gravedad, a la diferencia de densidades resultante y a la presencia de *gradientes térmicos* en una masa de metal líquido que se está solidificando, la *convección* tiene una fuerte influencia en las estructuras que se desarrollan. La convección promueve la formación de una zona exterior de enfriamiento, refina el tamaño del grano y acelera la transición de granos columnares a equiaxiales. La estructura mostrada en la figura 10.6b también se puede obtener aumentando la convección dentro del metal líquido en donde se separan los brazos de las dendritas (**multiplicación de las dendritas**). Por el contrario, al reducir o eliminar la convección se producen granos dendríticos columnares más gruesos y largos.

Los brazos de las dendritas no son particularmente fuertes y se pueden romper mediante agitación o vibración mecánica en las etapas iniciales de la solidificación (**formado de metal semisólido y reofundición**, ver sección 11.3.7). Este proceso produce un grano de tamaño más fino con granos no dendríticos equiaxiales distribuidos con mayor uniformidad a lo largo de la fundición (fig. 10.6c). Un beneficio colateral es el comportamiento **tixotrópico** de las aleaciones (esto es, la viscosidad decrece cuando se agita el metal líquido), que lleva a una mejor capacidad de fundición (colabilidad). Otra forma de formado de metal semisólido es la *fundición tixotrópica*, o tixofundición, en la que una palanquilla sólida se calienta hasta el estado semisólido y después se inyecta en un molde de fundición a presión (sección 11.3.5). En general, el calentamiento se realiza por convección en un horno, pero puede reforzarse mediante métodos mecánicos o electromagnéticos.

Se están realizando experimentos durante los vuelos espaciales en relación con los efectos de la gravedad sobre la microestructura de las fundiciones. La falta de gravedad (**microgravedad**) significa que, a diferencia de lo que sucede en la Tierra, no existen diferencias significativas de densidad o gradientes térmicos (y por lo tanto no existe convección) durante la solidificación. Esta falta de convección afecta la estructura de solidificación y la distribución de impurezas. Experimentos recientes comprenden el crecimiento de cristales para la producción de muestras semiconductoras de telurio de cadmio-zinc, telurio de mercurio-zinc y arseniuro de galio dopado con selenio (ver sección 28.3).

10.3 | Flujo del fluido

Para enfatizar la importancia del flujo del fluido en la fundición, describamos brevemente un sistema básico de fundición por gravedad como el que se muestra en la figura 10.8. El metal fundido se vacía a través de una **copa de vaciado**; después fluye a través del **sistema de alimentación** (bebedero, canales de alimentación y compuertas) dentro de la cavidad del molde. Como se ilustra en la figura 11.3, el **bebedero** es un canal cónico vertical por donde el metal fundido fluye hacia abajo, dentro del molde. Los **canales de alimentación** lo llevan desde el bebedero al interior de la cavidad del molde, o conectan el bebedero a la **compuerta** (la parte del canal de alimentación por la que el metal fundido entra en la cavidad del molde). Las **mazarotas** (también llamadas **alimentadores**) sirven como depósitos de metal fundido para proveer el metal necesario y evitar la porosidad debida a la contracción durante la solidificación. (Ver también fig. 11.3).

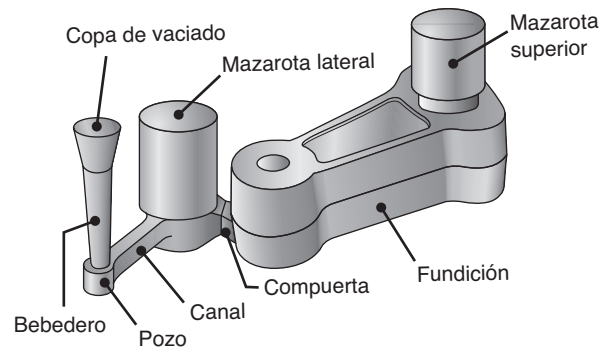


FIGURA 10.8 Esquema de una fundición característica con mazarotas y compuertas. Las mazarotas sirven como contenedores que suministran metal fundido a la fundición conforme se contrae durante la solidificación.

Aunque un sistema de alimentación como el señalado parece simple, una fundición satisfactoria requiere un diseño apropiado y el control del proceso de solidificación para asegurar un flujo del fluido adecuado en el sistema. Por ejemplo, una función importante del sistema de alimentación en la fundición en arena consiste en *atrapar contaminantes* (como óxidos y otras inclusiones) existentes en el metal fundido, al hacer que se adhieran a las paredes de dicho sistema para impedir que lleguen a la cavidad del molde. Además, un sistema de alimentación diseñado en forma apropiada ayuda a evitar o minimizar problemas (como enfriamiento prematuro, turbulencia o que algún gas quede atrapado). Incluso antes de llegar a la cavidad del molde, el metal fundido debe manejarse con cuidado para evitar la formación de óxidos en las superficies del mismo, originados por la exposición al medio ambiente o por la introducción de impurezas en el metal fundido.

Existen dos principios básicos fundamentales en el diseño de los canales de alimentación: el teorema de Bernoulli y la ley de continuidad de la masa.

Teorema de Bernoulli. Este teorema se basa en el principio de la conservación de la energía y relaciona presión, velocidad, la elevación del fluido a cualquier punto del sistema y las pérdidas por fricción en un sistema lleno de líquido. Esto se hace conforme a la ecuación

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad (10.2)$$

donde h es la elevación por encima de cierto plano de referencia, p la presión a esa elevación, v la velocidad del líquido a esa elevación, ρ la densidad del fluido (suponiendo que es incompresible) y g la constante gravitacional. La conservación de la energía obliga a que, en una ubicación particular en el sistema, se cumpla la siguiente relación:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + f \quad (10.3)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan dos elevaciones diferentes. En esta fórmula, f representa la pérdida por fricción en el líquido conforme viaja hacia abajo del sistema. Esta pérdida incluye factores como la pérdida de energía en las interfaces líquido-pared del molde y la turbulencia en el líquido.

Continuidad de masa. La ley de continuidad de masa establece que para líquidos incompresibles y en un sistema con paredes impermeables, la velocidad de flujo es constante. Por lo tanto,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (10.4)$$

donde Q es el gasto volumétrico (como m^3/s), A el área de la sección transversal de la corriente del líquido y v la velocidad promedio del líquido en dicha sección. Los subíndices 1 y 2 se refieren a dos puntos diferentes en el sistema. De acuerdo con esta ley, el gasto debe mantenerse en cualquier parte del sistema. La permeabilidad de las paredes es importante, porque de lo contrario parte del líquido pasaría a través de las paredes (como ocurre en los moldes de arena). Por ello, el gasto disminuye conforme el líquido se mueve a través del sistema. Con frecuencia se utilizan recubrimientos para inhibir dicho comportamiento en los moldes de arena.

Diseño del bebedero. Una aplicación de los dos principios recién establecidos es el diseño cónico tradicional de los bebederos (mostrado en la fig. 10.8). La forma del bebedero se puede determinar mediante las ecuaciones 10.3 y 10.4. Si la presión en la parte superior del bebedero es igual a la presión en el fondo y no existen pérdidas por fricción, la relación entre la altura y el área de la sección transversal en cualquier punto del bebedero está dada por la relación parabólica

$$\frac{A_1}{A_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \quad (10.5)$$

donde, por ejemplo, el subíndice 1 denota la parte superior del bebedero y el 2 el fondo. Por lo tanto, al moverse de arriba abajo, debe disminuir el área de sección transversal del bebedero. Dependiendo de los supuestos asumidos, se pueden obtener expresiones distintas a la ecuación 10.5. Por ejemplo, supóngase cierta velocidad del metal fundido (V_1) en la parte superior del bebedero. Después, utilizando las ecuaciones 10.3 y 10.4, se puede obtener una expresión para la relación A_1/A_2 , en función de h_1 , h_2 y V_1 .

Obsérvese que en un líquido en caída libre (como el agua de un grifo), el área de la sección transversal de la corriente disminuye al ganar velocidad. Si diseñamos un bebedero con una sección transversal de área constante y vaciamos el metal dentro de ella, se pueden desarrollar regiones en las que el líquido pierda contacto con las paredes del bebedero. A causa de ello puede darse el fenómeno de la **aspiración** (proceso en el que se succiona aire o éste queda atrapado en el líquido). Una alternativa común a los bebederos cónicos es el uso de bebederos con lados rectos, los cuales poseen un mecanismo de **estrangulación** en el fondo, que consiste en un núcleo o un canal de estrangulación. El estrangulador reduce el flujo lo suficiente para evitar la aspiración en el bebedero.

Modelación. Otra aplicación de las ecuaciones anteriores es la *modelación del llenado del molde*. Por ejemplo, considérese la situación mostrada en la figura 10.8, donde se vierte metal fundido en una copa de vaciado; fluye a través de un bebedero hacia un canal y una compuerta, y llena la cavidad del molde. Si la copa tiene un área de sección transversal mucho mayor que la del fondo del bebedero, entonces la velocidad del metal fundido en la parte superior de la copa es muy baja y puede considerarse cero. Si las pérdidas por fricción se deben a una disipación viscosa de energía, entonces f en la ecuación 10.3 se puede considerar una función de la distancia vertical y con frecuencia se aproxima a una función lineal. Por lo tanto, la velocidad del metal fundido que abandona la compuerta se obtiene de la ecuación 10.3 como

$$v = c\sqrt{2gh}$$

donde h es la distancia desde la base del bebedero hasta la altura del metal líquido y c un factor de fricción. Para un flujo sin fricción, c es igual a la unidad y se encuentra siempre

entre 0 y 1. La magnitud de c varía con el material del molde, la disposición y el tamaño del canal, y puede incluir pérdidas de energía debidas a turbulencia y a efectos viscosos.

Si el nivel del líquido ha alcanzado una altura x , entonces la velocidad en la compuerta es

$$v = c\sqrt{2g\sqrt{h-x}}$$

El gasto a través de la compuerta será el producto de esta velocidad y el área de la compuerta, según la ecuación 10.4. La forma de la fundición determinará la altura como una función del tiempo. Integrando la ecuación 10.4 se obtiene el tiempo medio de llenado y el gasto, y dividiendo el volumen de la fundición entre este gasto medio se obtiene el tiempo de llenado del molde.

La simulación de llenado del molde ayuda a los diseñadores a especificar el diámetro del canal, así como el tamaño y número de bebederos y copas de vaciado. Para asegurar que los canales se mantengan abiertos, el tiempo de llenado debe ser una pequeña fracción del tiempo de solidificación, pero la velocidad no debe ser tan alta como para erosionar el material del molde (a lo que se conoce como *lavado del molde*) o para producir un número de Reynolds demasiado alto (ver la siguiente parte). En caso contrario, se produce turbulencia y se atrapa aire. Por fortuna, ya existen muchas herramientas computacionales para evaluar los diseños de los sistemas de alimentación y ayudar a dimensionar los componentes.

Características del flujo. Un factor que debe considerarse en el flujo del fluido en los sistemas de alimentación es la presencia de **turbulencia**, en oposición al *flujo laminar* de los fluidos. El *número de Reynolds* (Re) se utiliza para cuantificar este aspecto del flujo del fluido. Representa la relación entre las fuerzas de la *inercia* y las de la *viscosidad*, y se define como

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta} \quad (10.6)$$

donde v es la velocidad del líquido, D el diámetro del canal, y ρ y η son la densidad y la viscosidad del líquido, respectivamente. Cuanto mayor sea el número de Reynolds, mayor será la tendencia a que ocurra el flujo turbulento.

En los sistemas de alimentación, Re varía típicamente entre 2000 y 20,000, en donde un valor superior a 2000 representa flujo laminar. Entre 2000 y 20,000 representa una mezcla de flujo laminar y turbulento. Por lo general, esta mezcla se considera inofensiva en los sistemas de alimentación. Sin embargo, los valores de Re superiores a 20,000 constituyen una turbulencia severa, lo que produce aire atrapado y la formación de *espuma* (nata que se forma en la superficie del metal fundido) por la reacción del metal líquido con el aire y otros gases. En general, para minimizar la turbulencia hay que evitar cambios súbitos en la dirección del flujo y en la geometría de las secciones transversales del canal en el diseño del sistema de alimentación.

La espuma o la escoria se pueden eliminar casi en su totalidad sólo mediante la *fundición al vacío* (sección 11.3.2). La fundición convencional atmosférica mitiga la espuma o la escoria mediante (a) desnatado, (b) el uso de sistemas de copas y canales de vaciado diseñados apropiadamente, o (c) el uso de filtros, que también pueden eliminar el flujo turbulento en el sistema de canales. Por lo general, los filtros se fabrican con cerámicas, mica o fibra de vidrio; su ubicación y colocación apropiadas son importantes para el filtrado efectivo de la nata y la escoria.

10.4 | Fluidez del metal fundido

A la capacidad del metal fundido para llenar las cavidades del molde se le llama *fluidez*, que consta de dos factores básicos: (1) las características del metal fundido y (2) los parámetros de fundición. Las siguientes características del metal fundido afectan la fluidez.

Viscosidad. Al aumentar la viscosidad y su sensibilidad a la temperatura (*índice de viscosidad*), la fluidez disminuye.

Tensión superficial. Una tensión superficial elevada en el metal líquido reduce su fluidez. Por esta causa, las películas de óxido sobre la superficie del metal fundido tienen un efecto adverso significativo sobre la fluidez. Por ejemplo, una película de óxido sobre la superficie del aluminio puro fundido triplica la tensión superficial.

Inclusiones. Las inclusiones pueden afectar significativamente la fluidez debido a que son insolubles. Este efecto se puede verificar observando la viscosidad de un líquido (como el aceite) con partículas de arena o sin ellas; el líquido con arena tiene una viscosidad mayor y, por lo tanto, una fluidez menor.

Patrón de solidificación de la aleación. La manera en que ocurre la solidificación (sección 10.2) puede afectar la fluidez. Más aún, la fluidez es inversamente proporcional al intervalo de solidificación. Cuanto menor es el intervalo (como en los metales puros y en los eutécticos), mayor será la fluidez. Por el contrario, las aleaciones con intervalos más largos de solidificación (como las aleaciones de soluciones sólidas) tienen una fluidez menor.

Los siguientes parámetros de fundición afectan la fluidez y también pueden afectar el flujo del fluido y las características térmicas del sistema.

Diseño del molde. El diseño y las dimensiones del bebedero, los canales y las mazas rotas, afectan la fluidez.

Material del molde y sus características superficiales. Cuanto mayor sea la conductividad térmica del molde y más rugosas sus superficies, menor será la fluidez del metal fundido. Aunque el calentamiento del molde mejora la fluidez, también hace más lenta la solidificación del metal. Por ende, la fundición desarrolla granos más gruesos y, de ahí, una menor resistencia.

Grado de sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento (definido como el incremento de temperatura de una aleación por encima de su punto de fusión) mejora la fluidez al retrasar la solidificación. Con frecuencia se especifica la **temperatura de vaciado** en lugar del grado de sobrecalentamiento, porque aquélla se determina más fácilmente.

Velocidad de vaciado. Cuanto menor sea la velocidad de vaciado del metal fundido dentro del molde, menor será la fluidez, debido a que la velocidad de enfriamiento es mayor cuando se vacía lentamente.

Transferencia de calor. Este factor afecta directamente la viscosidad del metal líquido (ver más adelante).

Aunque complejo, el concepto **capacidad de fundición** (colabilidad) se utiliza generalmente para describir la facilidad con que un metal puede fundirse para producir una parte con buena calidad. Este término no sólo incluye la fluidez, sino también la naturaleza de las prácticas de fundición.

10.4.1 Pruebas de fluidez

Se han desarrollado varias pruebas para cuantificar la fluidez, aunque ninguna se acepta de manera universal. En una prueba común de este tipo, se hace fluir el metal fundido a lo largo de un canal que se encuentra a la temperatura ambiente (fig. 10.9); la distancia que recorre el metal antes de solidificarse y detenerse es una medida de su fluidez. Obviamente, tal longitud está en función de las propiedades térmicas del metal y del molde, así como del diseño del canal. Aun así, dichas pruebas de fluidez son útiles y simulan situaciones de fundición en un grado razonable.

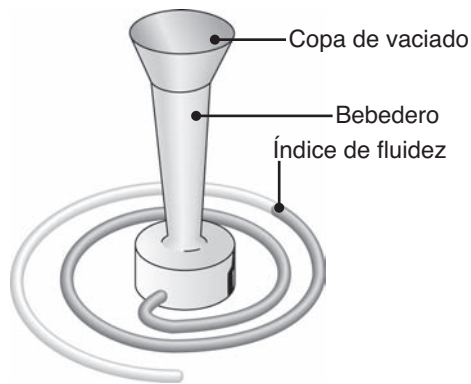


FIGURA 10.9 Método de prueba de fluidez en el que se utiliza un molde espiral. El *índice de fluidez* es la longitud del metal solidificado en el pasaje espiral. Cuanto mayor sea la longitud del metal solidificado, mayor será la fluidez.

10.5 Transferencia de calor

La transferencia de calor durante el ciclo completo (desde el vaciado a la solidificación y el enfriamiento a la temperatura ambiente) es otro factor que debe considerarse en la fundición de metales. El flujo de calor en diferentes puntos del sistema es un fenómeno complejo y depende de varios factores relacionados con el metal que se está fundiendo y con parámetros del molde y del proceso. Por ejemplo, en la fundición de secciones delgadas, las velocidades de flujo del metal deben ser lo suficientemente altas para evitar un enfriamiento y solidificación prematuros. Por otro lado, el gasto no debe ser tan elevado como para provocar turbulencia excesiva, con sus efectos dañinos en el proceso de fundición.

En la figura 10.10 se muestra una distribución típica de temperaturas en la interfaz líquido-metal del molde. El calor del metal líquido se libera a través de las paredes del molde y hacia el aire circundante. La temperatura baja en las interfaces aire-molde y molde-metal por la presencia de capas limítrofes y el contacto imperfecto en estas interfaces. La forma de la curva depende de las propiedades térmicas del metal fundido y del molde.

10.5.1 Tiempo de solidificación

Durante las etapas iniciales de la solidificación, comienza a formarse una delgada capa superficial solidificada en las paredes frías del molde, y conforme pasa el tiempo, el espesor de la capa aumenta (fig. 10.11). Con las paredes rectas de los moldes, este espesor es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Cuando éste se duplica, por consiguiente, la capa se vuelve $\sqrt{2} = 1.41$ veces (o 41%) más gruesa.

El **tiempo de solidificación** está en función del volumen de una fundición y de su área superficial (*regla de Chvorinov*):

$$\text{Tiempo de solidificación} = C \left(\frac{\text{Volumen}}{\text{Área de superficie}} \right)^n \quad (10.7)$$

donde C es una constante que refleja (*a*) el material del molde, (*b*) las propiedades del metal (incluyendo el calor latente) y (*c*) la temperatura. El parámetro n tiene un valor de entre 1.5 y 2, pero por lo general se considera 2. Por lo tanto, una esfera sólida grande se

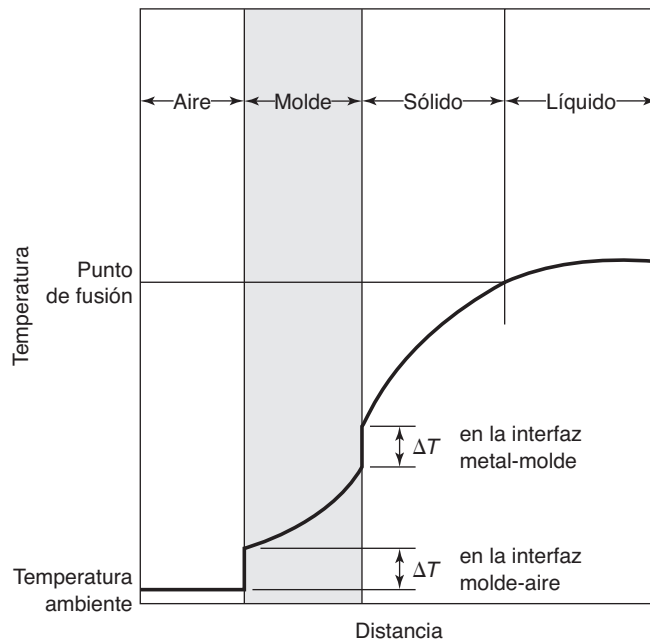


FIGURA 10.10 Distribución de la temperatura en la interfaz de la pared del molde y el metal líquido durante la solidificación de los metales en fundición.

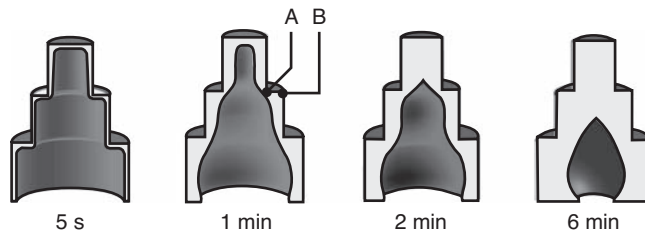


FIGURA 10.11 Capa superficial solidificada en una fundición de acero. El metal fundido restante se extrae en los tiempos indicados en la figura. Los objetos huecos decorativos se fabrican mediante un proceso llamado fundición hueca, que se basa en este principio. *Fuente:* H. F. Taylor, J. Wulff y M. C. Flemings.

solidificará y enfriará a la temperatura ambiente a una velocidad mucho menor que una esfera sólida pequeña. La razón de esto es que el volumen de una esfera es proporcional al cubo de su diámetro, y el área superficial es proporcional al cuadrado de su diámetro. De manera similar, puede demostrarse que el metal fundido se solidifica más rápido en un molde con forma de cubo que en uno esférico del mismo volumen (ver ejemplo 10.1).

En la figura 10.11 se muestran los efectos de la geometría del molde y el tiempo transcurrido sobre la forma y el espesor de la capa superficial. Como se ilustra, el metal fundido no solidificado se ha vaciado del molde a diferentes intervalos de tiempo, que van de cinco segundos a seis minutos. Obsérvese que (como se esperaba) el espesor de la capa superficial aumenta con el tiempo transcurrido y la capa es más delgada en los ángulos internos (punto A de la figura) que en los externos (punto B). Esta última condición es ocasionada por un enfriamiento más lento en los ángulos internos que en los externos.

EJEMPLO 10.1 Tiempos de solidificación para varias formas

Se están fundiendo tres piezas metálicas que tienen el mismo volumen, pero diferentes formas: una esfera, un cubo y un cilindro cuya altura es igual a su diámetro. ¿Cuál de las piezas se solidificará primero y cuál será la más lenta? Supóngase que $n = 2$.

Solución Se considera el volumen de cada pieza como la unidad. Entonces, de la ecuación 10.7:

$$\text{Tiempo de solidificación} \propto \frac{1}{(\text{Área de la superficie})^2}$$

Las áreas superficiales son las siguientes:

Esfera:

$$V = \left(\frac{4}{3}\right)\pi r^3, r = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{1/3}$$

$$A = 4\pi r^2 = 4\pi\left(\frac{3}{4\pi}\right)^{2/3} = 4.84$$

Cubo:

$$V = a^3, a = 1, \text{ y } A = 6a^2 = 6$$

Cilindro:

$$V = \pi r^2 h = 2\pi r^3, r = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{1/3}$$

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r h = 6\pi r^2 = 6\pi\left(\frac{1}{2\pi}\right)^{2/3} = 5.54$$

Por lo tanto, los tiempos de solidificación respectivos son:

$$t_{\text{esfera}} = 0.043C, t_{\text{cubo}} = 0.028C, t_{\text{cilindro}} = 0.033C$$

Entonces, la pieza con forma de cubo se solidificará más rápido y la esférica lo hará más despacio.

10.5.2 Contracción

Debido a sus características de dilatación térmica, los metales en general se contraen (comprimen) durante la solidificación y se enfrían a la temperatura ambiente. La *contracción*, que provoca cambios dimensionales y (algunas veces) agrietamiento, es el resultado de tres eventos consecutivos:

1. La contracción del metal fundido al enfriarse antes de solidificar.
2. La contracción del metal durante el cambio de fase de líquido a sólido (calor latente de fusión).
3. La contracción del metal solidificado (la fundición) conforme su temperatura se reduce a la temperatura ambiente.

La mayor medida potencial de contracción ocurre cuando la fundición se enfría a la temperatura ambiente. En la tabla 10.1 se muestra la medida en que se contraen diver-

TABLA 10.1

Contracción o dilatación volumétrica por solidificación para diversos metales fundidos			
Contracción (%)		Dilatación (%)	
Aluminio	7.1	Bismuto	3.3
Zinc	6.5	Silicio	2.9
Al-4.5% de Cu	6.3	Hierro gris	2.5
Oro	5.5		
Hierro blanco	4–5.5		
Cobre	4.9		
Bronce (70–30)	4.5		
Magnesio	4.2		
90% de Cu-10% de Al	4		
Aceros al carbono	2.5–4		
Al-12% de Si	3.8		
Plomo	3.2		

sos metales durante la solidificación. Obsérvese que algunos metales (como el hierro fundido gris) se dilatan (la razón es que el grafito tiene un volumen específico relativamente alto y cuando se precipita en forma de hojuelas de grafito, al solidificarse la fundición de hierro gris, provoca una dilatación neta del metal). En la sección 12.2.1 se estudia la contracción, respecto de las consideraciones de diseño para la fundición.

10.6 Defectos

Como se verá en esta sección (y en otras de las partes II a VI), en los procesos de manufactura pueden desarrollarse diversos defectos, dependiendo de factores como los materiales, el diseño de la pieza y las técnicas de procesamiento. En tanto que algunos defectos sólo afectan la apariencia de las partes producidas, otros pueden tener efectos adversos importantes en su integridad estructural.

En las fundiciones se pueden desarrollar varios defectos (figs. 10.12 y 10.13). Debido a que en el pasado se utilizaron diferentes nombres para describir el mismo defecto, el International Committee of Foundry Technical Associations ha elaborado una nomenclatura estandarizada que consta de siete categorías básicas de defectos de fundición, identificadas con letras mayúsculas en negritas:

- A: Proyecciones metálicas:** consisten en aletas, rebabas o proyecciones, como ampollas y superficies rugosas.
- B: Cavidades:** consisten en cavidades redondeadas o rugosas, internas o expuestas, incluyendo sopladuras, puntas de alfiler y cavidades por contracción (ver *porosidad*, sección 10.6.1).
- C: Discontinuidades:** como grietas, desgarramientos en frío o en caliente, y puntos frío. Si no se permite que el metal se contraiga libremente al solidificarse, pueden presentarse grietas y desgarres. Aunque varios factores están involucrados en el desgarramiento, el tamaño grueso del grano y la presencia de segregaciones de bajo punto de fusión a lo largo de los límites de los granos (*intergranulares*) incrementan la tendencia al desgarramiento en caliente. El punto *frío* es una interfaz en una fundición que no se funde totalmente debido al encuentro de dos corrientes de metal líquido provenientes de dos compuertas diferentes.
- D: Superficie defectuosa:** como pliegues, traslapes y cicatrices superficiales, capas de arena adherida y escamas de óxido.

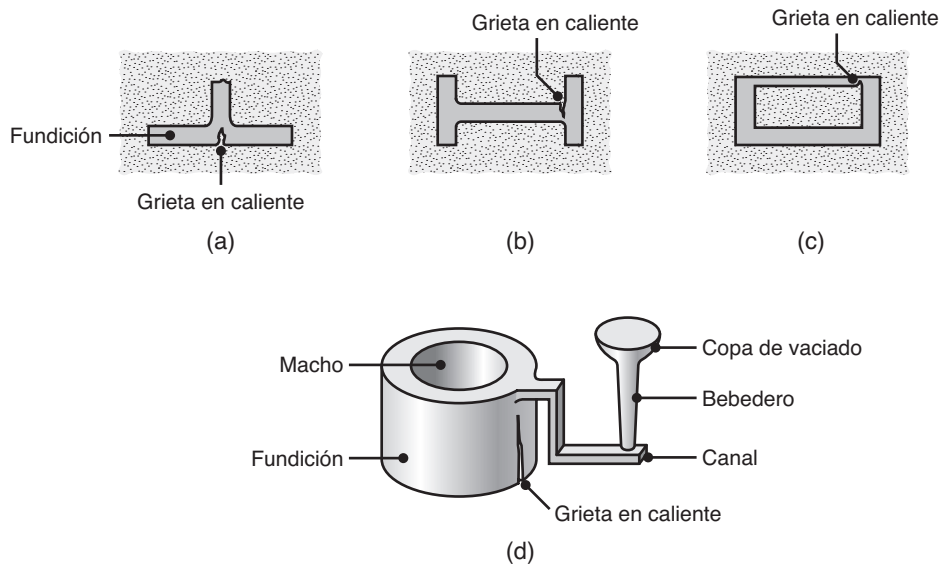


FIGURA 10.12 Ejemplos de grietas o desgarramientos en caliente en las fundiciones. Estos defectos obedecen a que la fundición no se puede contraer con libertad durante el enfriamiento, debido a restricciones en diversas partes de los moldes y los machos. Se pueden utilizar compuestos exotérmicos (productores de calor) como amortiguadores exotérmicos para controlar el enfriamiento en secciones críticas y evitar los agrietamientos en caliente.

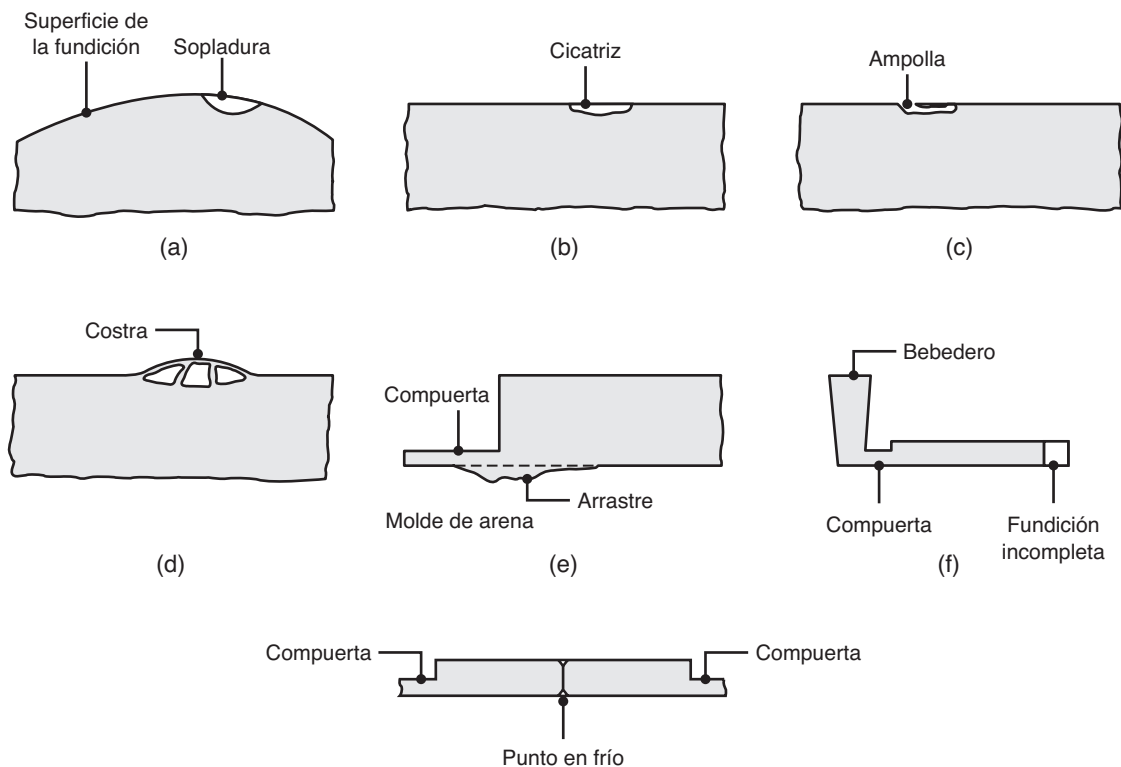


FIGURA 10.13 Ejemplos de defectos comunes en las fundiciones. Estos defectos se pueden minimizar o eliminar mediante el diseño apropiado, la preparación de los moldes y el control de los procedimientos de vaciado. *Fuente:* J. Datsko.

- E: Fundición incompleta:** como fallas (debidas a solidificación prematura), volumen insuficiente del metal vaciado y fugas (por la pérdida de metal del molde después de haber sido vaciado). Las fundiciones incompletas también pueden provenir de una temperatura muy baja del metal fundido o de un vaciado muy lento del mismo.
- F: Dimensiones o formas incorrectas:** debido a factores como tolerancia inapropiada para la contracción, error de montaje del modelo, contracción irregular, modelo deformado o fundición alabeada.
- G: Inclusiones:** se forman durante la fusión, solidificación y moldeo; en general son no metálicas. Se consideran dañinas porque actúan como multiplicadoras de esfuerzos y, por lo tanto, reducen la resistencia de la fundición. Durante el procesamiento del metal fundido se pueden filtrar partículas tan pequeñas como $30\ \mu\text{m}$. Las inclusiones se pueden formar durante la fusión, cuando el metal fundido reacciona con el medio ambiente (por lo común oxígeno) o con el crisol o el material del molde; por reacciones químicas entre los componentes del metal fundido; o a partir de escorias y otros materiales extraños atrapados en el metal fundido. El astillado de la superficie del molde y de los corazones o machos también puede producir inclusiones, lo que indica la importancia de la calidad de los moldes y de su mantenimiento.

10.6.1 Porosidad

La *porosidad* en una fundición puede ser ocasionada por *contracción*, *gases*, o por ambos. Se pueden desarrollar regiones porosas debido a la **contracción** del metal solidificado. Las secciones delgadas de una fundición se solidifican antes que las regiones gruesas; en consecuencia, el metal fundido fluye dentro de las regiones más gruesas que aún no se han solidificado. Las regiones porosas se pueden desarrollar en la parte central debido a la contracción, ya que la región más gruesa comienza a solidificarse primero. También puede desarrollarse *microporosidad* cuando el metal líquido se solidifica y contrae entre las dendritas y entre sus ramas.

La porosidad es dañina para la ductilidad de una fundición y para su acabado superficial, haciéndola permeable y, por lo tanto, afectando la hermeticidad de recipientes presurizados producidos por fundido. La porosidad ocasionada por la contracción se puede reducir o eliminar por los siguientes medios:

- Debe suministrarse la cantidad adecuada de metal líquido para evitar las cavidades ocasionadas por la contracción.
- Los **enfriadores** internos o externos, como los utilizados en la fundición en arena (fig. 10.14), también son un medio efectivo de reducir la porosidad por contracción. Su función consiste en aumentar la velocidad de solidificación en las regiones críticas. En general, los enfriadores internos se fabrican con el mismo material que la fundición y se dejan dentro de ella. Sin embargo, pueden surgir problemas relativos a la fusión apropiada de los enfriadores internos con la fundición; por ello, los talleres de fundición suelen evitar el uso de dichos enfriadores. Los enfriadores externos pueden ser del mismo material o ser de hierro, cobre o grafito.
- En las aleaciones, la porosidad se puede reducir o eliminar haciendo más pronunciado el gradiente de temperatura. Por ejemplo, es posible utilizar materiales para moldes que tienen una mayor conductividad térmica.
- Otro método para reducir la porosidad consiste en someter la fundición a un *prensado isostático en caliente* (ver sección 17.3.2).

Debido a que los metales líquidos tienen una solubilidad mucho mayor para los gases que los metales sólidos (fig. 10.15), cuando un metal comienza a solidificarse, los gases disueltos se expelen de la solución. Los gases también pueden provenir de la reac-

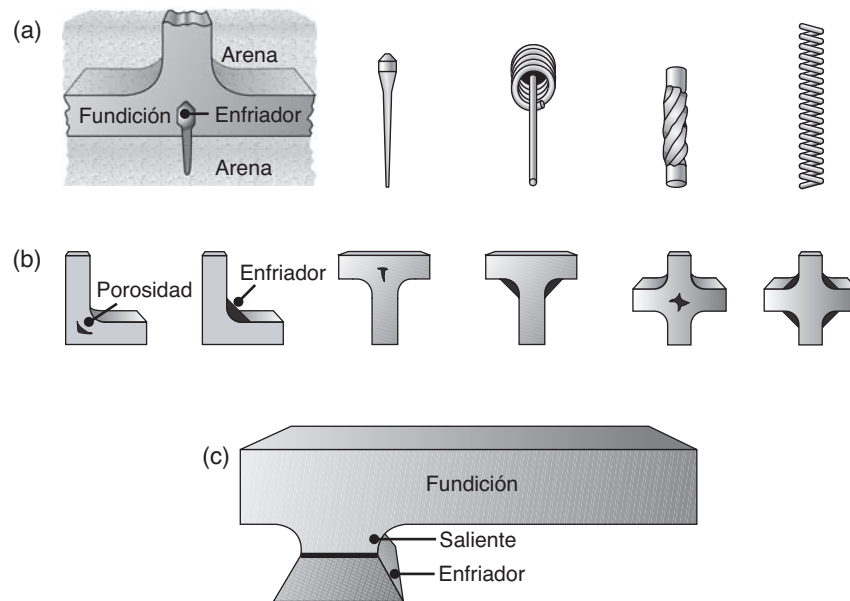


FIGURA 10.14 Diversos tipos de enfriadores (a) internos y (b) externos (áreas oscuras en la esquinas) utilizados en las fundiciones para eliminar la porosidad originada por la contracción. Los enfriadores se colocan en regiones en las que existe un gran volumen de metal, como se muestra en (c).

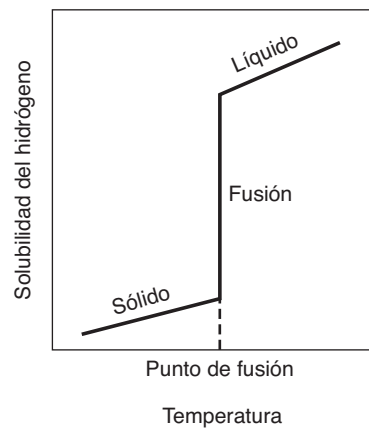


FIGURA 10.15 Solubilidad del hidrógeno en aluminio. Observe la disminución abrupta de la solubilidad conforme el metal fundido comienza a solidificarse.

ción del metal fundido con los materiales del molde. Los gases se acumulan en zonas donde existe porosidad (como en las regiones interdendríticas), u originan microporosidad en la fundición, sobre todo en el hierro, aluminio y cobre fundidos. Los gases disueltos se pueden retirar del metal fundido mediante el *lavado* o *purgado*, con un gas inerte, o fundiendo y vaciando el metal al vacío. Si el gas disuelto es oxígeno, el metal fundido se puede *desoxidar*. En general, el acero se desoxida con materiales de aluminio, silicio, aleaciones a base de cobre con cobre fosforoso, titanio y zirconio.

Es difícil determinar si la microporosidad es el resultado de la contracción o si la causan los gases. Si la porosidad es esférica y tiene paredes lisas (similar a los agujeros brillantes del queso suizo), generalmente se debe a gases; pero si las paredes son rugosas y angulares, es probable que se deba a la contracción entre dendritas. La porosidad gruesa obedece a la contracción y por lo común se le llama **cavidad por contracción**.

EJEMPLO 10.2 Fundición de pistones automovilísticos de aluminio

En la figura 10.16 se muestra un pistón de aluminio utilizado en motores automovilísticos de combustión interna. Estos productos se pueden manufacturar a velocidades muy altas, con tolerancias dimensionales estrechas y estrictos requisitos de materiales para lograr una operación apropiada. Los intereses económicos son obviamente mayúsculos, y es fundamental que los pistones se produzcan con un mínimo de costosas operaciones de acabado y con muy pocas piezas rechazadas.

Los pistones de aluminio se manufacturan mediante fundición debido a su capacidad para producir piezas con formas cercanas a la neta a las velocidades de producción requeridas. Sin embargo, con moldes diseñados de manera deficiente, llenados incompletos o porosidad excesiva, se puede ocasionar el rechazo de las partes, lo que aumentaría el costo. Tradicionalmente, estos defectos se controlaban mediante grandes tolerancias de maquinado, en conjunto con un diseño intuitivo de los moldes basado en la experiencia.

Los pistones se producen con aleaciones cuyo contenido de silicio es alto, como la aleación de aluminio 413.0, que tiene una fluidez elevada y puede crear superficies de alta definición mediante la fundición de molde permanente; también posee alta resistencia a la corrosión, buena soldabilidad y baja gravedad específica. La aceptación universal de los pistones de aluminio para los motores de combustión interna se debe sobre todo a su ligereza y a su alta conductividad térmica. Su inercia reducida permite mayores velocidades del motor y un contrapeso reducido en el cigüeñal, en tanto que su mayor conductividad térmica permite una transferencia de calor más eficiente del motor.

El molde de acero para herramental H13 se precalienta de 200 °C a 450 °C, dependiendo de la aleación a fundir y del tamaño de la pieza. Inicialmente, el precalen-



FIGURA 10.16 Pistón de aluminio para un motor de combustión interna: (a) recién fundido, y (b) después del maquinado.

tamiento se logra con un soplete manual, pero después de unas pocas fundiciones el molde alcanza un perfil de temperatura estable. El aluminio fundido se calienta a entre 100 °C y 200 °C por encima de su temperatura de liquidus, y después se coloca una cantidad de metal en el punto de alimentación del molde. Una vez que la cantidad de metal fundido se encuentra en su lugar, un pistón empuja el metal dentro del molde. Debido a la alta conductividad térmica del material del molde, la extracción de calor del metal fundido es rápida y el metal se puede solidificar en pequeños canales antes de llenar totalmente el molde. En general, la solidificación comienza en un extremo de la fundición antes de que se llene por completo el molde.

Al igual que con la mayoría de las aleaciones, es deseable que la solidificación comience en un extremo de la fundición y que el frente de solidificación se transmita a través del volumen. Esto produce una microestructura solidificada direccionalmente y la eliminación de la porosidad gruesa que surge cuando dos frentes de solidificación se encuentran dentro de una fundición. Además, pueden presentarse zonas de defectos en la fundición, como rebajes, puntos calientes, porosidad, agrietamiento y aire atrapado (como las sopladuras y costras). Un diseño deficiente del molde podría ocasionar defectos en 5% de las fundiciones.

Para mejorar la confiabilidad y reducir los costos asociados con la fundición de molde permanente, se utiliza un programa de computadora para simular el llenado del molde y sugerir causas potenciales de los defectos. Los modelos de computadora utilizan las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad —junto con la transferencia de calor y la solidificación— para modelar el proceso de fundición e identificar posibles deficiencias. Por ejemplo, en la figura 10.17 se muestra el resultado de una simulación de llenado de un molde, en donde permanece atrapada cierta cantidad de aire. Esto se corrige colocando un respiradero en el área correspondiente para permitir que el aire escape durante la fundición. La simulación en computadora permite a los diseñadores evaluar las características y geometrías de los moldes antes de comprar herramientas costosas, por lo que se ha convertido en un proceso indispensable para reducir costos y eliminar defectos en la fundición.

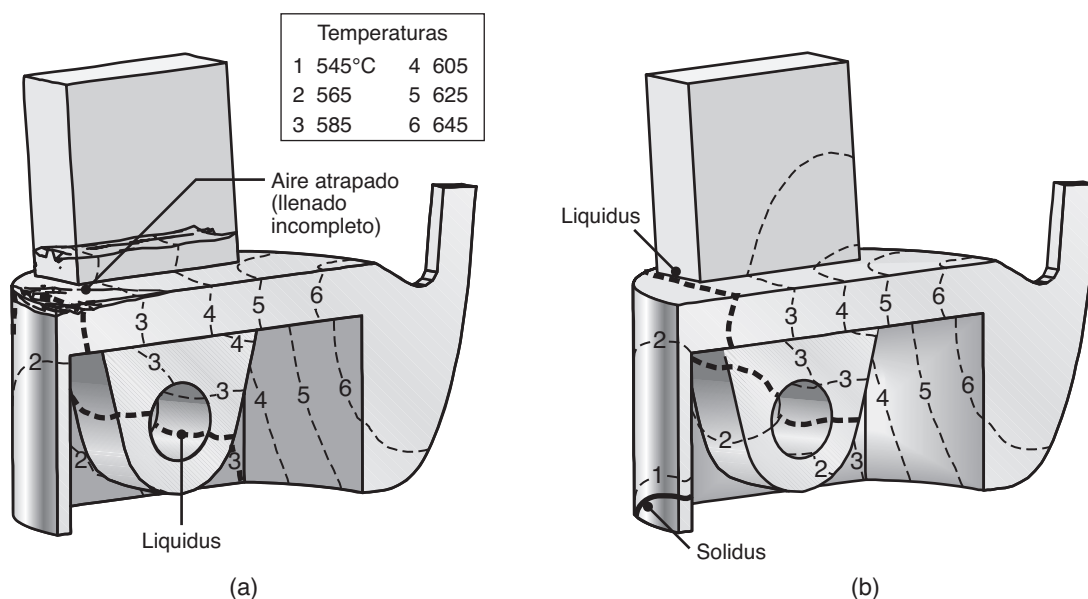


FIGURA 10.17 Simulación de llenado de un molde y solidificación. (a) 3.7 segundos después del inicio del vaciado. Observe que la zona pastosa se ha establecido antes de que el molde esté completamente lleno. (b) Utilizando respiraderos en el molde para retirar el aire atrapado, 5 segundos después del vaciado.

RESUMEN

- La fundición es un proceso de solidificación mediante el cual se vacía metal fundido dentro de un molde y se deja enfriar. El metal puede fluir a través de una variedad de pasajes (copas de vaciado, bebederos, canales de alimentación, mazarotas y compuertas) antes de alcanzar la cavidad final del molde. Las herramientas analíticas utilizadas en el diseño de fundiciones son el teorema de Bernoulli, la ley de continuidad de masa y el número de Reynolds, con los objetivos de obtener una velocidad apropiada del flujo y eliminar defectos asociados con la fluidez del fluido.
- La solidificación de los metales puros ocurre a temperatura constante, mientras que la de las aleaciones ocurre dentro de intervalos de temperatura. Los diagramas de fases son herramientas importantes para identificar el punto o puntos de solidificación de metales tecnológicamente importantes.
- La composición y las velocidades de enfriamiento del metal fundido afectan el tamaño y la forma de los granos y de las dendritas en la aleación que se está solidificando. A su vez, el tamaño y la estructura de los granos y de las dendritas influye en las propiedades de la fundición solidificada. El tiempo de solidificación está en función del volumen de la fundición y de su área superficial (regla de Chvorinov).
- La estructura de los granos de las fundiciones se puede controlar por diferentes medios para obtener las propiedades deseadas. Debido a que los metales se contraen durante la solidificación y el enfriamiento, se pueden formar cavidades en la fundición. La porosidad originada por los gases liberados durante la solidificación puede ser un problema significativo, en particular debido a su efecto adverso sobre las propiedades mecánicas de las fundiciones. También podrían presentarse diversos defectos en las fundiciones a causa de la falta de control de las variables del material y del proceso.
- Aunque la mayoría de los metales se contraen durante la solidificación, el hierro fundido gris y algunas aleaciones de aluminio en realidad se dilatan. Los cambios dimensionales y el agrietamiento (hojeamiento en caliente) son dificultades que pueden surgir durante la solidificación y el enfriamiento. Se han clasificado siete categorías básicas de defectos de fundición.
- Las prácticas de fusión tienen el mismo efecto directo en la calidad de las fundiciones que las operaciones en los talleres de fundición, como la producción de diseños y moldes, el vaciado del metal fundido, la remoción de partes fundidas de los moldes, limpieza, tratamiento térmico e inspección.

TÉRMINOS CLAVE

Aspiración	Fluidez	Porosidad
Bebedero	Fundición	Rango de solidificación o de congelamiento
Canales de alimentación	Granos columnares	Segregación
Capa superficial	Inoculante	Sistema de alimentación
Compuerta	Macrosegregación	Solidificación
Contracción	Mazarotas	Teorema de Bernoulli
Copa de vaciado	Microsegregación	Turbulencia
Dendritas	Molde	Zona pastosa
Dendritas columnares	Nucleación heterogénea	
Dendritas con núcleo	Nucleación homogénea	
Enfriadores	Número de Reynolds	

BIBLIOGRAFÍA

Alexiades, V., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, 1993.
Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 1974.
ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1998.
 Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.
 Campbell, J., *Castings*, Butterworth-Heinemann, 1991.
Casting in Tool and Manufacturing Engineers Handbook, Volume II: *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, 1984.
Casting Defects Handbook, American Foundrymen's Society, 1972.

Flemings, M. C., *Solidification Processing*, McGraw-Hill, 1974.
 Heine, R., *Principles of Metal Casting*, McGraw-Hill, 1999.
 Lieberman, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.
 Mikelonis, P. J. (ed.), *Foundry Technology: A Source Book*, ASM International, 1982.
 Minkoff, I., *Solidification and Cast Structure*, Wiley, 1986.
Steel Castings Handbook, 6a. ed., Steel Founders' Society of America, 1995.
 Szekely, J., *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, 1979.

PREGUNTAS DE REPASO

10.1 ¿Por qué la fundición es un proceso importante de manufactura?
 10.2 ¿Cuál es la diferencia entre la solidificación de los metales puros y las aleaciones metálicas?
 10.3 ¿Qué son las dendritas?
 10.4 Establezca la diferencia entre rangos de solidificación cortos y largos. ¿Cómo se determina el rango?
 10.5 ¿Qué es el sobrecalentamiento?
 10.6 Defina contracción y porosidad. ¿Cómo puede saber si las cavidades en una fundición se deben a porosidad o a contracción?
 10.7 ¿Cuál es la función de los enfriadores?
 10.8 ¿Qué es el número de Reynolds? ¿Por qué es importante en la fundición?

10.9 ¿Cómo se define la fluidez? ¿Por qué es importante?
 10.10 Explique las razones de los desgarramientos en caliente en las fundiciones.
 10.11 ¿Por qué es importante retirar la nata o escoria durante el vaciado del metal líquido dentro del molde? ¿Qué métodos se utilizan para retirarlos?
 10.12 ¿Cuáles son los efectos de los materiales para moldes en el flujo del fluido y la transferencia de calor?
 10.13 ¿Por qué es importante la ecuación de Bernoulli en la fundición?
 10.14 Describa la tixofundición y la reofundición.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

10.15 Describa las etapas comprendidas en la contracción de los metales durante la fundición.
 10.16 Explique las razones por las que la transferencia de calor y el flujo del fluido son importantes en la fundición de los metales.
 10.17 Sabemos que vaciar metal a alta velocidad dentro de un molde tiene ciertas desventajas. ¿Existe alguna desventaja en vaciarlo muy lentamente?
 10.18 Describa los eventos mostrados en la figura 10.5.
 10.19 ¿Le preocuparía el hecho de que partes de los enfriadores internos se dejan dentro de la fundición? ¿Qué materiales cree que deberían utilizarse para fabricar los enfriadores y por qué?
 10.20 ¿Qué demostraciones prácticas puede ofrecer para indicar la relación del tiempo de solidificación con el volumen y el área de la superficie?

10.21 Explique por qué desearía someter una fundición a diferentes tratamientos térmicos.
 10.22 ¿Por qué la porosidad tiene efectos dañinos en las propiedades mecánicas de las fundiciones? ¿La porosidad también podría afectar las propiedades físicas (como la conductividad térmica y eléctrica)? Explique su respuesta.
 10.23 Se va a fundir un volante manual de rayos en hierro gris. Para evitar el desgarramiento en caliente de los rayos, ¿los aislaría, o los enfriaría? Explique su respuesta.
 10.24 ¿Cuál(es) de la(s) siguiente(s) consideración(es) es(son) importante(s) para que una mazarota funcione apropiadamente? Ésta(s) debe(n): (a) tener un área superficial mayor que la parte que se está fundiendo, (b) mantenerse abierta(s) a la presión atmosférica, y/o (c) solidificar primero? ¿Por qué?

10.25 Explique por qué la constante C en la ecuación 10.7 depende del material del molde, de las propiedades del metal y de la temperatura.

10.26 ¿Los enfriadores externos son tan efectivos como los internos? Explique su respuesta.

10.27 Explique por qué la fundición de hierro gris sufre una dilatación en lugar de una contracción durante la solidificación, como se muestra en la tabla 10.1.

10.28 En relación con la figura 10.11, explique por qué las esquinas internas (como A) desarrollan una capa superficial más delgada que las esquinas externas (como B) durante la solidificación.

10.29 Observe la forma de las dos mazarotas de la figura 10.8 y discuta sus observaciones en relación con la ecuación 10.7.

10.30 ¿Existe alguna diferencia entre la tendencia a la formación de huecos por contracción en los metales con rangos de solidificación cortos y largos, respectivamente? Explique su respuesta.

10.31 ¿Cuál es la influencia del área de sección transversal del canal espiral de la figura 10.9 sobre los resultados de la prueba de fluidez? ¿Cuál es el efecto de la altura del bebedero? Si esta prueba se realiza con el dispositivo de prueba calentado a temperaturas elevadas, ¿serían más útiles los resultados de la prueba? Explique su respuesta.

10.32 Los fundidores y fabricantes de lingotes han observado durante mucho tiempo que las temperaturas bajas de vaciado (es decir, sobrecalentamiento bajo) promueven la formación de granos equiaxiales sobre granos columnares. Igualmente, los granos equiaxiales se vuelven más finos al disminuir la temperatura de vaciado. Explique estos fenómenos.

10.33 ¿Qué esperaríamos que ocurriera (al fundir aleaciones metálicas) si el molde se agitara agresivamente después de que el metal fundido estuvo dentro del molde el tiempo suficiente para formar una capa superficial?

10.34 Si examina un cubo de hielo común, verá cavidades y grietas en el mismo. Sin embargo, algunos cubos de hielo son de forma tubular y no tienen cavidades de aire o grietas apreciables en su estructura. Explique este fenómeno.

10.35 ¿Cómo puede saber si las cavidades en una fundición se deben a contracción o a burbujas de aire atrapadas?

10.36 Describa las desventajas de tener una mazarota que sea: (a) demasiado grande, y (b) demasiado pequeña.

10.37 ¿Cuáles son los beneficios y perjuicios de tener una temperatura de vaciado que sea mucho mayor que la temperatura de fusión de un metal? ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de tener una temperatura de vaciado que permanezca cercana a la temperatura de fusión?

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

10.38 Dibuje una gráfica de volumen específico en función de la temperatura para un metal que se contrae al enfriarse del estado líquido a la temperatura ambiente. En la gráfica, marque el área en la que las mazarotas compensan la contracción.

10.39 Una fundición redonda tiene 0.2 m (7.9 pulgadas) de diámetro y 0.5 m (19.7 pulgadas) de longitud. Otra fundición del mismo metal tiene sección transversal elíptica con una relación de ejes mayor a menor de 2 y tiene la misma longitud y área de sección transversal que la fundición redonda. Ambas piezas se funden en las mismas condiciones. ¿Cuál es la diferencia entre los tiempos de solidificación de las dos fundiciones?

10.40 Una placa cuadrada de 100 mm (4 pulgadas) de espesor y un cilindro recto circular con un radio de 100 mm (4 pulgadas) y una altura de 50 mm tienen el mismo volumen. Si se va a fundir cada uno de ellos utilizando una mazarota cilíndrica, ¿cada una de las piezas requerirá una mazarota del mismo tamaño para asegurar una alimentación apropiada? Explique su respuesta.

10.41 Suponga que la parte superior de un bebedero redondo tiene un diámetro de 3 pulgadas (75 mm) y una altura de 8 pulgadas (200 mm) desde el canal de alimentación. Con base en la ecuación 10.5, grafique el perfil del diámetro del bebedero, en función de su altura.

Suponga que el fondo del bebedero tiene un diámetro de 0.25 pulgadas (6 mm).

10.42 Se vacía aluminio puro en un molde de arena. El nivel del metal en la copa de vaciado es 8 pulgadas por encima del nivel del metal dentro del molde y el canal de alimentación es circular con un diámetro de 0.5 pulgadas. ¿Cuál es la velocidad y el gasto del flujo de metal dentro del molde? ¿El flujo es laminar o turbulento?

10.43 Un cilindro con un diámetro de 1 pulgada y una altura de 3 pulgadas se solidifica en tres minutos en una operación de fundición en arena. ¿Cuál es el tiempo de solidificación si se duplica la altura del cilindro? ¿Cuál es el tiempo si se duplica el diámetro?

10.44 El gasto volumétrico de metal dentro de un molde es de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$. La parte superior del bebedero tiene un diámetro de 20 mm y una longitud de 200 mm. ¿Qué diámetro deberá especificarse para el fondo del bebedero a fin de evitar la aspiración? ¿Cuál es la velocidad y el número de Reynolds resultantes en el fondo del bebedero si el metal que se va a fundir es aluminio con una viscosidad de 0.004 Ns/m^2 ?

10.45 Un molde rectangular con dimensiones de 100 mm $\times$ 200 mm $\times$ 400 mm se llena con aluminio sin sobrecalentamiento. Determine las dimensiones finales de la parte al enfriarse a la temperatura ambiente. Repita el análisis para el hierro fundido gris.

10.46 La constante C en la regla de Chvorinov está dada como 3 s/mm^2 y se utiliza para producir una fundición cilíndrica con un diámetro de 75 mm y una altura de 125 mm. Estime el tiempo en que la fundición se solidificará totalmente. El molde se puede romper con seguridad cuando la cáscara solidificada tiene cuando menos 20 mm. Suponiendo que el cilindro se enfría de modo uniforme,

¿cuánto tiempo debe pasar después de vaciar el metal fundido para que se pueda romper el molde?

10.47 Suponga que es un instructor que domina los temas descritos en este capítulo y que está entregando un cuestionario sobre los aspectos numéricos para examinar el grado de comprensión de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

10.48 ¿Puede proponer pruebas de fluidez distintas de la mostrada en la figura 10.9? Explique las características de sus métodos de prueba.

10.49 En la figura P10.49 se muestran diversos defectos y discontinuidades en productos fundidos. Revise cada uno de ellos y ofrezca soluciones para evitarlos.

10.50 La prueba de fluidez mostrada en la figura 10.9 sólo ilustra el principio de esta prueba. Diseñe una configuración para dicha prueba que muestre el tipo de materiales y el equipo a utilizar. Explique el método por el que determinaría la longitud del metal solidificado en el pasaje espiral.

10.51 Utilizando el equipo y los materiales disponibles en una cocina típica, diseñe un experimento para reproducir resultados similares a los mostrados en la figura 10.11. Comente sus observaciones.

10.52 Un método para relevar concentraciones de esfuerzos en una pieza es aplicando una pequeña deformación plástica uniforme a la misma. Liste sus preocupaciones y

recomendaciones si se sugiere un método similar para una fundición.

10.53 Si a una fundición de cierta forma se le va a duplicar el volumen, describa los efectos sobre el diseño del molde, incluyendo el cambio requerido en el tamaño de las mazarotas, canales de alimentación, estranguladores y bebederos.

10.54 Con frecuencia quedan pequeñas cantidades de escoria después del desnatado y se introducen en el flujo del metal fundido en la fundición. Reconociendo que la escoria es mucho menos densa que el metal, diseñe características del molde que retiren pequeñas cantidades de escoria antes de que el metal llegue a la cavidad del molde.

10.55 En la figura II.1 se muestra una variedad de componentes en un automóvil común que se producen mediante fundición. Piense en otros productos, como herramientas eléctricas y pequeños electrodomésticos, y elabore una ilustración similar a la que se hizo en esa figura.

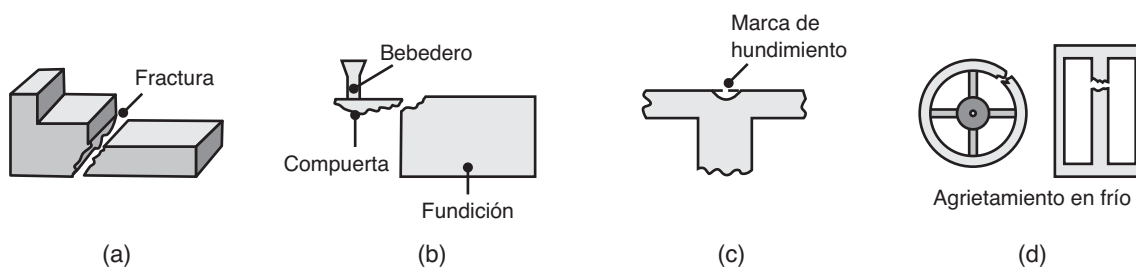
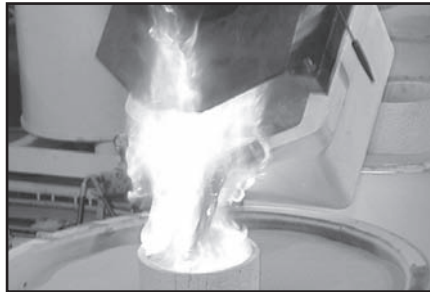


FIGURA P10.49

Procesos de fundición de metales



CAPÍTULO

11

En el capítulo anterior se estudiaron los fundamentos de la solidificación de los metales y los efectos del flujo del fluido y la transferencia del calor en los moldes; ahora se describirá en detalle:

- Las características de los procesos de molde desechable y de molde permanente.
- Las aplicaciones, ventajas y limitaciones de los procesos comunes de fundición.
- Fundición de monocristales.
- Técnicas de inspección para fundiciones.
- Breve revisión de los talleres de fundición y su automatización.

Productos fabricados comúnmente mediante fundición: monobloques para motores, cigüeñales, tapacubos, herramientas eléctricas, álabes para turbinas, plomería, dientes para cremalleras, matrices y moldes, engranes, ruedas de ferrocarril, propulsores, equipo de oficina, estatuas y cajas.

Procesos alternativos: forjado, metalurgia de polvos, maquinado y fabricación.

- 11.1 Introducción 285
- 11.2 Procesos de fundición de molde desechable 287
- 11.3 Procesos de fundición en molde permanente 303
- 11.4 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos 312
- 11.5 Solidificación rápida 314
- 11.6 Inspección de las fundiciones 314
- 11.7 Prácticas y hornos para fusión 315
- 11.8 Talleres de fundición y su automatización 316

EJEMPLO:

- 11.1 Componentes de superaleaciones fundidas por revestimiento para turbinas de gas 303

ESTUDIO DE CASO:

- 11.1 Fundición a la espuma perdida de monobloques para motores 299

11.1 | Introducción

Las primeras fundiciones metálicas se realizaron entre los años 4000 y 3000 a.C. mediante moldes de piedra y metal para fundir cobre. Con el paso del tiempo se han desarrollado diversos procesos de fundición, cada uno con características y aplicaciones propias (ver también fig. I.7a), a fin de cumplir requerimientos específicos de ingeniería y de servicio (tabla 11.1). Una gran variedad de partes y componentes se producen por medio de fundición, como monobloques para motores, cigüeñales, componentes automovilísticos y trenes de potencia (fig. 11.1), equipo agrícola y de ferrocarril, tubos y accesorios de plomería, herramientas eléctricas, cañones para armas, sartenes, equipo de oficina y componentes muy grandes para turbinas hidráulicas.

Dos tendencias han tenido un impacto importante en la industria de la fundición. La primera es la mecanización y automatización de este proceso, que ha conducido a cambios significativos en el uso del equipo y la mano de obra. Maquinaria avanzada y sistemas automáticos de control de procesos han reemplazado a los métodos tradicionales de fundición. La segunda tendencia importante es la creciente demanda de fundiciones de alta calidad, con tolerancias dimensionales cerradas.

Este capítulo está organizado conforme a las clasificaciones importantes de las prácticas de fundición (ver fig. II.2 en la Introducción a la parte II). Estas clasificaciones

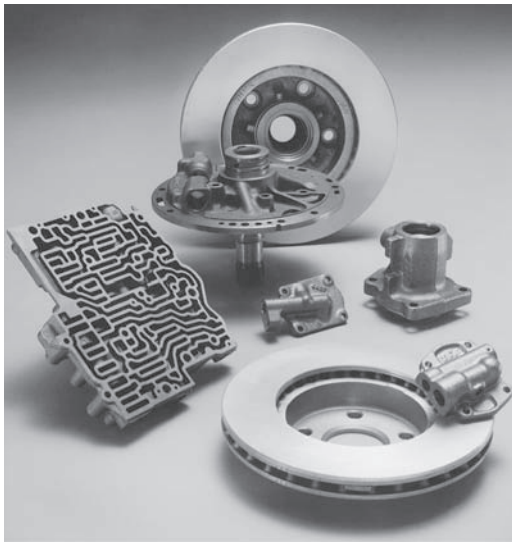
TABLA 11.1

Resumen de procesos de fundición		
Proceso	Ventajas	Limitaciones
En arena	Casi cualquier metal fundido; sin límite en el tamaño, forma o peso de la parte; bajo costo del herramental.	Se requiere algún acabado; acabado superficial relativamente grueso; tolerancias amplias.
Molde en cáscara	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Tamaño limitado de la pieza; modelos y equipos costosos.
Modelo evaporativo	La mayoría de los metales fundidos, sin límite de tamaño; partes de formas complejas.	Los modelos tienen baja resistencia y pueden ser costosos para pequeñas cantidades.
Molde de yeso	Partes de formas intrincadas; buena tolerancia dimensional y acabado superficial; baja porosidad.	Limitado a metales no ferrosos; límite al tamaño de la parte y al volumen de producción; tiempo relativamente largo para fabricar el molde.
Molde cerámico	Partes de formas intrincadas; partes con tolerancias cerradas; buen acabado superficial.	Tamaño limitado de la parte.
Por revestimiento	Partes de formas intrincadas; excelente acabado superficial y precisión; casi cualquier metal fundido.	Partes de tamaño limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos.
Molde permanente	Buen acabado superficial y tolerancia dimensional; baja porosidad; alta capacidad de producción.	Alto costo del molde; partes de tamaño y complejidad limitados; no es adecuado para metales con alto punto de fusión.
A presión en matriz	Excelente precisión dimensional y acabado superficial; alta capacidad de producción.	Alto costo de la matriz; partes de tamaño limitado; generalmente limitado a metales no ferrosos; largo tiempo de entrega.
Centrífuga	Grandes partes cilíndricas o tubulares con buena calidad; alta capacidad de producción.	Equipo costoso; partes de forma limitada.

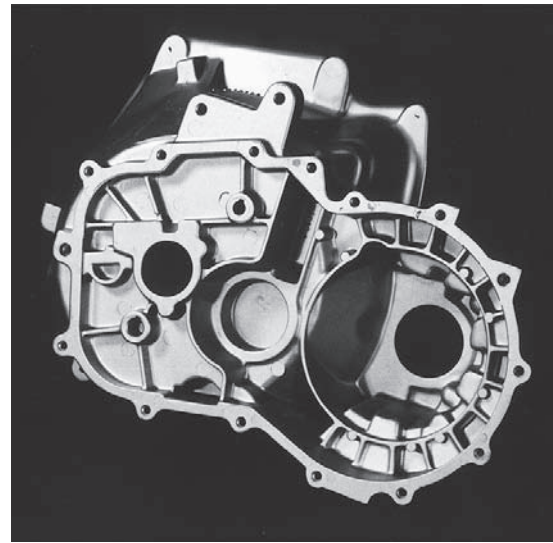
se relacionan con los materiales del molde, los procesos de moldeo y los métodos de alimentación del molde con metal fundido. Las principales categorías son las siguientes:

1. **Moldes desechables**, que suelen producirse con arena, yeso, cerámica y materiales similares, y que por lo general se mezclan con diversos aglutinantes (*agentes de unión*) para mejorar sus propiedades. Un molde típico de arena consta de 90% de arena, 7% de arcilla y 3% de agua. Como se señaló en el capítulo 8, estos materiales son *refractarios* (esto es, capaces de soportar las altas temperaturas de los metales fundidos). Una vez que la fundición solidifica, se rompe el molde para retirarla.
2. **Moldes permanentes**, que se fabrican con metales que mantienen su resistencia a temperaturas elevadas. Como su nombre indica, se utilizan en repetidas ocasiones y se diseñan de manera que las fundiciones puedan retirarse con facilidad y sea posible utilizar el molde en la siguiente fundición. Los moldes metálicos son mejores conductores de calor que los moldes desechables no metálicos (ver tabla 3.1); por consiguiente, la fundición que se está solidificando experimenta una mayor velocidad de enfriamiento, lo que a su vez afecta la microestructura y el tamaño de grano de la misma.
3. **Moldes compósitos**, que se producen con dos o más materiales (como arena, grafito y metales) y combinan las ventajas de cada uno. Estos moldes tienen una parte permanente y otra desechable, y se utilizan en diversos procesos de fundición para mejorar la resistencia del molde, controlar las velocidades de enfriamiento y optimizar la economía global de los procesos de fundición.

En la tabla 11.2 se presentan las características generales de la fundición en arena y de otros procesos de fundición. Casi todos los metales utilizados comercialmente se pueden fundir. Y aunque el material del molde determina el acabado superficial, las fundiciones en arena tienen por lo general superficies rugosas y de aspecto granular, como era de esperarse. Las tolerancias dimensionales no suelen ser tan buenas como las del maquinado y otros procesos de forma neta. Sin embargo, mediante fundición se pueden producir formas intrincadas, como los monobloques de hierro fundido para motores y propulsores muy grandes para barcos transatlánticos.



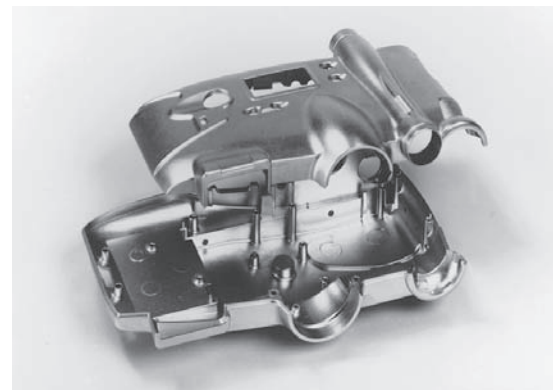
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 11.1 (a) Fundiciones comunes de hierro gris utilizadas en automóviles, incluyendo el cuerpo de la válvula de transmisión (izquierda) y el rotor de la masa con el cilindro de frenos (frente). *Fuente:* Cortesía de Central Foundry Division de General Motors Corporation. (b) Caja fundida para transmisión. (c) La cámara digital Polaroid PDC-2000 con una caja de magnesio de alta pureza AZ191D y fundición a presión en matriz. (d) Cámara Polaroid de dos piezas producida mediante el proceso de fundición a presión en matriz de cámara caliente. *Fuente:* Cortesía de Polaroid Corporation y Chicago White Metal Casting, Inc.

Debido a sus características y aplicaciones únicas, sobre todo en la manufactura de dispositivos microelectrónicos (parte V), en este capítulo también se describen técnicas básicas de crecimiento de cristales y se concluye con un breve resumen de los talleres de fundición modernos.

11.2 | Procesos de fundición de molde desechable

Las principales categorías de fundición de moldes desechables son la fundición en arena, en molde de cáscara, en molde de yeso, en moldes cerámicos, de modelo evaporativo y de revestimiento.

TABLA 11.2

Características generales de los procesos de fundición								
	Arena	Cáscara	Modelo evaporativo	Yeso	Revestimiento	Molde permanente	Matriz a presión	Centrífuga
Materiales fundidos comúnmente	Todos	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos	Todos	No ferrosos (Al, Mg, Zn, Cu)	Todos
Peso (kg):								
Mínimo	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.1	<0.01	0.01
Máximo	s/lím.	100+	100+	50+	100+	300	50	5000+
Tipo de acabado superficial (R_a en μm)	5-25	1-3	5-25	1-2	0.3-2	2-6	1-2	2-10
Porosidad ¹	3-5	4-5	3-5	4-5	5	2-3	1-3	1-2
Complejidad de forma ¹	1-2	2-3	1-2	1-2	1	2-3	3-4	3-4
Precisión dimensional ¹	3	2	3	2	1	1	1	3
Espesor sección (mm):								
Mínimo	3	2	2	1	1	2	0.5	2
Máximo	s/lím.	—	—	—	75	50	12	100
Tipo de tolerancia dimensional (mm/mm)	1.6-4 mm	±0.003		±0.005-0.010	±0.005	±0.015	±0.001-0.005	0.015
Costo ^{1,2}	(0.25 mm para partes pequeñas)							
Equipo	3-5	3	2-3	3-5	3-5	2	1	1
Modelo/matriz	3-5	2-3	2-3	3-5	2-3	2	1	1
Mano de obra	1-3	3	3	1-2	1-2	3	5	5
Tiempo típico de entrega ²	Días	Semanas	Semanas	Días	Semanas	Semanas	Semanas-meses	Meses
Capacidad típica de producción ² (partes/molde-hora)	1-20	5-50	1-20	1-10	1-1000	5-50	2-200	1-1000
Cantidad mínima ²	1	100	500	10	10	1000	10,000	10-10,000

Notas: 1. Clasificación relativa, de 1 (mejor) a 5 (peor). Por ejemplo, la fundición a presión en matriz tiene una porosidad relativamente baja, complejidad de la forma de media a baja, alta precisión dimensional, altos costos de equipo y matrices y bajos costos de mano de obra. Estas clasificaciones sólo son generales; pueden ocurrir variaciones significativas, dependiendo de los métodos de manufactura empleados.

2. Valores aproximados sin el uso de tecnologías de elaboración rápida de prototipos.

Fuente: Datos tomados de J. A. Schey, *Introduction to Manufacturing Processes*, 3a. ed., McGraw-Hill, 2000.

11.2.1 Fundición en arena

El método tradicional de fundición de metales es el de moldes de arena; se ha utilizado por milenios y todavía es la forma prevaleciente de fundición; sólo en Estados Unidos, cada año se funden unos 15 millones de toneladas de metal por este método. Sus aplicaciones características incluyen bases para máquinas, grandes impulsores de turbinas, propulsores, accesorios de plomería y numerosos componentes para equipo agrícola y de ferrocarriles. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en arena.

Básicamente, la *fundición en arena* consiste en: (a) colocar un modelo (que tiene la forma de la fundición deseada) en arena para hacer una impresión, (b) incorporar un sistema de alimentación, (c) retirar el modelo y llenar la cavidad del molde con metal fundido, (d) permitir que el metal se enfríe y solidifique, (e) separar el molde de arena, y (f) retirar la fundición (fig. 11.2).

Arenas. En la mayoría de las operaciones de fundición en arena se utiliza arena sílice (SiO_2) como material para el molde, porque es barata y resulta adecuada debido a sus características de alta temperatura y elevado punto de fusión. Existen dos tipos generales de arena: **aglutinada naturalmente** (*banco de arena*) y **sintética** (*arena de lago*). La mayoría de los talleres de fundición prefiere esta última porque puede controlar su composición con mayor facilidad. Para una fundición apropiada, la arena debe estar limpia y de preferencia ser nueva.

La selección de arena para moldes implica considerar varios factores y ciertas concesiones respecto de las propiedades. La arena que tiene granos finos y redondos se puede apisonar de modo más compacto y, en consecuencia, formar un molde con superficie más lisa. Aunque la arena de grano fino refuerza la resistencia del molde, estos granos también reducen su *permeabilidad* (penetración a través de los poros). Una buena permeabilidad de los moldes y de los machos o corazones permite que los gases y el vapor generado durante la fundición escapen fácilmente. El molde también debe tener una *colapsabilidad* adecuada para permitir que la fundición se contraiga al enfriarse, evitando así defectos como el desgarramiento y agrietamiento en caliente (ver fig. 10.12).

Tipos de moldes de arena. Los moldes de arena (fig. 11.3) se caracterizan por los tipos de arena que los componen y por los métodos utilizados para producirlos. Existen

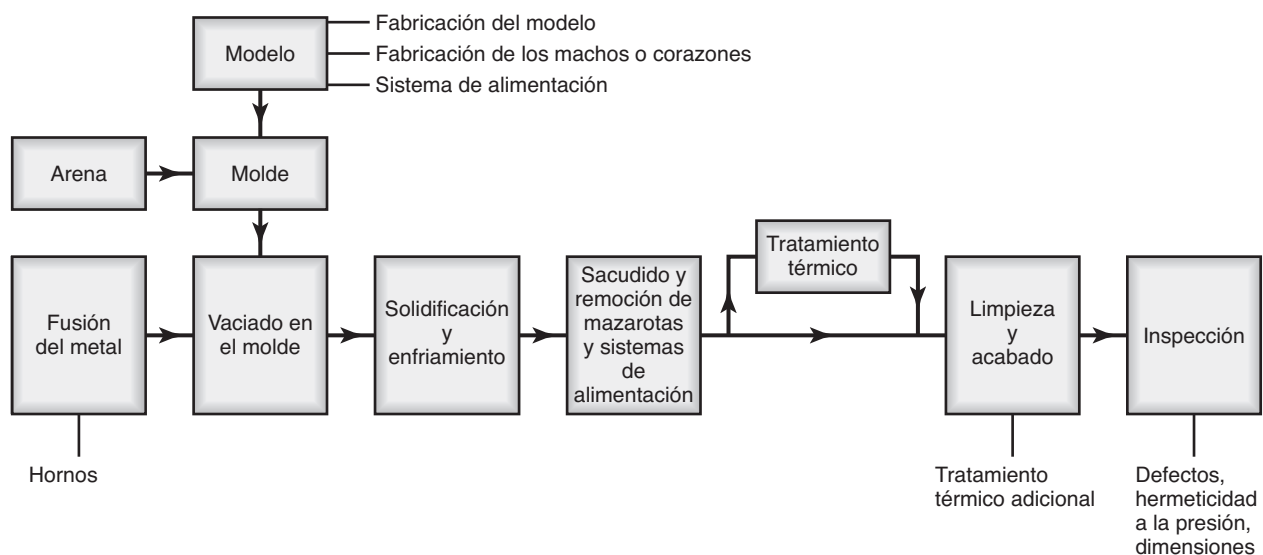


FIGURA 11.2 Descripción de los pasos de producción en una operación característica de fundición en arena.

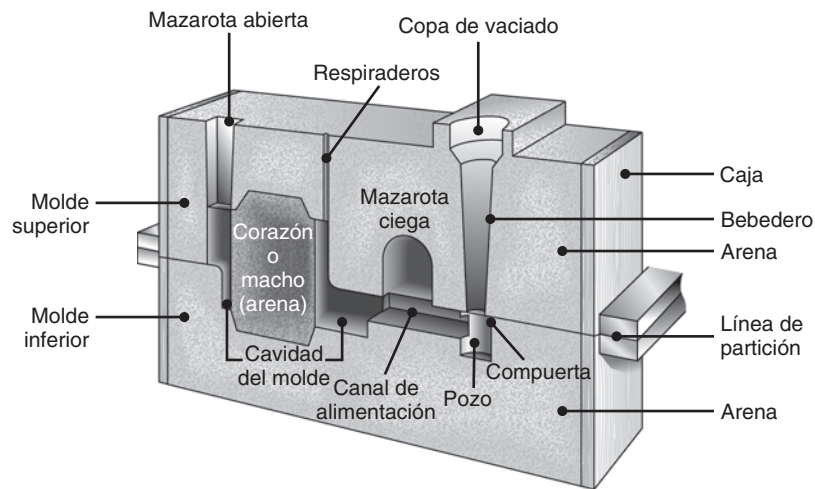


FIGURA 11.3 Esquema de un molde de arena mostrando diferentes características.

tres tipos básicos de moldes de arena: de arena verde, de caja fría y sin cocción. El material más común es la **arena verde para moldeo**, que es una mezcla de arena, arcilla y agua. El término “verde” indica que la arena dentro del molde está húmeda o mojada mientras se vacía el metal en su interior. Éste es el método menos costoso para fabricar moldes y la arena se recicla fácilmente para su uso posterior. En el método de **superficie seca**, la superficie del molde se seca, ya sea guardando el molde en aire o secándolo con sopletes. Debido a su mayor resistencia, estos moldes se utilizan en general para fundiciones grandes.

En el proceso de **molde de caja fría** se mezclan diversos *aglutinantes* orgánicos e inorgánicos con la arena, para unir químicamente los granos y obtener una mayor resistencia. Estos moldes tienen dimensiones más precisas que los de arena verde, pero son más costosos. En el proceso de **molde no cocido** se agrega una resina sintética líquida a la arena y la mezcla se endurece a temperatura ambiente. Debido a que el aglutinamiento del molde en este proceso y en el de caja fría ocurre sin calor, se les llama **procesos de curado en frío**.

Los moldes de arena se secan en hornos (horneados) antes de vaciar el metal fundido; son más resistentes que los moldes de arena verde y proporcionan mejor precisión dimensional y acabado superficial a la fundición. Sin embargo, este método tiene las siguientes desventajas: (a) la distorsión del molde es mayor, (b) las fundiciones son más susceptibles al desgarramiento en caliente debido a que el molde es menos colapsable, y (c) la capacidad de producción es menor porque se requiere mucho tiempo para el secado.

A continuación se describen las principales características de los moldes de arena.

1. La **caja**, que soporta el propio molde. Los moldes de dos piezas constan de un **molde superior** y uno **inferior**; la unión entre ambos es la **línea de partición**. Cuando se utilizan más de dos piezas en un molde de arena, a las partes adicionales se les llama *centros*.
2. Una **copa de vaciado** o **basín**, en la cual se vierte el metal fundido.
3. Un **bebedero**, a través del cual el metal fundido fluye hacia abajo.
4. Un **sistema de canales de alimentación**, que llevan el metal fundido desde el bebedero hasta la cavidad del molde. Las **compuertas** son las entradas a dicha cavidad.

5. Las **mazarotas**, que suministran metal fundido adicional a la fundición conforme ésta se contrae durante la solidificación. En la figura 11.3 se muestran dos tipos de mazarotas, una *ciega* y una *abierta*.
6. Los **machos** o **corazones**, que son insertos hechos de arena. Se colocan en el molde para formar regiones huecas o para definir la superficie interior de la fundición. También se utilizan en la parte exterior de la misma a fin de formar características como letras sobre la superficie o cavidades externas profundas.
7. **Respiraderos**, o vientos, que se colocan en los moldes para extraer los gases producidos cuando el metal fundido entra en contacto con la arena en el molde y en el macho. También dejan escapar el aire de la cavidad del molde conforme el metal fundido fluye en su interior.

Modelos. Los *modelos* se utilizan para moldear la mezcla de arena y dar forma a la fundición; pueden estar hechos de madera, plástico o metal. La selección de un material para el modelo depende del tamaño y la forma de la fundición, la precisión dimensional, la cantidad de fundiciones requeridas y el proceso de moldeo. Debido a que los modelos se reutilizan para elaborar moldes, la resistencia y durabilidad del material elegido debe reflejar el número de fundiciones que dichos modelos producirán. Éstos pueden fabricarse de una combinación de materiales para reducir el desgaste en regiones críticas, y por lo general se recubren con un **agente de separación** para que la fundición se extraiga más fácilmente de los moldes.

Los modelos se pueden diseñar con distintas características para que se adapten a aplicaciones específicas y a los requerimientos económicos. Los **modelos de una sola pieza**, también llamados *modelos sueltos*, o *sólidos*, se utilizan por lo común para formas más simples y para producir cantidades bajas; suelen fabricarse con madera y son económicos. Los **modelos divididos** son de dos piezas y se elaboran de modo que cada parte forme una porción de la cavidad para la fundición; de esta manera se pueden producir fundiciones con formas complicadas. Los **modelos de placa bipartidos** son un tipo común de modelo montado en el que se construyen modelos de dos piezas, asegurando cada mitad de uno o más modelos divididos a los lados opuestos de una placa sencilla (fig. 11.4). En este tipo de construcciones, el sistema de alimentación se puede montar en el lado del molde superior. Estos modelos se utilizan a menudo junto con máquinas de moldeo y grandes lotes de producción de fundiciones más pequeñas.

Un importante desarrollo en la elaboración de moldes y modelos es la aplicación de la **producción rápida de prototipos** (capítulo 20). Por ejemplo, en la fundición en arena se puede fabricar un modelo en una máquina de este tipo y sujetarlo a una placa soporte en una fracción del tiempo y del costo de maquinar un modelo. Existen varias técnicas de producción rápida de prototipos con las que estas herramientas se pueden producir rápidamente.

El diseño del modelo es un aspecto crítico de toda la operación de fundición, pues debe considerar la **contracción del metal**, la facilidad de extracción del molde de arena mediante una ligera inclinación o ángulo de salida favorable de las superficies paralelas a la dirección de extracción (fig. 11.5) y el flujo apropiado del metal dentro de la cavidad del molde. Estos temas se describen con mayor detalle en el capítulo 12.

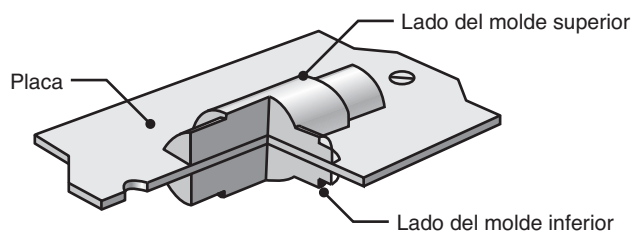


FIGURA 11.4 Modelo característico de placa bipartida metálica, utilizado en la fundición en arena.

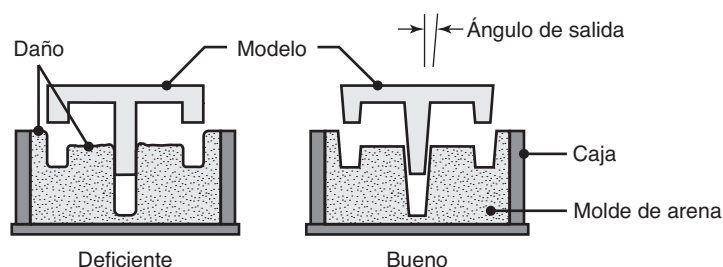


FIGURA 11.5 Ángulos de salida en modelos para facilitar la extracción del molde de arena.

Machos o corazones. Los *machos* o *corazones* se utilizan en las fundiciones con cavidades o pasajes internos, como los que se encuentran en un monobloque de motor automovilístico o en el cuerpo de una válvula. Se colocan en la cavidad del molde para formar superficies interiores de la fundición, y se retiran de la parte terminada durante el sacudido y procesamiento posteriores. Al igual que los moldes, los machos o corazones deben poseer resistencia, permeabilidad, capacidad para soportar el calor y colapsabilidad; de ahí que se produzcan con agregados de arena. El macho se ancla en **plantillas de corazones**, que son recesos agregados al modelo para soportar el macho y proporcionar un respiradero para el escape de los gases (fig. 11.6). Un problema común con los machos es que (para algunos requerimientos de fundición, como en el caso de que se requiera un receso) pueden carecer de soporte estructural suficiente en la cavidad. Es posible evitar que se muevan utilizando soportes metálicos (**soportes de corazones**) para fijarlos en su lugar (fig. 11.6b).

Por lo general, los corazones se fabrican como los moldes; la mayoría se elabora mediante procesos de cáscara (ver sección 11.2.2), sin cocción, o de caja fría. A los corazones se les da forma en las *cajas de corazones*, que se utilizan de manera muy similar a como se usan los modelos para formar moldes de arena.

Máquinas para moldeo de arena. El método para moldear más antiguo, que aún se utiliza en fundiciones sencillas, consiste en compactar la arena mediante martillado manual (*apisonado*), o compactándola alrededor del modelo. Sin embargo, en la mayoría de las operaciones, la mezcla de arena se apisona alrededor del modelo mediante *máquinas de moldeo*. Estas eliminan una laboriosa mano de obra, ofrecen una fundición de alta calidad al mejorar la aplicación y distribución de las fuerzas, manipulan el molde de manera controlada y cuidadosa e incrementan la capacidad de producción.

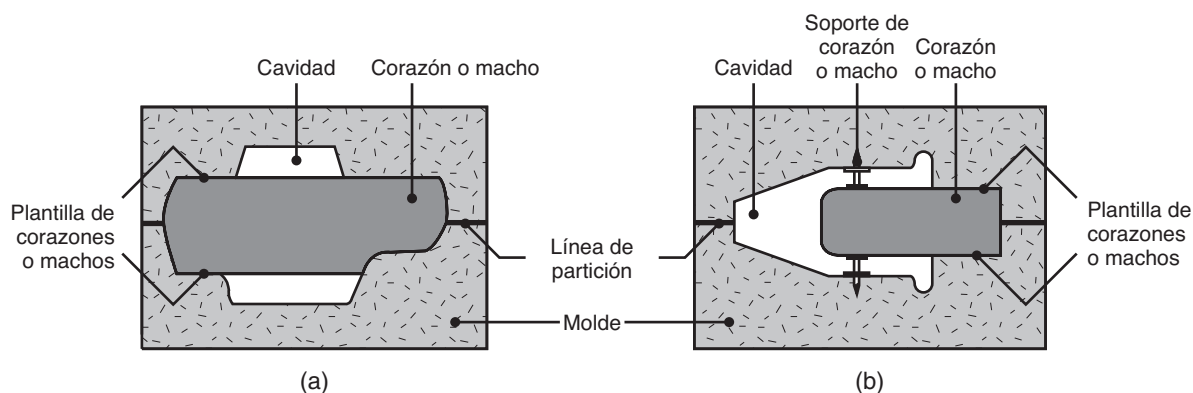


FIGURA 11.6 Ejemplos de corazones o machos de arena que muestran las plantillas y soportes para sostenerlos.

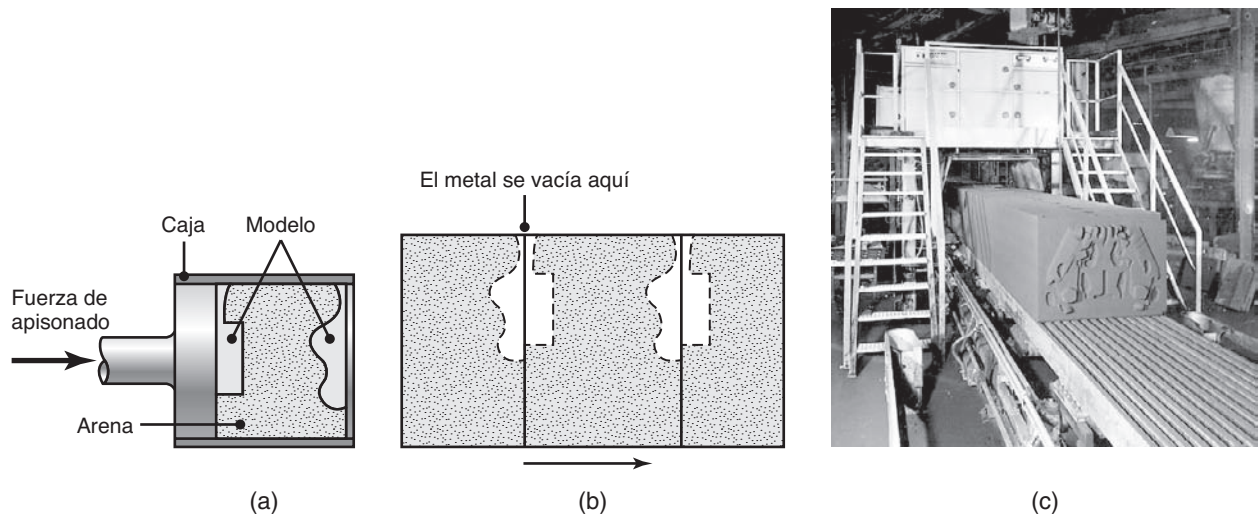


FIGURA 11.7 Moldeo vertical sin caja. (a) La arena se comprime entre las dos mitades del modelo. (b) Los moldes ensamblados pasan a lo largo de una línea de ensamble para vaciado. (c) Fotografía de una línea de moldeo vertical sin caja. Fuente: Cortesía de American Foundry Society.

En el **moldeo vertical sin caja**, las mitades del modelo forman una pared vertical contra la que se lanza y compacta la arena (fig. 11.7). Después, las mitades del molde se apilan de modo horizontal con la línea de partición orientada verticalmente, y se conducen a lo largo de un transportador de vaciado. Esta operación es sencilla, elimina la necesidad de manipular cajas y permite capacidades de producción muy altas, en particular cuando se automatizan otros aspectos de la operación (como la fabricación de corazones y el vaciado).

Los **lanzadores de arena** llenan de modo uniforme la caja con arena mediante una corriente de alta presión; se utilizan para llenar cajas grandes y por lo común los acciona una máquina. Un impulsor dentro de ésta lanza arena desde sus aspas (o copas) a velocidades tan elevadas que no sólo coloca la arena, sino que también la apisona apropiadamente.

En el **moldeo por impacto**, la arena se compacta mediante una explosión controlada o mediante la liberación instantánea de gases comprimidos. Este método produce moldes de una resistencia uniforme y buena permeabilidad.

En el **moldeo de vacío** (también conocido como *proceso V*), el modelo se cubre con una delgada lámina de plástico. La caja se coloca sobre dicho modelo y se llena con arena seca sin aglutinante. Después se pone una segunda lámina de plástico sobre la parte superior de la arena y una acción de vacío compacta la arena, de modo que puede retirarse el modelo. Las dos mitades del molde se producen de esta manera y se ensamblan. Durante el vaciado, el molde se mantiene al vacío, pero no la cavidad de la fundición. Cuando se solidifica el metal, el vacío se desactiva y la arena cae, liberando la fundición. El moldeo de vacío produce fundiciones con detalles superficiales y precisión dimensional de alta calidad; es adecuado en particular para fundiciones grandes y relativamente lisas (planas).

Operación de fundición en arena. Después de darse forma al molde y de colocarse los machos en su posición, las dos mitades (moldes superior e inferior) se cierran y se sujetan; se les agrega peso para evitar la separación de las secciones por la presión que ejerce el metal fundido cuando se vacía en la cavidad del molde. En la figura 11.8 se muestra una secuencia completa de operaciones de fundición en arena.

Después de solidificarse, la fundición se sacude para sacarla del molde y se retiran de ella la arena y las capas de óxido por vibración (utilizando un agitador) o con chorros de arena. Las fundiciones también se limpian mediante un chorro de granalla de acero o

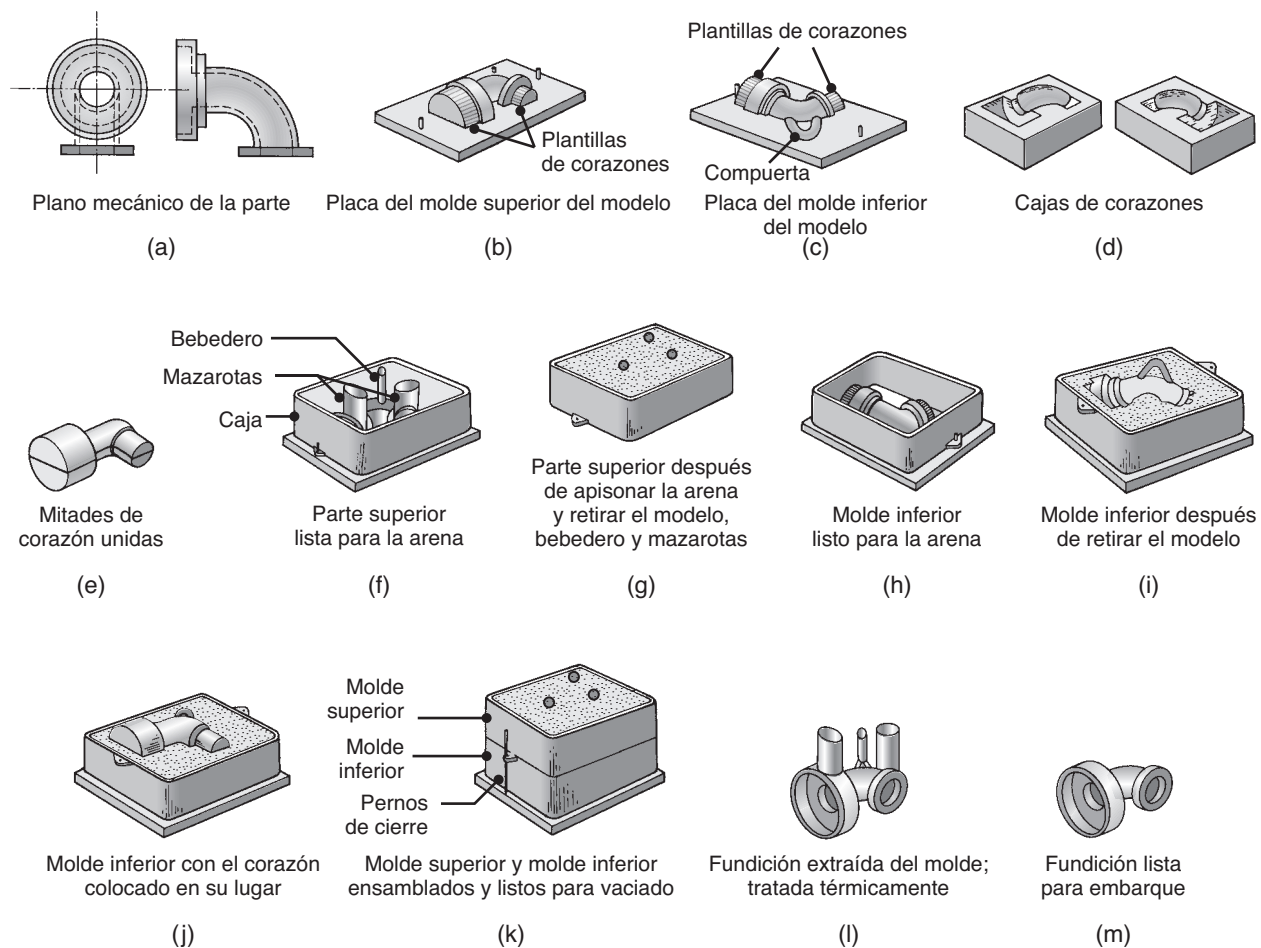


FIGURA 11.8 Esquema de la secuencia de operaciones para fundición en arena: (a) el plano mecánico de la parte se utiliza para generar un diseño para el modelo. En el plano deben considerarse factores como la contracción de la parte y el cono para extracción. (b-c) Los modelos se montan en placas equipadas con pernos para alineación. Obsérvese la presencia de plantillas para machos o corazones diseñados con el propósito de mantener los corazones en su lugar. (d-e) En las cajas de corazones se producen las mitades de éstos, que después se unen. Los corazones se utilizan para producir el área hueca de la parte mostrada en (a). (f) La mitad superior del molde se ensambla asegurando la placa superior del modelo a la caja mediante pernos de alineación y sujetando insertos a fin de formar el bebedero y las mazarotas. (g) La caja se apisona con arena y se retiran la placa y los insertos. (h) La parte inferior se produce de manera similar con el modelo insertado. Se coloca un tablero debajo del molde inferior y se alinea con pernos. (i) Se invierten el modelo, caja y tablero inferior y se retira el modelo, dejando la impresión apropiada. (j) Se coloca el corazón en su lugar dentro de la cavidad del molde inferior. (k) Se cierra el molde colocando la parte superior sobre la inferior y asegurando el ensamble con pernos. Después se somete la caja a presión para contrarrestar las fuerzas de flotación del líquido, que pueden levantar el molde superior. (l) Una vez que se solidifica el metal, se retira la fundición del molde. (m) Se cortan y reciclan el bebedero y las mazarotas, y la fundición se limpia e inspecciona y (de ser necesario) se le da tratamiento térmico. Fuente: Cortesía de Steel Founders' Society of America.

arena (*chorro de granalla*; sección 26.8). Las mazarotas y los sistemas de alimentación se cortan mediante oxígeno y gas combustible, por ejemplo oxiacetileno, aserrado, cizallado y ruedas abrasivas; o se recortan con matrices. Los sistemas de alimentación y las mazarotas de las fundiciones de acero también pueden retirarse con arcos de carbón-aire (sección 30.8) o con sopletes. Las fundiciones se limpian además por medios electroquímicos o mediante decapado con productos químicos para retirar óxidos superficiales.

La fundición puede recibir después *tratamiento térmico* a fin de mejorar ciertas propiedades que su uso requiere; estos procesos son importantes, particularmente para las fundiciones de acero. Las *operaciones de acabado* pueden comprender maquinado,

enderezado o forjado con matrices (dimensionado) para obtener las dimensiones finales. La *inspección* es un paso final básico que se realiza para asegurar que la fundición satisface todos los requisitos de diseño y control de calidad.

Moldeo con grafito compactado. En este proceso, el grafito compactado (sección 8.6) se utiliza en la fabricación de moldes para fundir metales reactivos, como titanio y zirconio. No se puede utilizar la arena porque estos metales reaccionan vigorosamente con la sílice. Los moldes se empaican como los de arena, se secan con aire, se hornean a 175 °C (350 °F), se calientan a 870 °C (1600 °F) y después se almacenan en humedad y temperatura controladas. Los procedimientos de fundición son similares a los de los moldes de arena.

11.2.2 Moldeo en cáscara

El *moldeo en cáscara* se desarrolló por primera vez en la década de 1940 y ha crecido de manera significativa porque puede producir muchos tipos de fundiciones, con tolerancias dimensionales cerradas y un buen acabado superficial, a bajo costo. Se aplica en pequeñas partes mecánicas que requieren alta precisión, como las cajas para engranes, cabezas de cilindros y bielas. El proceso también se utiliza ampliamente para producir corazones o machos de moldeo de alta precisión. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades del moldeo en cáscara.

En este proceso, un modelo montado, fabricado con un metal ferroso o aluminio, (a) se calienta a entre 175 °C y 370 °C (350 °F a 700 °F), (b) se recubre con un agente de separación (como la silicona) y (c) se sujeta a una caja o cámara. Ésta contiene arena fina mezclada con entre 2.5% y 4% de un aglutinante de resina termofija (como el fenol-formaldehído), que recubre las partículas de arena. Luego la caja se voltea (fig. 11.9) o la mezcla de arena se sopla sobre el modelo para cubrirlo.

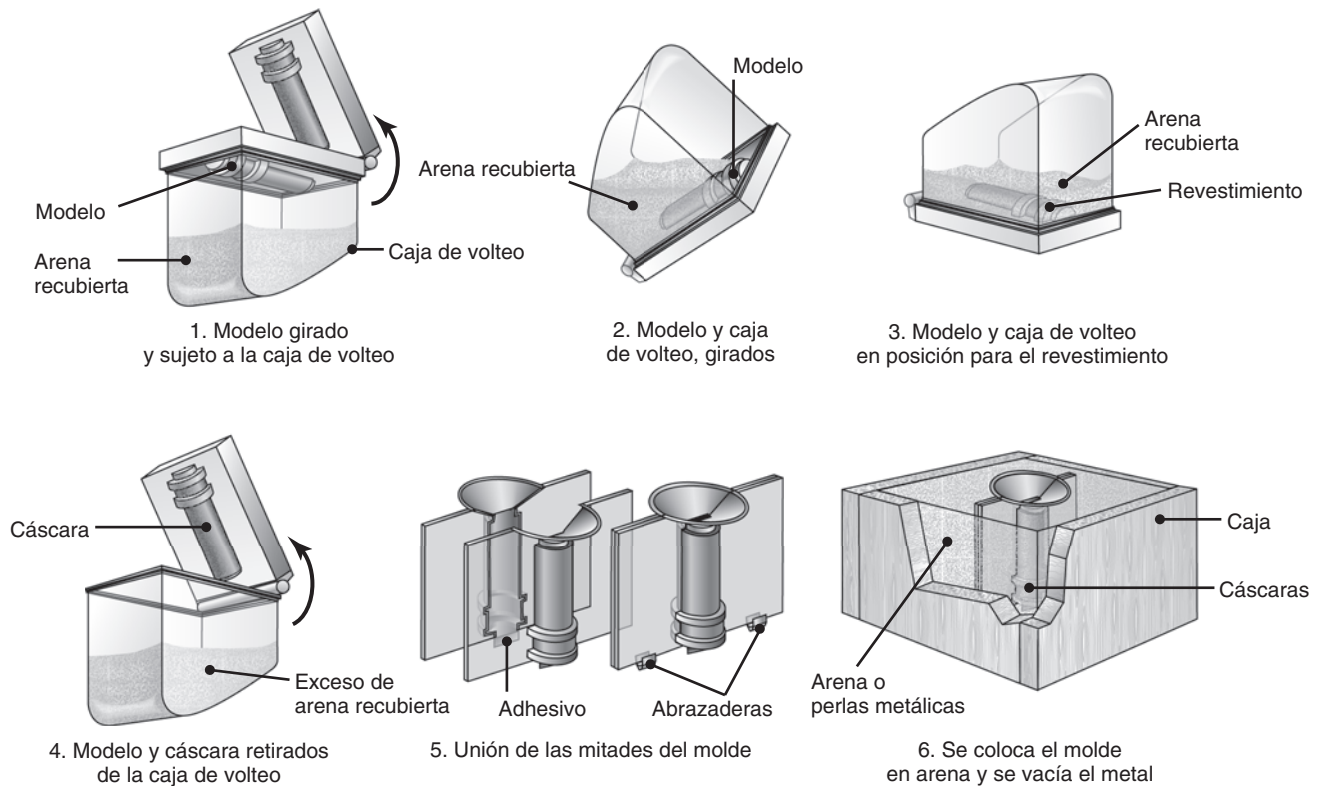


FIGURA 11.9 Proceso de moldeo en cáscara, también llamada técnica de la *caja de volteo*.

Después se coloca el ensamble en un horno por un periodo corto para que se complete el curado de la resina. En la mayoría de las máquinas de moldeo en cáscara, el horno consiste en una caja metálica con quemadores de gas que giran sobre el molde en cáscara para curarlo. La cáscara se endurece alrededor del modelo y se retira utilizando pernos integrados en él. De esta manera se producen dos medias cáscaras que se unen o sujetan para formar un molde.

Se puede determinar con precisión el espesor de la cáscara controlando el tiempo que el modelo está en contacto con el molde. De esta manera, será posible formarla con la resistencia y rigidez requeridas para soportar el peso del líquido fundido. Las cáscaras son ligeras y delgadas (por lo general de 5 mm a 10 mm, 0.2 a 0.4 pulgadas) y, en consecuencia, sus características térmicas se diferencian de las de los moldes más gruesos.

La arena en cáscara tiene menos permeabilidad que la utilizada para el moldeo en arena verde, ya que su tamaño de grano es mucho menor. Asimismo, la descomposición del aglutinante de la arena produce un gran volumen de gas, por lo cual, a menos que los moldes se ventilen apropiadamente, el aire y los gases atrapados causarían serios problemas en el moldeo en cáscara de las fundiciones ferrosas. La alta calidad de la fundición terminada puede reducir de modo significativo los costos de limpieza, maquinado y acabado. Las formas complejas se pueden producir con menos mano de obra y el proceso puede automatizarse con gran facilidad.

11.2.3 Fundición en molde de yeso

A este proceso, y a los procesos de molde de cerámica y de fundición de revestimiento descritos en las secciones 11.2.4 y 11.2.6, se les conoce como **fundición de precisión**, debido a la gran exactitud dimensional y el buen acabado superficial obtenido. Las partes características fabricadas por este medio son los componentes de cerraduras, engranes, válvulas, accesorios, herramental y ornamentos. En general las fundiciones pesan menos de 10 kg (22 libras) y se encuentran en el intervalo de 125 g a 250 g (1/4 a 1/2 libra), aunque pueden producirse piezas tan ligeras como 1 g (0.035 onza). En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en molde de yeso.

En el *proceso de moldeo en yeso*, el molde se fabrica con blanco de París (yeso o sulfato de calcio), talco y harina de sílice a fin de mejorar la resistencia y controlar el tiempo necesario para que se endurezca el yeso. Estos componentes se mezclan con agua, y el lodo resultante se vierte sobre el modelo. Una vez que se endurece el yeso (por lo general antes de 15 minutos), se le retira y el molde se seca a una temperatura de entre 120 °C y 260 °C (250 °F a 500 °F) para eliminar la humedad. Se pueden utilizar temperaturas mayores de secado, según el tipo de yeso. Las mitades del molde se ensamblan para formar la cavidad correspondiente y se precalientan a unos 120 °C (250 °F). Después se vacía el metal fundido dentro del molde.

Debido a que los moldes de yeso tienen muy baja permeabilidad, los gases generados al solidificarse el metal no pueden escapar; en consecuencia, el metal fundido se vierte en vacío o a presión. La permeabilidad del molde se puede incrementar sustancialmente por medio del *proceso Antioch*, en el que los moldes se deshidratan en una *autoclave* (horno presurizado) de 6 a 12 horas y después se rehidratan en aire por 14 horas. Otro método para aumentar la permeabilidad consiste en utilizar yeso espumado, que contiene burbujas de aire atrapadas.

Por lo general, los modelos para el moldeo en yeso están hechos de materiales como las aleaciones de aluminio o de zinc, los plásticos termofijos y el bronce. Los modelos de madera no son adecuados para producir un gran número de moldes, ya que se encuentran en contacto constante con el lodo de yeso a base de agua. En virtud de que la temperatura máxima que puede soportar el molde es, por lo general, de unos 1200 °C (2200 °F), la fundición en molde de yeso sólo se utiliza para el aluminio, magnesio, zinc y algunas aleaciones a base de cobre. Las fundiciones tienen un buen acabado superficial con detalles finos. Debido a que los moldes de yeso poseen una conductividad térmica menor que la de los otros, las fundiciones se enfrían lentamente y, por ende, se obtiene

una estructura más uniforme de granos, con menos alabeo. El espesor de pared de las partes fundidas puede ser de 1 mm a 2.5 mm (0.04 a 0.1 pulgadas).

11.2.4 Fundición en molde cerámico

El *proceso de fundición en molde cerámico* (también llamado *fundición de revestimiento de molde superior e inferior*) es similar al proceso de molde de yeso, excepto porque utiliza materiales refractarios para el molde que se adecuan a las aplicaciones de alta temperatura. Las partes que más se producen son los propulsores, cortadores para operaciones de maquinado, matrices para trabajar los metales y moldes para fabricar componentes de plástico y hule. Mediante este proceso se han fundido partes hasta de 700 kg (1500 libras).

El lodo es una mezcla de zirconio de grano fino (ZrSiO_4), óxido de aluminio y sílice fundida, que se agrega a los agentes aglutinantes y se vierte sobre el modelo (fig. 11.10) que se ha colocado en una caja de moldeo.

El modelo puede estar hecho de madera o metal. Después del endurecimiento, los moldes (caras de cerámica) se retiran, se secan, se queman para eliminar la materia volátil y se hornean; se sujetan con firmeza y se utilizan como moldes totalmente de cerámica. En el *proceso Shaw*, las caras de cerámica se refuerzan con arcilla refractaria (que tolera altas temperaturas) para dar resistencia al molde. Posteriormente las caras se ensamblan como molde completo, listas para el vaciado.

La resistencia a la temperatura elevada por parte de los materiales refractarios para moldear permite utilizar estos moldes para fundir metales ferrosos y otras aleaciones de alta temperatura, aceros inoxidable y aceros para herramientas. Aunque el proceso es costoso, las fundiciones tienen buena precisión dimensional y gran acabado superficial en una amplia gama de tamaños y formas.

11.2.5 Fundición de modelo evaporativo (proceso a la espuma perdida)

A la fundición de modelo evaporativo (y a la fundición de revestimiento tratada después) también se les conoce como procesos de fundición de *modelo desechable*, o procesos de *molde-modelo desechable*. Son únicos, pues deben producirse un modelo y un molde para cada fundición, mientras que los modelos de los procesos ya descritos son reutilizables. Se aplican en cabezas para cilindros, monobloques para motores, cigüeñales, componentes para frenos, múltiples y bases para máquinas. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición de modelo evaporativo.

Este proceso utiliza un modelo de poliestireno que se evapora al contacto con el metal fundido, a fin de formar una cavidad para la fundición; también se le conoce como *fundición a la espuma perdida* y recibe el nombre comercial de proceso *molde lleno*. Se

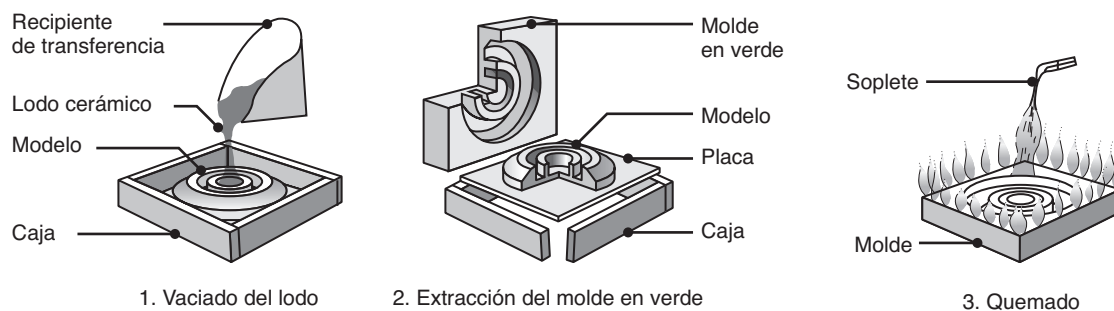


FIGURA 11.10 Secuencia de operaciones para fabricar un molde cerámico. Fuente: *Metals Handbook*, Vol. 5, 8ª. ed.

ha convertido en uno de los procesos de fundición más importantes para metales ferrosos y no ferrosos, particularmente en la industria automotriz.

En este proceso se colocan perlas de poliestireno desechable (EPS) sin tratamiento, que contienen de 5% a 8% de pentano (un hidrocarburo volátil) en una matriz precalentada que, por lo general está hecha de aluminio. El poliestireno se expande y adquiere la forma de la cavidad de la matriz. Se aplica calor adicional para fundir y unir las perlas. Después se enfría la matriz, se abre y se retira el modelo de poliestireno. También pueden producirse modelos complejos uniendo diversas secciones de modelos individuales mediante un adhesivo de fusión por calor (sección 32.4.1).

El modelo se recubre con un lodo refractario a base de agua, se seca y se coloca en una caja de moldeo. Después ésta se llena con arena fina suelta, que rodea y soporta al modelo (fig. 11.11), y se puede secar o mezclar con agentes aglutinantes para darle resistencia adicional. La arena se compacta periódicamente sin retirar el modelo de poliestireno; luego se vacía el metal fundido dentro del molde y vaporiza de inmediato el modelo. Al llenarse la cavidad, se reemplaza por completo el espacio que ocupaba antes el poliestireno. Este último es degradado (despolimerizado) por el calor y los productos de la degradación se ventilan hacia la arena circundante.

La velocidad del flujo de metal fundido dentro del molde depende del nivel de degradación del polímero. Algunos estudios han demostrado que dicho flujo es fundamentalmente laminar, con números de Reynolds que van de 400 a 3000. La velocidad del metal fundido en el frente metal-modelo de polímero (interfaz) va de 0.1 a 1.0 m/s y se puede controlar produciendo modelos con cavidades o secciones huecas. Por lo tanto, la velocidad aumenta conforme el metal fundido cruza estas regiones huecas, de manera similar al vaciado del metal dentro de una cavidad vacía.

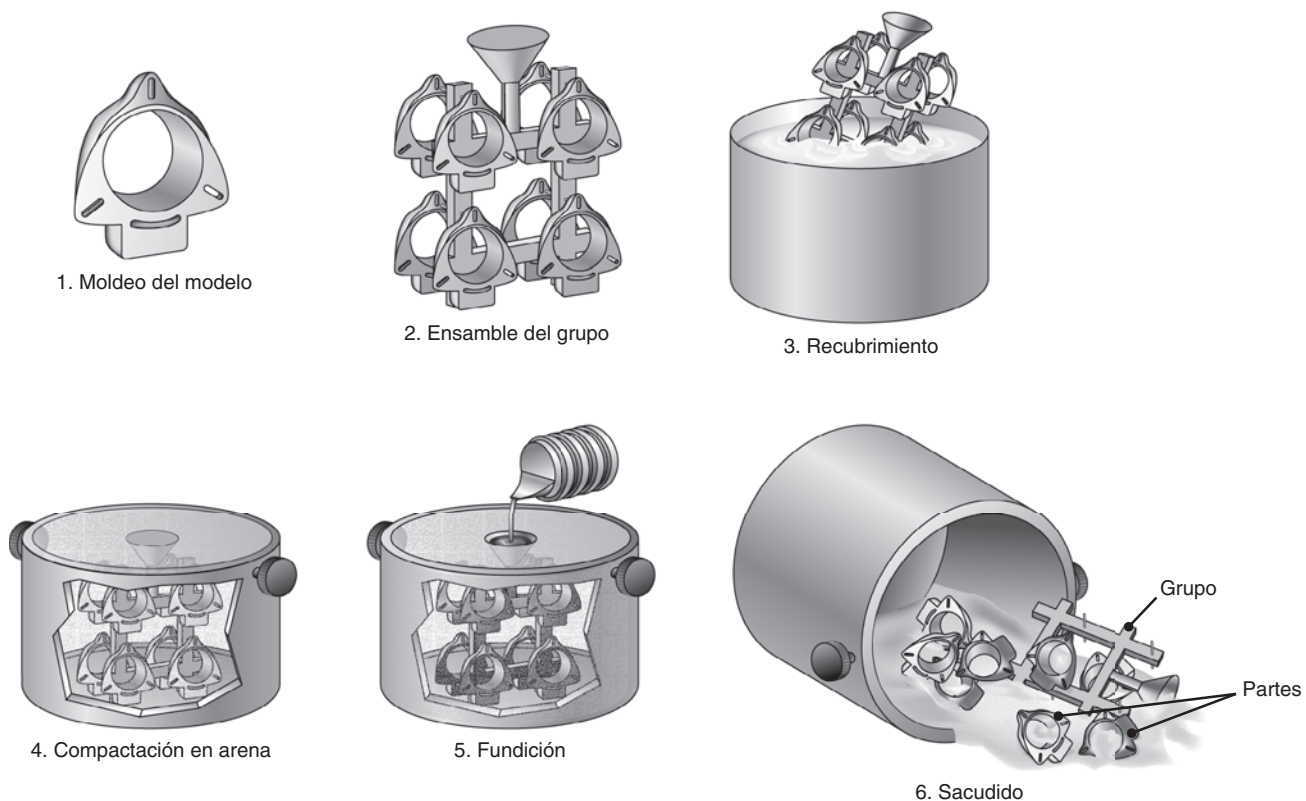


FIGURA 11.11 Esquema del proceso de fundición de modelo desechable, también conocido como fundición a la espuma perdida o fundición de modelo evaporativo.

Debido a que el polímero requiere mucha energía para degradarse, se presentan grandes gradientes térmicos en la interfaz metal-polímero. En otras palabras, el metal fundido se enfría de modo más rápido que si se vaciara directamente en una cavidad vacía y, en consecuencia, la fluidez es menor que en la fundición en arena. Esto tiene efectos importantes en la microestructura de toda la fundición y puede llevar a una solidificación direccional del metal. También pueden utilizarse el polimetilmetacrilato (PMMA) y el carbonato de polialquileo como materiales para modelos en fundiciones ferrosas.

El proceso de modelo evaporativo tiene muchas ventajas sobre otros métodos de fundición:

- El proceso es relativamente simple porque no existen líneas de partición, machos o corazones, o sistemas de mazarotas. De ahí que tenga flexibilidad de diseño.
- El proceso requiere cajas de moldeo económicas.
- El poliestireno es barato y se puede procesar fácilmente para producir modelos con formas complejas, tamaños diversos y detalles superficiales finos.
- La fundición requiere operaciones mínimas de acabado y limpieza.
- El proceso se puede automatizar y es económico para grandes lotes de producción. Sin embargo, hay que tomar en cuenta el costo de producción de la matriz que se utiliza al expandir las perlas de poliestireno para fabricar el modelo y la necesidad de dos juegos de herramental. De igual manera, el proceso sirve para nuevos diseños de fundición y no para los diseños existentes.

En una modificación del proceso de modelo evaporativo, llamada *proceso Replicast C-S*, una cáscara de cerámica circunda el modelo de poliestireno, que se quema antes de vaciar el metal fundido dentro del molde. Su principal ventaja sobre la fundición de revestimiento (que utiliza modelos de cera, sección 11.2.6) es que se evita por completo la inclusión de carbono en el metal. Desarrollos posteriores en la fundición de modelo evaporativo incluyen la producción de compósitos con matriz metálica (secciones 9.5 y 19.14). Durante el moldeo del modelo de polímero, se le insertan fibras o partículas que después se vuelven parte integral de la fundición. Técnicas adicionales incluyen la modificación y el refinamiento del grano de la fundición mediante refinadores de grano y aleaciones modificadoras maestras (sección 11.7) dentro del modelo cuando éste se moldea.

ESTUDIO DE CASO 11.1 | Fundición a la espuma perdida de monobloques para motores

Una de las partes más importantes del motor de combustión interna es el monobloque, el cual forma la envolvente del motor, aporta la estructura básica que encierra pistones y cilindros y resiste una presión significativa durante la operación.

Al advertir las presiones de la industria en favor de diseños de alta calidad, bajo costo y ligereza, Mercury Castings construyó una línea de fundición a la espuma perdida con el propósito de producir monobloques de aluminio para motores y cabezas de cilindros. Un ejemplo de una parte producida mediante fundición a la espuma perdida es un monobloque para motor de tres cilindros de 60 hp, utilizado en aplicaciones marinas y que se ilustra en la figura 11.12. Antes manufacturado como ocho fundiciones a presión por separado, el monobloque pasó así a sólo una fundición a la espuma perdida, de 22 libras, con un ahorro en peso y costo de 2 libras y 25 dólares por cada monobloque, respectivamente. Este tipo de fundición también permitió consolidar la cabeza de los cilindros del motor y los sistemas de escape y enfriamiento del monobloque, además de eliminar el maquinado asociado y los sujetadores requeridos en los diseños de fundición en arena o a presión. Asimismo, como el modelo contenía orificios que se podían fundir sin el uso de machos, se eliminaron numerosas operaciones de taladrado.



(a)



(b)

FIGURA 11.12 (a) El metal se vacía dentro del molde para fundir a la espuma perdida un motor marino de tres cilindros de 60 hp; (b) parte trasera del motor terminado. Fuente: Cortesía de Mercury Marine.

Mercury Marine también estaba en pleno desarrollo de un nuevo motor V6 utilizando una aleación de aluminio resistente a la corrosión y con mayor resistencia al desgaste. Este diseño de motor también requería la integración del monobloque de los cilindros y la cabeza, pues tenía secciones huecas para enfriamiento por chaqueta de agua que no se podían fabricar con corazones en la fundición a presión o mediante moldeo semipermanente (los procesos utilizados para sus otros monobloques V6). Con base en el éxito obtenido con el monobloque de tres cilindros a la espuma perdida, los ingenieros aplicaron la misma fundición a la matriz del monobloque V6. Ahora el nuevo monobloque de motor comprende una sola fundición, más ligera y económica que los diseños anteriores. Producido con una cabeza de cilindros y un sistema de escape y enfriamiento integrados, este componente se funde hueco a fin de crear un enfriamiento por chaqueta de agua más eficiente para la operación del motor.

La compañía también ha desarrollado un proceso presurizado a la espuma perdida. Se fabrica un molde de espuma, se coloca en una caja de moldeo y se cubre con arena. Después la caja se pone dentro de un recipiente a presión, donde un robot vacía aluminio fundido sobre el modelo de poliestireno. Se cierra la tapa de dicho recipiente y se aplica una presión de 150 psi a la fundición hasta que solidifica. El resultado es una fundición con mejor precisión dimensional, menor porosidad y una resistencia mejorada en comparación con la fundición convencional a la espuma perdida.

Fuente: Cortesía de Mercury Marine.

11.2.6 Fundición por revestimiento

El proceso de *fundición por revestimiento*, también llamado **proceso a la cera perdida**, se utilizó por primera vez entre los años 4000 y 3000 a.C. Las partes producidas comúnmente son componentes para equipo de oficina y componentes mecánicos, como engr-

nes, válvulas y manerales. Por medio de este proceso se han fundido exitosamente partes hasta de 1.5 m (60 pulgadas) de diámetro, con un peso hasta de 1140 kg (2500 libras). En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición por revestimiento.

En la figura 11.13 se muestra la secuencia comprendida en la fundición por revestimiento. El modelo se fabrica con cera o con un plástico como el poliestireno, mediante moldeo o técnicas de elaboración rápida de prototipos. Después el modelo se sumerge en un lodo de material refractario, por ejemplo, arena sílice muy fina con aglutinantes, incluyendo agua, silicato de etilo y ácidos. Una vez que se ha secado este recubrimiento inicial, el modelo se recubre varias veces para aumentar su espesor y mejorar su resistencia.

El término *revestimiento* proviene del hecho de que el modelo se reviste (circunda) con material refractario. Los modelos de cera requieren un manejo cuidadoso porque no son suficientemente fuertes para resistir las fuerzas propias de la fabricación de moldes; sin embargo, a diferencia de los modelos de plástico, la cera se puede recuperar y usar de nuevo.

El molde de una pieza se seca al aire y se calienta a una temperatura de 90 °C a 175 °C (200 °F a 375 °F). Se sostiene en posición invertida por unas 12 horas para fundir y extraer la cera. Después se le aplican entre 650 °C a 1050 °C (1200 °F a 1900 °F) por casi cuatro horas (dependiendo del metal a fundir) a fin de sacar el agua de la cristalización (agua combinada químicamente) y quemar cualquier cera residual. Una vez que se ha vaciado y solidificado el metal, el molde se rompe y la fundición se retira. Se pueden unir varios modelos para hacer un molde, al que entonces se le llama *árbol* (fig. 11.13), lo que

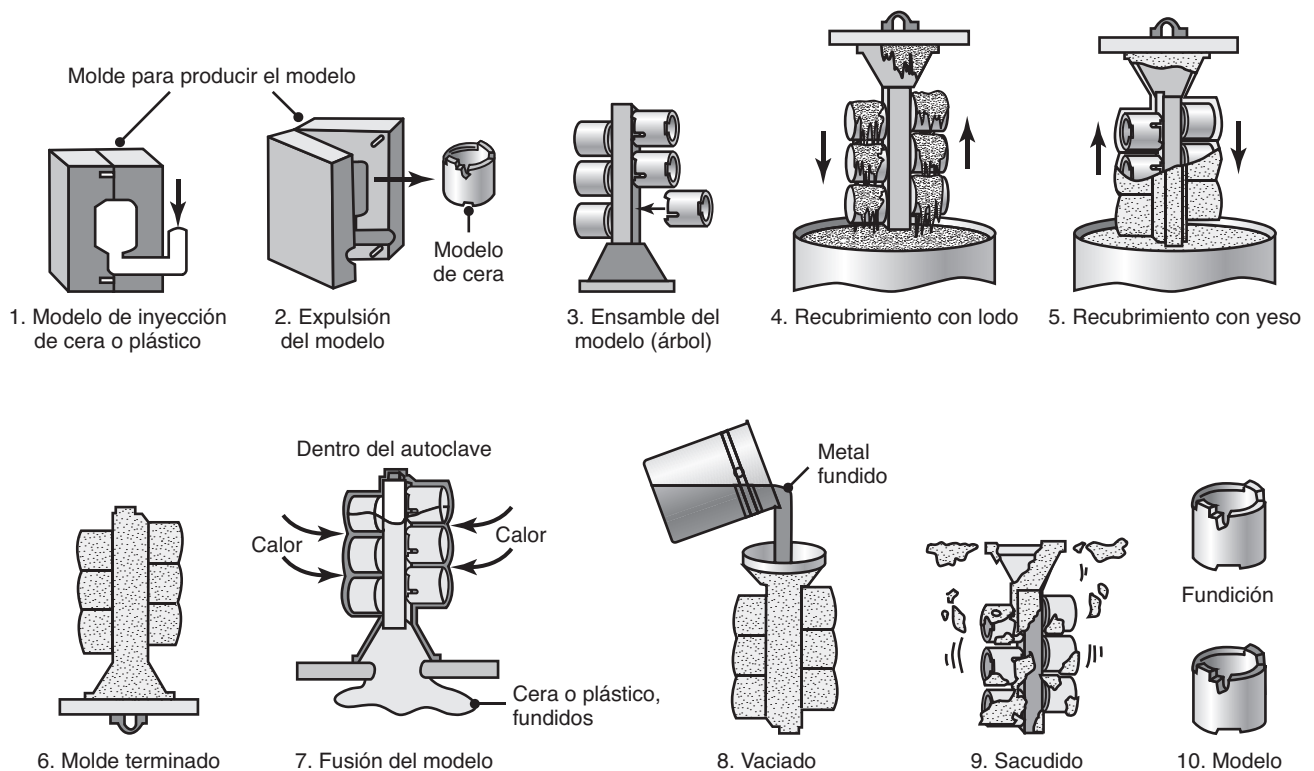


FIGURA 11.13 Esquema del proceso de fundición por revestimiento (a la cera perdida). Las fundiciones producidas por este método se pueden hacer con detalles muy finos a partir de una variedad de metales. *Fuente:* Cortesía de Steel Founder's Society of America.

incrementa de modo significativo la capacidad de producción. Para partes pequeñas, se puede insertar el árbol dentro de una caja de moldeo permeable y revestirla de lodo líquido. Después se coloca el revestimiento en una cámara y se evacua (para retirar las burbujas de aire) cuando se solidifica el molde. En general, la caja de moldeo se coloca en una máquina de fundición de vacío para que el metal fundido se introduzca en el molde permeable y sobre la parte, produciendo detalles finos.

Aunque los materiales del molde y la mano de obra involucrada hacen costoso el proceso a la cera perdida, éste es adecuado para fundir aleaciones de alto punto de fusión con buenos acabados superficiales y tolerancias dimensionales cerradas; se requieren muy pocas, o ninguna, operaciones de acabado, que de otra manera aumentarían de modo significativo el costo total de la fundición. Este proceso es capaz de producir formas intrincadas, con partes que pesan desde 1 g hasta 35 kg (0.035 onzas a 75 libras) a partir de una amplia variedad de metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas. Los avances recientes incluyen la fundición de componentes de titanio para motores y marcos estructurales para aeronaves con paredes de 1.5 mm (0.060 pulgadas) de espesor, compitiendo así con las estructuras de láminas metálicas utilizadas antes.

Fundición por revestimiento de cáscara cerámica. Una variación del proceso de fundición por revestimiento es la *fundición de cáscara cerámica*. Utiliza el mismo tipo de modelo de cera o plástico, que primero se sumerge en gel de silicato de etilo y luego en una cama fluida (ver sección 4.12) de sílice fundida de grano fino, o harina de zirconio. Después el modelo se sumerge en sílice de grano más grueso para integrar recubrimientos adicionales y desarrollar un espesor apropiado a fin de que el modelo pueda soportar el impacto térmico debido al vaciado. El resto del procedimiento es similar al de la fundición por revestimiento. Este proceso es económico y se utiliza extensamente para la fundición de precisión de aceros y aleaciones de alta temperatura.

En la figura 11.14 se muestra la secuencia de operaciones comprendidas en la fabricación de un disco para turbina por este método. Si se utilizan corazones de cerámica en la fundición, se retiran mediante lixiviado con soluciones cáusticas a alta presión y temperatura. El metal fundido se puede vaciar en vacío para extraer los gases generados y reducir la oxidación, mejorando así la calidad de la fundición. Para disminuir aún más la microporosidad, las fundiciones producidas mediante este y otros procesos se someten a prensado isostático en caliente. Las fundiciones de aluminio, por ejemplo, se someten a una presión de gas de hasta 100 MPa (15 ksi) a 500 °C (900 °F).

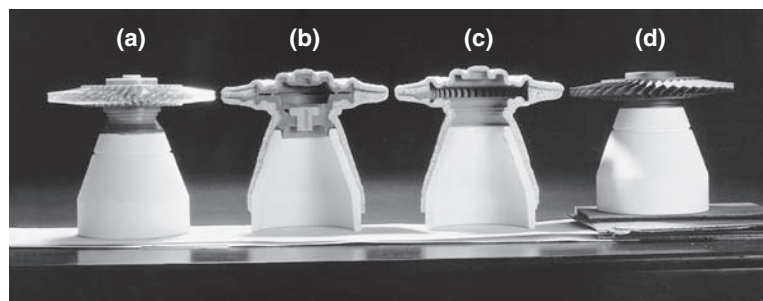


FIGURA 11.14 Fundición por revestimiento de un rotor fundido integralmente para una turbina de gas. (a) Ensamble del modelo de cera. (b) Cáscara cerámica alrededor del modelo de cera. (c) Se funde la cera y se llena el molde, en vacío, con una superaleación fundida. (d) Rotor fundido, producido con una forma neta o cercana a la neta. *Fuente:* Cortesía de Howmet Corporation.

EJEMPLO 11.1 Componentes de superaleaciones fundidas por revestimiento para turbinas de gas

Desde la década de 1960, las superaleaciones fundidas por revestimiento han reemplazado a sus contrapartes forjadas en las turbinas de gas de alto rendimiento. Gran parte del desarrollo ha tenido lugar al producir superaleaciones más limpias (base níquel y cobalto). Se han obtenido mejoras en las técnicas de fusión y fundición, como la fusión por inducción al vacío, y al utilizar controles con microprocesadores. Se han reducido continuamente los niveles de impurezas y de inclusiones, mejorando la resistencia y la ductilidad de estos componentes. Dicho control es fundamental, ya que estas partes operan a temperaturas sólo 50 °C (90 °F) debajo de la temperatura solidus de la aleación (sección 4.3).

En la mitad superior de la figura 11.15 se muestra la microestructura de un rotor para turbina de gas, fundido en su totalidad por revestimiento. Obsérvense los granos equiaxiales finos y uniformes en toda la sección transversal del rotor. Los procedimientos incluyen el uso de una adición nucleante al metal fundido, un control estricto de su sobrecalentamiento, técnicas de vaciado y el control de la velocidad de enfriamiento de la fundición. Por el contrario, nótese la estructura de grano grueso en la mitad inferior de la figura 11.15, que muestra el mismo tipo de rotor fundido convencionalmente. Éste tiene propiedades inferiores si se compara con el rotor de grano fino. Debido a los desarrollos en estos procesos, la proporción de partes fundidas con respecto a otras partes en los motores para aeronaves se ha incrementado de 20% a cerca de 45% en peso.

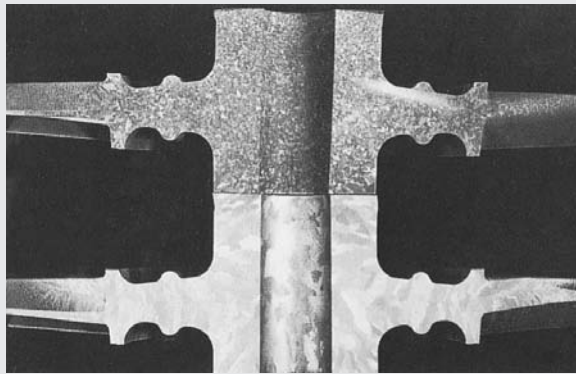


FIGURA 11.15 Sección transversal y microestructura de dos rotores: fundido por revestimiento (arriba); fundido convencionalmente (abajo). Fuente: *Advanced Materials and Processes*, octubre de 1990, página 25, ASM International.

11.3 | Procesos de fundición en molde permanente

Los procesos de fundición en molde permanente tienen ciertas ventajas sobre otros procesos de fundición, como se indica a continuación.

11.3.1 Fundición en molde permanente

En la *fundición en molde permanente* (también llamada *fundición en molde duro*), se fabrican dos mitades de un molde con materiales de alta resistencia a la erosión y a la fatiga térmica, como el hierro fundido, acero, latón, grafito o aleaciones metálicas refractarias. Las partes que más se producen mediante este proceso son los pistones automovilísticos,

cabezas para cilindros, bielas, discos para engranes de electrodomésticos y artículos de cocina. Las partes que pueden producirse económicamente suelen pesar menos de 25 kg (55 libras), aunque se han producido fundiciones especiales que pesan cientos de kilogramos utilizando este proceso. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición en molde permanente.

La cavidad del molde y el sistema de alimentación se maquinan en el molde, por lo que se vuelven parte integral del mismo. Para producir fundiciones con cavidades internas, antes se colocan machos fabricados con metal o agregados de arena en el molde. Los materiales característicos de los machos o corazones son arena aglutinada con aceite o resina, yeso, grafito, hierro gris, acero de bajo carbono y acero para matrices de trabajo en caliente. El que se usa más es el hierro gris, sobre todo en grandes moldes para fundiciones de aluminio y magnesio. También se utilizan insertos para diversas partes del molde.

Para aumentar la vida de los moldes permanentes, las superficies de la cavidad del molde suelen recubrirse con un lodo refractario (como silicato de sodio y arcilla) o se rociaban con grafito después de algunas fundiciones. Estos recubrimientos también sirven como agentes de separación y como barrera térmica, controlando así la velocidad de enfriamiento de la fundición. Es posible que se requieran expulsores mecánicos (como pernos localizados en diferentes partes del molde) para retirar fundiciones complejas; por lo general los expulsores dejan pequeñas impresiones redondas.

Los moldes se sujetan por medios mecánicos y se calientan a entre 150 °C y 200 °C (300 °F a 400 °F) para facilitar el flujo del metal y reducir el daño térmico a las matrices debido a los altos gradientes de temperatura. Luego se vacía el metal fundido a través del sistema de alimentación. Tras la solidificación, se abren los moldes y se retira la fundición. Se utilizan medios especiales para enfriar el molde, incluyendo agua o aletas similares a las empleadas en los motores de motocicleta o podadoras de pasto, que enfrían el monobloque del motor.

Aunque la operación de fundición en molde permanente se realiza manualmente, puede automatizarse en grandes lotes de producción. La mayoría de las veces este proceso se utiliza para aluminio, magnesio, aleaciones de cobre y hierro gris debido a sus puntos de fusión, que por lo general son más bajos, aunque también se pueden fundir aceros mediante moldes de grafito o de metales resistentes al calor. Este método produce fundiciones con buen acabado superficial, tolerancias dimensionales cerradas, propiedades mecánicas buenas y uniformes, y grandes capacidades de producción. Aunque los costos del equipo pueden ser elevados debido al alto precio de las matrices, los costos de mano de obra se mantienen bajos automatizando el proceso. La fundición en molde permanente no es económica para pequeños lotes de producción ni para formas intrincadas, por la dificultad de retirar la fundición del molde. Sin embargo, pueden utilizarse machos o corazones de arena que se colapsan con facilidad y que después se retiran de la fundición, dejando intrincadas cavidades internas. A este proceso se le llama entonces **fundición de molde semipermanente**.

11.3.2 Fundición de vacío

En la figura 11.16 se muestra un esquema del proceso de *fundición de vacío*, o *proceso de baja presión contra-gravedad* (CL) (no confundir con el proceso de moldeo de vacío descrito en la sección 11.2.1). La fundición de vacío es una alternativa a la fundición por revestimiento, de molde en cáscara y de arena verde, y es sobre todo adecuada para formas complejas con paredes delgadas (0.75 mm; 0.03 pulgadas) con propiedades uniformes. Las partes más producidas son componentes de superaleaciones para turbinas de gas. Estas partes, que a menudo se encuentran en forma de superaleaciones para turbinas de gas, tienen paredes tan delgadas como 0.5 mm (0.02 pulgadas).

En este proceso, una mezcla de arena fina y uretano se moldea sobre matrices metálicas y se cura con vapor de amina. Después el molde se sostiene con un brazo robot y se sumerge parcialmente en el metal fundido que se mantiene en un horno de inducción. El metal se puede fundir en aire (*proceso CLA*) o en vacío (*proceso CLV*). El vacío redu-

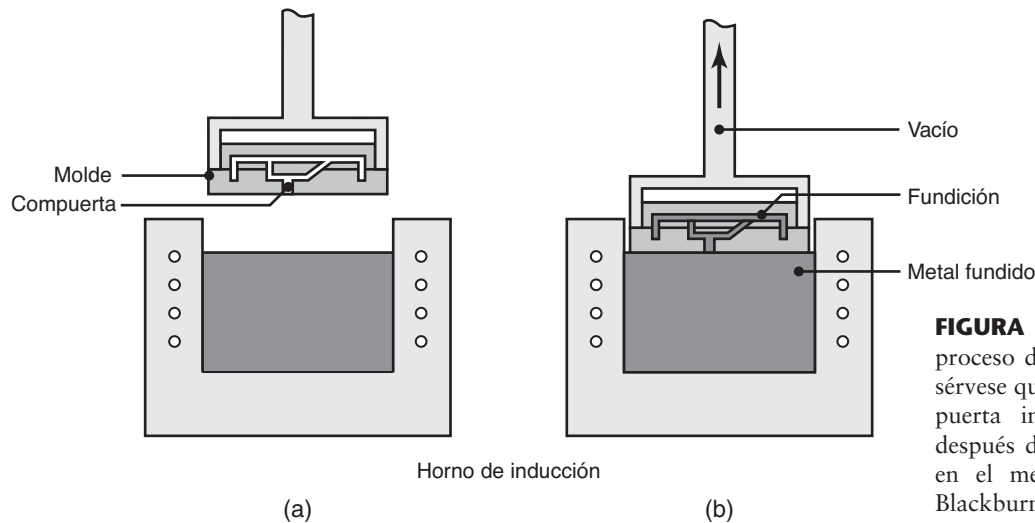


FIGURA 11.16 Esquema del proceso de fundición al vacío. Obsérvese que el molde tiene una compuerta inferior. (a) Antes y (b) después de la inmersión del molde en el metal fundido. Fuente: R. Blackburn.

ce la presión del aire dentro del molde a casi dos tercios de la presión atmosférica, introduciendo así el metal fundido dentro de las cavidades del molde a través de una compuerta en el fondo del molde. Por lo general, el metal en el horno se encuentra a una temperatura de 55 °C (100 °F) por encima de la temperatura liquidus de la aleación. En consecuencia, comienza a solidificarse en muy poco tiempo; una vez que se llena el molde, se retira del metal fundido.

El proceso puede automatizarse y los costos de producción ser similares a los de la fundición en arena verde. Por medio de este método se han fundido al vacío partes de acero inoxidable, al carbono y de alta y baja aleación que pesan hasta 70 kg (155 libras). Las partes CLA se producen con facilidad en volúmenes elevados y a un costo relativamente bajo. Por lo general, las partes CLV comprenden metales reactivos, como el aluminio, titanio, zirconio y hafnio.

11.3.3 Fundición hueca

Se había observado en la figura 10.11 que en una fundición primero se desarrollaba una capa superficial solidificada, la cual se volvía más gruesa con el tiempo. Utilizando este principio, se pueden hacer fundiciones huecas de paredes delgadas mediante la fundición de molde permanente: un proceso denominado *fundición hueca*, que es adecuado para pequeños lotes de producción y que se utiliza en la fabricación de objetos ornamentales y decorativos (como bases y vástagos para lámparas) y en juguetes con metales de bajo punto de fusión, como zinc, estaño y aleaciones de plomo. El metal fundido se vacía en el molde metálico. Una vez que se obtiene el espesor deseado de la capa superficial solidificada, se invierte (o se gira) el molde y se vacía el metal líquido restante. Después se abren las dos mitades del molde y se retira la fundición. Obsérvese que esta operación es muy similar a la fabricación de formas huecas de chocolate, huevos y otras confiterías.

11.3.4 Fundición a presión

En los dos procesos de molde permanente ya descritos, el metal fundido fluye hacia la cavidad del molde por gravedad. En la *fundición a presión* (también llamada *fundición de baja presión* o de *vaciado a presión*), el metal fundido se fuerza hacia arriba mediante presión de gas, dentro de un molde de grafito o metálico. La presión se mantiene hasta que el metal se solidifica por completo en el molde. El metal fundido también se puede forzar hacia arriba por medio de un vacío, que retira los gases disueltos y produce una fundición

con menor porosidad. La fundición a presión suele utilizarse en fundiciones de alta calidad, como las ruedas de acero para carros de ferrocarril, aunque éstas también se pueden fundir en moldes de arena o en moldes semipermanentes hechos de grafito y arena.

N. del RT. Este proceso se conoce comúnmente como inyección de metales.

11.3.5 Fundición a presión en matriz N. del RT.

El proceso de *fundición a presión en matriz*, desarrollado a principios de 1900, es un ejemplo más de la fundición en molde permanente. Las partes que por lo común se producen mediante la fundición a presión en matriz son cajas y monobloques para motores, componentes para máquinas de oficina y artículos electrodomésticos, herramientas manuales y juguetes. El peso de la mayoría de las fundiciones va de menos de 90 g (3 onzas) a casi 25 kg (55 libras). Los costos de los equipos, en particular el de las matrices, es alto, pero en general los costos de la mano de obra son bajos debido a que ahora el proceso es semi (o totalmente) automatizado. La fundición a presión en matriz es económica para grandes lotes de producción. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de este tipo de fundición.

En este proceso, el metal fundido se fuerza dentro de la cavidad de la matriz a presiones que varían de 0.7 a 700 MPa (0.1 a 100 ksi). No debe confundirse el término europeo *fundición a presión en matriz* (o simplemente fundición a presión), que se aborda en esta sección, con el término *fundición a presión* descrito en la sección 11.3.4. Existen dos tipos básicos de máquinas de fundición a presión en matriz: de cámara caliente y de cámara fría.

El **proceso de cámara caliente** (fig. 11.17) comprende el uso de un pistón, que atrapa cierto volumen de metal fundido y lo fuerza dentro de la cavidad de la matriz a través de un cuello de ganso y una boquilla. Las presiones llegan hasta 35 MPa (5000 psi), con un promedio de unos 15 MPa (2000 psi). El metal se mantiene a presión hasta que se solidifica en la matriz. Para mejorar la vida de ésta y promover un enfriamiento rápido del metal (y de ese modo reducir el tiempo del ciclo de inyección), las matrices suelen enfriarse por circulación de agua o aceite a través de diversos pasajes dentro de su bloque. Por lo regular, las aleaciones de bajo punto de fusión (como el zinc, magnesio, estaño y plomo) se funden mediante este proceso. Los tiempos del ciclo varían de 200 a 300 inyecciones individuales por hora para el zinc, aunque se pueden fundir componentes muy pequeños, como los dientes para cremalleras, a razón de 18,000 inyecciones por hora.

En el **proceso de cámara fría** (fig. 11.18), se vacía metal fundido dentro del cilindro de inyección (*cámara de inyección*). Esta cámara no se calienta, de ahí el término *cámara*

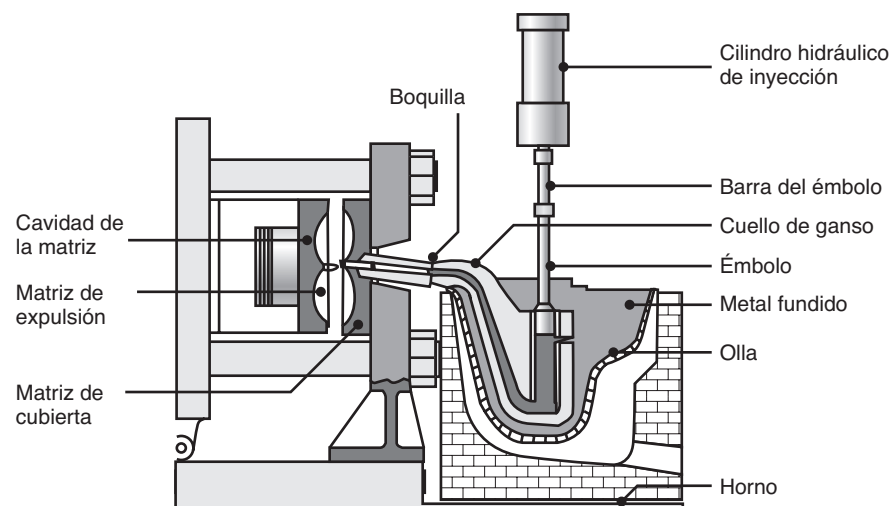


FIGURA 11.17 Esquema del proceso de fundición a presión en matriz de cámara caliente.

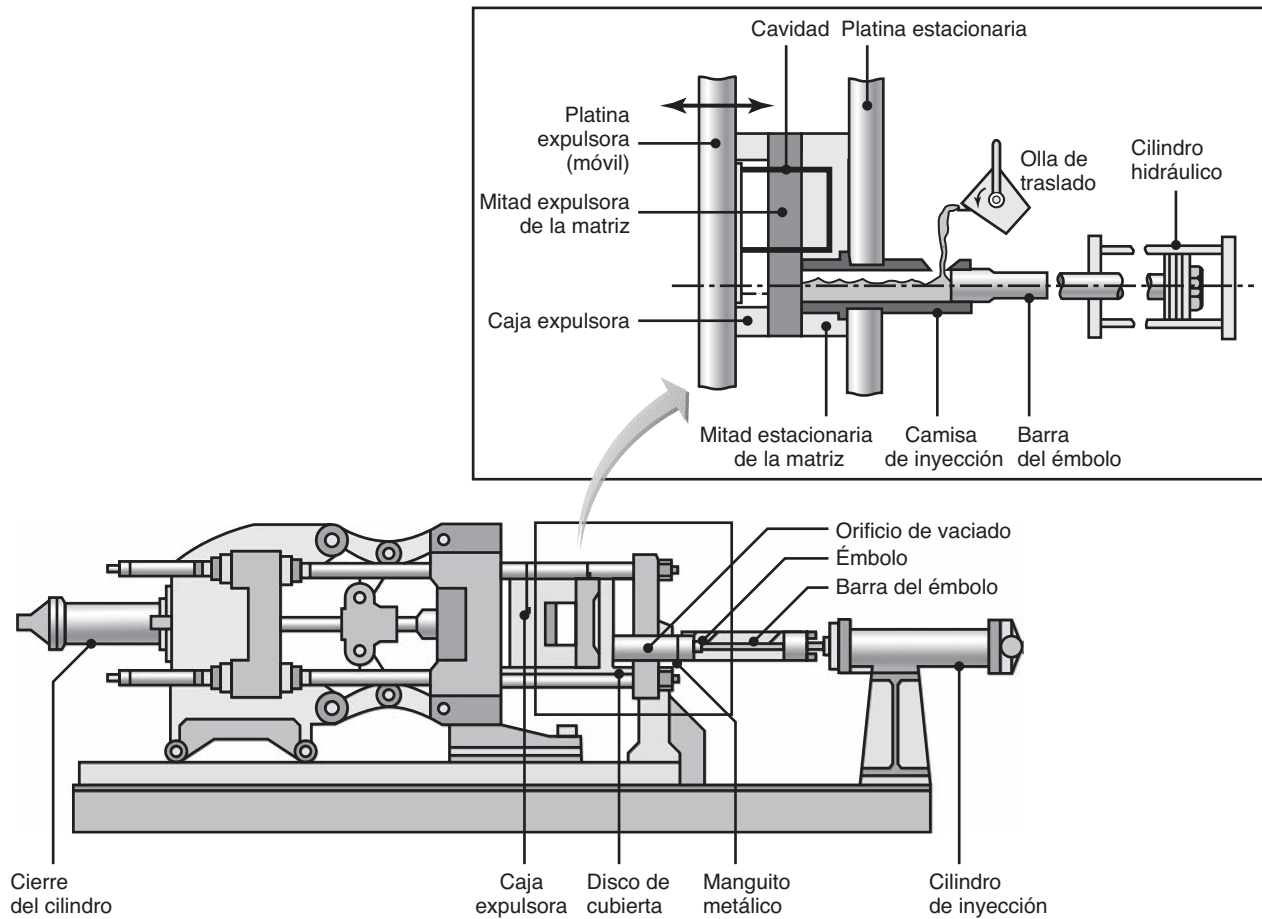


FIGURA 11.18 Esquema del proceso de fundición a presión en matriz de cámara fría. Estas máquinas son grandes en comparación con el tamaño de la fundición debido a las grandes fuerzas requeridas para mantener juntas las dos mitades de las matrices cerradas a presión.

fría. El metal se fuerza dentro de la cavidad de la matriz a presiones que generalmente van de 20 a 70 MPa (3 a 10 ksi), aunque pueden ser tan elevadas como 150 MPa (20 ksi).

Las máquinas pueden ser horizontales (como en la figura) o verticales, en cuyo caso la cámara de inyección es vertical. Normalmente, las aleaciones de alto punto de fusión de aluminio, magnesio y cobre se funden mediante este método, aunque también pueden fundirse otros metales (incluyendo los ferrosos). Las temperaturas de los metales fundidos inician en casi 600 °C (1150 °F) para el aluminio y algunas aleaciones de magnesio, y aumentan de modo considerable para las aleaciones de base cobre y de base hierro.

Capacidades de proceso y selección de la máquina. La fundición a presión en matriz tiene la capacidad de producir con rapidez partes fuertes de alta calidad y formas complejas, en particular con aluminio, bronce, magnesio y zinc (tabla 11.3). También proporciona una buena precisión dimensional y detalles de la superficie, por lo que las partes requieren muy pocas (o ninguna) operaciones de maquinado o terminado (formado de forma neta). Debido a las altas presiones involucradas, se producen paredes hasta de 0.38 mm (0.015 pulgadas), que son mucho más delgadas que las obtenidas por otros medios de fundición. Sin embargo, permanecen las marcas de los expulsores, al igual que pequeñas cantidades de proyecciones (material delgado comprimido entre las matrices) en la línea de partición de la matriz.

TABLA 11.3

Propiedades y aplicaciones características de algunas aleaciones comunes de fundición a presión en matriz				
Aleación	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones
Aluminio 380 (3.5 de Cu-8.5 de Si)	320	160	2.5	Electrodomésticos, componentes automovilísticos, estructuras y cajas de motores eléctricos.
Aluminio 13 (12 de Si)	300	150	2.5	Formas complejas con paredes delgadas, partes que requieren resistencia a temperaturas elevadas.
Bronce 858 (60 de Cu)	380	200	15	Accesorios de plomería, candados, bujes, fundiciones ornamentales.
Magnesio AZ91 B (9 de Al-0.7 de Zn)	230	160	3	Herramientas eléctricas, partes automotrices, artículos deportivos.
Zinc No. 3 (4 de Al)	280	—	10	Partes automotrices, equipo de oficina, utensilios domésticos, accesorios de edificios, juguetes.
Zinc No. 5 (4 Al-1 Cu)	320	—	7	Electrodomésticos, partes automotrices, accesorios de edificios, equipo para negocios.

Fuente: American Die Casting Institute.

En la figura 11.1d se muestra una parte característica fabricada mediante fundición a presión en matriz; obsérvese lo intrincado de la forma y el fino detalle de la superficie. En la producción de ciertas partes, la fundición a presión en matriz puede competir de modo favorable con otros métodos de manufactura (como el estampado y forjado de láminas metálicas) y otros procesos de fundición. Además, debido a que el metal fundido se enfría con rapidez en las paredes de la matriz, la fundición tiene una capa superficial dura, de grano fino, con alta resistencia. En consecuencia, la relación resistencia a peso de las partes fundidas en matriz aumenta al disminuir el espesor de pared. Con un buen acabado superficial y una buena precisión dimensional, la fundición a presión en matriz puede producir superficies lisas para rodamientos que de otra manera se maquinarían normalmente.

Se pueden fundir integralmente a presión en matriz componentes como pernos, flechas y sujetadores roscados. Este proceso, denominado **moldeo con insertos**, es similar a la colocación de palitos de madera en las paletas antes de congelarlas (ver también la sección 19.3). Para que exista una buena resistencia entre las fases, las superficies de los insertos deben estar moleteadas (ver fig. 23.1f), ranuradas o estriadas. Por lo común, se utilizan insertos de acero, bronce y latón en aleaciones fundidas a presión en matriz. Al seleccionar los materiales para los insertos, debe tenerse en consideración la posibilidad de que ocurra corrosión galvánica. Para evitar este problema potencial, el inserto se puede aislar, recubrir o tratar superficialmente.

Debido a las altas presiones involucradas, las matrices para fundición a presión tienden a dividirse, a menos que se sujeten con firmeza. Por lo tanto, las máquinas para fundición a presión en matriz se clasifican según la fuerza que pueden ejercer para mantener cerradas las matrices. Las capacidades de las máquinas disponibles comercialmente varían de casi 25 a 3000 toneladas. Otros factores comprendidos en la selección de las máquinas para fundición a presión en matriz son el tamaño de esta última, la carrera del pistón, la presión de inyección y el costo.

Las matrices para fundición a presión (fig. 11.19) pueden ser de *una cavidad*, de *cavidades múltiples* (con varias cavidades idénticas), de *cavidades de combinación* (con varias cavidades diferentes) o *matrices unitarias* (matrices pequeñas y sencillas que pueden combinarse en dos o más unidades en una matriz maestra de sujeción). Por lo gene-

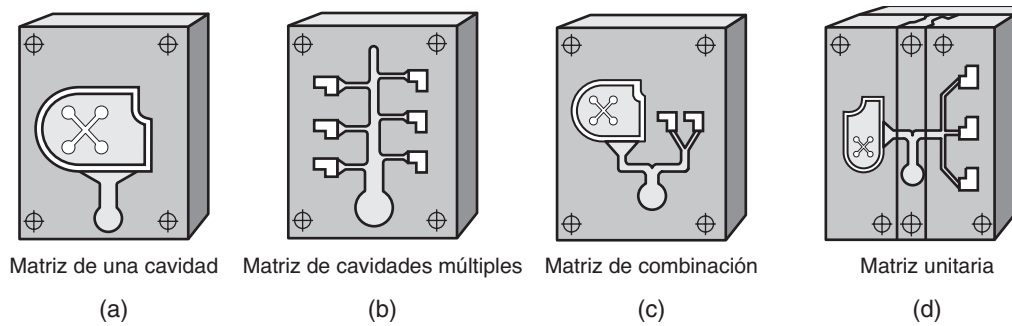


FIGURA 11.19 Diferentes tipos de cavidades en una matriz de fundición a presión. Fuente: Cortesía de American Die Casting Institute.

ral, la relación del peso de la matriz con respecto al peso de la pieza es de 1000 a 1, por lo que la matriz para una fundición que pese 2 kg debería pesar unos 2000 kg. Las matrices suelen fabricarse con aceros para herramientas para trabajo en caliente o aceros para moldes (ver sección 5.7). El desgaste de la matriz aumenta con la temperatura del metal fundido. El **agrietamiento por calor** de las matrices (el agrietamiento superficial originado por su calentamiento y enfriamiento repetitivo, visto en la sección 3.6) puede constituir un problema. Cuando los materiales para la matriz se seleccionan de manera apropiada y se les da mantenimiento adecuado, ésta puede durar más de medio millón de inyecciones antes de desgastarse significativamente.

El diseño de las matrices incluye una inclinación favorable (ángulo de salida) para permitir la extracción de la fundición. Los bebederos y canales de alimentación se pueden retirar en forma manual o mediante troqueles en una prensa. En la actualidad, los procesos completos de fundición a presión en matriz y de acabado están altamente automatizados. Con frecuencia se aplican lubricantes (agentes de separación) como delgados recubrimientos sobre las superficies de las matrices; éstos suelen ser lubricantes a base de agua, con grafito u otros componentes en suspensión. Debido a la alta capacidad de enfriamiento del agua, estos fluidos también son efectivos para mantener bajas las temperaturas de la matriz y así mejorar la vida de esta última.

11.3.6 Fundición centrífuga

Como su nombre lo indica, el proceso de *fundición centrífuga* utiliza las fuerzas de inercia (causadas por la rotación) para distribuir el metal fundido en las cavidades del molde —un método que fue sugerido inicialmente a principios de 1800. Existen tres tipos de fundición centrífuga: la fundición realmente centrífuga, la fundición semicentrífuga y el centrifugado.

Fundición realmente centrífuga. En la *fundición realmente centrífuga* se producen piezas cilíndricas huecas (como tubos sin costura, cañones de armas, bujes, revestimientos para cilindro de motores, pistas para rodamientos, con o sin bridas, y postes para iluminación de calles) mediante la técnica mostrada en la figura 11.20. En este proceso, el metal fundido se vacía dentro de un molde rotatorio. Por lo general, el eje de rotación es horizontal, aunque puede ser vertical en el caso de piezas de trabajo cortas. Los moldes se fabrican con acero, hierro o grafito y pueden contener un revestimiento refractario para incrementar la vida del molde. Las superficies de éste pueden tener forma para fundir tubos con diferentes diseños externos. La superficie interior de la fundición sigue siendo cilíndrica, ya que el metal fundido se distribuye de modo uniforme como resultado de las fuerzas centrífugas. Sin embargo, debido a las diferencias de densidad, los elementos más ligeros (como la espuma, impurezas y piezas del revestimiento refractario) tienden a reunirse en la superficie interior de la fundición. En consecuencia, las propiedades de la fundición pueden variar a lo largo de su espesor.

Se pueden fundir centrífugamente partes cilíndricas que varían de 13 mm (0.5 pulgadas) a 3 m (10 pies) de diámetro y de 16 m (50 pies) de largo, con paredes que van de 6 a 125 mm (0.25 a 5 pulgadas) de espesor. La presión generada por la fuerza centrífuga es elevada (hasta de 150 g); dicha presión es necesaria para fundir partes con paredes

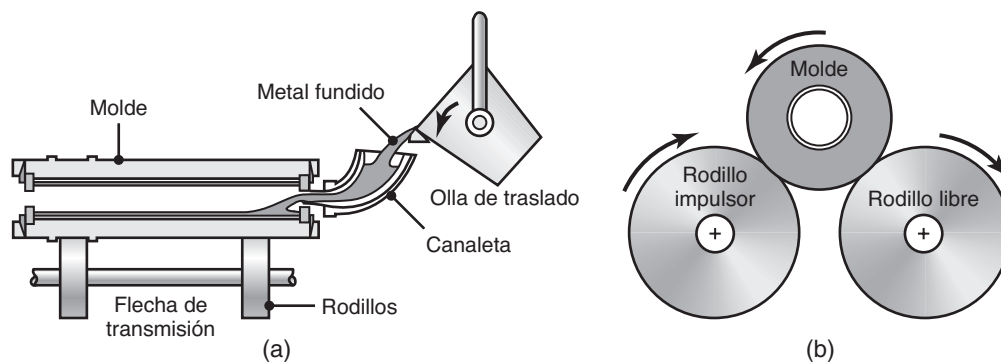


FIGURA 11.20 (a) Esquema del proceso de fundición centrífuga. Con este proceso se pueden fundir tubos, revestimientos cilíndricos y partes de forma similar. (b) Vista lateral de la máquina.

gruesas. Por medio de este proceso se producen fundiciones de buena calidad, precisión dimensional y detalle de la superficie externa. En la tabla 11.2 se presentan las capacidades de la fundición centrífuga.

Fundición semicentrífuga. En la figura 11.21a se muestra un ejemplo de *fundición semicentrífuga*. Este método se utiliza para fundir partes con simetría rotatoria, como las ruedas con rayos.

Centrifugado. En el *centrifugado* (también llamado *fundición centrífuga*), las cavidades de un molde de cualquier forma se colocan a cierta distancia del eje de rotación. El metal fundido se vacía por el centro y se fuerza dentro del molde mediante fuerzas centrífugas (fig. 11.21b). Las propiedades de las fundiciones pueden variar según la distancia que haya desde el eje de rotación, como en la fundición realmente centrífuga.

11.3.7 Fundición por dado impresor y formado de metales semisólidos

Dos procesos de fundición que fundamentalmente constituyen combinaciones de fundición y forjado (capítulo 14) son la *fundición por dado impresor* y el *formado de metales semisólidos*.

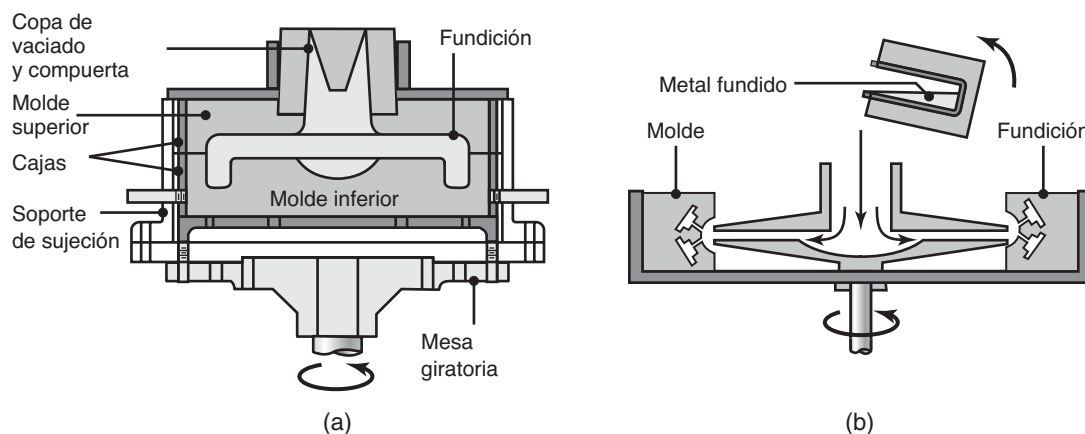


FIGURA 11.21 (a) Esquema del proceso de fundición semicentrífuga. Mediante este proceso se pueden fundir ruedas con rayos. (b) Esquema de fundición por centrifugado. Los moldes se colocan en la periferia de la máquina y el metal fundido se vierte dentro de ellos mediante fuerza centrífuga.

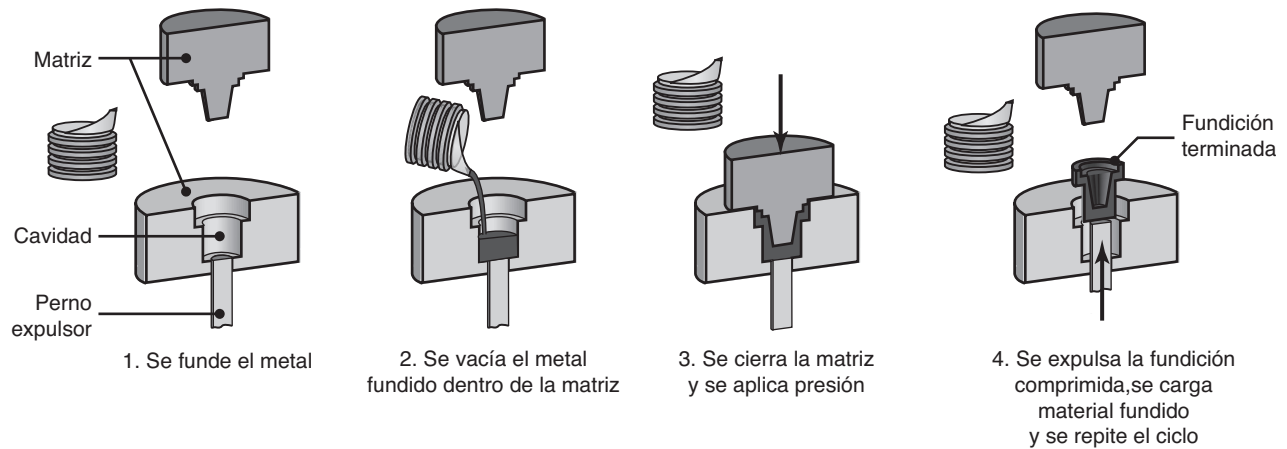


FIGURA 11.22 Secuencia de operaciones en el proceso de fundición por dado impresor. Este proceso combina las ventajas de la fundición y el forjado.

Fundición por dado impresor. El proceso de *fundición por dado impresor* (o *forjado de metal líquido*) se desarrolló en la década de 1960 y comprende la solidificación de metal fundido a alta presión (fig. 11.22). Los productos típicos producidos son los componentes automovilísticos y cuerpos de morteros (cañón de barril corto). La maquinaria incluye una matriz, un punzón y un perno expulsor. La presión aplicada por el punzón mantiene los gases atrapados en solución y el contacto a alta presión en la interfaz matriz-metal promueve una rápida transferencia de calor, lo que produce una microestructura fina con buenas propiedades mecánicas.

La aplicación de presión también supera las dificultades de alimentación que pudieran surgir al fundir metales con un largo intervalo de solidificación (sección 10.2.2). Las presiones requeridas en la fundición por dado impresor son menores que las del forjado en frío o en caliente. Se pueden hacer partes complejas con una forma cercana a la neta y un detalle fino de la superficie, tanto con aleaciones no ferrosas como con ferrosas.

Formado de metal semisólido. El formado de metal semisólido (también llamado *procesamiento en estado pastoso*, ver fig. 10.4) se desarrolló en la década de 1970 y se introdujo en la producción comercial en 1981. Cuando el metal (que consiste en líquido y componentes sólidos) entra en la matriz, se agita para triturar todas las dendritas como sólidos finos, y cuando se enfrían en la matriz, se desarrollan como una estructura de grano fino. La aleación muestra un comportamiento *tixotrópico* (de ahí que al proceso también se le llame *tixoformado*), lo que significa que su viscosidad disminuye cuando se agita. Así, por ejemplo, en reposo y por encima de su temperatura solidus, la aleación tiene la consistencia de la mantequilla, pero cuando se agita con vigor, su consistencia es similar a la del aceite para motor. El procesamiento de los metales en su estado pastoso también ha llevado a desarrollos en la *extrusión*, el *forjado* y el *laminado de estado pastoso* (de ahí el término *trabajo de metales semisólidos*). Estos procesos se utilizan para fabricar partes con aleaciones y compósitos de matriz metálica fundidos o forjados, diseñados especialmente.

El comportamiento tixotrópico se ha utilizado para desarrollar tecnologías que combinan la fundición y el forjado de partes mediante palanquillas fundidas, las cuales se forjan cuando son de 30% a 40% líquidas. Las partes automotrices de aleación de magnesio, por ejemplo, se han producido en máquinas con una característica que combina los procesos de fundición a presión en matriz y el moldeo de plásticos por inyección utilizando tornillos recíprocos (ver sección 19.3). Las partes fabricadas incluyen bra-

zos de control, soportes y componentes de la dirección. El procesamiento de los aceros por tixofundido aún no alcanza el mismo estado que con el magnesio, debido sobre todo a las altas temperaturas involucradas, que afectan la vida de la matriz, y a la dificultad de fabricar formas complejas. Las ventajas del formado de metales semisólidos sobre la fundición de presión en matrices son: (a) las estructuras desarrolladas son homogéneas, con propiedades uniformes y alta resistencia, (b) se pueden fabricar partes delgadas y gruesas, (c) pueden utilizarse aleaciones fundidas y forjadas, y (d) a las partes se les puede dar tratamiento térmico posterior. Sin embargo, los costos tanto de los materiales como globales son mayores que los de la fundición a presión en matriz.

Reofundición. Ésta es otra técnica, que inicialmente se investigó en la década de 1960, para formar metales en estado semisólido. El metal se calienta apenas por encima de su temperatura solidus y se vierte en un recipiente para enfriarlo al estado semisólido. Después el lodo se mezcla y se vierte en el molde o matriz. Este proceso ha sido utilizado satisfactoriamente con aleaciones de aluminio y de magnesio.

11.3.8 Operaciones de fundición en molde compuesto

Los *moldes compósitos* se fabrican con dos o más materiales diferentes y se utilizan en el moldeo en cáscara y en otros procesos de fundición. Por lo general se emplean para fundir formas complejas, como propulsores para turbinas. Incrementan la resistencia del molde, mejoran la precisión dimensional y el acabado superficial de las fundiciones y pueden ayudar a reducir los costos globales y el tiempo de procesamiento. Los materiales para moldeo más utilizados son cáscaras (producidas de la forma que ya se indicó), yeso, arena con aglutinante, metal y grafito. Estos moldes también pueden incluir machos o corazones y enfriadores para controlar la velocidad de solidificación en las áreas críticas de las fundiciones.

11.4 Técnicas de fundición para componentes monocristalinos

En la sección 1.2 se describieron las características de las estructuras monocristalinas y policristalinas en los metales. En esta sección se abordan las técnicas utilizadas para fundir componentes monocristalinos (como los álabes para turbinas de gas), que por lo general se fabrican con superaleaciones de base níquel y se utilizan en las etapas calientes de la máquina. Los procedimientos correspondientes también pueden usarse en otras aleaciones y componentes.

Fundición convencional de álabes para turbinas. El *proceso de fundición convencional* utiliza un molde de cerámica. El metal fundido se vacía dentro del molde y comienza a solidificarse en las paredes cerámicas. La estructura de grano desarrollada es policristalina, similar a la mostrada en la figura 10.2c. Sin embargo, la presencia de límites de los granos hace que esta estructura sea susceptible a la termofluencia y al agrietamiento a través de los límites cuando se somete a fuerzas centrífugas y a las elevadas temperaturas que suele haber en la operación de una turbina de gas.

Álabes solidificados direccionalmente. El *proceso de solidificación direccional* (fig. 11.23a) se desarrolló inicialmente en la década de 1960. El molde de cerámica se precalienta con calor radiante y se soporta en una placa de enfriamiento enfriada por agua. Una vez que se vacía el metal dentro del molde, el ensamble de dicha placa se baja lentamente. Los cristales comienzan a crecer hacia arriba en la superficie de la placa de enfriamiento, como los granos columnares mostrados en la figura 10.3. Por ello, el álabe se solidifica en forma direccional con límites de grano longitudinales, pero no transversales. En consecuencia, el álabe es más fuerte en la dirección de las fuerzas centrífugas desarrolladas en la turbina de gas.

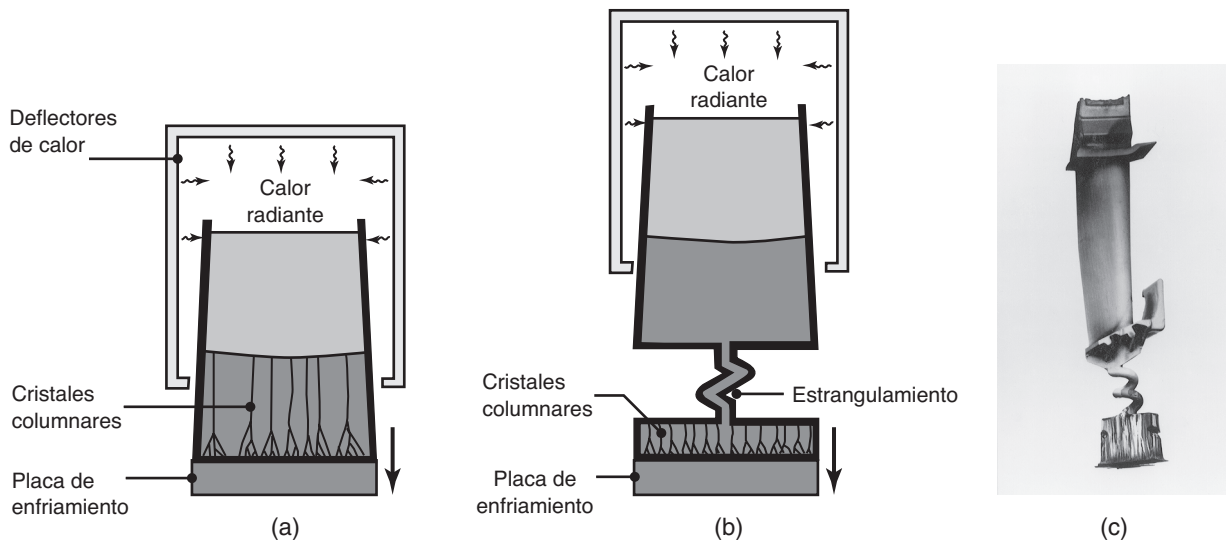


FIGURA 11.23 Métodos de fundición de álabes para turbina: (a) solidificación direccional; (b) método para producir un álabe monocristalino; y (c) álabe monocristalino con la porción estrangulada aún sujeta. Fuente: (a) y (b) B. H. Kear. (c) Cortesía de ASM International.

Álabes monocristalinos. En el *crecimiento de cristales*, desarrollado en 1967, el molde tiene un estrangulamiento en forma de sacacorchos o hélice (figs. 11.23b y c). La sección transversal es tan pequeña que sólo permite que se ajuste un cristal a través de ella. El mecanismo de crecimiento de cristales es tal que sólo los cristales orientados más favorablemente son capaces de crecer (una situación similar a la mostrada en la fig. 10.3) a lo largo de la hélice, porque las paredes del pasaje helicoidal interceptan a todos los otros cristales.

Al bajar lentamente el ensamble, crece un solo cristal hacia arriba a través del estrangulamiento y comienza a crecer en el molde. Es importante controlar de manera estricta la rapidez del movimiento. La masa solidificada en el molde es un álabe monocristalino. Aunque estos álabes son más costosos que los de otros tipos, la falta de límites de granos los hace resistentes a la termofluencia y al impacto térmico, por lo que tienen una vida de servicio más larga y confiable.

Crecimiento de monocristales. El crecimiento de monocristales es una actividad importante en la industria de los semiconductores, en la manufactura de obleas (*wafers*) de silicio para dispositivos microelectrónicos (capítulo 28). Existen dos métodos básicos de crecimiento de cristales.

- En el **método de cristalización progresiva**, también conocido como **proceso Czochralski (CZ)** (fig. 11.24a), se sumerge un cristal semilla en el metal fundido y después se extrae con lentitud (a razón de $10 \mu\text{m/s}$ aproximadamente), al tiempo que se gira. El metal líquido comienza a solidificarse en la semilla y la estructura cristalina de ésta continúa desarrollándose. Se pueden agregar *dopantes* (elementos de aleación) al metal líquido para proporcionarle propiedades eléctricas especiales. Con este proceso se hacen crecer monocristales de silicio, germanio y otros elementos. Por medio de esta técnica pueden producirse lingotes monocristalinos con dimensiones típicas de 50 mm a 150 mm (2 a 6 pulgadas) de diámetro y más de 1 m (40 pulgadas) de longitud.
- La segunda técnica para el crecimiento de cristales es el **método de la zona flotante** (fig. 11.24b). Se inicia con una barra de silicio policristalino que descansa sobre un monocristal; un devanado de inducción calienta las dos piezas mientras se mueve lentamente hacia arriba. El monocristal crece hacia arriba manteniendo su

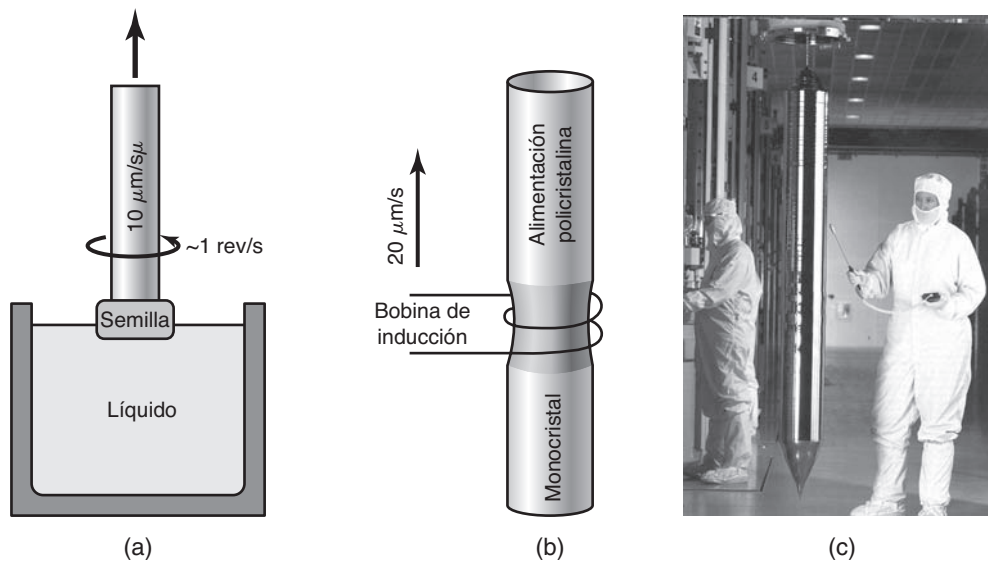


FIGURA 11.24 Dos métodos de crecimiento de cristales: (a) crecimiento progresivo (proceso Czochralski), y (b) método de la zona flotante. El crecimiento de cristales es importante, sobre todo en la industria de los semiconductores. (c) Lingote monocristalino producido por el proceso Czochralski. Fuente: Cortesía de Intel Corp.

orientación. Después se cortan obleas delgadas de la barra, se limpian y se pulen para utilizarse en la fabricación de dispositivos microelectrónicos.

11.5 | Solidificación rápida

En la sección 6.14 se describen las propiedades de las *aleaciones amorfas* (también conocidas como *vidrios metálicos*). La técnica para fabricarlas (llamada *solidificación rápida*) comprende el enfriamiento del metal fundido a velocidades de hasta 10^6 K/s, a fin de que no tenga tiempo para cristalizarse (ver también fig. 1.11). La solidificación rápida produce una ampliación significativa de la solubilidad de sólido, refinamiento de grano y reducción de la microsegregación (ver sección 10.2.3), entre otros efectos.

En un método común llamado **fundido en disco rotatorio** (fig. 11.25), la aleación se funde por inducción en un crisol cerámico. Después se lanza, por medio de un gas de alta presión, a gran velocidad contra un disco giratorio de cobre (bloque de enfriamiento), que enfría rápidamente la aleación (**enfriamiento por aplastamiento**).

11.6 | Inspección de las fundiciones

Para mantener una buena calidad es importante controlar todas las etapas de la fundición, desde la preparación del molde hasta la extracción de las fundiciones de los moldes o de las matrices. Se pueden utilizar varios métodos para inspeccionar fundiciones a fin de determinar su calidad y la presencia y los tipos de cualquier posible defecto. Las fundiciones pueden inspeccionarse *visual* u *ópticamente* en busca de defectos superficiales. Los defectos internos y bajo la superficie se investigan mediante diferentes técnicas *no destructivas* (sección 36.10). En las pruebas *destructivas* (sección 36.11), se extraen especímenes de prueba de distintas secciones de una fundición para hacer ensayos de resistencia, ductilidad y otras propiedades mecánicas, además de determinar la presencia, ubicación y distribución de la porosidad y cualquier otro defecto.

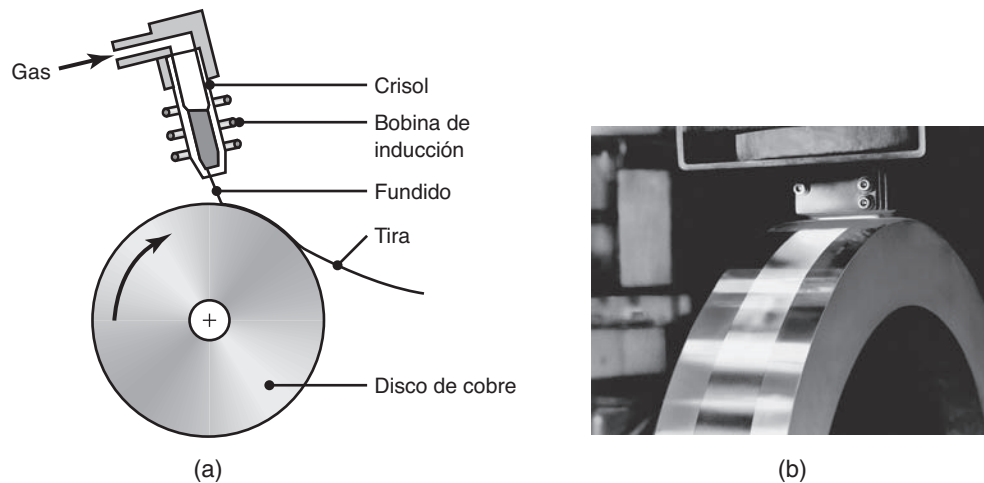


FIGURA 11.25 (a) Esquema del fundido en disco rotatorio para producir tiras delgadas de metal amorfo. (b) Fotografía de la producción de aleación de níquel mediante fundido en disco rotatorio. Fuente: Cortesía de Siemens AG.

La *hermeticidad a la presión* de los componentes fundidos (válvulas, bombas y tubos) se determina por lo general sellando las aberturas en la fundición y presurizándolos con agua, aceite o aire. (El aire es compresible y su uso resulta muy peligroso en dichas pruebas debido a la posibilidad de una súbita explosión por un defecto mayor en la fundición). En caso de requerir extrema hermeticidad para prevenir las fugas en aplicaciones críticas, se utiliza helio presurizado o gases especialmente aromatizados con detectores.^{N. del RT.} Después se revisa que la fundición no tenga fugas mientras se mantiene la presión. Las fundiciones inaceptables o defectuosas se funden otra vez para reprocesarlas.

N. del RT. Muy similar a lo que se realiza con el gas doméstico (propano), el cual es inodoro, y para detectar una posible fuga se le adiciona un aromatizante de olor característico.

11.7 | Prácticas y hornos para fusión

La práctica de la fusión es un aspecto importante de las operaciones de fundición, ya que tiene un impacto directo en su calidad. Los hornos se alimentan con material fundible, que consiste en metal, elementos de aleación y otros materiales (como **fundente** y constituyentes formadores de escoria). Los fundentes son compuestos inorgánicos que refinan el metal fundido eliminando los gases disueltos y diferentes impurezas. Se pueden agregar manualmente o inyectar de modo automático en el metal fundido.

Hornos de fusión. Los hornos de fusión que más se utilizan en los talleres de fundición son los hornos de arco eléctrico, de inducción, de crisol y cubilotes.

- Los hornos de **arco eléctrico**, descritos en la sección 5.2.3 e ilustrados en la figura 5.2, se utilizan ampliamente en talleres de fundición y tienen ventajas como una capacidad elevada de fusión (y, por lo tanto, gran capacidad de producción), causan mucho menos contaminación que otros tipos de hornos y son capaces de mantener el metal fundido (a temperatura constante por cierto periodo) para propósitos de aleación.
- Los hornos de **inducción** (fig. 5.2c) son útiles sobre todo en pequeños talleres de fundición y producen fusiones de composición controlada más pequeñas. Existen dos tipos básicos. El *horno de inducción sin núcleo* consta de un crisol totalmente rodeado por una bobina de cobre enfriado por agua, por la que pasa una corriente

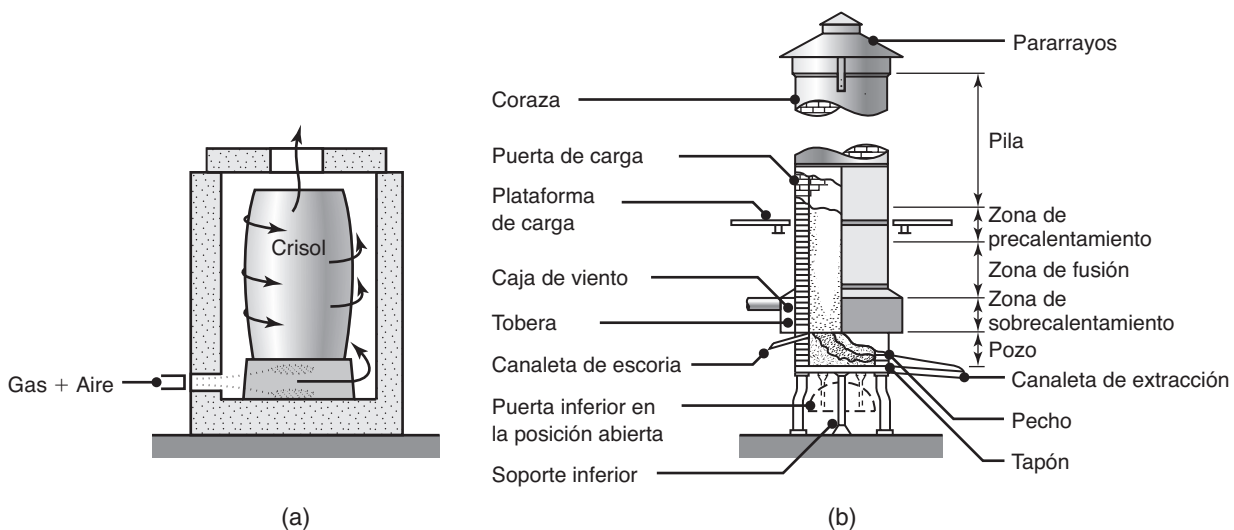


FIGURA 11.26 Dos tipos de hornos de fusión utilizados en los talleres de fundición: (a) de crisol, y (b) cubilote.

de alta frecuencia. Debido a que existe una fuerte acción de agitación electromagnética durante el calentamiento por inducción, este tipo de horno tiene excelentes características de mezclado para alejar y agregar una nueva carga de metal.

El otro tipo, llamado *horno de canal* o *de núcleo*, emplea una corriente de baja frecuencia (hasta de 60 Hz) y tiene una bobina que rodea sólo una pequeña parte de la unidad. Por lo común se utiliza en talleres de fundición no ferrosa y es adecuado para: (a) sobrecalentamiento (es decir, calentamiento por encima de la temperatura normal de fundición para mejorar la fluidez), (b) sostenimiento (que lo hace adecuado para aplicaciones de fundición a presión en matriz), y (c) duplicación (utilizando dos hornos para, por ejemplo, fundir el metal en un horno y transferirlo a otro).

- Los **hornos de crisol** (fig. 11.26a), que se han utilizado ampliamente a lo largo de la historia, se calientan con combustibles como los gases comerciales, gasóleo y combustible fósil, además de la electricidad. Pueden ser estacionarios, basculantes o móviles.
- Los **cubilotes** son recipientes de acero verticales recubiertos con refractarios, que se alimentan con capas alternas de metal, coque y fundente (fig. 11.26b). Aunque requieren mayores inversiones y de manera creciente han sido reemplazados por los hornos de inducción, los cubilotes funcionan continuamente, tienen altas capacidades de fusión y producen grandes cantidades de metal fundido.
- La **fusión por levitación** comprende la *suspensión magnética* del metal fundido. Una bobina de inducción calienta en forma simultánea una palanquilla sólida y agita y confina la fusión, eliminando así la necesidad de un crisol (que podría ser una fuente de contaminación con inclusiones de óxidos). El metal fundido fluye hacia abajo dentro de un molde de fundición por revestimiento colocado directamente bajo la bobina. Las fundiciones por revestimiento producidas con este método no tienen inclusiones de refractarios ni porosidad por gas, y poseen una estructura uniforme de grano fino.

11.8 Talleres de fundición y su automatización

Las operaciones de fundición se realizan por lo general en *talleres de fundición* (del latín *fundere*, que significa “fusión y vaciado”). Aunque tradicionalmente han comprendido

mucha mano de obra, los talleres modernos de fundición tienen instalaciones automatizadas e integradas con computadoras en todos los aspectos de sus operaciones. Producen una amplia variedad y tamaños de fundición a altas capacidades de producción, con un buen control de la calidad y a un bajo costo.

Como se indicó en la figura 11.2, las operaciones en los talleres de fundición inicialmente comprendían dos grupos de actividades separadas. El primero es la fabricación de modelos y moldes. Ahora se utilizan el diseño y la manufactura asistidos por computadora y técnicas de producción rápida de prototipos para minimizar la prueba de ensayo y error, y, de esta manera, mejorar la eficiencia. Se utiliza maquinaria automatizada para minimizar los costos de la mano de obra, que pueden ser significativos en la producción de fundiciones. El segundo grupo de actividades es la fusión de los metales, controlando su composición e impurezas y vaciándolos en los moldes.

El resto de las operaciones, como el vaciado en moldes manejados en transportadoras, la agitación, limpieza, tratamiento térmico e inspección, también se han automatizado. Esto minimiza la mano de obra, reduce la posibilidad de error humano, aumenta la capacidad de producción e incrementa los niveles de calidad. Hoy en día se utilizan ampliamente los robots industriales (sección 37.7) en las operaciones de las fundiciones, como limpieza, corte de mazarotas, ventilación y rociado de moldes, vaciado, selección e inspección. Otras operaciones son los sistemas automáticos de almacenamiento y entrega de machos o corazones y modelos mediante vehículos guiados de manera automática (sección 37.6).

El nivel de automatización en los talleres de fundición es un factor económico importante, en particular porque muchos talleres de fundición son negocios pequeños. El grado de automatización depende del tipo de productos fabricados. Por ejemplo, una instalación para fundición a presión por matriz, o un taller de fundición que fabrica partes para la industria automotriz, pueden implicar lotes de producción de cientos de miles de unidades, por lo que es deseable un alto nivel de automatización. En cambio, un taller de fundición por pedido que produzca lotes de producción cortos puede no estar automatizado en la misma medida. Además, en el pasado, las operaciones de los talleres de fundición eran vistas como algo sucio y caliente, intensivas en el uso de la mano de obra. Hoy en día, puede ser difícil encontrar personal calificado para trabajar en dicho ambiente. En consecuencia, la automatización se ha vuelto crecientemente necesaria para compensar la declinación en la competencia de los trabajadores.

RESUMEN

- En general, los procesos de fundición se clasifican como fundición en molde desechable o en molde permanente. Los procesos de molde desechable más comunes son en arena, en cáscara, de yeso, de cerámica y fundición por revestimiento. Los de molde permanente incluyen la fundición hueca, a presión, a presión en matriz y centrífuga. En general, la fundición en molde desechable implica menores costos de moldes y equipos, pero con una menor precisión dimensional.
- Los moldes utilizados en la fundición de molde permanente están hechos de metal o de grafito y se utilizan varias veces para producir un gran número de partes. Debido a que los metales son buenos conductores de calor, aunque no permiten el escape de los gases, los moldes permanentes tienen efectos diferentes sobre la fundición que los de arena u otros materiales agregados.
- En la fundición de molde permanente, los costos de las matrices y del equipo son relativamente altos, pero los procesos resultan económicos cuando se trata de grandes lotes de producción. La pérdida por desechos es baja y la precisión dimensional elevada, con buenos detalles superficiales.

- Otros procesos de fundición incluyen la fundición por dado impresor (una combinación de fundición y forjado), formado de metales semisólidos, solidificación rápida para la producción de aleaciones amorfas y la fundición de componentes monocristalinos (como los álabes para turbinas) para las etapas calientes de los motores de propulsión.
- Los procesos de fusión y su control también son factores importantes en las operaciones de fundición. Incluyen la fusión apropiada de los metales, la preparación para la aleación, la remoción de escoria y espuma, y el vaciado del metal fundido en los moldes. También es importante la inspección de las fundiciones, a fin de buscar posibles defectos internos o externos.
- Posteriormente, las fundiciones se pueden someter a proceso adicional (como el tratamiento térmico y las operaciones de maquinado) para producir las formas finales deseadas y las características de la superficie.

TÉRMINOS CLAVE

Agente de separación	Fundición en molde de yeso	Moldes compósitos
Aglutinantes	Fundición en molde permanente	Moldes desechables
Arena verde para moldeo	Fundición hueca	Moldes permanentes
Crecimiento de cristales	Fundición por dado impresor	Plantillas de machos o corazones
Formado de metales semisólidos	Fundición por revestimiento	Proceso a la cera perdida
Fundentes	Fusión por levitación	Proceso a la espuma perdida
Fundición a presión	Machos o corazones	Producción rápida de prototipos
Fundición a presión en matriz	Modelo desechable	Reofundición
Fundición centrífuga	Modelos	Solidificación rápida
Fundición de modelo evaporativo	Moldeo con insertos	Soportes de machos o corazones
Fundición de precisión	Moldeo de grafito compactado	Talleres de fundición
Fundición de vacío	Moldeo en arena	Tixotrópico
Fundición en molde cerámico	Moldeo en cáscara	

BIBLIOGRAFÍA

Allsop, D. F. y Kennedy, D., *Pressure Die Casting-Part II: The Technology of the Casting and the Die*, Pergamon, 1983.

An Introduction to Die Casting, American Die Casting Institute, 1981.

ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1998.

Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.

Campbell, J., *Castings*, 2a. ed. Butterworth-Heinemann, 2003.

Clegg, A. J., *Precision Casting Processes*, Pergamon, 1991.

Kaye, A. y Street, A. C., *Die Casting Metallurgy*, Butterworth, 1982.

Lieberman, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.

Mikelonis, P. J. (ed.), *Foundry Technology: A Source Book*, ASM International, 1982.

Product Design for Die Casting, Diecasting Development Council, 1998.

Steel Castings Handbook, 6a. ed., ASM International, 1995.

Street, A. C., *The Diecasting Book*, 2a. ed., Portcullis Press, 1986.

The Metallurgy of Die Castings, Society of Die Casting Engineers, 1986.

Young, K. P., *Semi-solid Processing*, Chapman & Hall, 1997.

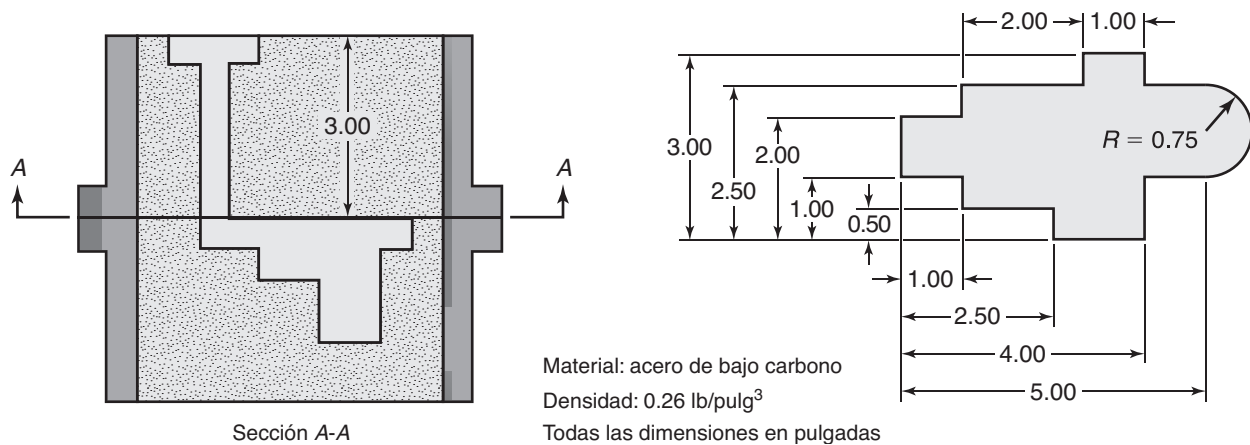


FIGURA P11.40

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

11.44 Liste los materiales para moldes y matrices utilizados en los procesos de fundición descritos en este capítulo. Debajo de cada tipo de material, liste los procesos de fundición que se emplean y explique por qué son adecuados para ese material para moldes o matrices en particular.

11.45 La forma óptima de una mazarota es esférica, para asegurar que se enfría más lentamente que la fundición que alimenta. Sin embargo, es difícil fundir mazarotas con esa forma. (a) Dibuje la forma de una mazarota ciega que sea fácil de moldear pero que tenga la menor relación área-volumen posible. (b) Compare el tiempo de solidificación de la mazarota en la parte (a) con el de una mazarota con forma de cilindro circular recto. Suponga que el volumen de cada mazarota es el mismo y que su altura es igual a su diámetro. (Ver ejemplo 10.1).

11.46 Dibuje una línea de fundición automatizada que consista en maquinaria, transportadores, robots, sensores, etc., y que realice automáticamente el proceso de fundición de modelo desechable.

11.47 ¿Cuál de los procesos de fundición sería más adecuado para fabricar juguetes pequeños? ¿Por qué?

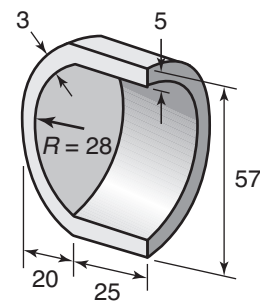
11.48 Describa los procedimientos que usaría para fabricar una estatua grande de bronce. ¿Qué proceso(s) de fundición sería(n) adecuado(s)? ¿Por qué?

11.49 Escriba un breve informe sobre la permeabilidad de los moldes y las técnicas utilizadas para determinar la permeabilidad.

11.50 Comúnmente, los metales ligeros se funden en moldes de hule vulcanizado. Efectúe una investigación a partir de la bibliografía y describa la mecánica de este proceso.

11.51 Algunas veces es deseable enfriar los metales más lentamente que como se haría si los moldes se mantuvieran a temperatura ambiente. Liste los métodos y explique por qué los utilizaría para hacer más lento el proceso de enfriamiento.

11.52 La parte mostrada en la figura P11.52 es una cáscara semiesférica utilizada como copa acetabular (con for-



Dimensiones en mm

FIGURA P11.52

ma de hongo) en una prótesis de cadera. Seleccione un proceso de fundición para esta parte y dibuje todos los modelos o herramentales necesarios si se va a producir con una aleación de cobalto-cromo.

11.53 En la figura P11.53 se ilustra la porosidad desarrollada en la saliente de una fundición. Demuestre que este problema se puede eliminar simplemente reposicionando la línea de partición de esta fundición.

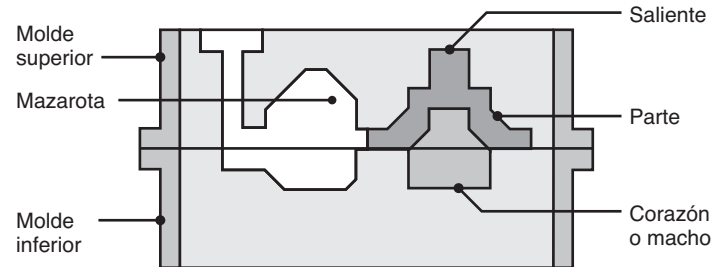


FIGURA P11.53

Fundición de metales: diseño, materiales y economía



CAPÍTULO 12

Este último capítulo sobre fundición de metales sirve como guía para importantes consideraciones respecto de las relaciones entre el diseño del producto, la selección de material y el proceso y los métodos económicos de fundición para aplicaciones específicas. Se describen de manera detallada:

- Consideraciones de diseño para la fundición en moldes desechables y permanentes.
- Lineamientos generales para una fundición exitosa.
- Características y aplicaciones de las aleaciones de fundición ferrosas y no ferrosas.
- Consideraciones económicas en la fundición de metales.

- 12.1 Introducción 323
- 12.2 Consideraciones de diseño en la fundición 323
- 12.3 Aleaciones para fundición 332
- 12.4 Economía de la fundición 337

EJEMPLO:

- 12.1 Ilustraciones de diseños de fundición deficientes y adecuados 330

12.1 | Introducción

En los dos capítulos anteriores se observó que la práctica exitosa de la fundición requiere el control adecuado de un gran número de variables; por ejemplo, las características particulares de metales y aleaciones fundidas, el método de fundición, los materiales de moldes y matrices, el diseño del molde y diversos parámetros del proceso. Todo, el flujo del metal fundido en las cavidades del molde, los sistemas de alimentación, la velocidad de enfriamiento y los gases generados, influye en la calidad de una fundición.

En este capítulo se describen las consideraciones y los lineamientos generales de diseño de la fundición de metales y se presentan sugerencias para evitar defectos. También se definen las características de las aleaciones que más se funden, y sus aplicaciones típicas. Debido a que la economía de las operaciones de fundición es tan importante como los aspectos técnicos, en este capítulo también se tratan en forma breve los factores económicos básicos relativos a las operaciones de fundición.

12.2 | Consideraciones de diseño en la fundición

Como en todas las operaciones de manufactura, con los años se han desarrollado ciertos lineamientos y principios de diseño respecto de la fundición. A pesar de que estos principios se han establecido sobre todo a través de la experiencia, también se han llegado a utilizar en gran medida los métodos analíticos, la simulación y el modelado de procesos, así como las técnicas de diseño y manufactura asistidas por computadora; de esta manera se han mejorado la productividad y la calidad de las fundiciones con ahorros significativos en los costos.

Todas las operaciones de fundición comparten ciertas características, como el cambio de fase y la contracción térmica durante el ciclo de fundición. En consecuencia, aplican por igual varias consideraciones de diseño a la fundición en arena y a la fundición a presión, por ejemplo. Sin embargo, cada proceso tiene sus propios criterios de diseño en particular; la fundición en arena requiere tomar en consideración la erosión del molde y las inclusiones correspondientes a la arena en la fundición, en tanto que en la fundición a presión no existirán dichas preocupaciones (aunque sufre sus propios problemas, como el agrietamiento por calor de las matrices, que reduce la vida de éstas).

Con mucha frecuencia, la corrección de las causas de los defectos es complicada y, por otra parte, las consideraciones que se presentan en este capítulo de ninguna manera representan una lista exhaustiva. Además, a menudo los defectos son aleatorios y difíciles de reproducir, lo que complica aún más la implantación de medidas correctivas. En la mayoría de los casos, cierto diseño de molde produce un gran porcentaje de partes adecuadas y algunas defectuosas. Es muy difícil que un molde no produzca partes defectuosas; por estas razones, se deben establecer procedimientos de control de calidad para aplicaciones críticas de las fundiciones.

12.2.1 Consideraciones generales de diseño para fundiciones

Existen dos tipos de problemas de diseño en fundición: (a) las características geométricas, tolerancias, etc., que deben incorporarse en la parte, y (b) las características que debe tener el molde para producir la fundición deseada. Por lo general, el diseño robusto de las fundiciones involucra los siguientes pasos:

1. Diseñar la parte de manera que la forma pueda fundirse con facilidad. En este capítulo se proporcionan varias consideraciones importantes que son útiles en dichos proyectos de diseño.
2. Seleccionar un proceso de fundición y un material apropiado para la parte, tamaño, propiedades mecánicas, etc. Con frecuencia, el diseño de la parte no es independiente del primer paso dado y se necesita especificar la parte, el material y el proceso de manera simultánea.
3. Localizar la línea de partición del molde en la parte.
4. Localizar y diseñar las compuertas que permitan la alimentación uniforme de la cavidad del molde con el metal fundido.
5. Seleccionar una geometría apropiada del canal de alimentación para el sistema.
6. Localizar las características del molde, como bebederos, filtros y mazarotas, como es apropiado.
7. Asegurar que estén vigentes controles adecuados y prácticas apropiadas.

A continuación examinaremos las reglas correspondientes a las condiciones generales de fundición y después trataremos las normas específicas aplicables a operaciones particulares de fundición.

Diseño de las partes fundidas. Las siguientes consideraciones son importantes para el diseño de las fundiciones, como se señala en la figura 12.1.

- **Esquinas, ángulos y espesores de sección.** Deben evitarse en lo posible las esquinas, ángulos y filetes agudos, pues actúan como concentradores de esfuerzos y pueden hacer que el metal (y las matrices) se agriete o desgarre durante la solidificación. Los radios de los filetes deben seleccionarse para reducir las concentraciones de esfuerzos y asegurar el flujo apropiado de metal líquido durante el vaciado. Por lo general, los radios de los filetes van de 3 mm a 25 mm (1/8 a 1 pulgada), aunque se pueden permitir radios menores en fundiciones pequeñas y en aplicaciones específicas. Sin embargo, si los radios de los filetes son demasiado grandes, el volumen del material en esas regiones también es grande y, por consiguiente, la velocidad de enfriamiento es inferior.

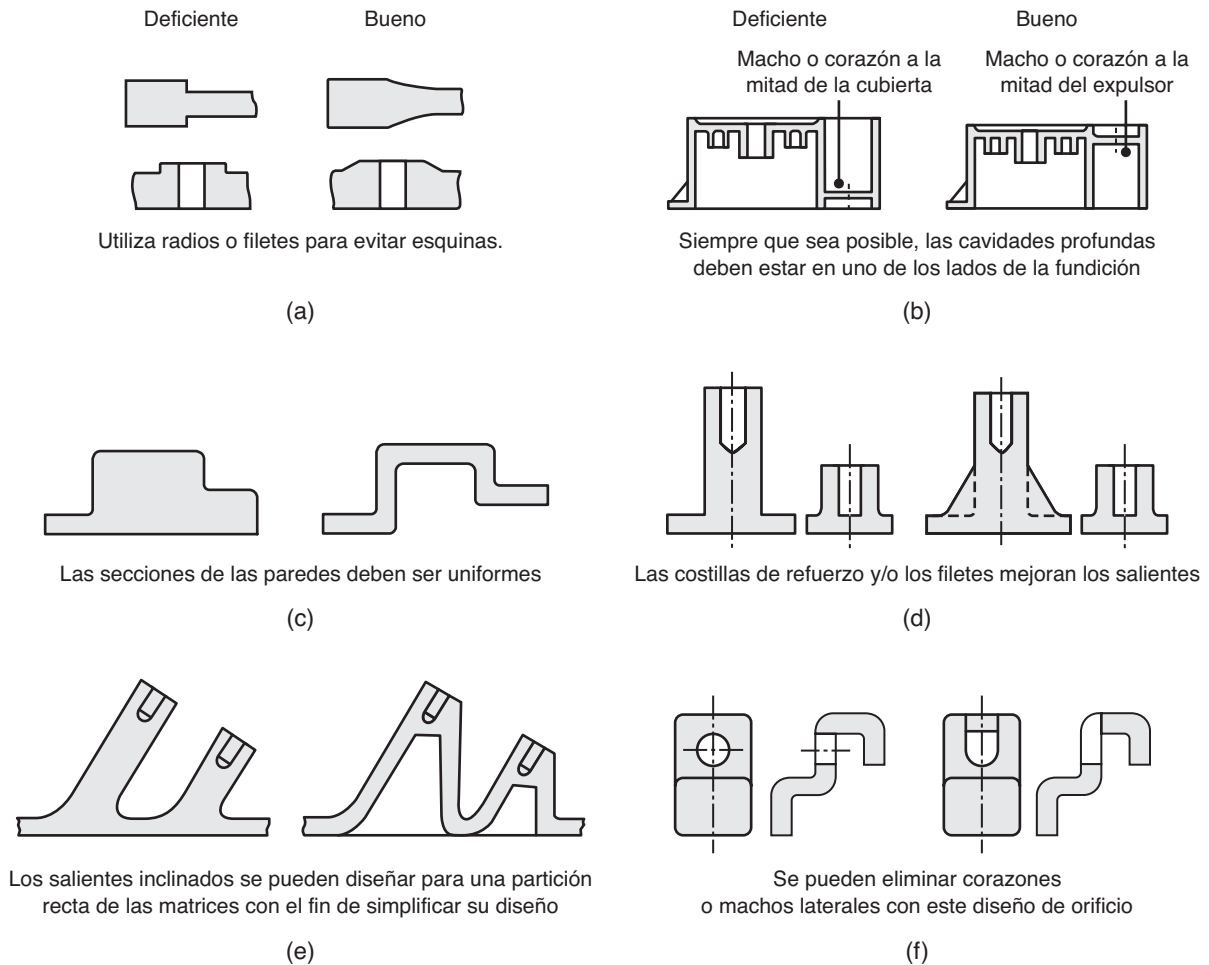


FIGURA 12.1 Modificaciones de diseño sugeridas para evitar defectos en las fundiciones. *Fuente:* Cortesía del American Die Casting Institute.

Los cambios de sección en las fundiciones deben suavizarse al pasar de una a otra. La ubicación del círculo más grande que puede inscribirse en una región particular es crítica por lo que se refiere a las cavidades por contracción (figs. 12.2a y b). Debido a que la velocidad de enfriamiento en regiones con círculo más grandes es menor, se les conoce como **puntos calientes**. Estas regiones pueden desarrollar **cavidades por contracción** y **porosidad** (figs. 12.2c y d). Las cavidades en los puntos calientes se pueden eliminar mediante corazones o machos pequeños. A pesar de que producen orificios en la fundición (fig. 12.2e), esto no afecta su resistencia de manera significativa. Es importante mantener (hasta donde sea posible) secciones transversales y espesores de pared uniformes a lo largo de toda la fundición, para evitar o minimizar las cavidades por contracción. Aunque aumentan el costo de producción, las camisas *metálicas* o los *enfriadores* en el molde pueden eliminar o minimizar los puntos calientes (ver fig. 10.14).

- **Áreas planas.** Hay que evitar las áreas planas grandes (superficies lisas), ya que pueden distorsionarse durante el enfriamiento por los gradientes de temperatura o desarrollar un acabado superficial deficiente debido a un flujo disparejo del metal durante el vaciado. Una de las técnicas comunes para resolver esto consiste en dividir las superficies planas con costillas de refuerzo y serraciones.

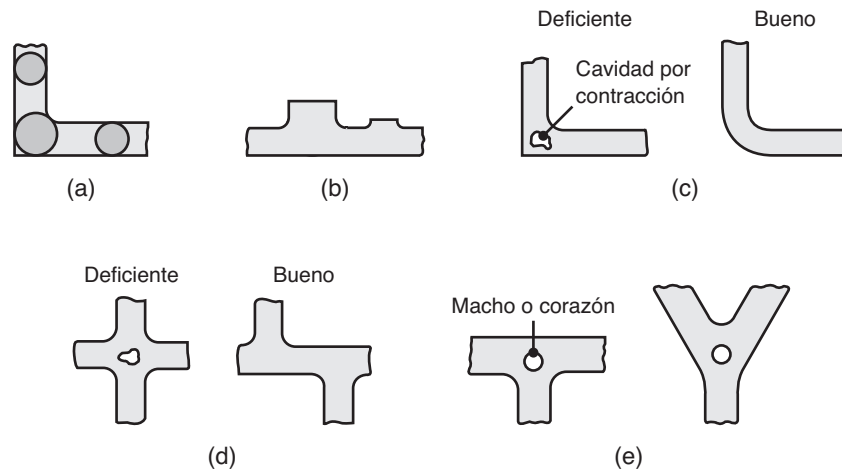


FIGURA 12.2 Ejemplos de diseños que muestran la importancia de mantener secciones transversales uniformes en las fundiciones para evitar puntos calientes y cavidades por contracción.

- **Contracción.** Para evitar el agrietamiento de la fundición durante el enfriamiento, debe haber tolerancias a la contracción durante la solidificación. En fundiciones con costillas de refuerzo que se cruzan, pueden reducirse los esfuerzos de tensión alternando las costillas o cambiando la geometría de la intersección. Las dimensiones del modelo también deben permitir la contracción del metal durante la solidificación y el enfriamiento. Las tolerancias a la contracción, conocidas como **tolerancias a la contracción de los fabricantes de modelos**, por lo general van de 10 a 20 mm/m (1/8 a 1/4 pulgada/pie). En la tabla 12.1 se presenta la tolerancia normal a la contracción para metales fundidos comúnmente en arena.
- **Ángulo de salida.** Por lo general, se da un pequeño ángulo de salida (conicidad) en los modelos para moldes de arena, que permita extraer el modelo sin dañar el molde (ver fig. 11.5). Los ángulos de salida suelen ir de 5 a 15 mm/m (1/16 a 3/16 pulgada/pie). Dependiendo de la calidad del modelo, es común que los ángulos de salida sean de 0.5° a 2°. Los ángulos en superficies internas son por lo general dos veces esta medida; tienen que ser mayores a los de las superficies exteriores porque la fundición se contrae hacia dentro, hacia el núcleo.
- **Tolerancias dimensionales.** Las tolerancias dimensionales dependen del proceso de fundición en particular, del tamaño de la fundición y del tipo de modelo utilizado. Deben ser lo más amplias que sea posible, dentro de los límites del buen desempe-

TABLA 12.1

Tolerancia normal a la contracción para algunos metales fundidos en moldes de arena	
Metal	%
Hierro fundido gris	0.83–1.3
Hierro fundido blanco	2.1
Hierro fundido maleable	0.78–1.0
Aleaciones de aluminio	1.3
Aleaciones de magnesio	1.3
Latón amarillo	1.3–1.6
Bronce de fósforo	1.0–1.6
Bronce de aluminio	2.1
Acero de alto manganeso	2.6

ño de la parte; de lo contrario, el costo de la fundición aumenta. Por lo general, en la práctica comercial, las tolerancias se encuentran en el intervalo de ± 0.8 mm (1/32 pulgadas) para pequeñas fundiciones y se incrementan con el tamaño de las fundiciones. Por ejemplo, las tolerancias para fundiciones grandes pueden ser hasta de ± 6 mm (0.25 pulgadas).

- **Letreros y marcas.** Es una práctica común incluir alguna forma de identificación de partes (como letreros o logotipos corporativos) en las fundiciones. Esta característica se puede grabar bajo la superficie de fundición o puede sobresalir de la misma; lo más deseable dependerá del método de producción de los moldes. Por ejemplo, en la fundición en arena, una placa del modelo se produce maquinándola en una fresadora CNC y es más simple maquinar letras en la placa del modelo. En cambio, en la fundición de matrices es más simple maquinar letras dentro del molde.
- **Operaciones de acabado.** Al diseñar una fundición, es importante considerar las operaciones posteriores de maquinado y acabado que ocurren con frecuencia. Por ejemplo, si se va a perforar un orificio en una fundición, es mejor ubicarlo en una superficie plana que en una curva, para evitar que la perforación se desvíe. Un diseño aún mejor incorporaría una pequeña hendidura como punto de inicio para las operaciones de perforado. Las fundiciones deben incluir características que permitan sujetarlas fácilmente en las máquinas herramienta.

Selección del proceso de fundición. La selección del proceso de fundición no se puede separar del tema de la economía (ver la sección 12.4). Sin embargo, la tabla 11.1 indica algunas ventajas y limitaciones de dichos procesos que tienen algún impacto en el diseño de las fundiciones. A continuación se tratan las reglas específicas de diseño para operaciones con moldes desechables y permanentes.

Localización de la línea de partición. Las partes deben orientarse en los moldes de manera que la parte grande de la fundición esté relativamente abajo y se minimice su altura. La orientación de la parte también determina la distribución de la porosidad. Por ejemplo, en la fundición de aluminio, el hidrógeno es soluble en metal líquido, pero ya no lo es cuando el aluminio se solidifica (ver fig. 10.15). En consecuencia, durante la fundición del aluminio pueden formarse burbujas de hidrógeno que flotarán hacia arriba debido a su flotabilidad, de modo que habrá una mayor porosidad en las partes superiores de las fundiciones. Por lo tanto, las superficies críticas deben orientarse de manera que queden con la cara hacia abajo.

Entonces, una parte orientada de manera adecuada puede tener especificada la línea de partición. Ésta es la línea o plano que separa las mitades superior (molde superior) e inferior (molde inferior) de los moldes (ver fig. 11.4). En general, la línea de partición debe estar a lo largo de un plano recto y no de uno contorneado. Siempre que sea posible, dicha línea debe pasar por las esquinas o aristas de las fundiciones en lugar de hacerlo por las superficies planas a la mitad de la fundición, de manera que la *proyección* en la línea de partición (el material que se sale entre las dos mitades del molde) no sea visible. La localización de la línea es importante debido a que influye en el diseño del molde, la facilidad del moldeo, la cantidad y forma de los corazones o machos requeridos, el método de soporte y el sistema de compuertas.

La línea de partición debe colocarse lo más abajo posible (respecto de la fundición) para los metales menos densos (como las aleaciones de aluminio) y localizarse a casi la mitad de la altura para metales más densos (como los aceros). Sin embargo, no se debe permitir que el metal fluya verticalmente, en especial cuando no está restringido por un bebedero. La colocación de la línea tiene un gran efecto en el resto del diseño del molde. Por ejemplo, en la fundición en arena, es común que los canales de alimentación, las compuertas y el bebedero se coloquen en el molde inferior sobre la línea de partición. Además, la ubicación de dicha línea y la orientación de la parte determinan el número de machos o corazones requeridos y es preferible evitar el uso de éstos siempre que sea práctico.

Localización y diseño de compuertas. Las compuertas son las conexiones entre los canales de alimentación y la parte a fundir. Algunas de las consideraciones en el diseño de los sistemas de compuertas son:

- Con frecuencia son preferibles, y necesarias, varias compuertas para partes grandes. Este hecho ofrece las ventajas de permitir una temperatura de vaciado inferior y reducir los gradientes de temperatura en la fundición.
- Las compuertas deben alimentar las secciones gruesas de las fundiciones.
- Se debe utilizar un filete en las partes donde la compuerta topa con la fundición; esta característica produce menos turbulencia que las uniones abruptas.
- La compuerta más cercana al bebedero debe colocarse a suficiente distancia, de manera que pueda retirarse con facilidad. Esta distancia puede ser tan pequeña como unos cuantos milímetros para fundiciones pequeñas y hasta 500 mm para partes grandes.
- La longitud mínima de la compuerta debe ser de tres a cinco veces su diámetro, según el metal que se esté fundiendo. La sección transversal tiene que ser suficientemente grande para permitir el llenado de la cavidad del molde y más pequeña que la sección transversal del canal de alimentación.
- Se deben evitar las compuertas curvadas, pero cuando sean necesarias, se tiene que localizar una sección recta en la compuerta inmediatamente adyacente a la fundición.

Diseño del canal de alimentación. El canal de alimentación es una vía de distribución horizontal que acepta metal fundido del bebedero y lo conduce a las compuertas. En las partes simples se utiliza un canal, pero las fundiciones más complejas requieren sistemas de dos canales. Los canales de alimentación se utilizan para atrapar escoria (mezcla de óxido y metal que se forma en la superficie de los metales) y evitar que se introduzca en las compuertas y en la cavidad del molde. Es común colocar trampas para escoria al final de los canales; éstos se proyectan arriba de las compuertas para garantizar que el metal en las mismas se extraiga de la parte inferior de la superficie.

Diseño de otras características del molde. El objetivo principal al diseñar un *bebedero* (como se describe en la sección 10.3) es alcanzar las velocidades requeridas de flujo del metal al tiempo que se evita la aspiración o formación excesiva de escoria. Estas velocidades se determinan de manera que se evite la turbulencia, pero el molde se llena rápidamente en comparación con el tiempo requerido de solidificación. Se puede utilizar una *copa de vaciado* para asegurar que no se interrumpa el flujo del metal dentro del bebedero; además, si se mantiene el metal fundido en la copa durante el vaciado, entonces la escoria flota y no entra en la cavidad del molde. Se usan *filtros* para atrapar grandes contaminantes, disminuir la velocidad del metal y hacer que el flujo sea más laminar. Se pueden emplear *enfriadores* para acelerar la solidificación del metal en una región particular de una fundición.

Establecimiento de buenas prácticas. Mucho se ha observado que cierto diseño de molde puede producir partes tanto aceptables como defectuosas, y es poco común que produzca sólo partes adecuadas o sólo defectuosas. Para verificar fundiciones defectuosas, son necesarios procedimientos de control de calidad. A continuación se presentan algunos de los problemas comunes:

- Es fundamental empezar con un metal fundido de alta calidad para producir fundiciones superiores. Tanto la temperatura de vaciado como la química del metal, el arrastre de gas y el manejo de los procedimientos pueden afectar la calidad del metal que se vacía en un molde.
- No se debe interrumpir el vaciado del metal, ya que puede arrastrar escoria y producir turbulencia. La lúnula del metal fundido en la cavidad del molde debe experimentar un avance continuo, sin interrupciones y hacia arriba.

- Las diferentes velocidades de enfriamiento en el cuerpo de una fundición producen esfuerzos residuales, por lo que podría necesitarse el relevado de esfuerzos (sección 4.11) para evitar distorsiones de las fundiciones en aplicaciones críticas.

12.2.2 Diseño para la fundición de moldes desechables

Los procesos de moldes desechables tienen consideraciones específicas de diseño que, sobre todo, se atribuyen al material del molde, el tamaño de las partes y el método de fabricación. Es claro que una fundición en un proceso de molde desechable (como una fundición por revestimiento) tarda en enfriarse más que, digamos, en la fundición a presión en matriz, lo que tiene implicaciones importantes en la distribución de los moldes.

Algunas consideraciones importantes de diseño para fundición de moldes desechables son las siguientes:

Distribución del molde. Las características del molde deben colocarse de manera lógica y compacta, con varias compuertas según sea necesario. Uno de los objetivos más importantes en la distribución del molde es que la solidificación se inicie en un extremo del mismo y que avance en un frente uniforme a través de la fundición, solidificando las mazarotas al final. Tradicionalmente, esta distribución se ha basado en la experiencia, en las consideraciones del flujo del fluido y la transferencia de calor. En épocas más recientes se han creado programas comerciales para computadoras basados en algoritmos de diferencias finitas, que permiten la simulación del llenado del molde y la rápida evaluación de la distribución del mismo.

Diseño de las mazarotas. Un problema importante en el diseño de las fundiciones es el tamaño y la colocación de las mazarotas. Éstas son extremadamente útiles al afectar el avance del frente de solidificación a través de una fundición y son fundamentales en la distribución del molde que se indicó antes. Las mazarotas ciegas son características apropiadas de diseño y mantienen el calor por más tiempo que las abiertas. Las mazarotas se diseñan de acuerdo con seis reglas básicas:

1. La mazarota no debe solidificarse antes que la fundición. Por lo general, esto se logra evitando las mazarotas pequeñas y utilizando las cilíndricas con relaciones de aspecto pequeño (relaciones pequeñas de altura a sección transversal). Las mazarotas esféricas son las de forma más efectiva, pero es difícil trabajar con ellas.
2. El volumen de la mazarota debe ser lo suficientemente grande para que proporcione una cantidad suficiente de metal líquido y así compensar la contracción en la fundición.
3. Las uniones entre la fundición y el alimentador no deben desarrollar un punto caliente en el que se pueda producir porosidad por contracción.
4. Las mazarotas deben colocarse de manera que el metal líquido se pueda depositar en los lugares donde más se necesite.
5. Debe haber suficiente presión para conducir el metal líquido al interior de los lugares del molde donde se requiera. Por lo tanto, las mazarotas no son tan útiles para metales con densidad menor (como las aleaciones de aluminio) como lo son para aquéllos con densidad mayor (como el acero y el hierro fundido).
6. La presión potencial de la mazarota debe suprimir la formación de cavidades y estimular su llenado completo.

Tolerancias de maquinado. Debido a que la mayoría de las fundiciones de moldes desechables requieren ciertas operaciones adicionales de acabado, como maquinado y rectificación, deben considerarse tolerancias para estas operaciones en el diseño de las fundiciones. Estas tolerancias, que se incluyen en las dimensiones de los modelos, dependen del tipo de fundición y aumentan con el tamaño y espesor de la sección de las fundiciones. Por lo general, van de entre 2 y 5 mm (0.1 a 0.2 pulgada) para fundiciones pequeñas, a más de 25 mm (1 pulgada) para fundiciones grandes.

12.2.3 Diseño para fundición en moldes permanentes

En el ejemplo 12.1 se tratan lineamientos y ejemplos típicos de diseño para fundición en moldes permanentes. En el diseño de herramientas para fundición a presión hay factores especiales por considerar. No obstante que los diseños pueden modificarse con el fin de eliminar el ángulo de extracción para una mejor exactitud dimensional, por lo general se requiere un ángulo de $1/2^\circ$ o incluso $1/4^\circ$; de lo contrario, se pueden producir escoriaciones (por amarrado local o por adhesión del material) entre la parte y las matrices y provocar distorsión.

Las partes fundidas a presión adquieren una forma cercana a la neta, requiriendo sólo la remoción de las compuertas y un mecanizado menor para eliminar rebabas y otros defectos menores. El acabado superficial y la exactitud dimensional de las partes fundidas a presión son muy buenas (ver tabla 11.2) y, en general, no necesitan tolerancia para maquinado.

EJEMPLO 12.1 Ilustraciones de diseños de fundición deficientes y adecuados

En la figura 12.3 se muestran varios ejemplos de diseños deficientes y adecuados para fundiciones en moldes permanentes y a presión. A continuación se describen las diferencias significativas en el diseño para cada ejemplo.

- a. La parte inferior del diseño de la izquierda tiene una pared delgada sin un papel funcional aparente, por lo que este punto puede fracturarse si se somete a fuerzas elevadas o a impacto. El diseño adecuado elimina este problema y puede simplificar la fabricación de matrices y moldes.
- b. Las superficies planas grandes siempre presentan dificultades al fundir metales (y materiales no metálicos), ya que tienden a combarse y a desarrollar superficies disparejas. Una práctica común para evitar esta situación consiste en dividir la superficie con costillas y serraciones del lado opuesto de la fundición. Este método reduce en gran medida la distorsión sin afectar la apariencia ni la función de la superficie plana.
- c. Este ejemplo de diseños deficiente y adecuado es importante no sólo para fundiciones, sino también para partes que se maquilan o rectifican. Es difícil producir radios internos o esquinas agudas que pudieran requerirse para efectos funcionales, como los insertos que se diseñan a fin de llegar al fondo de la cavidad de la parte. Además, en el caso de cavidades lubricadas, el lubricante se puede acumular en el fondo y, al ser incompresible, evita la inserción total de una parte en la cavidad. La colocación de un radio pequeño en las esquinas o en la periferia del fondo de la parte elimina este problema.
- d. La función de dicha parte puede ser, por ejemplo, la de una perilla que se sujeta y se gira; y de ahí, las características exteriores a lo largo de su periferia. Obsérvese en el diseño de la izquierda que la periferia interior de la perilla también presenta características que no son funcionales, pero que ayudan a ahorrar material. La matriz de fundición para un diseño adecuado es más fácil de fabricar.
- e. Obsérvese que el diseño deficiente tiene filetes agudos en la base de las ranuras longitudinales, por lo que la matriz posee protuberancias filosas (filo de cuchillo). Debido a su filo, es posible que, con el uso prolongado de la matriz, estos bordes se astillen.
- f. El diseño deficiente de la izquierda tiene roscas que alcanzan la cara derecha de la fundición, por lo cual es posible que durante la fundición parte del metal fundido penetre en esta región, formando una rebaba e interfiriendo en la función del inserto roscado, como cuando se utiliza una tuerca. El diseño adecuado usa un desplazamiento en la barra roscada para eliminar este problema. La consideración de este diseño también se aplica al moldeo por inyección de los plásticos, ejemplo que se muestra en la figura 19.9.

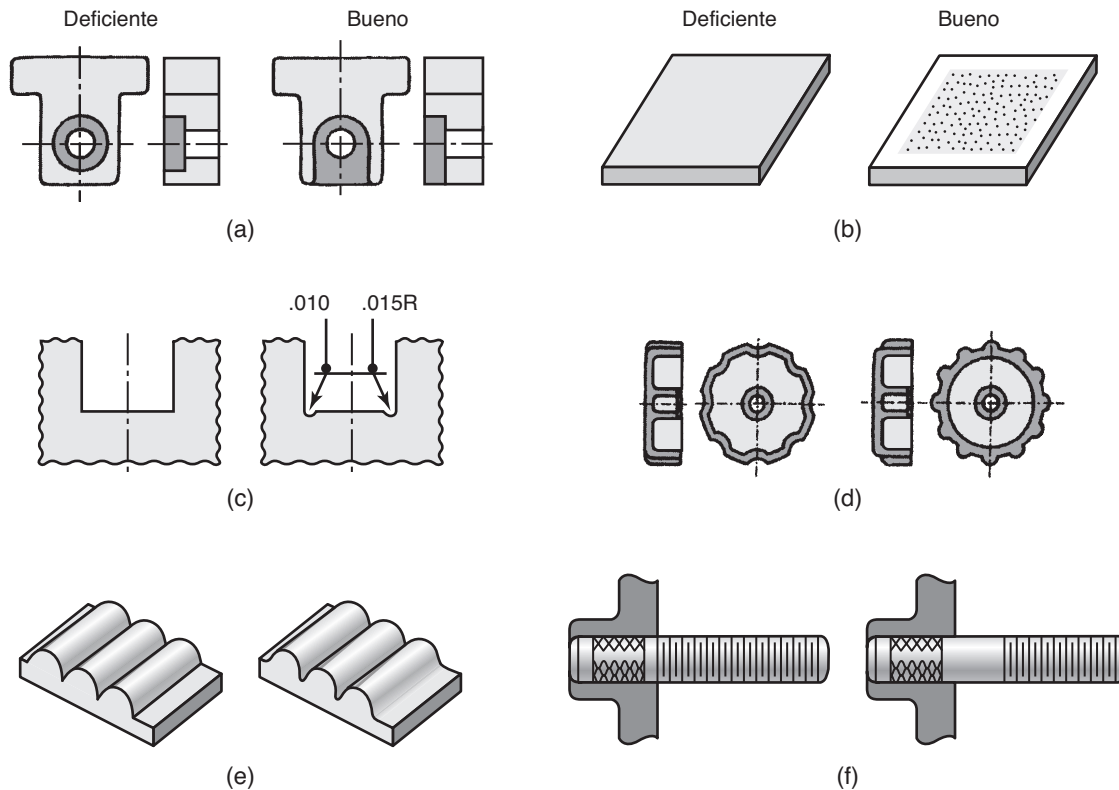


FIGURA 12.3 Ejemplos de diseños indeseables (deficientes) y deseables (buenos) de fundición. Fuente: Cortesía del American Die Casting Institute.

12.2.4 Modelado por computadora de procesos de fundición

Debido a que la fundición involucra acciones complejas entre variables del material y del proceso, es fundamental elaborar un estudio cuantitativo de estas interacciones para diseñar de manera apropiada las fundiciones y producir fundiciones de alta calidad. A pesar de que en el pasado estos estudios enfrentaban grandes dificultades, los rápidos avances en la computación y las técnicas de modelado han conducido a innovaciones importantes en el modelado de algunos aspectos de la fundición (como el flujo del fluido, la transferencia de calor y las microestructuras desarrolladas durante la solidificación) conforme a varias condiciones de dicho proceso.

El modelado del *flujo del fluido en el molde* se basa en las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad (sección 10.3). Predice el comportamiento del metal durante el vaciado en el sistema de alimentación y su avance en la cavidad del molde, así como las distribuciones de velocidad y presión en el sistema. También se han logrado avances en el modelado de la *transferencia de calor* en la fundición. El software moderno puede reunir el flujo del fluido, la transferencia de calor y los efectos de las condiciones de la superficie, las propiedades térmicas de los materiales involucrados y la convección natural y forzada durante el enfriamiento. Obsérvese que las condiciones de la superficie varían durante la solidificación, conforme se desarrolla una capa de aire entre la fundición y la pared del molde debido a la contracción. Se han efectuado estudios similares sobre el modelado del desarrollo de *microestructuras* en la fundición. Estos estudios abarcan el flujo de calor, los gradientes de temperatura, la nucleación y el desarrollo de cristales, la formación de estructuras dendríticas y equiaxiales, el choque recíproco de los granos y el movimiento de la interfaz líquido-sólido durante la solidificación.

Por ejemplo, hoy en día dichos modelos tienen la capacidad de predecir el ancho de la zona pastosa (ver fig. 10.4) durante la solidificación y el tamaño del grano en las fundiciones. De manera similar, la capacidad de calcular isoterma (líneas con la misma temperatura) proporciona una introspección de los posibles puntos calientes y el desarrollo posterior de cavidades por contracción. Con la disponibilidad de software amigable para el usuario y los avances en el diseño y la fabricación asistidos por computadora, las técnicas de modelado se han vuelto más fáciles de implantar. Los beneficios son el aumento de la productividad, el mejoramiento de la calidad, mayor facilidad de planeación y estimación de costos, así como una respuesta más rápida para los cambios de diseño. En la actualidad existen diversos programas de software comercial para procesos de modelado para fundición, como Magmasoft, ProCast, Solidia y AFSsolid.

12.3 Aleaciones para fundición

En los capítulos 5 y 6 se describieron las propiedades y aplicaciones generales de los metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas, respectivamente. En esta sección se describen las propiedades y aplicaciones de los metales y las aleaciones para fundición; sus propiedades y características de fundición y fabricación se resumen en la figura 12.4 y en las tablas 12.2 a 12.5. Además de dichas características, algunas consideraciones importantes en las aleaciones para fundición son su maquinabilidad y soldabilidad, ya que por lo general se ensamblan con otros componentes para producir la parte entera.

La aleación para fundición más utilizada (en tonelaje) es el hierro gris, seguido del hierro dúctil, aluminio, zinc, plomo, cobre, hierro maleable y magnesio. Los embarques de fundiciones en Estados Unidos son de casi 13 millones de toneladas por año.

12.3.1 Aleaciones no ferrosas para fundición

A continuación se describen las aleaciones no ferrosas comunes para fundición:

Aleaciones con base de aluminio. Las aleaciones con base de aluminio tienen una amplia gama de propiedades mecánicas, principalmente debido a varios mecanismos de endurecimiento y tratamientos térmicos que se pueden utilizar en ellas (sección 4.9). Estas aleaciones ofrecen alta conductividad eléctrica y, por lo general, buena resistencia a la corrosión atmosférica. Sin embargo, su resistencia a algunos ácidos y a todos los álcalis es deficiente y se debe tener cuidado para evitar la corrosión galvánica. No son tóxicas, su peso es ligero y tienen maquinabilidad adecuada. Excepto las aleaciones con silicio, suelen mostrar baja resistencia al desgaste y a la abrasión. Las aleaciones con base de aluminio tienen diversas aplicaciones, incluyendo los usos arquitectónico y decorativo. Una tendencia creciente es su empleo en automóviles, para componentes como monobloques de motores, cabezas de cilindros, múltiples de admisión, cajas de transmisión, componentes de suspensión, ruedas y frenos. A las partes hechas de aleaciones con base de aluminio y base de magnesio se les conoce como fundiciones de **metal ligero**.

Aleaciones con base de magnesio. La densidad más baja de todas las aleaciones para fundiciones comerciales se encuentra en el grupo con base de magnesio. Tienen buena resistencia a la corrosión y resistencia moderada, según el tratamiento térmico específico utilizado. Se aplican en ruedas automotrices, cubiertas y monobloques de motores enfriados por aire.

Aleaciones con base de cobre. Aunque son costosas, las aleaciones con base de cobre tienen buena conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión y nula toxicidad, así como propiedades de desgaste adecuadas para materiales de soporte. Existe una gran variedad de aleaciones con base de cobre, incluyendo latones y bronce de aluminio, de fósforo y de estaño.

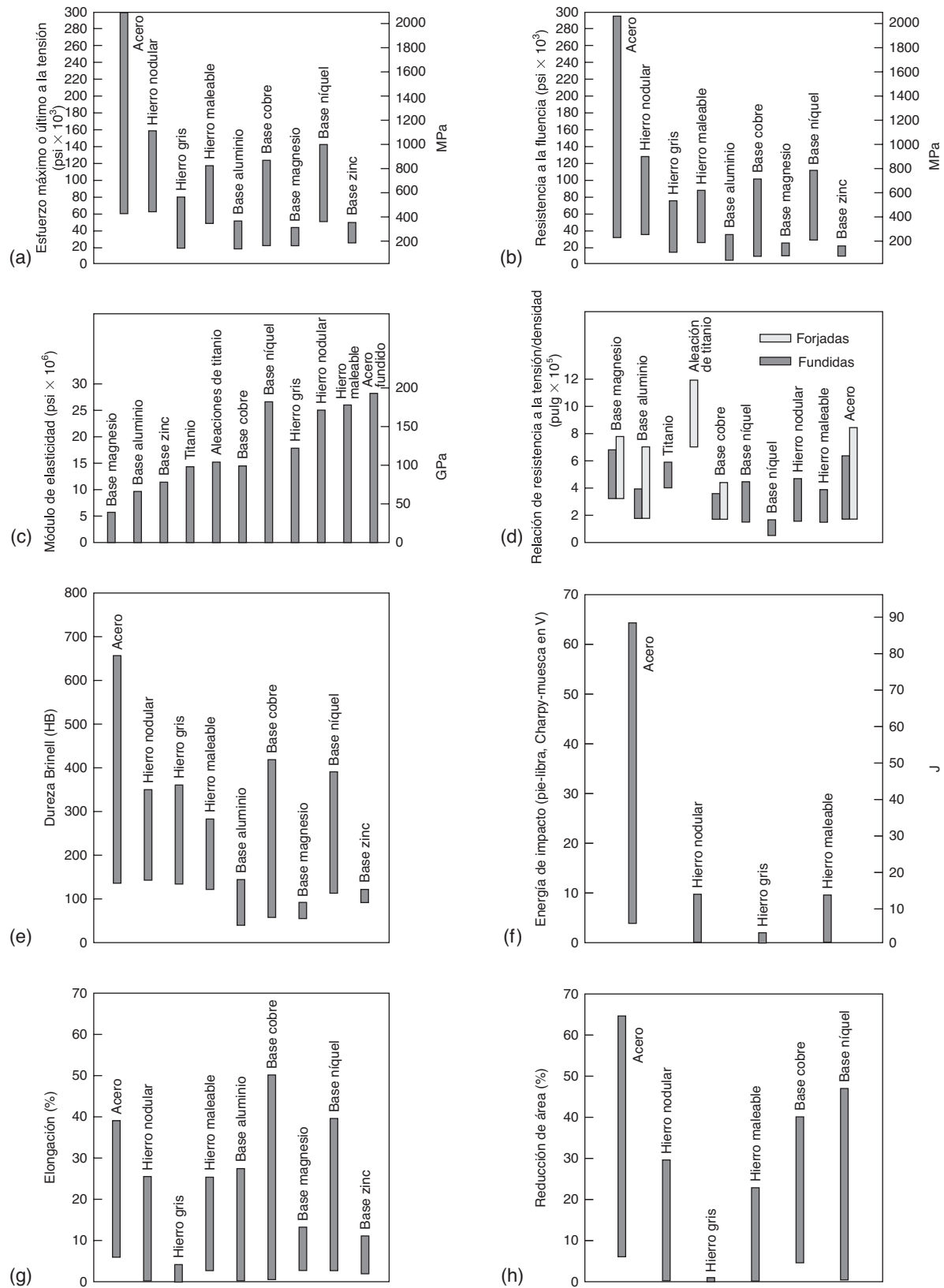


FIGURA 12.4 Propiedades mecánicas para diferentes grupos de aleaciones fundidas. Obsérvese que incluso dentro del mismo grupo las propiedades varían en una amplia gama, en especial para los aceros fundidos. *Fuente:* Cortesía de Steel Founder's Society of America.

TABLA 12.2

Aplicaciones comunes de las fundiciones y características de fundición				
Tipo de aleación	Aplicaciones comunes	Capacidad de fundición*	Soldabilidad*	Maquinabilidad*
Aluminio	Pistones, cajas de embragues, múltiples de admisión	E	R	A-E
Cobre	Bombas, válvulas, engranes, propulsores marinos	R-A	R	R-A
Hierro dúctil	Cigüeñales, engranes de uso pesado	A	D	A
Hierro gris	Monobloques de motores, engranes, discos y tambores de frenos, bastidores de máquinas	E	D	A
Magnesio	Cárter de cigüeñales, cajas de transmisión	A-E	A	E
Hierro maleable	Maquinaria agrícola y de construcción, rodamientos de uso pesado, material rodante para ferrocarriles	A	D	A
Níquel	Álabes para turbinas de gas, componentes de bombas y válvulas para plantas químicas	R	R	R
Acero (al carbono y de baja aleación)	Bloques de matrices, piezas brutas de engranes de uso pesado, elementos de trenes de aterrizaje de aviones, ruedas de ferrocarril	R	E	R
Acero (de alta aleación)	Cajas de turbinas de gas, componentes de bombas y válvulas, mandíbulas de trituradoras de piedra	R	E	R
Hierro blanco	Molinos, boquillas para granallado, zapatas de freno de ferrocarril, trituradoras y pulverizadoras	A	MD	MD
Zinc	Manijas de puertas, parrillas de radiadores	E	D	E

*E = Excelente; A = adecuado; R = regular; MD = muy deficiente; D = difícil

TABLA 12.3

Propiedades y aplicaciones comunes de los hierros fundidos					
Hierro fundido	Tipo	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones típicas
Gris	Ferrítico	170	140	0.4	Tubería, drenaje sanitario
	Perlítico	275	240	0.4	Monobloques para motores, máquinas herramienta
Dúctil (Nodular)	Martensítico	550	550	0	Superficies de desgaste
	Ferrítico	415	275	18	Tubería, servicio general
	Perlítico	550	380	6	Cigüeñales, partes sujetas a fuertes tensiones
	Martensita revenida	825	620	2	Partes de máquinas con alta resistencia, partes resistentes a desgaste
Maleable	Ferrítico	365	240	18	Herrajes, accesorios de tubería, servicio general de ingeniería
	Perlítico	450	310	10	Equipo ferroviario, acoplamientos
	Martensita revenida	700	550	2	Equipo ferroviario, engranes, bielas
Blanco	Perlítico	275	275	0	Partes resistentes al desgaste, rodillos para laminado

TABLA 12.4

Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises				
Clase ASTM	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Dureza (HB)
20	152	572	66–97	156
25	179	669	79–102	174
30	214	752	90–113	210
35	252	855	100–119	212
40	293	965	110–138	235
50	362	1130	130–157	262
60	431	1293	141–162	302

TABLA 12.5

Propiedades y aplicaciones comunes de las aleaciones no ferrosas fundidas					
Aleaciones (UNS)	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación en 50 mm (%)	Aplicaciones comunes
Aleaciones de aluminio					
195 (AO1950)	Con tratamiento térmico	220–280	110–220	8.5–2	Fundiciones en arena
319 (AO3190)	Con tratamiento térmico	185–250	125–180	2–1.5	Fundiciones en arena
356 (AO3560)	Con tratamiento térmico	260	185	5	Fundiciones en molde permanente
Aleaciones de cobre					
Latón rojo (C83600)	Recocido	235	115	25	Accesorios de tubería, engranes
Latón amarillo (C86400)	Recocido	275	95	25	Herrajes, ornamental
Bronce de manganeso (C86100)	Recocido	480	195	30	Cubos de propulsores, álabes
Bronce de estaño plomado (C92500)	Recocido	260	105	35	Engranes, rodamientos, válvulas
Bronce de cañón (C90500)	Recocido	275	105	30	Partes para bombas, accesorios
Plata níquel (C97600)	Recocido	275	175	15	Partes marinas, válvulas
Aleaciones de magnesio					
AZ91A	F	230	150	3	Fundiciones a presión
AZ63A	T4	275	95	12	Fundiciones en arena y en molde permanente
AZ91C	T6	275	130	5	Partes de alta resistencia
EZ33A	T5	160	110	3	Partes de temperatura elevada
HK31A	T6	210	105	8	Partes de temperatura elevada
QE22A	T6	275	205	4	Partes de máxima resistencia

Aleaciones con base de zinc. Las aleaciones con base de zinc son un grupo de aleaciones con bajo punto de fusión que tienen excelente resistencia a la corrosión, buena fluidez y suficiente resistencia para aplicaciones estructurales. Por lo común se utilizan en la fundición a presión, sobre todo para partes con paredes delgadas y formas intrincadas.

Aleaciones con base de estaño. Aunque de baja resistencia, estas aleaciones tienen buena resistencia a la corrosión y, por lo general, se utilizan para superficies de cojinetes.

Aleaciones con base de plomo. Estas aleaciones tienen aplicaciones similares a las de las aleaciones con base de estaño, pero la toxicidad del plomo es una desventaja que impide su mayor aplicación.

Aleaciones de alta temperatura. Las aleaciones de alta temperatura tienen una amplia gama de propiedades y por lo general requieren temperaturas de hasta 1650 °C (3000 °F) para fundir titanio y superaleaciones, y más elevadas en el caso de aleaciones refractarias (Mo, Nb, W y Ta). Se utilizan técnicas especiales para fundir estas aleaciones para boquillas y varios componentes de motores de reacción y cohetes. Algunas de estas aleaciones son más adecuadas y económicas para fundición que para formado mediante otros métodos de fabricación, como el forjado.

12.3.2 Aleaciones ferrosas para fundiciones

Las aleaciones ferrosas fundidas más comunes son las siguientes:

Hierros fundidos. Los hierros fundidos son los metales fundidos más numerosos y se pueden fundir con facilidad en formas intrincadas. Por lo general poseen diversas propiedades deseables, como resistencia al desgaste, dureza y buena maquinabilidad. El término *hierro fundido* se refiere a una familia de aleaciones y, como se describe en la sección 4.6, se clasifican en hierros fundidos gris, dúctil (nodular o esferoidal), blanco, maleable y de grafito compactado. En las tablas 12.3 y 12.4 se describen sus propiedades generales y aplicaciones comunes.

- a. **Hierro fundido gris.** Las fundiciones de hierro fundido gris tienen relativamente pocas cavidades por contracción y poca porosidad. Diferentes formas de esta aleación son el *ferrítico*, el *perlítico* y el *martensítico*. Debido a las diferencias en sus estructuras, cada tipo tiene distintas propiedades. En la tabla 12.4 se proporcionan las propiedades mecánicas de diversas clases de hierro fundido gris. Se utilizan comúnmente en los monobloques de motores, alojamientos de motores eléctricos, tubos y superficies de desgaste para máquinas. Además, su capacidad de amortiguamiento lo ha convertido en un material común para bancadas de máquinas herramienta. Los hierros fundidos grises se especifican mediante una designación de ASTM de dos dígitos. Por ejemplo, la clase 20 indica que el material debe tener una resistencia mínima a la tensión de 20 ksi (140 MPa).
- b. **Hierro dúctil (nodular).** Generalmente utilizados para partes de máquinas, carcasas, engranes, tubos, rodillos para laminadores y cigüeñales de automóviles, los hierros dúctiles se especifican mediante un conjunto de números de dos dígitos. Por ejemplo, la clase o grado 80-55-06 indica que el material tiene una resistencia mínima a la tensión de 80 ksi (550 MPa), una resistencia mínima a la fluencia de 55 ksi (380 MPa) y 6% de elongación en 2 pulgadas (50 mm).
- c. **Hierro fundido blanco.** Debido a su extrema dureza y resistencia al desgaste, el hierro fundido blanco se utiliza principalmente en rodillos para laminadores, zapatas para frenos de carros de ferrocarril y revestimientos en maquinaria para procesar materiales abrasivos.
- d. **Hierro maleable.** El hierro maleable se usa principalmente en equipo ferroviario y varios tipos de herrajes, accesorios y componentes para aplicaciones eléctricas. Los hierros maleables se especifican mediante una designación de cinco dígitos. Por ejemplo, 35018 indica que la resistencia a la fluencia del material es de 35 ksi (240 MPa) y su elongación es de 18% en 2 pulgadas.
- e. **Hierro de grafito compactado.** Producido comercialmente por primera vez en 1976, el hierro de grafito compactado (CGI) tiene propiedades que se encuentran entre las de los hierros grises y dúctiles: los primeros tienen buen amortiguamiento y conductividad térmica, aunque baja ductilidad, en tanto que los segundos poseen amortiguamiento y conductividad térmica deficientes, pero alta resistencia a la tensión y resistencia a la fatiga. El hierro de grafito compactado ofrece amortiguamiento y propiedades térmicas similares a las del hierro gris, y resistencia y rigidez comparables a las del hierro dúctil. Debido a su resistencia, las partes hechas de

CGI pueden ser más pequeñas y, por lo tanto, más ligeras. Es fácil de fundir, tiene propiedades consistentes durante la fundición y su maquinabilidad es mejor que la del hierro dúctil (lo que es importante, ya que se utiliza en monobloques de motores automovilísticos y cabezas de cilindros). Se están desarrollando nuevas técnicas de fundición para mejorar la maquinabilidad del CGI.

Aceros fundidos. Debido a las altas temperaturas necesarias para fundir aceros (hasta de 1650 °C, 3000 °F), este proceso requiere experiencia considerable. Las altas temperaturas implican dificultades en la selección de los materiales para los moldes, en particular por la alta reactividad de los aceros con el oxígeno durante la fundición y el vaciado del metal. Las fundiciones de acero poseen propiedades que son más uniformes (isotrópicas) que las fabricadas mediante procesos de trabajo mecánico (parte III). Los aceros fundidos se pueden soldar; sin embargo, la soldadura altera la microestructura de la fundición en la zona afectada por el calor (ver fig. 30.17), afectando de esta manera la resistencia, ductilidad y tenacidad del metal base. Es necesario realizar un tratamiento térmico posterior a fin de restaurar las propiedades mecánicas de la fundición. Las piezas fundidas soldadas han ganado importancia en el ensamble de máquinas y estructuras grandes, cuyas configuraciones complejas o el tamaño de la fundición pueden hacer que la fundición de la parte para una sola ubicación no sea económica. Los aceros fundidos tienen importantes aplicaciones en equipo para vías férreas, minería, plantas químicas, campos petroleros y construcción pesada.

Aceros inoxidables fundidos. La fundición de aceros inoxidables involucra consideraciones similares a las de los aceros. Por lo general, tienen intervalos de solidificación largos y altas temperaturas de fusión. Pueden desarrollar diversas estructuras, según su composición y los parámetros de su procesamiento. Existen aceros inoxidables fundidos con diversas composiciones que se pueden tratar térmicamente y soldar. Estos productos poseen alta resistencia al calor y a la corrosión, en especial en las industrias química y alimentaria. Las aleaciones con base de níquel para fundición se utilizan en ambientes severamente corrosivos y para servicio de alta temperatura.

12.4 | Economía de la fundición

Como en todos los procesos de fabricación, el costo de cada parte fundida (**costo unitario**) depende de diversos factores, incluyendo materiales, equipo y mano de obra. Al revisar los diversos procesos de fundición en el capítulo 11, se puede observar que unos requieren más mano de obra que otros; algunos necesitan costosas matrices y maquinaria, en tanto que otros requieren una gran cantidad de tiempo para producir las fundicio-

TABLA 12.6

Características generales de los costos de los procesos de fundición

Proceso de fundición	Costo*			Capacidad de producción (piezas/hora)
	Matriz	Equipo	Mano de obra	
En arena	B	B	B-M	<20
Molde en cáscara	B-M	M-A	B-M	<50
Yeso	B-M	M	M-A	<10
Por revestimiento	M-A	B-M	A	<1000
En molde permanente	M	M	B-M	<60
A presión en matriz	A	A	B-M	<200
Centrífuga	M	A	B-M	<50

*B = bajo; M = medio; A = alto.

nes (tabla 12.6). Cada uno de estos factores individuales afecta (en grados variables) el costo general de una operación de fundición. Como se describe con mayores detalles en la sección 40.7, el costo de un producto incluye los costos de materiales, mano de obra, herramental y equipo. La preparación para la fundición de un artículo incluye la producción de moldes y matrices que requieren materias primas, tiempo y esfuerzo, todo lo cual también afecta el costo de los productos.

Como se puede observar en la tabla 12.6, los moldes para fundición en arena implican un costo relativamente pequeño. En cambio, los moldes para diversos procesos y las matrices para fundición a presión requieren materiales costosos y mucha preparación. También existen costos importantes implícitos en la elaboración de modelos para fundición, aunque (como se señala en la sección 11.2.1) hay un gran avance en el uso de técnicas de elaboración rápida de prototipos para reducir costos y tiempo.

La fusión y el vaciado del metal fundido en moldes, así como el tratamiento térmico, la limpieza y la inspección de las fundiciones, también implican costos. El tratamiento térmico es una parte importante de la producción de muchos grupos de aleaciones (en especial de las fundiciones ferrosas) y puede ser necesario para producir propiedades mecánicas mejoradas. Sin embargo, también introduce otro conjunto de problemas de producción (como la formación de escamas en las superficies de fundición y alabeo de la parte) que pueden ser importantes en los costos. La mano de obra y las habilidades requeridas para estas operaciones pueden variar de modo considerable, dependiendo del proceso particular y el nivel de automatización en el taller de fundición. Por ejemplo, la fundición por revestimiento exige mucha mano de obra debido a los diversos pasos involucrados en la operación, aunque es posible cierta automatización, como el uso de robots (fig. 12.5). En cambio, operaciones como los procesos altamente automatizados de fundición a presión en matriz pueden mantener altas tasas de producción con poca mano de obra.



FIGURA 12.5 Un robot genera una cáscara de cerámica en modelos (árboles) de cera para fundición por revestimiento. El robot se programa para sumergir los árboles y después colocarlos en un sistema de secado automatizado. Con muchas capas, se forma una cáscara gruesa de cerámica apropiada para la fundición por revestimiento. *Fuente:* Cortesía de Wisconsin Precision Casting Corporation.

También debe hacerse notar que el costo por cada fundición disminuye conforme aumenta el número de partes fundidas. Por lo tanto, el sostenimiento de altas tasas de producción puede justificar el alto costo de matrices y maquinaria. Sin embargo, si la demanda es relativamente pequeña, el costo por cada fundición aumenta con rapidez. Así que se vuelve más económico fabricar las partes mediante fundición en arena u otros procesos de fundición que se describen en este capítulo, o mediante otros procesos de fabricación que se describen en las partes III y IV.

RESUMEN

- Se han establecido lineamientos generales para ayudar a los diseñadores a producir fundiciones sin defectos y cumplir con las tolerancias dimensionales, los requisitos de servicio y diversas especificaciones y estándares. Estos principios tienen que ver con la forma de la fundición y con diversas técnicas para minimizar los puntos calientes que pueden causar cavidades por contracción. Debido al gran número de variables involucradas, es fundamental el control riguroso de todos los parámetros, en particular de los relacionados con la naturaleza del flujo del metal líquido al interior de los moldes y matrices y con la velocidad de enfriamiento en diferentes regiones del molde.
- Existen diversas aleaciones ferrosas y no ferrosas para fundición con una amplia gama de propiedades, características de fundición y aplicaciones. Puesto que muchas fundiciones se diseñan y producen para ensamblarse con otros componentes y estructuras mecánicas (subensambles), también son importantes muchas otras consideraciones (como la soldabilidad, maquinabilidad y características superficiales).
- Entre los límites del buen rendimiento, los aspectos económicos de la fundición son tan importantes como las consideraciones técnicas. Los factores que afectan el costo general son el costo de materiales, moldes, matrices, equipo y mano de obra, cada uno de los cuales varía con las operaciones específicas. Un parámetro importante es el costo por cada fundición, que puede justificar grandes gastos para grandes lotes de producción utilizando maquinaria automatizada y controles por computadora.

TÉRMINOS CLAVE

Cavidades por contracción

Costo unitario

Hierro de grafito compactado

Hierro fundido

Línea de partición

Molde inferior

Porosidad

Principios de diseño

Puntos calientes

Tolerancia a la contracción de los fabricantes de modelos

Tolerancia de maquinado

BIBLIOGRAFÍA

Abrasion-Resistant Cast Iron Handbook, American Foundry Society, 2000.

Alexiades, V., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, 1993.

Allsop, D. F. y Kennedy, D., *Pressure Die Casting-Part II: The Technology of the Casting and the Die*, Pergamon, 1983.

An Introduction to Die Casting, American Die Casting Institute, 1981.

Analysis of Casting Defects, American Foundrymen's Society, 1974.

ASM Handbook, Vol. 15: *Casting*, ASM International, 1988.

ASM Specialty Handbook: Cast Irons, ASM International, 1996.

Bradley, E. F., *High-Performance Castings: A Technical Guide*, Edison Welding Institute, 1989.

Campbell, J., *Castings*, 2a. ed., Butterworth-Heinemann, 2003.

Casting Defects Handbook, American Foundrymen's Society, 1972.

Clegg, A. J., *Precision Casting Processes*, Pergamon, 1991.

Davis, J. R. (ed.), *Cast Irons*, ASM International, 1996.

Elliott, R., *Cast Iron Technology*, Butterworth, 1988.

Heine, R. W., Loper, C. R., Jr. y Rosenthal, C., *Principles of Metal Casting*, 2a. ed., McGraw-Hill, 1967.

Investment Casting Handbook, Investment Casting Institute, 1997.

- Johns, R., *Casting Design*, American Foundrymen's Society, 1987.
- Karlsson, L. (ed.), *Modeling in Welding. Hot Powder Forming and Casting*, ASM International, 1997.
- Kaye, A. y Street, A. C., *Die Casting Metallurgy*, Butterworth, 1982.
- Krauss, G., *Steels: Heat Treatment and Processing Principles*, ASM International, 1990.
- Kurz, W. y Fisher, D. J., *Fundamentals of Solidification*, Trans Tech Pub., 1994.
- Liebermann, H. H. (ed.), *Rapidly Solidified Alloys*, Marcel Dekker, 1993.
- The Metallurgy of Die Castings*, Society of Die Casting Engineers, 1986.
- Powell, G. W., Cheng, S.-H. y Mobley, C. E., Jr., *A Fractography Atlas of Casting Alloys*, Battelle Press, 1992.
- Rowley, M. T. (ed.), *International Atlas of Casting Defects*, American Foundrymen's Society, 1974.
- Steel Castings Handbook*, 6a. ed., ASM International, 1995.
- Walton, C. F. y Opar, T. J. (eds.), *Iron Castings Handbook*, 3a. ed., Iron Castings Society, 1981.

PREGUNTAS DE REPASO

- 12.1 Describa las consideraciones generales de diseño en la fundición de metales.
- 12.2 ¿Qué son los puntos calientes? ¿Cuál es su significado en la fundición de metales?
- 12.3 ¿Qué es la tolerancia por contracción? ¿Qué es la tolerancia de maquinado?
- 12.4 ¿Son necesarios los ángulos de salida en todos los moldes?
- 12.5 ¿Cuáles son las fundiciones de metal ligero? ¿Dónde se utilizan generalmente?
- 12.6 Nombre los tipos de hierros fundidos disponibles y liste sus principales características y aplicaciones.
- 12.7 ¿Por qué los aceros son más difíciles de fundir que los hierros fundidos? ¿Cuál es la consecuencia de esto?
- 12.8 Describa los factores importantes involucrados en la economía de las operaciones de fundición.
- 12.9 ¿Cuál es la diferencia entre un canal de alimentación y una compuerta?
- 12.10 ¿Cuál es la diferencia entre la tolerancia de maquinado y la tolerancia dimensional?
- 12.11 Liste las reglas para localizar líneas de partición en fundición.

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 12.12 Describa el procedimiento que seguiría para determinar si un defecto en una fundición es una cavidad por contracción o una porosidad provocada por gases.
- 12.13 Explique cómo haría para evitar el desgarramiento por calor.
- 12.14 Describa su observación respecto de los cambios de diseño mostrados en la figura 12.1.
- 12.15 Si sólo necesita unas cuantas fundiciones del mismo diseño, ¿cuál de los tres procesos sería el más costoso por fundición de pieza?
- 12.16 En lo general, ¿está de acuerdo con los valores de los costos de la tabla 12.6? Si es así, ¿por qué?
- 12.17 Agregue más ejemplos a los mostrados en la figura 12.2.
- 12.18 Explique de qué manera son útiles las costillas y serraciones en la fundición de superficies planas que de lo contrario se podrían distorsionar. Proporcione una ilustración específica.
- 12.19 Describa la naturaleza de los cambios de diseño realizados en la figura 12.3. ¿Qué principios generales observa en esta ilustración?
- 12.20 En la figura 12.4, observe que la ductilidad de algunas aleaciones para fundición es muy baja. ¿Cree que esto debe ser una preocupación importante en aplicaciones de ingeniería de fundiciones? Explique su respuesta.
- 12.21 ¿Cree que habrá menos defectos en una fundición realizada mediante vaciado por gravedad que en una efectuada por vaciado a presión? Explique su respuesta.
- 12.22 Explique la diferencia en la importancia de los ángulos de salida en la fundición en arena verde respecto de la fundición en molde permanente.
- 12.23 ¿Qué tipo de hierro fundido sería apropiado para bastidor de máquinas pesadas, como imprentas y máquinas herramientas? ¿Por qué?
- 12.24 Explique las ventajas y limitaciones de los filetes agudos y redondeados, respectivamente, en el diseño de una fundición.
- 12.25 Explique por qué varía tanto el módulo elástico (E) del hierro fundido gris, como se muestra en la tabla 12.4.
- 12.26 ¿Por qué las mazarotas no son tan útiles en la fundición a presión en matriz como en la fundición en arena?

12.27 Describa las desventajas de tener una mazarota (a) muy grande o (b) muy pequeña.

12.28 ¿Por qué las mazarotas ciegas pueden ser más pequeñas que las mazarotas abiertas?

12.29 Si fuera a incorporar letras o números en una parte fundida en arena, ¿las resaltaría sobre la superficie o las inscribiría dentro de ella? ¿Qué pasa si la parte se produjera mediante fundición por revestimiento? Explique su respuesta.

12.30 Las recomendaciones generales de diseño para un pozo en una fundición en arena (ver fig. 11.3) son: (a) que su diámetro sea por lo menos dos veces el diámetro de salida del bebedero, y (b) que su profundidad sea casi dos veces la profundidad del canal de alimentación. Explique las consecuencias de no apegarse a estos lineamientos.

12.31 Comúnmente, las regiones pesadas de las partes se colocan en el molde inferior de la fundición en arena y no en el molde superior. Explique las razones.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

12.32 Al diseñar modelos para fundición, los fabricantes utilizan reglas especiales que incorporan automáticamente tolerancias para la contracción de los sólidos en sus diseños. Por ejemplo, la regla de 12 pulgadas de un fabricante de modelos es mayor a un pie. ¿Cuán larga debe ser la regla de un fabricante a fin de hacer modelos para (a) fundiciones de aluminio, y (b) acero con alto contenido de manganeso?

12.33 Utilizando los datos proporcionados en la tabla 12.2, grafique diagramas aproximados de (a) capacidad de fundición contra soldabilidad, y (b) capacidad de fundición contra maquinabilidad para al menos cinco de los materiales incluidos en la tabla.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

12.34 Liste los procesos de fundición que son apropiados para fabricar partes huecas con: (a) características externas complejas, (b) características internas complejas, y (c) características internas y externas complejas. Explique sus elecciones.

12.35 Con frecuencia quedan cantidades pequeñas de escoria y desechos después de desnatar y se introducen en el flujo de metal fundido en la fundición. Si se reconoce que la escoria y los desechos son menos densos que el me-

tal fundido, diseñe las características del molde que eliminen pequeñas cantidades de escoria antes que el metal llegue a la cavidad del molde.

12.36 Para la rueda de metal fundido ilustrada en la figura P12.36, muestre cómo pueden utilizarse (a) la colocación de la mazarota, (b) la colocación del macho o corazón, (c) las camisas metálicas, y (d) los enfriadores para ayudar a alimentar el metal fundido y eliminar la porosidad en la saliente del mamelón de la maza.

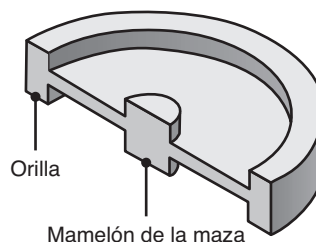


FIGURA P12.36

12.37 Suponga que falta la introducción de este capítulo. Escriba un breve texto para resaltar la importancia de los temas abarcados en ella.

12.38 En la figura P12.38, el diseño original de la fundición mostrado en (a) se modificó con el diseño mostrado

en (b). La fundición es redonda y tiene un eje vertical de simetría. Como parte funcional, ¿qué ventajas cree que tiene el nuevo diseño respecto del anterior?

12.39 En la figura P12.39 se muestra un diseño incorrecto y uno correcto para una fundición. Revise los cambios realizados y comente sus ventajas.

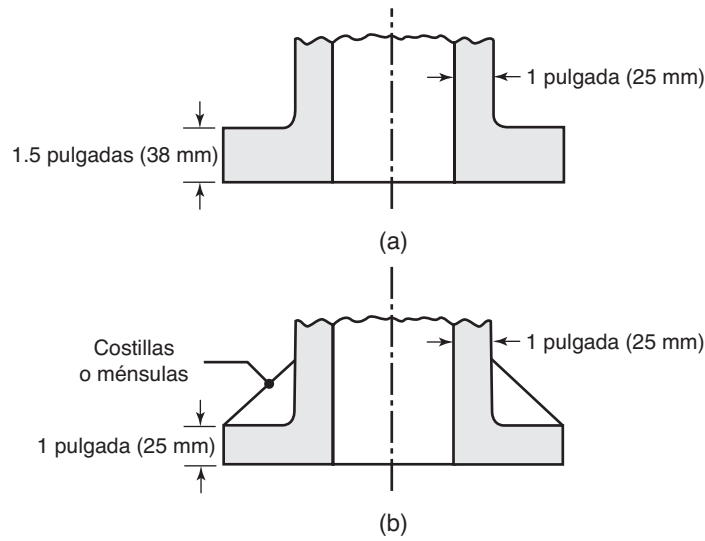


FIGURA P12.38

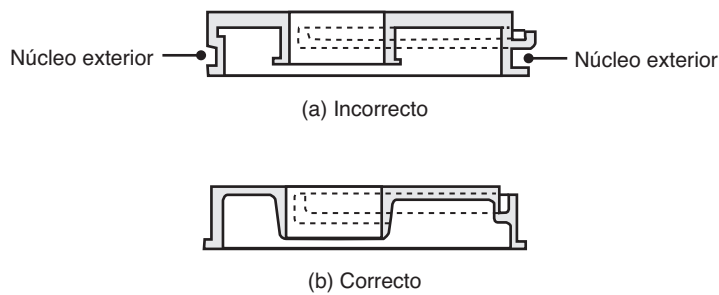


FIGURA P12.39

12.40 En la figura P12.40 se muestran tres grupos de diseños para fundición a presión en matriz. Observe los cambios realizados al diseño 1 de la matriz y comente las razones.

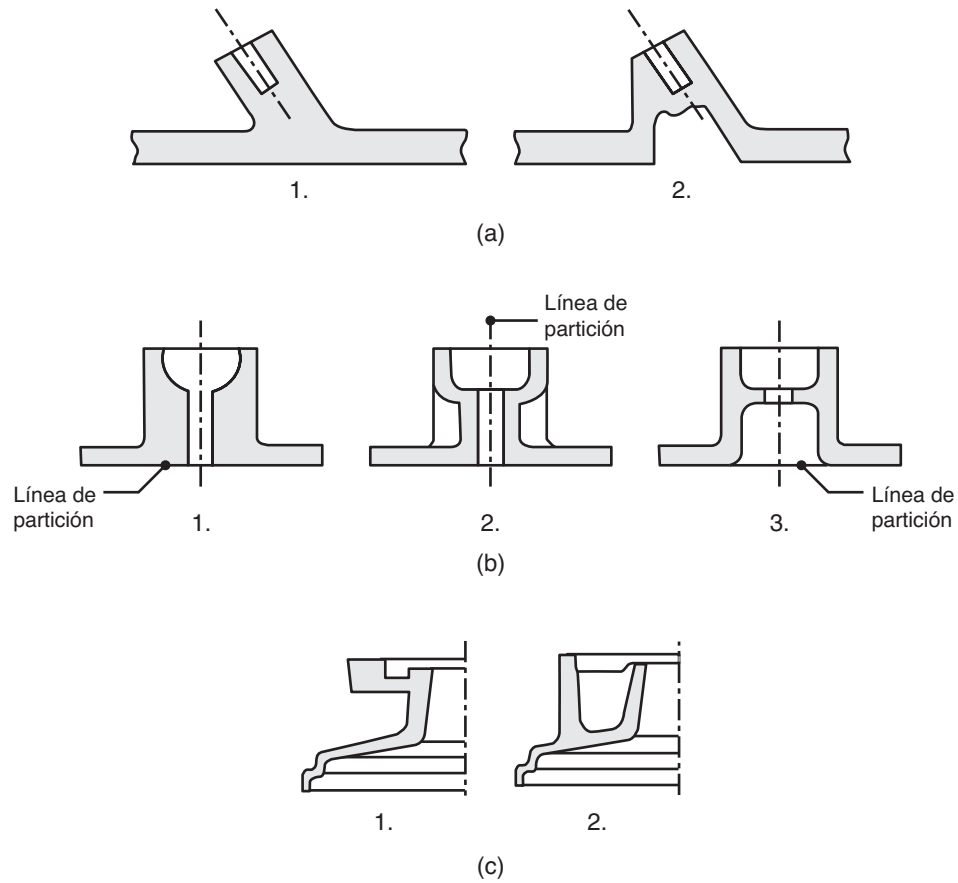
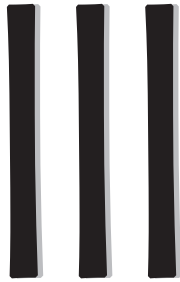


FIGURA P12.40

P A R T E



Procesos y equipo de formado y moldeado

Por lo general, tendemos a dar por sentados muchos de los productos que utilizamos en la actualidad y los materiales y componentes de los que están hechos. Sin embargo, cuando los inspeccionamos, pronto advertimos que se han utilizado una gran variedad de materiales y procesos en su fabricación (fig. III.1). Obsérvese también que algunos productos sólo constan de unas cuantas partes (lápices mecánicos, accesorios para iluminación), mientras que otros están constituidos por miles (automóviles, computadoras) o incluso millones de ellas (aviones, transbordadores espaciales). Hay productos que tienen formas simples con curvaturas lisas (rodamientos de bolas, manubrios de bicicletas), en tanto que otros poseen configuraciones complejas (monobloques de motores, bombas) y superficies de características detalladas (monedas, platería). Algunos artículos se utilizan en aplicaciones críticas (cables de elevadores, álabes para turbinas) y otros en aplicaciones cotidianas (sujetadores para papel, tenedores, cuchillos). Algunos objetos son muy delgados (papel aluminio, películas de plástico), mientras que otros son muy gruesos (cascos de barcos, placas de calderas).

Obsérvese que en el título de esta sección se utilizan las palabras *formado* y *moldeado*. Aunque no siempre hay claras distinciones entre ambas, por lo general el formado indica “cambiar” la forma de un cuerpo sólido existente. Por lo tanto, en los procesos

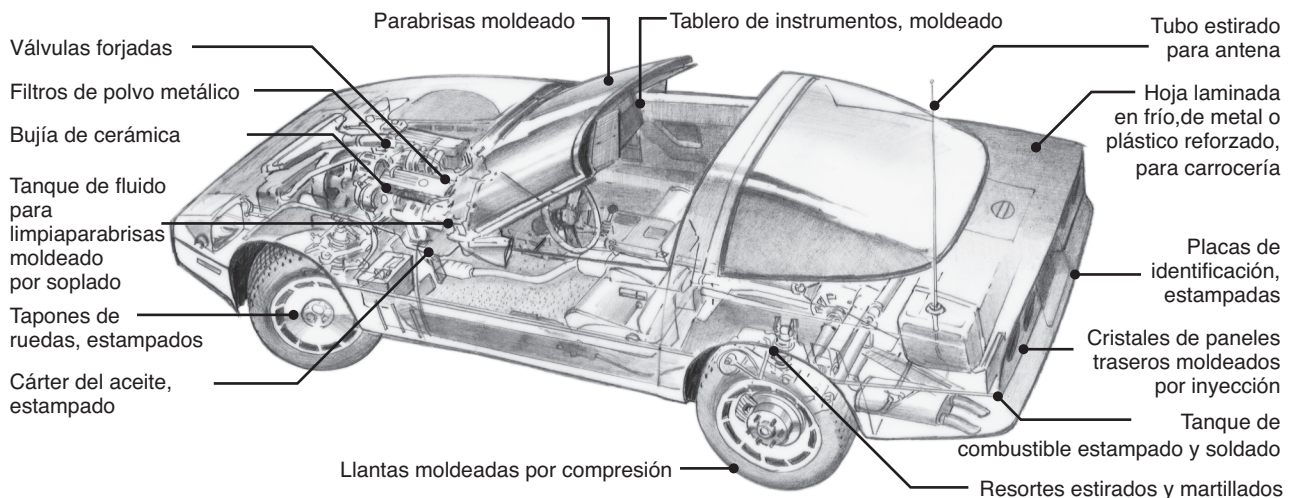


FIGURA III.1 Partes formadas y moldeadas en un automóvil común.

de formado el material inicial (conocido como pieza de trabajo, tocho o pieza bruta) puede tener la forma de una placa, lámina, barra, varilla, alambre o tubo de diferentes secciones transversales. Por ejemplo, si se desea fabricar un gancho de alambre ordinario para colgar ropa, se da forma a una pieza recta de alambre doblándolo y torciéndolo. También es común fabricar la carrocería metálica de un automóvil con lámina de acero plano rolada, a la que después se le dan diferentes formas (tapa del motor, techo, cajuela, tableros de puertas) mediante un par de matrices grandes.

Por lo general, los **procesos de moldeado** incluyen el moldeo y la fundición de materiales blandos o fundidos, y el producto terminado casi adquiere la forma deseada. Quizá requiera pocas, o ninguna, operaciones de acabado. Por ejemplo, un gancho de plástico para colgar ropa se fabrica confinando plástico fundido en un molde de dos placas con una cavidad con forma de gancho. Los receptores telefónicos, los revestimientos de las puertas para refrigeradores, los gabinetes de las computadoras y otros innumerables productos de plástico se forman de igual manera, forzando el polímero fundido en un molde y dejando que se solidifique. Como otro ejemplo, el aislante de cerámico blanco de una bujía para automóvil se fabrica moldeando arcilla en un molde, dejándola secar después y coccionándola en un horno.

Algunas operaciones de formado y moldeado sirven para elaborar *productos continuos* largos, como placas, láminas, tubería, cable y barras de diferentes secciones transversales. Los procesos de laminado, extrusión y estirado (capítulos 13 y 15) tienen la capacidad de fabricar dichos productos, que después se cortan a las longitudes deseadas. Por otro lado, en general, procesos como el forjado (capítulo 14), formado de láminas metálicas (capítulo 16), metalurgia de polvos (capítulo 17), moldeado de cerámicos y vidrios (capítulo 18) y plásticos y plásticos reforzados (capítulo 19) dan como resultado *productos discretos*.

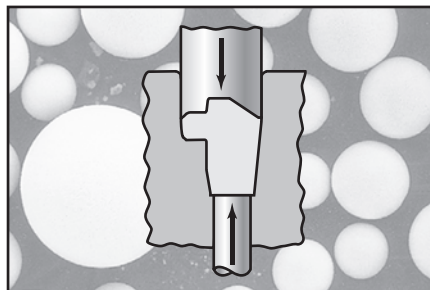
El material inicial que se utiliza en el formado y moldeado de metales suele ser el metal fundido, el cual se *funde* en *lingotes* individuales, o *de manera continua* a planchones, redondos o tubos. Las estructuras fundidas se convierten en *estructuras maleables* mediante los procesos de deformación plástica descritos en diversos capítulos. La materia prima usada también puede consistir en *polvos metálicos*, que después se prensan y sinterizan (se calientan sin fundirse) como productos individuales. En el caso de los plásticos, por lo común los materiales iniciales son las partículas (“pellets”), hojuelas o polvo, y en el caso de los cerámicos, son las arcillas y óxidos obtenidos de minerales o producidos sintéticamente.

En la parte III se describen factores importantes que participan en cada proceso de formado y moldeado, junto con la manera en que las propiedades y los procesos de los materiales afectan la calidad de los productos (tabla III.1). También se explica por qué algunos materiales pueden procesarse sólo mediante ciertos métodos de manufactura y por qué partes con formas particulares pueden trabajarse sólo mediante ciertas técnicas y no con otras. Las características de la maquinaria y el equipo utilizado en estos procesos también afectan de modo significativo la calidad de los productos, la velocidad de producción y la economía de una operación de manufactura en particular.

TABLA III.1

Características generales de los procesos de formado y moldeado	
Proceso	Características
Laminado	
Plano	Producción de placas planas, hojas y hojas delgadas a altas velocidades; buen acabado superficial, en especial el laminado en frío; inversión de capital muy elevada; costo de mano de obra baja a moderada.
De forma	Producción de varias formas estructurales (como vigas I y rieles) a altas velocidades; incluye laminado de roscas; requiere rodillos de forma y equipos costosos; costo de mano de obra bajo a moderado; habilidad moderada del operador.
Forjado	Producción de partes discretas con un juego de matrices; generalmente se requieren algunas operaciones de acabado; por lo común, se realizan a temperaturas elevadas, pero también en frío para partes más pequeñas, los costos de matrices y equipos son elevados; costo de mano de obra de moderado a elevado; habilidad moderada a alta del operador.
Extrusión	Producción de tramos largos de formas sólidas o huecas con sección transversal constante; después se corta el producto a las longitudes deseadas, por lo general se realiza a temperaturas elevadas; la extrusión en frío tiene similitudes con el forjado y se utiliza para hacer productos discretos; costo de matrices y equipo de moderado a elevado; costo de mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Estirado	Producción de barra y alambre largos con diferentes secciones transversales; buen acabado superficial; costos de matrices, equipo y mano de obra de bajo a moderado; habilidad baja a moderada del operador.
Formado de hojas metálicas	Producción de una gran variedad de formas con paredes delgadas y con geometrías simples y complejas; por lo general, costos de matrices, equipo y mano de obra de bajos a moderados; habilidad baja a moderada del operador.
Metalurgia de polvos	Producción de formas simples o complejas mediante compactado y sinterizado de polvos metálicos; costo moderado de matrices y equipo; costo bajo de mano de obra y baja habilidad del operador.
Procesamiento de plásticos y materiales compósitos	Producción de una amplia variedad de productos continuos o discretos mediante los procesos de extrusión, moldeado, fundición y fabricación; costos moderados por matrices y equipo; alta habilidad del operador en el procesamiento de materiales compósitos.
Formado y moldeado de cerámicos	Producción de productos discretos mediante diferentes procesos de moldeado, secado y cocción; costo de matrices y equipo de bajo a moderado; habilidad moderada a alta del operador.

Procesamiento de los polvos metálicos



CAPÍTULO 17

En este capítulo se exploran los procesos y técnicas de manufactura para producir partes de formas netas a partir de la metalurgia de polvos. En específico, se describen:

- Métodos para producir polvos metálicos.
- Procesos que se utilizan para consolidar y sinterizar polvos dándoles las formas deseadas.
- Procesos adicionales y operaciones de acabado para mejorar las propiedades.
- Aspectos competitivos de este proceso único.

Productos comúnmente fabricados: barras de conexión, anillos para pistones, engranes, levas, bujes, rodamientos, herramientas de corte, implantes quirúrgicos, imanes y filtros metálicos.

Procesos alternativos: fundición, forjado y maquinado.

17.1 | Introducción

En los procesos de fabricación que hemos descrito hasta ahora, las materias primas utilizadas han sido metales y aleaciones, ya sea en estado fundido (vaciado) o en forma sólida (trabajado metálico). En este capítulo se describe el proceso de la **metalurgia de polvos** (P/M, por sus siglas en inglés), en el que los polvos metálicos se compactan para darles las formas deseadas, con frecuencia complejas, y se sinterizan (se calientan sin que se fundan) para formar una pieza sólida. Los egipcios emplearon este proceso por primera vez alrededor del año 3000 a.C. para fabricar herramientas de hierro. Uno de sus primeros usos en la época moderna fue a principios del siglo XX, a fin de hacer filamentos de tungsteno para focos. La disponibilidad de una amplia variedad de composiciones de polvos metálicos, la capacidad de producir partes en formas netas (**formado de formas netas**) y la economía general de la operación, proporcionan a este proceso único sus numerosas aplicaciones, atractivas y crecientes.

Por medio de las técnicas de metalurgia de polvos se fabrica una amplia gama de partes y componentes (fig. 17.1): (a) pequeños balines para bolígrafos; (b) componentes automovilísticos (que en la actualidad constituyen cerca de 70% del mercado de la metalurgia de polvos), como anillos para pistones, varillas de conexión, placas de frenos, engranes, levas y bujes; (c) aceros para herramientas, carburos de tungsteno y cermetes como materiales para herramientas y matrices; (d) escobillas de grafito impregnadas con cobre para motores eléctricos; (e) materiales magnéticos; (f) filtros metálicos y rodamientos impregnados con aceite de porosidad controlada; (g) espumas metálicas; (h) implantes quirúrgicos, y (i) muchos otros para aplicaciones aeroespaciales, nucleares e industriales. Hoy, los avances en esta tecnología permiten fabricar partes *estructurales*

17.1	Introducción	483
17.2	Producción de polvos metálicos	484
17.3	Compactación de los polvos metálicos	490
17.4	Sinterizado	499
17.5	Operaciones secundarias y de acabado	503
17.6	Consideraciones de diseño	505
17.7	Capacidades del proceso	508
17.8	Economía de la metalurgia de polvos	508

EJEMPLOS:

17.1	Prensado isostático en caliente de un elevador de válvulas	496
17.2	Contracción en sinterización	502
17.3	Engranes producidos por metalurgia de polvos para un tractor de jardín	504
17.4	Producción de carburo de tungsteno para herramientas y matrices o dados	504

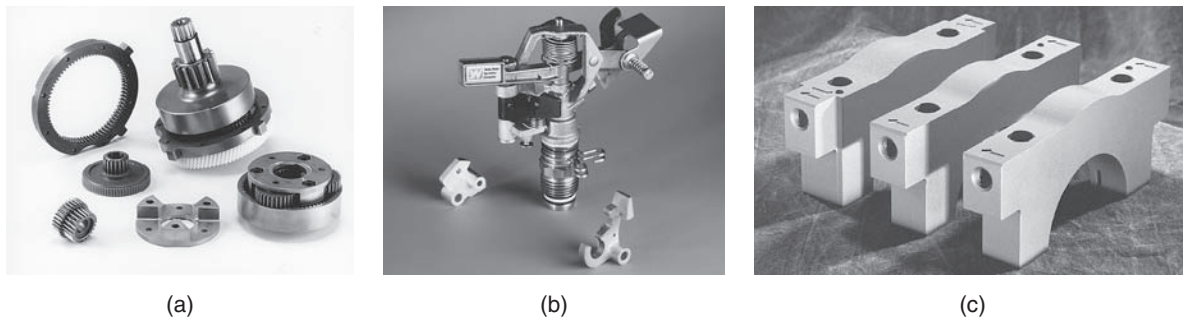


FIGURA 17.1 (a) Ejemplos de partes comunes fabricadas por medio de procesos de metalurgia de polvos. (b) Palanca superior de disparo para un rociador comercial de riego elaborada mediante P/M. Esta parte se produce con una aleación de latón sin plomo; reemplaza a una parte fundida a presión en matriz con un ahorro de 60% del costo. (c) Tapas fabricadas por metalurgia de polvos para soportes principales para motores automovilísticos (cojinetes) de 3.8 y 3.1 litros de General Motors. Fuente: (a) y (b) Reproducido con permiso de *Success Stories on P/M Parts*, 1998. Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1998. (c) Cortesía de Zenith Sintered Products, Inc., Milwaukee, Wisconsin.

para aeronaves, como algunos componentes de los trenes de aterrizaje, soportes para montaje de motores, discos para motores, propulsores y bastidores o armaduras para motor de barquillas por medio de P/M.

La metalurgia de polvos ha resultado competitiva con los procesos (como la fundición, el forjado y el maquinado o mecanizado), en particular para partes relativamente complejas fabricadas con aleaciones de alta resistencia y duras. Aunque la mayoría de las partes pesan menos de 2.5 kg (5 libras), pueden llegar hasta 50 kg (100 libras). Se ha demostrado que las piezas de P/M se pueden producir en masa de manera económica, en cantidades que van desde 5000 piezas al año y hasta 100 millones anuales de contrapesos para vibradores de teléfonos celulares.

Los metales más utilizados en la P/M son hierro, cobre, aluminio, estaño, níquel, titanio y los metales refractarios. Para las partes fabricadas con latón, bronce, aceros y aceros inoxidable se emplean *polvos prealeados*, en los que cada partícula de polvo es una aleación. Por lo general, las fuentes de metales son metales y aleaciones a granel, menas, sales y otros compuestos.

17.2 Producción de polvos metálicos

El proceso de metalurgia de polvos consta de las siguientes operaciones, en secuencia (fig. 17.2):

1. Producción de polvos
2. Mezcla
3. Compactación
4. Sinterizado
5. Operaciones de acabado

17.2.1 Métodos para la producción de polvos

Existen diversos métodos para producir polvos metálicos, la mayoría de los cuales se pueden elaborar mediante más de un método. La elección depende de los requisitos del producto final. La microestructura, las propiedades de la masa y de la superficie, la pureza química, la porosidad, la forma y distribución del tamaño de las partículas dependen del proceso específico que se usó (figs. 17.3 y 17.4). Estas características son importantes, ya que afectan de manera significativa el flujo y la permeabilidad durante la compactación y en las operaciones posteriores de sinterizado. El tamaño de las partículas producidas va de 0.1 a 1000 μm (4 a 0.04 pulgadas).

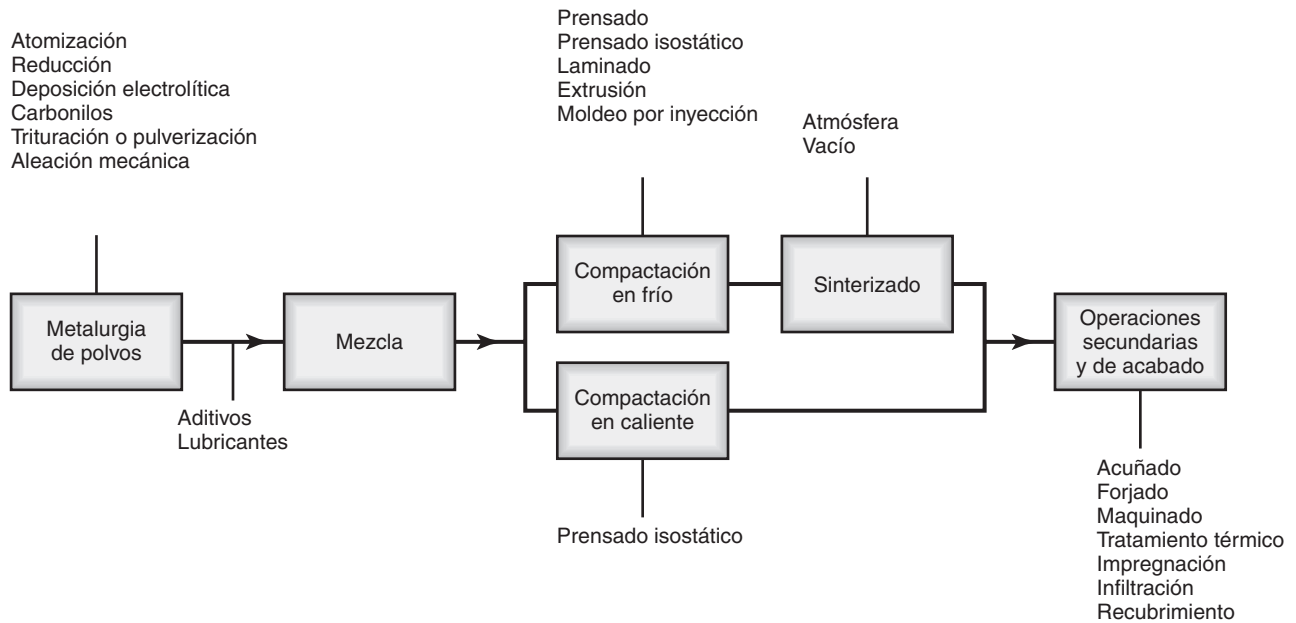


FIGURA 17.2 Resumen de procesos y operaciones comprendidas en la fabricación de partes mediante metalurgia de polvos.

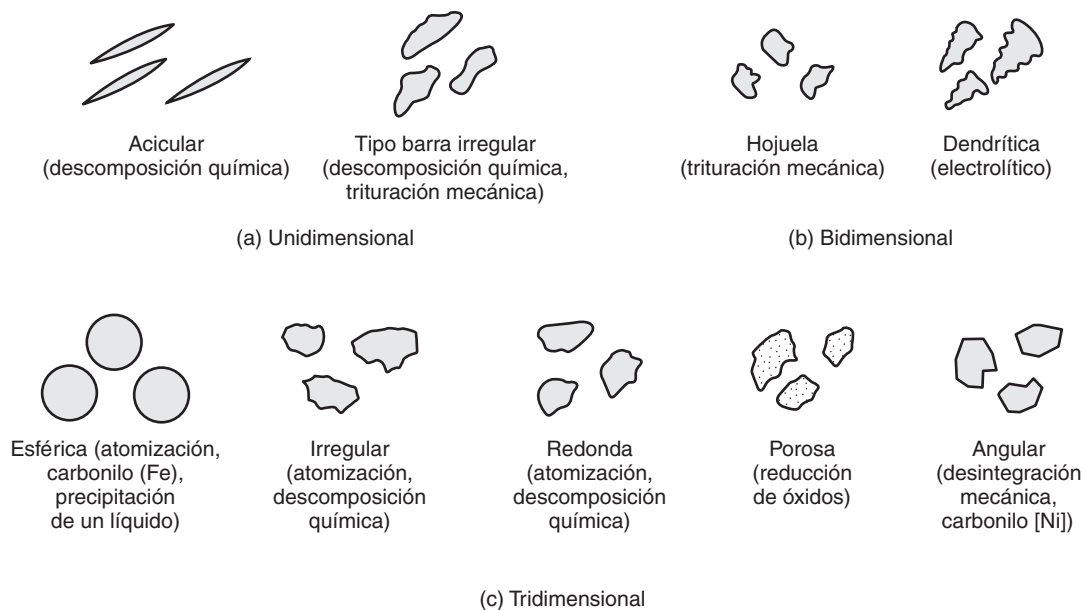


FIGURA 17.3 Forma de las partículas en la metalurgia de polvos y procesos por los cuales se producen. Los polvos de hierro se elaboran por medio de muchos de estos procesos.

Atomización. La atomización produce una corriente de metal líquido cuando se inyecta metal fundido a través de un pequeño orificio. La corriente se divide en chorros de gas inerte o de aire (fig. 17.5a) o agua (fig. 17.5b), lo que se conoce como *atomización por gas* y *por agua*, respectivamente. El tamaño y la forma de las partículas formadas depende de la temperatura del metal fundido, la rapidez del flujo, el tamaño de la boquilla

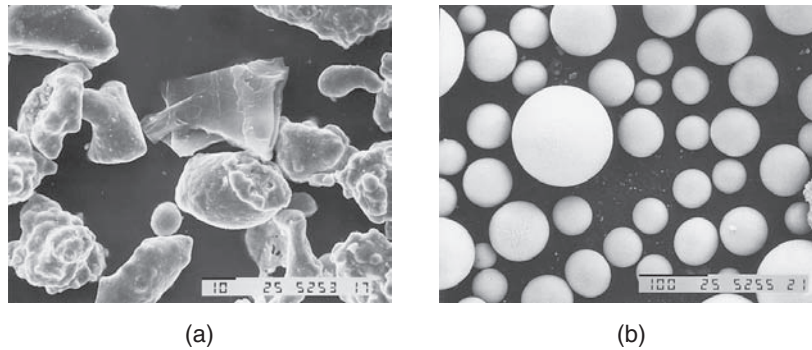


FIGURA 17.4 (a) Imagen de microscopio electrónico de barrido de las partículas de polvo de hierro fabricadas mediante atomización. (b) Partículas de polvo de superaleación de base níquel (Udimet 700) fabricadas mediante el proceso de electrodo giratorio; ver figura 17.5c. *Fuente:* Cortesía de P. G. Nash, Illinois Institute of Technology, Chicago.

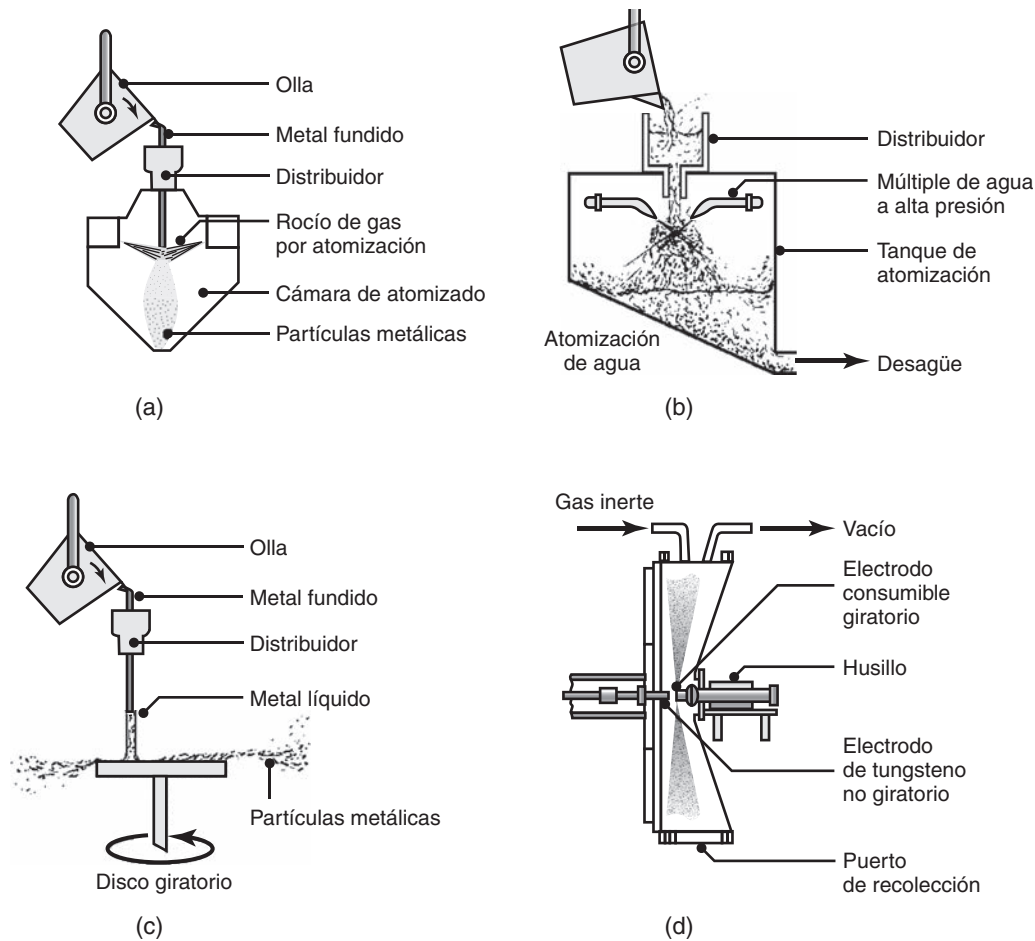


FIGURA 17.5 Métodos de producción de polvos metálicos por atomización: (a) atomización de gas; (b) atomización de agua; (c) atomización con un electrodo consumible giratorio y (d) atomización centrífuga con un disco o copa giratoria.

y las características del chorro. El agua produce un lodo de polvo metálico y líquido en el fondo de la cámara de atomización. Aunque es necesario que los polvos se sequen antes de utilizarlos, el agua permite que las partículas se enfríen más rápido y, por ende, velocidades de producción más elevadas. En general, la atomización por gas produce más partículas esféricas (ver fig. 17.3c).

En la *atomización centrífuga*, la corriente de metal fundido cae rápidamente sobre un disco o copa giratoria, de manera que las fuerzas centrífugas dividen la corriente de metal fundido y generan partículas (fig. 17.5c). En una variación de este método, se gira con rapidez un electrodo consumible (a casi 15,000 rev/min) dentro de una cámara llena de helio (fig. 17.5d). La fuerza centrífuga divide la punta fundida del electrodo en partículas metálicas.

Reducción. La *reducción* de óxidos metálicos (es decir, la eliminación de oxígeno) utiliza gases, entre ellos el hidrógeno y el monóxido de carbono, como agentes reductores. Por este medio, óxidos metálicos muy finos son reducidos al estado metálico. Los polvos producidos son esponjosos, porosos y tienen formas esféricas o angulares de tamaño uniforme.

Deposición electrolítica. La *deposición electrolítica* utiliza soluciones acuosas o sales fundidas. Los polvos producidos se encuentran entre los más puros existentes.

Carbonilos. Los *carbonilos metálicos*, como el carbonilo de hierro ($\text{Fe}(\text{CO})_5$) y el carbonilo de níquel ($\text{Ni}(\text{CO})_4$), se forman al dejar que el hierro o el níquel reaccionen con el monóxido de carbono. Después, los productos de la reacción se descomponen en hierro y níquel y se convierten en partículas pequeñas, densas, de alta pureza, con esfericidad uniforme.

Trituración o pulverización. La *trituration mecánica* (*pulverización*) comprende la trituración (fig. 17.6), molido en un molino de bolas, o esmerilado de metales frágiles o menos dúctiles en pequeñas partículas. Un *molino de bolas* (fig. 17.6b) es una máquina con un cilindro hueco giratorio que se llena parcialmente con bolas de acero o de fundición blanca. En el caso de los materiales frágiles, las partículas de polvo producidas tienen formas angulares; si los metales son dúctiles tienen forma de hojuela y no son particularmente adecuadas para aplicaciones en metalurgia de polvos.

Aleación mecánica. En la *aleación mecánica* se mezclan polvos de dos o más metales puros en un molino de bolas, como se ilustra en la figura 17.7. Debido al impacto de las bolas duras, los polvos se fracturan y se unen por difusión, formando polvos de aleaciones. La fase dispersa puede producir el reforzamiento de las partículas o proporcionar propiedades eléctricas o magnéticas especiales al polvo.

Métodos diversos. Otros métodos que se utilizan de manera poco común para hacer polvos son:

- Precipitación de una solución química.
- Producción de virutas finas de metal por medio de **maquinado**.
- Condensación de vapor.

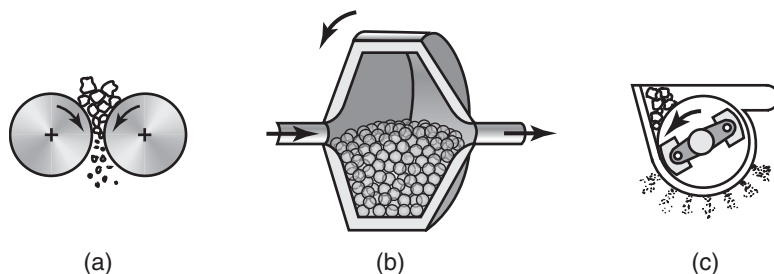


FIGURA 17.6 Métodos de trituración mecánica para obtener partículas finas: (a) pulverización con rodillo; (b) molino de bolas y (c) molido con martillo.

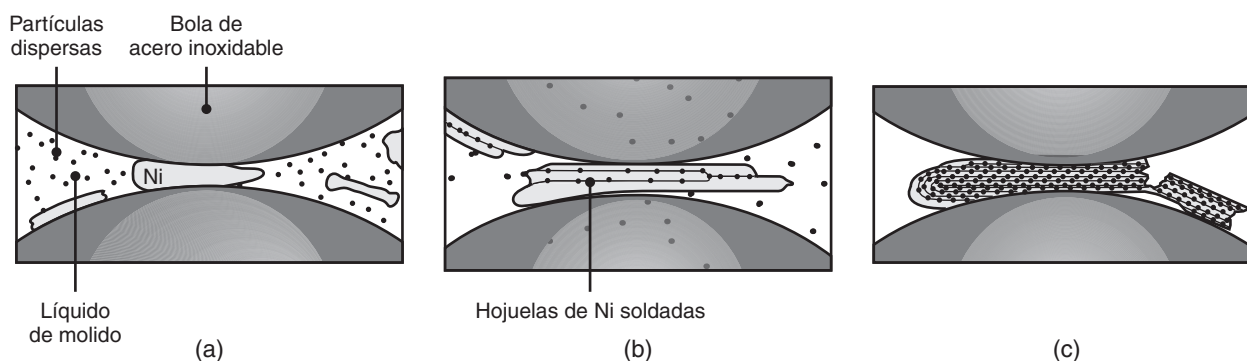


FIGURA 17.7 Aleación mecánica de partículas de níquel con partículas dispersas más pequeñas. Al aplanarse las partículas de níquel entre dos bolas, la segunda fase, más pequeña, se imprime en la superficie del níquel y al final se dispersa a través de la partícula debido a los eventos sucesivos de aplanado, fractura y soldado.

Desarrollos más recientes incluyen las técnicas basadas en *procesos metalúrgicos extractivos de alta temperatura*, que se basan en la reacción de halogenuros volátiles (compuesto de halógeno y un elemento electropositivo) con metales líquidos y la reducción controlada y reducción/carburación de óxidos sólidos.

Nanopolvos. Los desarrollos más recientes incluyen la producción de *nanopolvos* de cobre, aluminio, hierro, titanio y diversos metales (ver también *nanomateriales* en la sección 6.16). Debido a que estos polvos son pirofóricos (se encienden de manera espontánea) o se contaminan de inmediato al exponerlos al aire, se embarcan como lodos espesos bajo hexano gaseoso (que por sí mismo es altamente volátil y combustible). Cuando el material se somete a una gran deformación plástica mediante compresión y cizallado a niveles de esfuerzo de 5500 MPa (800 ksi) durante el proceso de los polvos, se reduce el tamaño de las partículas, en tanto que el material queda libre de poros y posee propiedades mejoradas.

Polvos microencapsulados. Estos polvos metálicos se recubren por completo con un aglutinante. Para aplicaciones eléctricas (como los componentes magnéticos de bobinas de ignición y otras aplicaciones por pulsos de CA y CD), el aglutinante actúa como aislante, el cual evita que la electricidad fluya entre las partículas, reduciendo así las pérdidas por corrientes de eddy (corrientes parásitas). Los polvos se compactan mediante prensado a temperatura media y se utilizan con el aglutinante todavía existente. (Ver también *moldeo por inyección de polvos*, sección 17.3.3).

17.2.2 Tamaño, forma y distribución de las partículas

Por lo general, el *tamaño de las partículas* se mide por medio de *tamizado*, es decir, pasando el polvo metálico a través de tamices (*cribas*) con diversos tamaños de malla. El análisis del tamizado se realiza mediante una pila vertical de tamices, con el tamaño cada vez más fino de malla conforme el polvo pasa hacia abajo a través de los tamices. Cuanto más grande es el tamaño de la malla, más pequeña es la abertura en el tamiz. Por ejemplo, una malla de tamaño 30 tiene una abertura de 600 μm , el tamaño 100 tiene 150 μm y el tamaño 400 tiene 38 μm . (Este método es similar a la numeración de los granos abrasivos. Cuanto más grande es el número, más pequeño será el tamaño de la partícula abrasiva).

Además del análisis del tamiz, existen diversos métodos para analizar el tamaño de las partículas:

1. **Sedimentación**, que comprende la medición de la rapidez a la que las partículas se sedimentan en un fluido.
2. **Análisis microscópico**, que puede incluir el uso de la microscopía electrónica de transmisión y de barrido.

3. **Dispersión de la luz** de un láser que ilumina una muestra constituida por partículas suspendidas en un medio líquido. Las partículas hacen que la luz se disperse; después un detector digitaliza las señales y calcula la distribución del tamaño de las partículas.
4. **Óptico** (como el de las partículas que bloquean un rayo de luz), que después se detecta mediante una fotocelda.
5. **Partículas suspendidas** en un líquido, cuyo tamaño y distribución se detecta después mediante sensores eléctricos.

Forma de las partículas. La forma de las partículas, que afecta en gran medida las características de su procesamiento, por lo general se describe en términos de relación de aspecto o factor de forma. La *relación de aspecto* es la relación de la dimensión más grande respecto de la dimensión más pequeña de la partícula. Esta relación va de la unidad (para una partícula esférica) hasta aproximadamente 10, para partículas con forma de hojuela o de aguja.

Factor de forma (SF, por sus siglas en inglés). También conocido como *índice de forma*, es una medida de la relación del área de la superficie de la partícula respecto de su volumen, que se normaliza por referencia a una partícula esférica de volumen equivalente. Por lo tanto, el factor de forma de una hojuela es más alto que el de una esfera.

Distribución de tamaño. La distribución del tamaño de las partículas es un factor que debe considerarse, porque afecta las características de procesamiento del polvo. Se determina en términos de la gráfica de *frecuencia y distribución* (ver la sección 36.7 para más detalles). Al valor máximo se le conoce como *tamaño de modo* (o *de la moda*).

Otras propiedades de los polvos metálicos que tienen un efecto sobre su comportamiento durante el procesamiento son: (a) las *propiedades de flujo*, cuando se llenan las matrices o dados, (b) la *compresibilidad*, cuando se compactan, (c) la *densidad*, como se define en diversos términos como la densidad teórica, la densidad aparente y la densidad al momento en que el polvo se sacude o se golpea ligeramente dentro de la cavidad de la matriz.

17.2.3 Mezcla de polvos metálicos

La *mezcla* (combinación) de los polvos es el siguiente paso en el procesamiento de la metalurgia de polvos. Se realiza con los siguientes propósitos:

- Se pueden mezclar polvos de diferentes metales y otros materiales con el fin de proporcionar propiedades y características físicas y mecánicas especiales al producto de la P/M. Obsérvese que se pueden producir combinaciones de metales aleándolos antes de elaborar un polvo, o se pueden producir las mezclas. La combinación adecuada es fundamental para garantizar la uniformidad de las propiedades mecánicas en toda la pieza.
- Aun cuando se utiliza un solo metal, los polvos pueden variar significativamente en tamaño y forma, por lo que deben mezclarse para obtener uniformidad entre las piezas. La combinación ideal es aquella en la que todas las partículas de cada material (y de cada tamaño y morfología) se distribuyen de manera uniforme.
- Se pueden mezclar *lubricantes* con los polvos para mejorar sus características de flujo. Reducen la fricción entre las partículas metálicas, mejoran el flujo de los polvos metálicos en las matrices y mejoran la vida de la matriz. En general, los lubricantes son ácido esteárico o estearato de zinc en una proporción de 0.25% a 5% en peso.
- Se utilizan otros aditivos: *aglutinantes* (como en los moldes de arena) para desarrollar suficiente *resistencia en verde (crudo)* (ver la sección 17.3) y también se pueden usar aditivos para facilitar el sinterizado.

La mezcla de polvos debe efectuarse en condiciones controladas para evitar la contaminación o el deterioro. Éste se debe a un mezclado excesivo, que puede alterar la forma de las partículas y hacer que se endurezcan por trabajo, dificultando así la operación

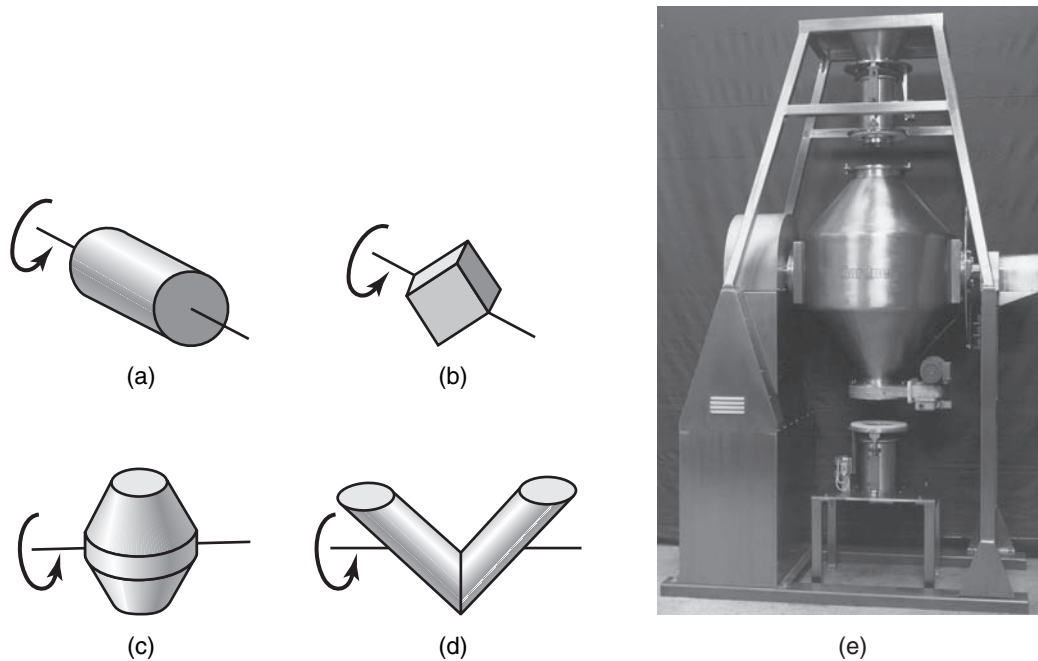


FIGURA 17.8 (a) a (d) Algunas figuras comunes de recipientes para combinar o mezclar polvos. (e) Mezclador adecuado para mezclar polvos metálicos. Dado que éstos son abrasivos, los mezcladores se basan en la rotación o volteado de figuras cerradas, al contrario del uso de agitadores agresivos. *Fuente:* Cortesía de Kemutec Group, Inc.

posterior de compactado. Los polvos se pueden mezclar en aire, en atmósferas inertes (para evitar la oxidación) o en líquidos (que actúan como lubricantes y hacen que la mezcla sea más uniforme). Existen diversos tipos de equipo de mezclado (fig. 17.8).

Riesgos. Debido a su alta relación de área de superficie a volumen, los polvos metálicos pueden ser explosivos, en especial el aluminio, magnesio, titanio, zirconio y torio. Es necesario tener mucho cuidado durante su mezclado, almacenamiento y manejo. Algunas precauciones incluyen: (a) conexión del equipo a tierra, (b) evitar las chispas (utilizando herramientas que no las produzcan) y la fricción como fuentes de calor, y (c) evitar nubes de polvo, las llamas descubiertas y las reacciones químicas.

17.3 | Compactación de los polvos metálicos

La *compactación* es el paso en el que se presan los polvos mezclados para darles diversas formas dentro de las matrices, como se muestra en la figura 17.9. Los propósitos de la compactación son obtener la forma, densidad y contacto de partícula con partícula necesarios y hacer que la pieza tenga suficiente resistencia para su proceso posterior. El polvo (*materia prima*) es introducido en la matriz mediante una zapata de alimentación y el punzón superior descende hacia el interior de la matriz. Las prensas utilizadas son las accionadas por medios hidráulicos o mecánicos y, por lo general, el proceso se realiza a temperatura ambiente, aunque puede efectuarse a temperaturas elevadas.

Al polvo prensado se le conoce como **comprimido crudo** o **compactado en verde**, ya que tiene una resistencia baja, como se ve en las partes crudas en la fundición en barbotina (sección 18.2.1). Las partes crudas o en verde son muy frágiles (similares a un gis) y se pueden desmoronar o dañar con mucha facilidad; esta situación se exagera por medio de prácticas deficientes de prensado. Para obtener resistencias más elevadas en verde, el polvo se debe proporcionar de manera adecuada a la cavidad de la matriz y tienen que desarrollarse las presiones adecuadas en toda la pieza.

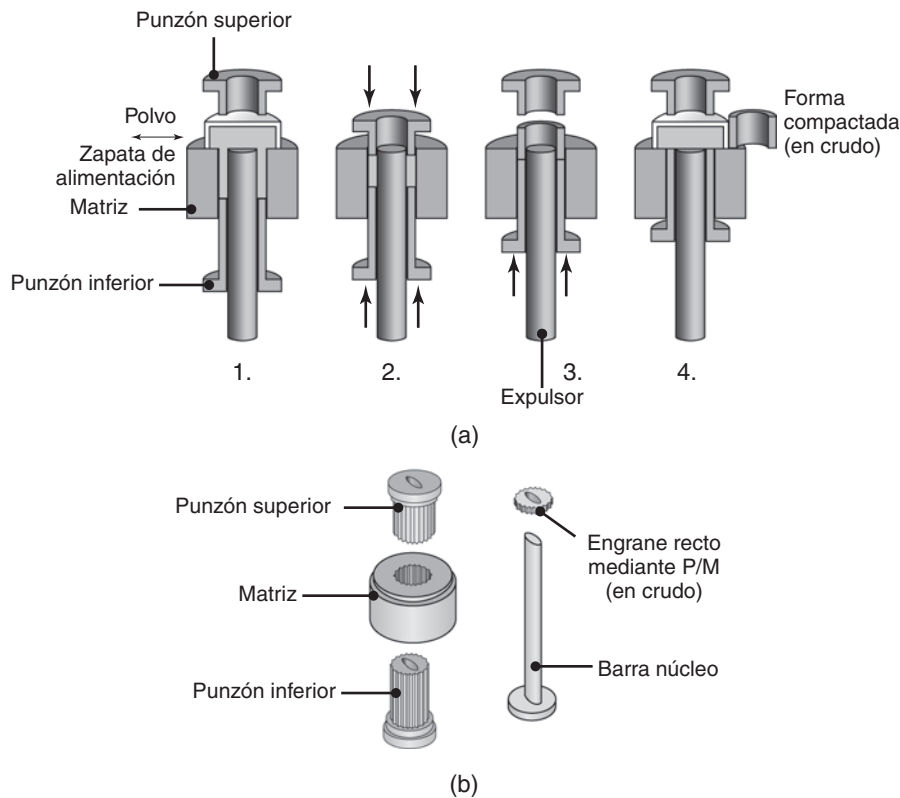


FIGURA 17.9 (a) Compactación de polvos metálicos para formar un buje. A la parte de polvo prensado se le conoce como compactado crudo o en verde. (b) Juego típico de herramienta y matriz para compactar un engrane recto. Fuente: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

La *densidad* del comprimido crudo o en verde depende de la presión aplicada (fig. 17.10a). Conforme aumenta la presión de compactación, la densidad del comprimido se aproxima a la del metal en su forma sólida. Un factor importante en la densidad es la distribución del tamaño de las partículas: si todas son del mismo tamaño, siempre habrá cierta porosidad al momento de compactarlas; en teoría, una porosidad de por lo menos 24% en volumen. (Por ejemplo, si observa una caja llena con pelotas de tenis, notará que siempre hay espacios vacíos entre éstas). Al introducir partículas más pequeñas en la mezcla de polvo, se llenan los espacios entre las partículas grandes del polvo y de esa manera se obtiene una densidad superior en el compactado (ver también *aluminio poroso*, sección 6.2).

Cuanto más alta sea la densidad de la pieza compactada, más elevada serán su resistencia y módulo elástico (fig. 17.10b). La razón es que cuanto más alta es la densidad, más alta es la cantidad de metal sólido en el mismo volumen y, por lo tanto, su resistencia es mayor (resistencia a fuerzas externas). Debido a la fricción entre (a) las partículas metálicas del polvo y (b) las superficies del punzón y las paredes de la matriz, la densidad en el interior de la parte puede variar en forma considerable. Esta variación se puede minimizar con el diseño adecuado del punzón y de la matriz y mediante el control de la fricción. Por ejemplo, podría ser necesario utilizar punzones múltiples con movimientos independientes, a fin de garantizar que la densidad sea más uniforme en toda la parte (fig. 17.11). Recuérdese una discusión similar relacionada con el compactado de arena en la fabricación de moldes (ver fig. 11.7). Sin embargo, la variación de densidad puede ser deseable en componentes como engranes, levas, bujes y partes estructurales. Por ejemplo, es posible aumentar la densidad en lugares críticos en los que son importantes la resistencia elevada y la resistencia al desgaste, y reducirla en donde no lo son.

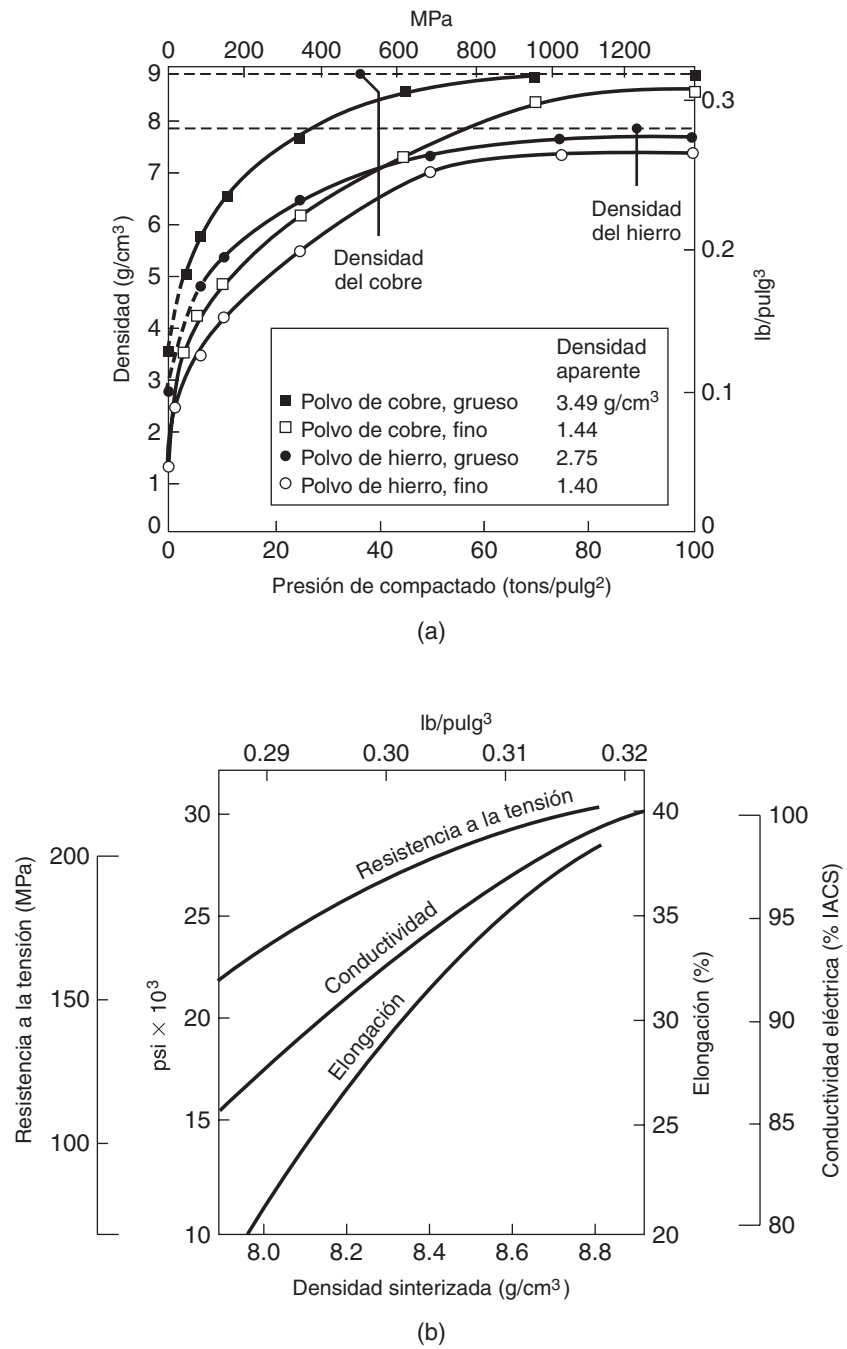


FIGURA 17.10 (a) Densidad de compactados de polvo de cobre y hierro en función de la presión de compactado. La densidad influye en gran medida en las propiedades mecánicas y físicas de las partes de P/M. (b) Efecto de la densidad en la resistencia a la tensión, la elongación y la conductividad eléctrica del polvo de cobre. Fuente: (a) F. V. Lenel, (b) IACS: Internacional Annealed Copper Standard (para conductividad eléctrica).

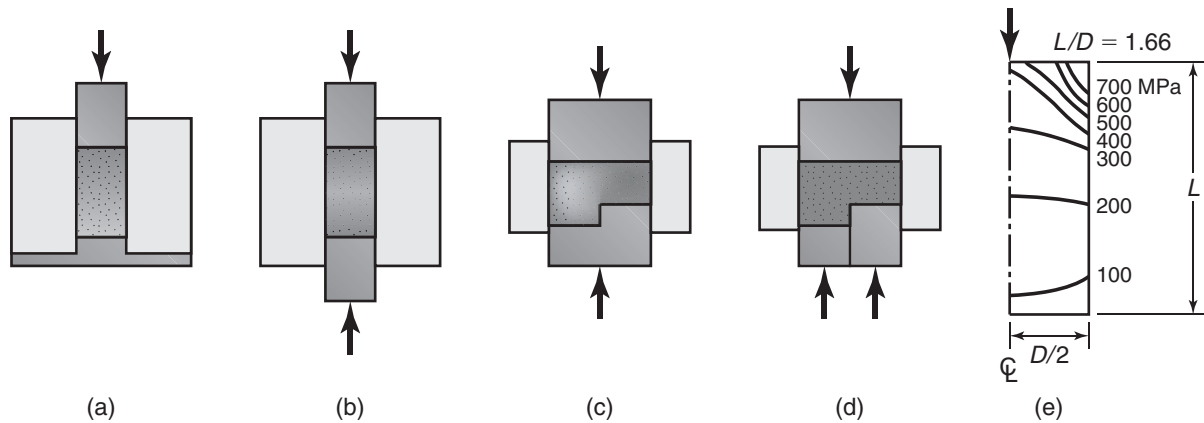


FIGURA 17.11 Variación de la densidad al compactar polvos metálicos en diversas matrices: (a) y (c) prensa de acción simple; (b) y (d) prensa de doble acción. Obsérvese en (d) la mayor uniformidad de la densidad al prensar con dos punzones con movimiento independiente, en comparación con (c). (e) Perfiles de presión en polvo de cobre compactado en una prensa de acción simple. Fuente: P. Duwez y L. Zwel.

17.3.1 Equipo

La presión requerida para prensar polvos metálicos va de 70 MPa (10 ksi) (para el aluminio) a 800 MPa (120 ksi) (para piezas de hierro de alta densidad) (ver la tabla 17.1). La presión necesaria para compactado depende de las características y la forma de las partículas, del método de mezclado y del lubricante.

Las capacidades de prensado van de 1.8 a 2.7 MN (200 a 300 toneladas), aunque se utilizan prensas con mucha mayor capacidad para aplicaciones especiales. La mayoría de las aplicaciones requieren menos de 100 toneladas. Para tonelajes pequeños se usan prensas mecánicas tipo cigüeñal (manivela) o excéntricas; para capacidades superiores, se emplean prensas de balancín (rótula) o de junta articulada (palanca) (ver fig. 14.17c). Se pueden utilizar prensas hidráulicas (fig. 17.12) con capacidades tan elevadas como 45 MN (5000 toneladas) para partes grandes. La selección de la prensa depende del tamaño de la pieza y su configuración, los requisitos de densidad y la capacidad de producción. Sin embargo, cuanto más alta sea la velocidad de prensado, mayor será la tendencia de la prensa a atrapar aire en la cavidad de la matriz y, de esta manera, evitar la compactación adecuada.

TABLA 17.1

Presiones de compactado para diversos polvos	
Metal	Presión (MPa)
Aluminio	70–275
Latón	400–700
Bronce	200–275
Hierro	350–800
Tantalio	70–140
Tungsteno	70–140
Otros materiales	
Óxido de aluminio	110–140
Carbono	140–165
Carburos cementados	140–400
Ferritas	110–165



FIGURA 17.12 Prensa mecánica de 7.3 MN (825 toneladas) para compactar polvos metálicos. *Fuente:* Cortesía de Cincinnati Incorporated.

17.3.2 Prensado isostático

Los comprimidos crudos o en verde se pueden someter a *presión hidrostática* para lograr una compactación más uniforme y, por lo tanto, densidad.

En el **prensado isostático en frío** (CIP, por sus siglas en inglés), el polvo metálico se coloca en un molde de hule flexible, comúnmente fabricado con hule neopreno, uretano, cloruro de polivinilo u otro elastómero (fig. 17.13). Después se presuriza el ensamble hidrostáticamente en una cámara, por lo general utilizando agua. La presión más común es 400 MPa (60 ksi), aunque se pueden usar presiones hasta de 1000 MPa (150 ksi). En la figura 17.14 se muestran las capacidades del CIP y de otros métodos de compactado en términos de tamaño y complejidad de la pieza. Una aplicación común se da en revestimientos de cilindros automovilísticos.

Por lo general, en el **prensado isostático en caliente** (HIP, por siglas en inglés), el contenedor se fabrica de una hoja de metal de alto punto de fusión y el medio de presurización es gas inerte de alta temperatura o un fluido vítreo (similar al vidrio) (fig. 17.15). Las condiciones comunes para el HIP son presiones elevadas hasta de 100 MPa (15 ksi), aunque pueden ser tres veces más altas, y a una temperatura de 1200 °C (2200 °F). La ventaja

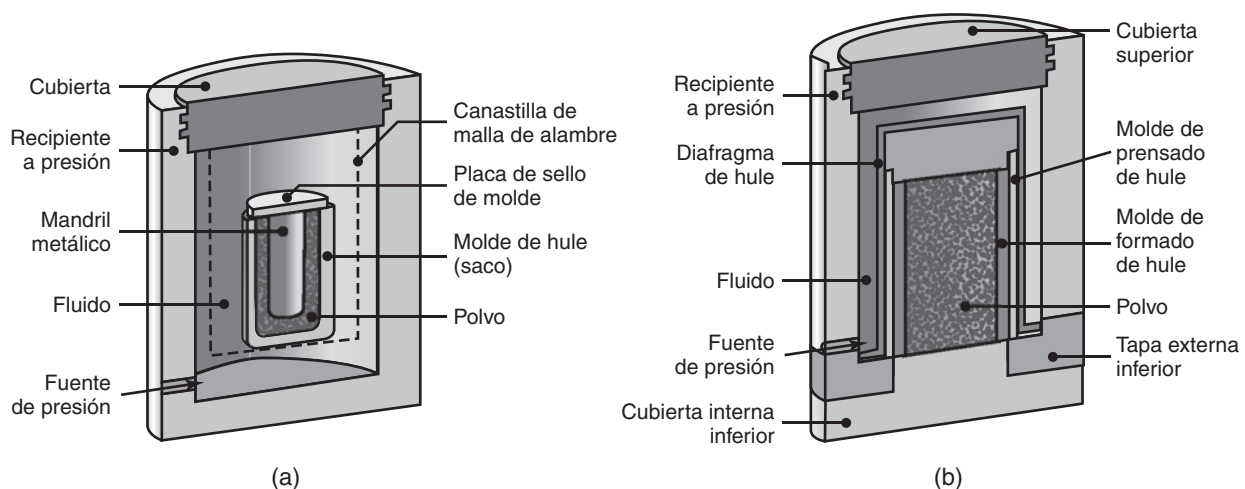


FIGURA 17.13 Diagrama esquemático del prensado isostático en frío, aplicado para el formado de un tubo. El polvo se encierra en un contenedor flexible alrededor de una barra de núcleo sólido. Se aplica presión isostática al ensamble dentro de una cámara de alta presión. *Fuente:* Reimpreso con permiso de R. M. German, *Powder Metallurgy Science*. Metal Powder Industries Federation, Princeton, NJ, 1984.

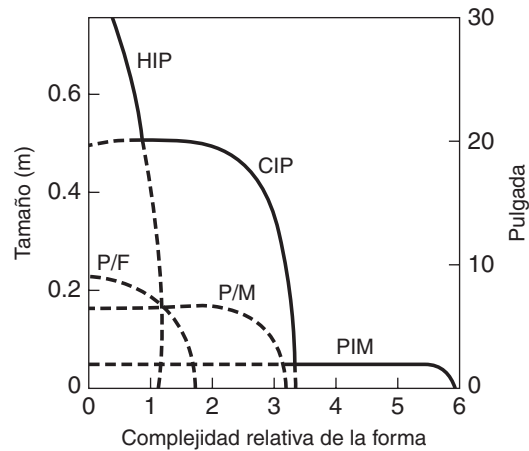


FIGURA 17.14 Capacidades de diversas operaciones de P/M, con respecto al tamaño de la parte y la complejidad de la forma. P/F significa forjado de polvos. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

principal del HIP es su capacidad para producir compactados que tienen casi 100% de densidad, buen enlace metalúrgico de las partículas y buenas propiedades mecánicas, por lo que ha ganado una amplia aceptación en la fabricación de piezas de alta calidad.

El proceso de HIP se utiliza principalmente en la fabricación de componentes de superaleaciones para las industrias aeronáutica y aeroespacial, y en aplicaciones militares, médicas y químicas. También se emplea: (a) para cerrar la porosidad interna, (b) para mejorar las propiedades en las fundiciones de superaleaciones y de aleaciones de titanio para la industria aeroespacial, y (c) como paso de densificación final para las herramientas de corte de carburo de tungsteno y carburos y aceros para herramientas de la P/M.

Las principales ventajas del prensado isostático son las siguientes:

- Debido a la uniformidad de la presión en todas direcciones y la ausencia de fricción en las paredes de la matriz, produce compactados totalmente densos, con una es-

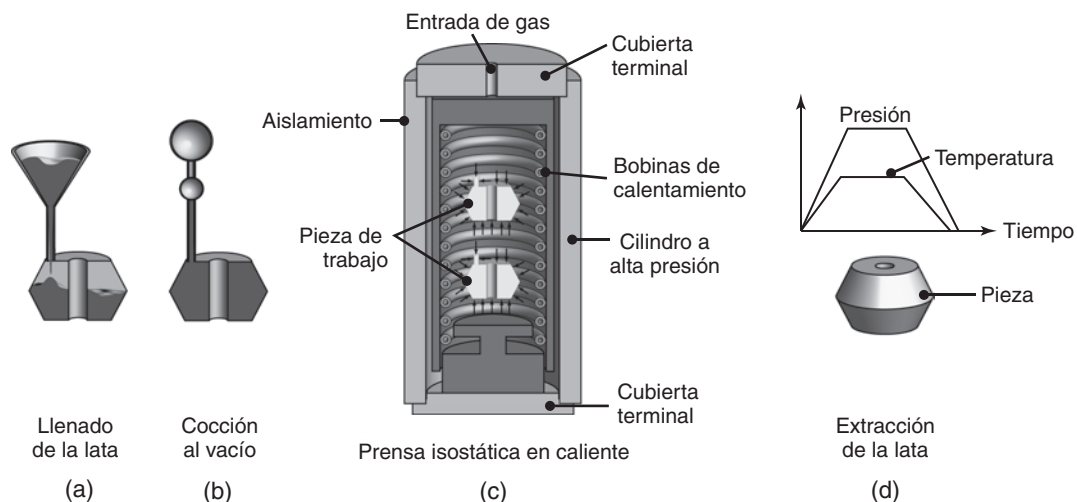


FIGURA 17.15 Esquema de prensado isostático en caliente. En el diagrama se muestra la variación de presión y temperatura contra tiempo.

tructura y densidad de granos uniformes (propiedades isotrópicas), sin considerar la forma de la pieza. Se han producido partes con altas relaciones de longitud a diámetro, con densidad muy uniforme, resistencia, tenacidad y buen detalle de superficie.

- El HIP tiene la capacidad de manejar partes mucho más grandes que las de otros procesos de compactado.

Las limitaciones del HIP son las siguientes:

- Tiene tolerancias dimensionales más amplias que las obtenidas en otros procesos de compactado.
- El costo del equipo y el tiempo de producción son superiores a los requeridos en otros procesos.
- Sólo se aplica a cantidades relativamente pequeñas de producción; por lo general, menos de 10,000 partes o piezas al año.

EJEMPLO 17.1 Prensado isostático en caliente de un elevador de válvula

En la figura 17.16 se muestra un elevador de válvulas con revestimiento de HIP utilizado en toda una gama de motores a diesel de uso medio a pesado para camiones. El elevador de válvulas de 0.2 kg (0.45 libra) se monta en el árbol de levas y abre y cierra las válvulas del motor. Como tal, es deseable que tenga una capa o cara de carburo de tungsteno resistente al desgaste y un eje de acero resistente a la fatiga. Antes de que se desarrollara el elevador de válvulas de HIP, se producían partes por medio de soldadura fuerte en un horno, pero provocaban fallas ocasionales en el campo y valores relativamente altos de desperdicio. La producción anual requerida de estas partes es de casi 400,000, de manera que los altos valores de desperdicio son objetables.

El producto de revestimiento HIP consta de una cara o capa de carburo de tungsteno (WC) con 9% de Co como aglutinante, fabricada con polvo (prensado y sinterizado), un casquete de lámina metálica de acero montado sobre el disco de WC, una capa intermedia de lámina de aleación de cobre y un eje de acero. El casquete se suelda con un haz de electrones al eje de acero y después el ensamble se prensa isostáticamente en caliente para obtener una unión muy resistente. El prensado HIP se efectúa a 1010 °C (1850 °F), a una presión de 100 MPa (15,000 psi). La superficie de carburo de tungsteno tiene una densidad de 14.52 a 14.72 g/cm³, una dureza de 90.8 ± 5 HRA y una resistencia a la ruptura transversal mínima de 2450 MPa (355,000 psi).

Las operaciones secundarias se limitan al rectificado de la cara a fin de eliminar cualquier protuberancia del casquete de lámina metálica para exponer la superficie de

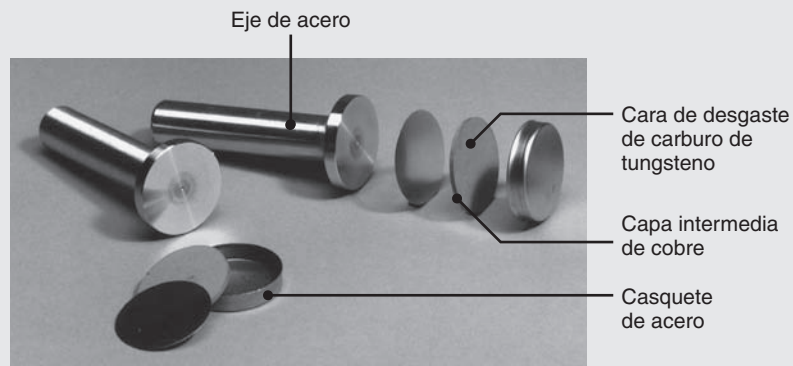


FIGURA 17.16 Elevador de válvulas para motores diesel de uso rudo producido a partir de un casquete de carburo prensado isostáticamente en caliente sobre un eje de acero. Fuente: Cortesía de Metal Powder Industries Federation y Bodycote, Inc.

carburo de tungsteno resistente al desgaste. La alta confiabilidad de la unión de HIP redujo en gran medida los valores del desperdicio a menos de 0.2%. Durante casi cuatro años no se han experimentado fallas de campo en la producción total. Los costos de producción también se redujeron en gran medida debido al paso de prensado isostático en caliente.

Fuente: Cortesía de Metal Powder Industry Federation.

17.3.3 Procesos diversos de compactado y moldeado

Moldeado por inyección de polvo (PIM, por sus siglas en inglés). En este proceso (también conocido como **moldeado por inyección de metales** [MIM]), se mezclan polvos metálicos muy finos ($<10\ \mu\text{m}$) con 25% a 45% de un aglutinante de polímero o a base de cera. Después, la mezcla se somete a un proceso similar a la fundición en dado o matriz (sección 11.3.5; ver también *moldeo de plásticos por inyección* en la sección 19.3); se inyecta en el molde a una temperatura de entre 135 °C y 200 °C (275 °F a 400 °F). Las partes crudas moldeadas se colocan en un horno a baja temperatura para quemar el plástico (*desaglutinado*), o se elimina el aglutinante por medio de la extracción de solventes. Después se sinterizan las partes en un horno a temperaturas altas hasta de 1375 °C (2500 °F). También se pueden realizar operaciones posteriores (como roscado de orificios y tratamiento térmico).

Por lo general, los metales adecuados para el moldeo por inyección de polvo son los que se funden a temperaturas superiores a 1000 °C (1830 °F); ejemplos de ello son los aceros al carbono e inoxidables, los aceros para herramientas, el cobre, el bronce y el titanio. Las partes comunes fabricadas por este método son los componentes de relojes, cañones de armas de pequeño calibre, anillos de extensión para rifles, bisagras de puertas, propulsores para sistemas aspersores y bisturís.

Las ventajas principales del moldeo por inyección de polvo sobre la compactación convencional son las siguientes:

- Se pueden moldear y después extraer de las matrices con facilidad, formas complejas con espesores de pared tan pequeños como 5 mm (0.2 pulgada).
- Las propiedades mecánicas son casi iguales a las de los productos forjables.
- Las tolerancias dimensionales son buenas.
- Se pueden lograr altas capacidades de producción mediante matrices de cavidades múltiples.
- Las partes producidas mediante el proceso PIM compiten de manera adecuada contra las partes pequeñas de fundición por revestimiento, las forjas pequeñas y las partes complejas maquinadas. Sin embargo, no compiten bien con la fundición a presión de zinc y aluminio ni con el maquinado de roscas.

Las principales limitaciones del PIM son el alto costo y la disponibilidad limitada de polvos metálicos finos.

Laminado. En el *laminado de polvo* (también conocido como **compactación laminar**), el polvo metálico se introduce o alimenta dentro del espacio de laminación en un molino de laminación dúo (fig. 17.17) y se compacta como banda continua a velocidades de hasta 0.5 m/s (100 pies/min). El proceso de laminado se puede efectuar a temperatura ambiente o elevada. Mediante este proceso puede fabricarse lámina metálica para componentes eléctricos y electrónicos y para monedas.

Extrusión. Los polvos se pueden compactar por medio de *extrusión*, con la cual el polvo se encierra en un contenedor metálico y se extruye en caliente. Después de sinterizarse, las partes preformadas mediante P/M se pueden volver a calentar y forjar en un dado o matriz cerrada para darle su forma final. Por ejemplo, los polvos de superaleaciones se extruyen en caliente para mejorar sus propiedades.

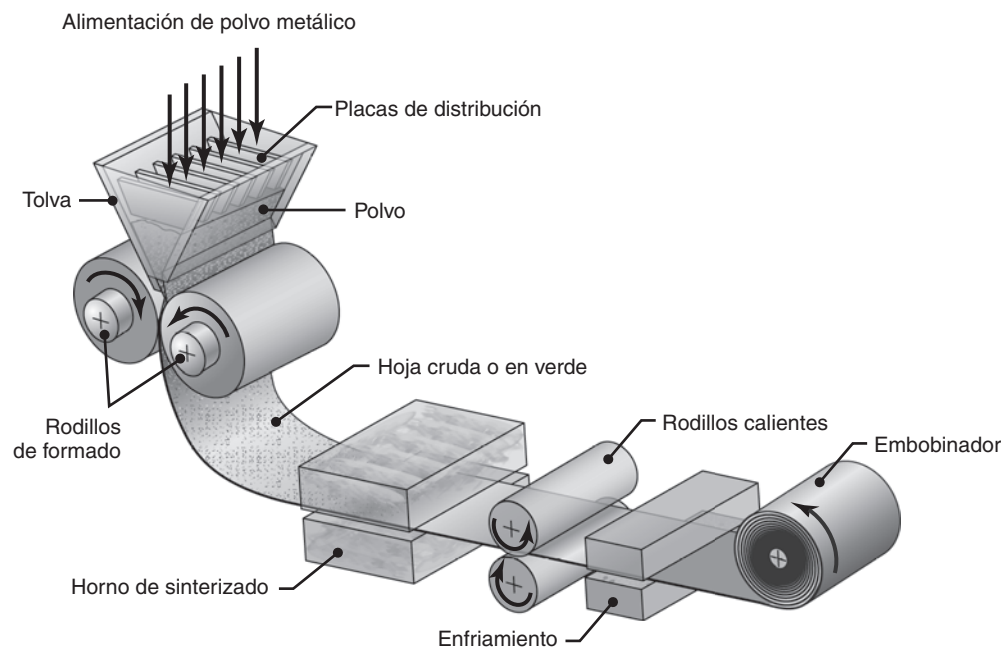


FIGURA 17.17 Ilustración de laminado de polvos.

Compactación sin presión. En la *compactación sin presión*, la matriz se llena con polvo metálico por medio de gravedad y el polvo se sinteriza directamente en la matriz. Debido a la baja densidad resultante, la compactación sin presión se utiliza sobre todo para partes metálicas porosas, como filtros.

Deposición por rocío. La deposición por rocío (aspersión) es un *proceso de generación de formas* (fig. 17.18). Los componentes básicos de dicho proceso para polvos metálicos son: (a) un atomizador, (b) una cámara de rocío con atmósfera inerte, y (c) un molde para producir preformas. El molde se puede fabricar dándole diversas formas, como palanquillas, tubos, discos y cilindros.

Aunque existen muchas variaciones, la más conocida es el *proceso Osprey* que se muestra en la figura 17.18. Después de atomizar un metal, se deposita sobre un molde de preforma enfriado, por lo general fabricado con cobre o material cerámico, donde se solidifica. Las partículas metálicas se aglutinan, desarrollando una densidad que normalmente es de más de 99% de la densidad del metal sólido. Las formas de deposición por

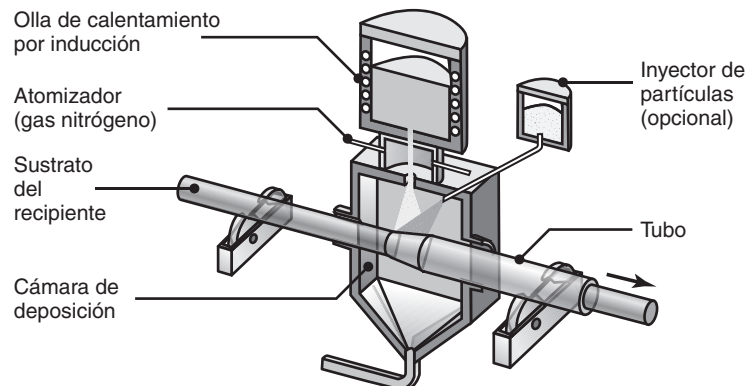


FIGURA 17.18 Deposición por rociado (*proceso Osprey*) en el que el metal fundido se rocía sobre un mandril giratorio para producir tubería sin costura.

rocío se pueden someter a procesos de formado y consolidación adicionales, como forjado, laminado y extrusión. El tamaño de los granos es fino y las propiedades mecánicas son comparables a las de los productos forjables fabricados con la misma aleación.

Moldes cerámicos. Los moldes de material cerámico para dar forma a los polvos metálicos se fabrican por medio de técnicas utilizadas en la fundición por revestimiento. Después de fabricar el molde, se llena con polvo metálico y se coloca en un contenedor de acero. El espacio entre el molde y el contenedor se llena con el material en partículas. Luego se evacua el contenedor, se sella y se somete a prensado isostático en caliente. Con este proceso se han fabricado rotores para compresores de aleación de titanio para motores de misiles.

17.3.4 Materiales para punzones y matrices

La selección de los materiales para punzones y matrices para la metalurgia de polvos depende de cuán abrasivo es el polvo metálico y del número de piezas a producir. La mayoría de los materiales comunes para dados o matrices son los aceros para herramientas endurecibles al aire o aceite (como D2 o D3), con rango de dureza de 60 a 64 HRC (tabla 5.7). Debido a su dureza y resistencia al desgaste superiores, las matrices de carburo de tungsteno se utilizan para aplicaciones más severas. Por lo general, los punzones se fabrican con materiales similares.

El control dimensional de las matrices y los punzones debe ser muy estricto, ya que es fundamental para una compactación adecuada y para la vida de las matrices. Un espacio demasiado grande entre el punzón y la matriz permite que el polvo metálico se meta en la separación, donde interfiere severamente en la operación y provoca partes excéntricas. Por lo general, las holguras diametrales son menores a 25 μm (0.001 pulgada). Las superficies de las matrices y los punzones se deben lapear o pulir (en la dirección de los movimientos de la herramienta en la matriz) para mejorar la vida de la matriz y el rendimiento general.

17.4 Sinterizado

El *sinterizado* es el proceso mediante el cual los compactados crudos o en verde se calientan en un horno de atmósfera controlada a una temperatura por debajo del punto de fusión, pero lo suficientemente elevada para permitir que se unan (fusionen) las partículas individuales. Como ya hemos visto, el comprimido crudo o en verde es frágil y su resistencia (*resistencia en crudo*) es baja. La naturaleza y resistencia de la unión entre las partículas y, por lo tanto, la del compactado sinterizado, depende de los complejos mecanismos de difusión, flujo plástico, evaporación de materiales volátiles en el compactado, recristalización, crecimiento de los granos y contracción de los poros.

Las variables principales en la sinterización son la temperatura, el tiempo y la atmósfera del horno. Por lo general, las temperaturas de sinterización (tabla 17.2) se en-

TABLA 17.2

Temperatura y tiempo de sinterización para diversos metales		
Material	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
Cobre, latón y bronce	760–900	10–45
Hierro y hierro-grafito	1000–1150	8–45
Níquel	1000–1150	30–45
Aceros inoxidable	1100–1290	30–60
Aleaciones de álnico (para imanes permanentes)	1200–1300	120–150
Ferritas	1200–1500	10–600
Carburo de tungsteno	1430–1500	20–30
Molibdeno	2050	120
Tungsteno	2350	480
Tantalio	2400	480

cuentran en el intervalo de 70% a 90% del punto de fusión del metal o la aleación (ver tabla 3.1). Los tiempos de sinterización (tabla 17.2) van de un mínimo de unos 10 minutos para aleaciones de hierro y cobre, hasta 8 horas para tungsteno y tantalio.

Los hornos de sinterización continua, que se utilizan en la mayor parte de la producción, tienen tres cámaras:

1. *Cámara de quemado* para volatilizar los lubricantes del compactado crudo, a fin de mejorar la resistencia de la unión y evitar agrietamientos.
2. *Cámara de alta temperatura* para sinterización.
3. *Cámara de enfriamiento*.

Si se desea obtener propiedades óptimas, es importante controlar adecuadamente la atmósfera del horno para una sinterización exitosa. Una atmósfera sin oxígeno es fundamental para controlar el carburado y descaburado de los compactados de hierro y de base hierro, además de evitar la oxidación de los polvos. Por lo general, se utiliza un vacío para sinterizar aleaciones de metal refractario y aceros inoxidables. Los gases más empleados para la sinterización son hidrógeno, amoníaco disociado o quemado, gases de hidrocarburos parcialmente quemados y nitrógeno.

Los mecanismos de sinterización son complejos y dependen tanto de la composición de las partículas metálicas como de los parámetros del procesamiento. Los mecanismos de sinterizado son *difusión*, *transporte de la fase vapor* y *sinterizado de la fase líquida*. Al aumentar la temperatura, dos partículas adyacentes de polvo empiezan a formar una unión por medio de un **mecanismo de difusión** (*unión de estado sólido*, fig. 17.19a); en consecuencia, se incrementan la resistencia, densidad, ductilidad y conductividades térmica y eléctrica del compactado. Sin embargo, al mismo tiempo, el compactado se contrae, de ahí que se deban considerar tolerancias para la contracción, como se hace en fundición.

Un segundo mecanismo de sinterización es el **transporte de la fase vapor** (fig. 17.19b). Dado que el material se calienta muy cerca de su temperatura de fusión, algunos átomos del metal se liberan de las partículas como fase vapor. En geometrías convergentes (la interfaz entre dos partículas), la temperatura de fusión es localmente más alta y la fase vapor se solidifica de nuevo. Por lo tanto, la interfaz crece y se refuerza, en tanto que cada partícula se contrae como un todo.

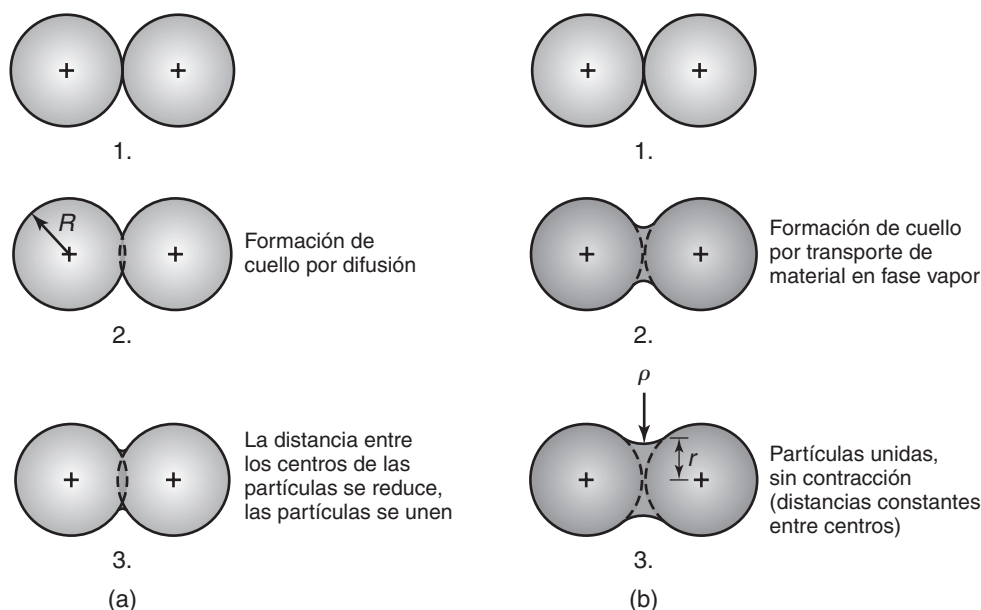


FIGURA 17.19 Esquema de dos mecanismos para sinterización de polvos metálicos: (a) transporte de material de estado sólido, y (b) transporte de material de fase vapor. R = radio de la partícula, r = radio del cuello y ρ = radio del perfil del cuello.

Si dos partículas adyacentes son de diferentes metales, la *aleación* puede ocurrir en la interfaz entre las dos partículas. Si una de ellas tiene un punto de fusión inferior al de la otra, entonces se funde y (debido a la tensión superficial) rodea la partícula que no se ha fundido. Conocida como **sinterización de fase líquida**, un ejemplo de este mecanismo es el cobalto en herramientas y matrices de carburo de tungsteno (ver ejemplo 17.4 y también la sección 22.4). De esta manera se pueden obtener partes más resistentes y densas. En el **sinterizado por chispa** (proceso experimental), los polvos metálicos sueltos se colocan en un molde de grafito calentado por medio de corriente eléctrica, se someten a una descarga de alta energía y se compactan; todo en un solo paso.

Propiedades mecánicas. Dependiendo de la temperatura, el tiempo y la historia del procesamiento, se pueden obtener diferentes estructuras y porosidades en un compactado sinterizado y así afectar sus propiedades. La porosidad no se puede eliminar por completo porque (a) quedan huecos después del compactado, y (b) se desarrollan gases durante el sinterizado. La porosidad puede consistir en una *red* de poros interconectados u *orificios cerrados*. Por lo general, si la densidad del material es menor a 80% de su densidad teórica, los poros se interconectan. Aunque la porosidad reduce la resistencia del producto de la P/M, es una característica importante para fabricar filtros y rodamientos metálicos y para permitir la infiltración de lubricantes líquidos por medio de la tensión superficial.

En la tabla 17.3 se presentan las propiedades mecánicas comunes para diversas aleaciones sinterizadas mediante P/M. En la tabla 17.4 se dan las diferencias entre las propiedades mecánicas de metales forjables contra la P/M. Para evaluar más a fondo las diferencias entre las propiedades de los metales y aleaciones de la P/M, forjables y fundidos, compara esta tabla con las proporcionadas en las partes I y II.

TABLA 17.3

Propiedades mecánicas de materiales seleccionados de P/M							
Denominación	Tipo MPIF	Condición	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Dureza	Elongación en 25 mm (%)
Ferrosos					70		
FC-0208	N	AS	225	205	70	45 HRB	<0.5
		HT	295	—	110	95 HRB	<0.5
	R	AS	415	330	110	70 HRB	1
		HT	550	—	130	35 HRC	<0.5
	S	AS	550	395	130	80 HRB	1.5
		HT	690	655	145	40 HRC	<0.5
FN-0405	S	AS	425	240	145	72 HRB	4.5
		HT	1060	880	160	39 HRC	1
	T	AS	510	295	160	80 HRB	6
		HT	1240	1060		44 HRC	1.5
		Aluminio					
601 AB, barra prensada		AS	110	48	—	60 HRH	6
		HT	252	241	—	75 HRH	2
Latón							
CZP-0220	T	—	165	76	—	55 HRH	13
	U	—	193	89	—	68 HRH	19
	W	—	221	103	—	75 HRH	23
Titanio							
Ti-6Al-4V		HIP	917	827	—	—	13
Superalaciones							
Estelite 19		—	1035	—	—	49 HRC	<1

MPIF: Metal Powder Industries Federation. AS = sólo sinterizado, HT = con tratamiento térmico, HIP = prensado isostático en caliente.

TABLA 17.4

Comparación de propiedades mecánicas de algunos metales forjados y de P/M equivalentes (sólo sinterizados)				
Metal	Condición	Densidad (%)	UTS (MPa)	Elongación en 50 mm (%)
Aluminio	2014-T6 Forjado (W)	—	480	20
		P/M	330	2
	6061-T6	W	310	15
		P/M	250	2
Cobre, OFHC	W, recocido	—	235	50
	P/M	89	160	8
Latón, 260	W, recocido	—	300	65
	P/M	89	255	26
Acero, 1025	W, laminado en caliente	—	590	25
	P/M	84	235	2
Acero inoxidable, 303	W, recocido	—	620	50
	P/M	82	360	2

Nota: La densidad y resistencia de los materiales de P/M aumentan mucho con el procesamiento adicional, como forjado, prensado isostático y tratamientos térmicos.

En la tabla 17.5 se muestran los efectos de diversos procesos de manufactura en las propiedades mecánicas de una aleación de titanio. Obsérvese que el titanio prensado isostáticamente en caliente (HIP) tiene propiedades que son similares a las del titanio fundido y forjado. Sin embargo, cabe recordar que a menos que se forjen con precisión, por lo general las forjas requieren ciertos procesos adicionales de maquinado y acabado que quizás un componente de P/M no requiera.

TABLA 17.5

Comparación de propiedades mecánicas de la aleación de titanio Ti-6AL-4V					
Proceso (*)	Densidad (%)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Resistencia máxima a la tensión (MPa)	Elongación (%)	Reducción de área (%)
Fundida	100	840	930	7	15
Fundida y forjada	100	875	965	14	40
Mezclado elemental (P + S)	98	786	875	8	14
Mezclado elemental (HIP)	>99	805	875	9	17
Prealeado (HIP)	100	880	975	14	26

(*) P + S = prensado y sinterizado, HIP = prensado isostáticamente en caliente.

Fuente: Cortesía de R. M. German.

EJEMPLO 17.2 Contracción en sinterización

En la unión de estado sólido durante la sinterización de un compactado crudo o en verde de polvos metálicos, la contracción lineal es 4%. Si la densidad sinterizada deseada es 95% de la densidad teórica del metal, ¿cuál sería la densidad del compactado crudo?

Solución La contracción lineal se define como $\Delta L/L_0$, donde L_0 es la longitud original. La contracción volumétrica durante la sinterización es:

$$V_{\text{sint}} = V_{\text{crudo}} \left(1 - \frac{\Delta L}{L_0} \right)^3 \quad (17.1)$$

El volumen del compactado en verde debe ser mayor al de la parte sinterizada, pero la masa no cambia durante el sinterizado, por lo que podemos escribir nuevamente esta expresión en términos de la densidad, ρ :

$$\rho_{\text{cruda}} = \rho_{\text{sint}} \left(1 - \frac{\Delta L}{L_o} \right)^3 \quad (17.2)$$

Por lo tanto,

$$\rho_{\text{cruda}} = 0.95(1 - 0.04)^3 = 0.84 \text{ u } 84\%$$

17.5 | Operaciones secundarias y de acabado

Para mejorar más las propiedades de los productos sinterizados mediante la P/M, o para proporcionarles características especiales, se pueden efectuar operaciones adicionales después de la sinterización.

1. El **acuñado** y **dimensionamiento** son operaciones de compactado que se realizan a alta presión en prensas. Los propósitos de estas operaciones son proporcionar precisión dimensional a la pieza sinterizada y mejorar su resistencia y acabado superficial mediante densificación adicional.
2. Los compactados *preformados* y *sinterizados* de polvo aleado se pueden **forjar** después en frío o en caliente para darles las formas finales deseadas y, en algunas ocasiones, mediante *forjado por impacto*. Estos productos tienen un buen acabado superficial, buenas tolerancias dimensionales y tamaño de grano fino y uniforme. Las propiedades superiores obtenidas hacen que esta tecnología sea particularmente apropiada para aplicaciones como los componentes automovilísticos y de motores a reacción sometidos a esfuerzos elevados.
3. Las partes de polvos metálicos se pueden someter a otras operaciones de acabado como:
 - **Maquinado:** para producir diversas características geométricas mediante fresado, taladrado y roscado (para producir orificios roscados).
 - **Rectificado:** para mejorar la precisión dimensional y el acabado superficial.
 - **Recubrimiento:** para mejorar la apariencia y la resistencia al desgaste y a la corrosión.
 - **Tratamiento térmico:** para mejorar la dureza y la resistencia.
4. La porosidad inherente de los componentes de la P/M se puede utilizar **impregnándolos** con un fluido. Los rodamientos y bujes que se lubrican internamente hasta con 30% de aceite en volumen se fabrican al sumergir el rodamiento sinterizado en aceite caliente. Estos rodamientos tienen un suministro continuo de lubricante (debido a la acción capilar) durante su vida útil (también se los conoce como *lubricados permanentemente*). Las uniones universales se fabrican asimismo por medio de técnicas de P/M impregnadas con grasa, por lo que ya no requieren los accesorios tradicionales para la grasa.
5. La **infiltración** es un proceso por el cual se pone en contacto un lodo de un metal de punto de fusión inferior con la parte sinterizada. Después se calienta el montaje a una temperatura suficientemente alta para fundir el lodo. El metal fundido se infiltra en los poros mediante la acción capilar y produce una parte relativamente libre de poros, con una buena densidad y resistencia. La aplicación más común es la infiltración de compactados con base de hierro mediante cobre. Las ventajas de la infiltración es que se mejoran la dureza y la resistencia a la tensión de la parte y se llenan los poros, por lo que se evita la penetración de humedad (que puede provocar corrosión). Además, dado que es deseable cierta porosidad cuando se utiliza un infiltrante, la parte puede sinterizarse sólo parcialmente, lo que produce una distorsión térmica inferior.

EJEMPLO 17.3 Engranés producidos por metalurgia de polvos para un tractor de jardín

Se han fabricado de manera competitiva engranes que utilizan polvos de alta calidad, los cuales tienen alta compresibilidad y, por ello, requieren bajas presiones de compactado. Estas partes tienen densidad de media a alta y son adecuadas para aplicaciones severas, con cargas elevadas, y para superficies de alto desgaste. En una aplicación, se produjo un engrane de reducción para un tractor de jardín a partir de polvo de hierro y se infiltró con cobre. A pesar de que su resistencia era aceptable, la razón de desgaste bajo cargas elevadas era demasiado alta. El desgaste produjo la pérdida del perfil de los dientes, carga lateral en los rodamientos y alto nivel de ruido. Para mejorar la resistencia y la resistencia al desgaste, se seleccionó un nuevo polvo que contenía 2.0% de Ni, 0.5% de C y 0.5% de Mo; el resto era polvo de hierro atomizado. Debido al tamaño de la pieza, las cargas de prensado eran muy altas.

Se rediseñó la parte y el herramental se hizo con tres punzones para compactar la pieza a tres densidades diferentes. Toda la parte requirió una carga de compactado de 4 MN (450 toneladas). Por este método se obtuvo alta densidad en las secciones de la parte que requerían resistencia y resistencia al desgaste elevadas. La alta densidad también permitió la carburación de la pieza para mejorar su dureza. La parte presinterizada se prensó de nuevo (a una densidad superior de 7.3 a 7.5 g/cm³ en el área dentada) para mejorar la resistencia, en tanto que el cubo del engrane permaneció a su densidad de prensado de 6.4 a 6.6 g/cm³. El peso del engrane era de 1 kg (2.25 libras).

EJEMPLO 17.4 Producción de carburo de tungsteno para herramientas y matrices o dados

El carburo de tungsteno es un material importante para herramientas y dados o matrices, sobre todo debido a su dureza, resistencia y resistencia al desgaste en una amplia variedad de temperaturas. En la fabricación de carburos se utilizan las técnicas de metalurgia de polvos. Primero, se mezclan los polvos de tungsteno y carbono en un molino de bolas o en un mezclador giratorio. La mezcla, que es básicamente 94% de W y 6% de C (en peso), se calienta a unos 1500 °C (2800 °F) en un horno de inducción al vacío. Como consecuencia, el tungsteno se carburiza y forma carburo de tungsteno en forma de polvo fino. A éste se le agrega después un agente aglutinante (por lo general, cobalto) junto con un fluido orgánico, como hexano, y la mezcla se muele en un molino de bolas para producir una mezcla uniforme y homogénea. Este proceso puede tardar varias horas, o incluso días.

La mezcla se seca y consolida, por lo general mediante el compactado en frío y bajo presiones de casi 200 MPa (30,000 psi). Después se sinteriza la parte en una atmósfera de hidrógeno u horno de vacío a una temperatura de entre 1350 °C y 1600 °C (2500 °F a 2900 °F), dependiendo de su composición. A esta temperatura, el cobalto se encuentra en fase líquida y actúa como aglutinante para las partículas de carburo. Los polvos también se pueden prensar en caliente a la temperatura de sinterización mediante matrices o dados de grafito.

El carburo de tungsteno sufre una contracción lineal de casi 16% durante el sinterizado, lo que corresponde a una contracción volumétrica de alrededor de 40%. En consecuencia, el control del tamaño y de la forma es importante para producir herramientas con las dimensiones y tolerancias deseadas. También se puede producir una combinación de otros carburos (como el de titanio y el de tantalio) por medio de este método, utilizando mezclas fabricadas mediante el método descrito. La tendencia es utilizar partículas cada vez más finas para mejorar las propiedades mecánicas de las estructuras de dicho compuesto.

17.6 Consideraciones de diseño

Dadas las propiedades únicas de los polvos metálicos, sus características de flujo en la matriz y la fragilidad de los compactados crudos o en verde, existen ciertos principios de diseño que es necesario seguir (figs. 17.20 a 17.22).

1. La forma del compactado debe ser lo más simple y uniforme posible. Deben evitarse cambios abruptos de contorno, secciones delgadas, variaciones de espesor y las relaciones altas longitud a diámetro.
2. Deben tomarse precauciones para expulsar el compactado crudo de la matriz sin dañarlo, por lo que los orificios o depresiones tienen que ser paralelos al eje de avance del punzón. También deben proveerse bisels para evitar daños a las orillas durante la expulsión.
3. Las partes producidas mediante P/M se deben producir con las tolerancias dimensionales más amplias aceptables (congruentes con las aplicaciones a las que se destinan), para aumentar la vida de los herramientas y matrices y reducir los costos de producción.
4. Por lo general, el espesor de las paredes de la pieza no debe ser menor a 1.5 mm (0.060 pulgada); sin embargo, con cuidado especial se pueden prensar con éxito paredes delgadas hasta de 0.34 mm (0.0135 pulgada) en componentes de 1 mm (0.04 pulgada) de longitud. Las paredes con relaciones de longitud a espesor mayores a 8:1 son difíciles de prensar y las variaciones de densidad son virtualmente inevitables.
5. Se pueden producir escalones en las partes si son simples y su tamaño no excede 15% de la longitud total de la parte. Se pueden prensar escalones más grandes, pero requieren herramental más complejo, de movimientos múltiples.
6. Se pueden prensar letras si están orientadas de manera perpendicular a la dirección del prensado y se pueden realzar o rebajar. Las letras realzadas son más susceptibles a daños en la etapa cruda y también evitan el apilamiento durante el sinterizado.
7. Los rebordes o salientes se pueden producir mediante un escalón en el dado. Sin embargo, los rebordes grandes pueden romperse con la expulsión y requerir herramental más elaborado. Un reborde largo debe incorporar un ángulo de salida alrededor del mismo, un radio en la arista inferior y un radio en la unión del reborde y/o el cuerpo del componente para reducir las concentraciones de esfuerzo y la probabilidad de fractura.

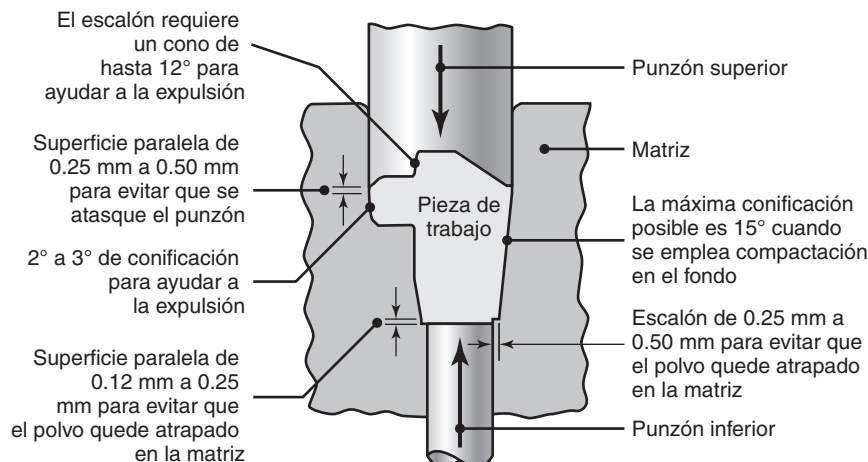


FIGURA 17.20 Geometría y características de diseño de la matriz o dado para compactación de polvos metálicos. Fuente: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

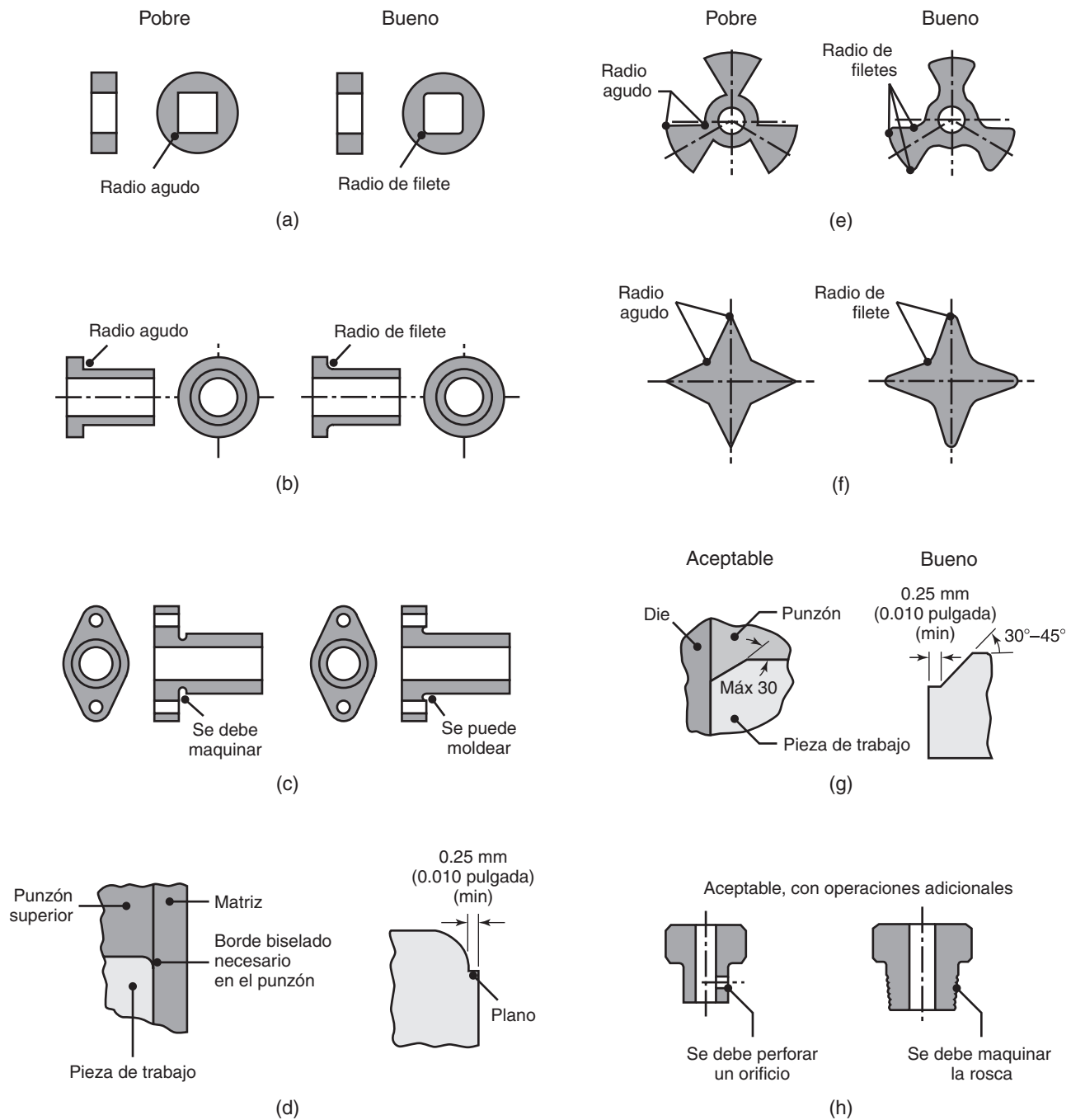


FIGURA 17.21 Ejemplos de partes de P/M que muestran diseños pobres y buenos. Obsérvese que deben evitarse los radios agudos y las esquinas entrantes, y que las cuerdas y los orificios transversales tienen que producirse por separado mediante operaciones adicionales de maquinado. *Fuente:* Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

8. No se puede prensar un radio verdadero en la orilla de una parte porque requeriría que el punzón se biselara en forma vertical (que se conificara ligeramente) hasta un espesor de cero, como se muestra en la figura 17.21d. Es preferible prensar chafalanes o planos, y un método común de diseño es un ángulo de 45° en un plano de 0.25 mm (0.010 pulgada).
9. Las chavetas, las ranuras de chavetas y los orificios utilizados para transmitir torques en engranes y poleas se pueden formar durante la compactación de polvos. Es

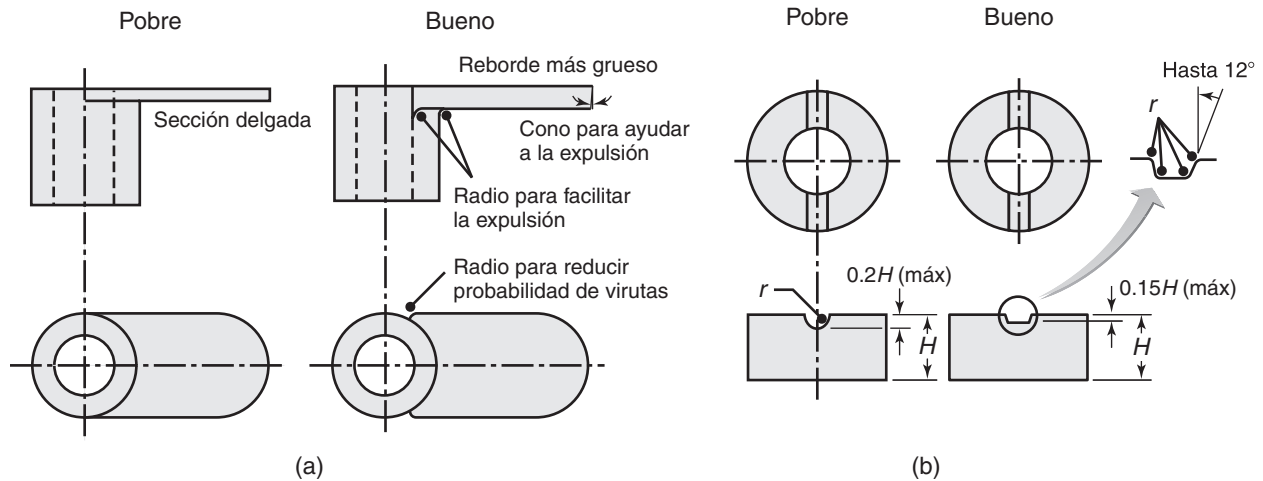


FIGURA 17.22 (a) Características de diseño para uso con rebordes sin soporte. (b) Características de diseño para su uso con ranuras. Fuente: Cortesía de Metal Powder Industries Federation.

posible producir resaltes siempre que se utilicen ángulos de salida adecuados y su longitud sea pequeña en comparación con el componente en general.

10. Se pueden hacer muescas y ranuras si se orientan perpendicularmente en la dirección del prensado. Se recomienda que las ranuras circulares no excedan una profundidad de 20% de todo el componente y que las ranuras rectangulares no excedan 15%.
11. Las partes producidas mediante moldeo por inyección de polvos tienen restricciones similares de diseño a las del moldeo por inyección de los polímeros. Con el PIM, los espesores de pared deben ser uniformes para minimizar la distorsión durante el sinterizado. Además, los moldes se deben diseñar con transiciones tersas para evitar la acumulación de polvo y permitir la distribución uniforme del mismo (fig. 17.23).
12. Por lo general, las tolerancias dimensionales de las partes sinterizadas mediante P/M son del orden de ± 0.05 a 0.1 mm (± 0.002 a 0.004 pulgada). Las tolerancias mejoran de modo significativo con operaciones adicionales, como dimensionamiento, maquinado y rectificado.

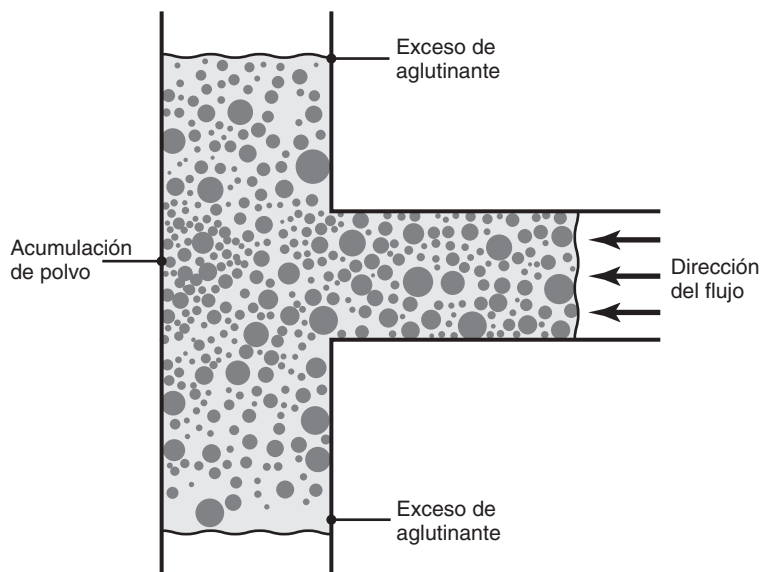


FIGURA 17.23 Ilustración de la distribución no uniforme de polvo debido a transiciones abruptas del canal en el moldeo por inyección del metal.

17.7 Capacidades del proceso

Las capacidades del proceso de metalurgia de polvos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Es una técnica para fabricar partes de metales refractarios de alto punto de fusión, y partes cuya producción por otros métodos pueda ser difícil o poco económica.
- Son posibles altas velocidades de producción de partes relativamente complejas mediante equipo automatizado y que requiere poca mano de obra.
- El procesamiento de los polvos metálicos ofrece buen control dimensional y (en muchos casos) la eliminación de las operaciones de maquinado y acabado; de esta manera, reduce los desechos y desperdicios y ahorra energía.
- La disponibilidad de una amplia gama de composiciones permite obtener propiedades mecánicas y físicas especiales, como rigidez, amortiguamiento de la vibración, dureza, densidad, tenacidad y propiedades eléctricas y magnéticas específicas. Algunas de las recientes superaleaciones de alta aleación se pueden manufacturar como partes sólo por medio del procesamiento de la P/M.
- Ofrece la capacidad de impregnación e infiltración para aplicaciones específicas.

Las limitaciones de la P/M son:

- El alto costo de los polvos metálicos, en particular los destinados al moldeo por inyección de polvos, en comparación con los de las materias primas que se funden o forjan.
- El alto costo del herramental y del equipo para líneas pequeñas de producción.
- Limitaciones en el tamaño y complejidad de la forma de la pieza.
- Propiedades mecánicas, como la resistencia y la ductilidad, que por lo general son inferiores a las obtenidas mediante el forjado. Sin embargo, las propiedades de las partes producidas mediante P/M de densidad total, fabricadas mediante operaciones de HIP o forjado adicional, pueden ser tan altas como las de las fabricadas mediante otros procesos.

17.8 Economía de la metalurgia de polvos

Dado que mediante la metalurgia de los polvos se pueden producir partes en formas netas o casi netas y así eliminar muchas operaciones secundarias de manufactura y ensamble, se ha vuelto cada vez más competitiva respecto de la fundición, el forjado y el maquinado. Por otro lado, el alto costo inicial de los punzones, matrices y equipo para el procesamiento de la P/M significa que el volumen de producción debe ser suficientemente alto para justificar este gasto. A pesar de que existen excepciones, por lo general el proceso es económico para cantidades de más de 10,000 piezas.

Como en otras operaciones de trabajos de los metales, el costo de las matrices y el herramental en la metalurgia de polvos depende de la complejidad de la forma de la pieza y el método de procesamiento de los polvos metálicos. Por lo tanto, los costos de herramental para procesos como el prensado isostático en caliente y el moldeo por inyección de polvos son más elevados que para el procesamiento convencional de los polvos. Debido a su método de manufactura de formas casi netas, el costo de las operaciones de acabado para la P/M es bajo en comparación con otros procesos, como la fundición y el forjado. Sin embargo, si existen ciertas características de la parte (como orificios roscados, rebajos y cavidades y orificios transversales), entonces los costos de acabado aumentan. Por consiguiente, puede ser más importante apegarse a los lineamientos de diseño en P/M para minimizar o evitar dichas operaciones adicionales en este proceso que en los otros.

Los costos del equipo para procesamiento convencional de la P/M son de alguna manera similares a los del procesamiento de deformación volumétrica de los metales, co-

TABLA 17.6

Partes de titanio forjadas y de P/M y ahorro en los costos				
Parte	Peso (kg)			
	Palanquilla forjada	P/M	Parte final	Ahorro en costo (%)
F-14 Soporte de fuselaje	2.8	1.1	0.8	50
F-18 Soporte de montaje de motor	7.7	2.5	0.5	20
F-18 Accesorio de soporte de gancho de arrestador	79.4	25	12.9	25
F-14 Bastidor de barquilla	143	82	24.2	50

mo el forjado. Sin embargo, el costo aumenta en forma significativa cuando se utilizan métodos como HIP y P/M. Los costos de mano de obra no son tan altos como los de otros procesos, sobre todo porque las operaciones individuales (como mezcla, compactación y sinterizado de polvos) se realizan en equipo altamente automatizado. En consecuencia, las habilidades requeridas no son tan altas.

La capacidad de formas casi netas de la P/M reduce o elimina de manera significativa el desperdicio. Por ejemplo, en la tabla 17.6 se muestran las comparaciones de peso de los componentes para aeronaves producidos mediante los procesos de forja o de P/M. Obsérvese que las partes de P/M se someten a procesos adicionales de maquinado, por lo que las partes finales pesan menos que las fabricadas mediante cualquiera de los dos procesos solos.

RESUMEN

- La metalurgia de polvos es un proceso de moldeado de forma neta que consiste en producir polvos metálicos, mezclarlos, compactarlos en matrices o dados y sinterizarlos para proporcionarles resistencia, dureza y tenacidad. La compactación también se puede efectuar mediante prensado isostático en frío o en caliente a fin de mejorar las propiedades. Aunque el tamaño y peso de sus productos están limitados, el proceso de la P/M tiene la capacidad de producir partes relativamente complejas de manera económica, como formas netas, a tolerancias dimensionales cerradas y con una gran variedad de polvos de metales y aleaciones.
- Se pueden realizar operaciones secundarias y de acabado en las partes producidas mediante P/M para mejorar su precisión dimensional, acabado superficial, propiedades físicas y mecánicas y su apariencia. Estas operaciones incluyen forjado, tratamiento térmico, maquinado, rectificado, recubrimiento, infiltración (con aceite, por ejemplo) e impregnación (con metales con punto de fusión bajo, por ejemplo).
- El control de la forma y calidad del polvo, las variables del proceso y las atmósferas de sinterización son factores que deben considerarse al analizar la calidad del producto. La densidad y las propiedades mecánicas y físicas se pueden controlar mediante el diseño del herramental y la presión de compactado.
- Un proceso importante de P/M es el moldeo por inyección de polvo, que comprende la mezcla de polvos metálicos muy finos con polímeros para hacer que fluyan más fácilmente en los moldes de la forma compleja durante el compactado. Los polímeros se evaporan después, durante la sinterización.
- Las consideraciones de diseño para la metalurgia de polvos incluyen la forma de la pieza, la capacidad de expulsar el compactado crudo o en verde de la matriz o dado y las tolerancias dimensionales aceptables para la aplicación en particular. El proceso de P/M es adecuado para líneas de producción de volumen medio a alto y para partes relativamente pequeñas. Tiene ciertas ventajas competitivas sobre otros métodos de producción, como la fundición, el forjado y el maquinado.

TÉRMINOS CLAVE

Aleación mecánica	Impregnación	Prensado isostático en caliente
Atomización	Infiltración	Prensado isostático en frío
Carbonilos	Metalurgia de polvos	Reducción
Compactación	Mezclado	Resistencia en crudo
Compactación sin presión	Moldeo por inyección de metales	Sinterizado
Compactado crudo o en verde	Moldeo por inyección	Sinterizado por chispas
Deposición electrolítica	Moldeo por inyección de polvos	Tamizado
Factor de forma	Prensado	Trituración o pulverizado

BIBLIOGRAFÍA

- ASM Handbook, Vol. 7: *Powder Metal Technologies and Applications*, ASM International, 1998.
- Atkinson, H. V. y Rickinson, B. A., *Hot Isostatic Pressing*, Adam Hilger, 1991.
- Dowson, G., *Powder Metallurgy: The Process and its Products*, Adam Hilger, 1990.
- Fayed, M. y Otten L. (eds.), *Handbook of Powder Science and Technology*, 2a. ed., Chapman & Hall, 1997.
- German, R. M., *Powder Injection Molding*, Metal Powder Industries Federation, 1990.
- _____, *Sintering Technology and Practice*, Wiley, 1996.
- _____, y Bose, A., *Injection Molding of Metals and Ceramics*, Metal Powder Industries Federation, 1997.
- Hausner, H. H. y Mall, M. K., *Handbook of Powder Metallurgy*, Chemical Publishing Company, 1982.
- Kuhn, H. A. y Ferguson, B. L., *Powder Forging*, Metal Powder Industries Federation, 1990.
- Lawley, A., *Atomization: The Production of Metal Powders*, Metal Powder Industries Federation, 1992.
- Lenel, F. V., *Powder Metallurgy: Principles and Applications*, American Powder Metallurgy Institute, 1980.
- Powder Metallurgy Design Manual*, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, 1995.

PREGUNTAS DE REPASO

- 17.1 Describa brevemente los pasos de producción comprendidos en la fabricación de partes mediante la metalurgia de polvos.
- 17.2 Nombre los diversos métodos de producción de polvos y explique los tipos de polvos producidos.
- 17.3 Explique por qué se mezclan los polvos metálicos.
- 17.4 ¿Es importante la resistencia en crudo o en verde? Explique su respuesta.
- 17.5 Nombre los métodos utilizados en la compactación de polvos metálicos.
- 17.6 ¿Qué riesgos implica el procesamiento de la P/M? Explique sus causas.
- 17.7 ¿Qué requisitos deben reunir los punzones y matrices o dados en el procesamiento de la P/M?
- 17.8 Describa qué ocurre a los polvos metálicos durante el sinterizado.
- 17.9 ¿Por qué se efectúan operaciones secundarias y de acabado en partes producidas mediante P/M?
- 17.10 Explique la diferencia entre impregnación e infiltración. Proporcione algunas aplicaciones de cada una.
- 17.11 ¿Qué es una aleación mecánica? ¿Cuáles son sus ventajas sobre la aleación convencional de metales?
- 17.12 ¿Por qué son necesarias las atmósferas de protección en el sinterizado? ¿Cuáles serían los efectos en las propiedades de las partes producidas mediante P/M si no se utilizaran dichas atmósferas?
- 17.13 ¿Cómo se producen los polvos esféricos? ¿Cómo se producen los polvos con bordes puntiagudos?
- 17.14 ¿Qué es el “tamizado” de los polvos metálicos? ¿Por qué se realiza?

PROBLEMAS CUALITATIVOS

- 17.15 ¿Por qué hay variación de densidad en el compactado de polvos? ¿Cómo se reduce?
- 17.16 ¿Cuál es la magnitud de los esfuerzos y las fuerzas comprendidas en el compactado de polvos?
- 17.17 Dé las razones por las que el moldeado por inyección de polvos es un proceso importante.
- 17.18 ¿Cómo varía el equipo utilizado para el compactado de polvos en relación con el usado en otras operaciones de trabajo de los metales?
- 17.19 ¿Por qué las propiedades mecánicas y físicas dependen de la densidad de las partes producidas mediante P/M?
- 17.20 ¿Cuáles son los efectos de las diferentes formas y tamaños de las partículas de metal en el procesamiento de la P/M?
- 17.21 Describa las ventajas y limitaciones relativas del prensado isostático en frío y en caliente.
- 17.22 ¿Son diferentes los requisitos de los materiales para punzones y matrices en la metalurgia de polvos que los de forja y extrusión? Explique su respuesta.
- 17.23 Ya indicamos que la P/M puede ser competitiva con respecto a procesos como la fundición y el forjado.

Explique por qué es así, proporcionando gamas de aplicaciones.

17.24 Explique las razones de las formas de las curvas mostradas en la figura 17.10 y de sus posiciones relativas en los gráficos.

17.25 ¿Los compactados crudos deben llevarse a la temperatura de sinterización lenta o rápidamente? Explique sus razones.

17.26 Debido a que se someten a un procesamiento especial, los polvos metálicos son más costosos que los mismos metales en forma sólida, en especial los polvos utilizados en el moldeo por inyección de polvos. ¿Cómo se justifica el costo adicional en el proceso de partes por medio de la metalurgia de polvos?

17.27 En la figura 17.11e se observa que la presión no es uniforme a través del diámetro del compactado a una distancia particular del punzón. ¿Cuál es la razón de esta variación?

17.28 ¿Por qué la presión de compactado y la temperatura de sinterización dependen del tipo de polvo metálico?

17.29 Comente las formas e intervalos de las curvas de las capacidades de proceso en la figura 17.14.

PROBLEMAS CUANTITATIVOS

- 17.30 Estime el máximo tonelaje requerido para compactar una masa de latón de 2.5 pulgadas de diámetro. ¿La altura de la masa metálica provoca alguna diferencia en su respuesta? Explique sus razonamientos.
- 17.31 Respecto de la figura 17.10a, ¿cuál debería ser el volumen del polvo de hierro fino suelto para hacer un compactado cilíndrico sólido de 25 mm de diámetro y 15 mm de altura?
- 17.32 Determine los factores de forma para: (a) un cilindro con relaciones dimensionales de 1:1:1, y (b) una hojuela con relaciones de 1:10:10.
- 17.33 Estime el número de partículas en una muestra de 400 g de polvo de hierro, si el tamaño de las partículas es de 75 μm .
- 17.34 Supóngase que la superficie de una partícula de cobre se cubre con una capa de óxido de 0.1 mm de espesor. ¿Cuál es el volumen (y el porcentaje del volumen) ocupado por esta capa si la partícula de cobre tiene 60 μm de diámetro?
- 17.35 Investigue en la bibliografía técnica para obtener datos sobre la contracción durante el sinterizado de las

partes producidas mediante la P/M. Comente sus observaciones.

17.36 Grafique el área total de la superficie de una muestra de 100 g de aluminio en función del logaritmo natural del tamaño de la partícula.

17.37 Un polvo grueso de cobre se compacta en una prensa mecánica a una presión de 20 toneladas/pulg². Durante la sinterización, la parte cruda se contrae un 8% adicional. ¿Cuál es la densidad final?

17.38 Un engrane se manufactura a partir de polvos de hierro. Se desea que tenga 90% de la densidad final de la del hierro fundido y se sabe que la contracción en la sinterización será de casi 5%. Para un engrane que tiene 2.5 pulgadas de diámetro y un cubo de 0.75 pulgada, ¿cuál es la fuerza de prensado requerida?

17.39 Suponga que es un instructor que cubre los temas descritos en este capítulo y realiza una prueba sobre diversos aspectos para examinar los conocimientos de los estudiantes. Prepare dos problemas cuantitativos y proporcione las respuestas.

SÍNTESIS, DISEÑO Y PROYECTOS

17.40 Dibuje los productos de P/M en los que serían deseables variaciones de densidad (ver fig. 17.11). Explique por qué en términos de las funciones de estas piezas.

17.41 Compare las consideraciones de diseño para productos de P/M con las de (a) fundición, y (b) forja. Describa sus observaciones.

17.42 ¿Existen aplicaciones en las que usted, como ingeniero de manufactura, no recomendaría un producto de P/M? Explique su respuesta.

17.43 Describa detalladamente otros métodos de manufactura de las partes que se muestran en la figura 17.1.

17.44 ¿Cuán grande es el tamaño de los granos de los polvos metálicos que se pueden producir en las cámaras de atomización? Investigue en la bibliografía para determinar la respuesta.

17.45 Grafique el tamaño de abertura contra el tamaño de la malla para tamices utilizados en la clasificación de tamaños de polvos.

17.46 Utilice Internet para localizar proveedores de polvos metálicos y compare los costos del polvo con el costo de los lingotes de cinco materiales.

17.47 Se sabe que en el diseño de engranes de P/M, el diámetro exterior del cubo debe estar lo más lejos posible de la raíz del engrane. Explique por qué éste es el caso.

17.48 Explique por qué las partes de polvos metálicos se utilizan comúnmente para elementos de máquinas que requieren buenas características de fricción y desgaste, y para partes producidas en masa.

17.49 Se indicó que el moldeado por inyección de polvos compite bien con la fundición por revestimiento y los forjados pequeños de varios materiales, pero no con las fundiciones de matrices de zinc y aluminio. Explique por qué.

17.50 Describa de qué manera sería útil la información proporcionada en la figura 17.14 para diseñar partes de P/M.

17.51 Ya indicamos que en el proceso mostrado en la figura 17.18, las formas producidas se limitan a partes asimétricas. ¿Cree que sería posible producir otras formas también? Describa cómo modificaría el diseño de la configuración para fabricar dichas formas y explique las dificultades que se pueden encontrar.