

Fundamentos de manufactura moderna

Tercera edición

**Mc
Graw
Hill**

Mikell P. Groover

Director Higher Education: Miguel Ángel Toledo Castellanos
Director editorial: Ricardo A. del Bosque Alayón
Editor sponsor: Pablo E. Roig Vázquez
Editora de desarrollo: Lorena Campa Rojas
Supervisor de producción: Zeferino García García

Traducción: Carlos Roberto Cordero Pedraza
Javier Enríquez Brito
Jesús Elmer Murrieta Murrieta

Diseño de portada: Círculodiseño

FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA

Tercera edición

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra,
por cualquier medio, sin la autorización escrita del editor.



McGraw-Hill
Interamericana

DERECHOS RESERVADOS © 2007 respecto a la tercera edición en español por
McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

A Subsidiary of *The McGraw-Hill Companies, Inc.*

Edificio Punta Santa Fe
Prolongación Paseo de la Reforma 1015, Torre A
Piso 17, Colonia Desarrollo Santa Fe,
Delegación Álvaro Obregón
C.P. 01376, México, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana, Reg. Núm. 736

ISBN-13: 978-970-10-6240-1

ISBN-10: 970-10-6240-X

Traducido de la tercera edición en inglés de la obra *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING. Materials, Processes and Systems*. Copyright © 2007 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ISBN-10: 0-471-74485-9

ISBN-13: 978-0-471-74485-6

1234567890

0986543217

Impreso en México

Printed in Mexico

Parte III

Procesos de solidificación

10

FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 10.1 Panorama de la tecnología de fundición
 - 10.1.1 Procesos de fundición
 - 10.1.2 Moldes para fundición en arena
- 10.2 Calentamiento y vertido
 - 10.2.1 Calentamiento del metal
 - 10.2.2 Vertido del metal fundido
 - 10.2.3 Análisis de ingeniería del vertido
 - 10.2.4 Fluidez
- 10.3 Solidificación y enfriamiento
 - 10.3.1 Solidificación de los metales
 - 10.3.2 Tiempo de solidificación
 - 10.3.3 Contracción
 - 10.3.4 Solidificación direccional
 - 10.3.5 Diseño de la mazarota

En esta parte del libro se estudian aquellos procesos de manufactura en los que el material de inicio se encuentra en forma líquida o en condición muy plástica, y se crea un objeto a través de su solidificación. Los procesos de fundición y moldeo dominan esta categoría de operaciones de conformación. En relación con la figura 10.1, los procesos de solidificación se clasifican de acuerdo con el material de ingeniería que se procesa: 1) metales, 2) cerámicos, en específico vidrios,¹ y 3) polímeros y compuestos de matriz de polímero (PMC, por sus siglas en inglés). En este capítulo y el siguiente se cubre la fundición de metales. El trabajo del vidrio se estudia en el capítulo 12 y el procesamiento de polímeros y PMC se trata en los capítulos 13, 14 y 15.

La **fundición** es un proceso en el que metal derretido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El término **fundición** también se aplica al objeto que se fabrica por medio de este proceso. Es uno de los procesos más antiguos de conformación, pues se remonta a hace 6 000 años (véase la nota histórica 10.1). El principio de la fundición parece sencillo: se derrite metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa.

¹ Entre los cerámicos sólo el vidrio se procesa por solidificación; los cerámicos nuevos y tradicionales reciben su forma con el empleo de procesos de partículas (véase el capítulo 17).

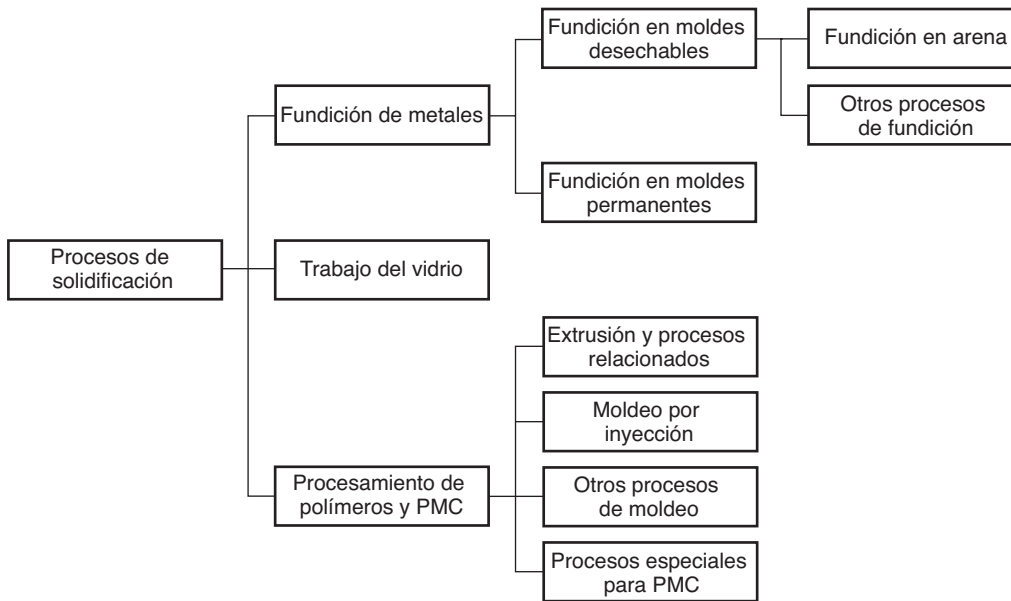


FIGURA 10.1 Clasificación de los procesos de solidificación.

Nota histórica 10.1 *Orígenes de la fundición*

La fundición de metales puede rastrearse hasta alrededor de 4000 a.C. El oro fue el primer metal descubierto y usado por las civilizaciones antiguas; era maleable y se martillaba con facilidad para darle forma a temperatura ambiente. Parecía que no hubiera necesidad de otras maneras para dar forma al oro. Fue el descubrimiento posterior del cobre lo que originó la necesidad de la fundición. Aunque el cobre podía forjarse para darle forma, el proceso era más difícil (debido al endurecimiento por deformación) y se limitaba a formas relativamente simples. Los historiadores creen que transcurrieron cientos de años antes de que el proceso de fundir cobre se llevara a cabo por vez primera, es probable que por accidente durante la reducción del mineral de cobre durante la preparación para martillar el metal en alguna forma útil. Así, por azar, nació el arte de la fundición. Es probable que el descubrimiento ocurriera en Mesopotamia, y la “tecnología” se difundiera con rapidez por el resto del mundo antiguo.

Fue una innovación de importancia significativa en la historia de la humanidad. Con la fundición podían obtenerse formas mucho más intrincadas que por medio del martillado. Era posible fabricar herramientas y armas más sofisticadas. Se obtenían implementos y ornamentos más detallados. Se hacía joyería fina de oro, más bella y valiosa que con los métodos anteriores.

Primero se emplearon aleaciones para fundir, cuando se descubrió que la mezcla de cobre y estaño (la aleación que se formaba era bronce) producía fundidos mucho mejores que el cobre solo. La fundición permitió la creación de riqueza en aquellas naciones que la hacían del mejor modo. Durante la edad de bronce (cerca de 2 000 años), Egipto dominó el mundo civilizado antiguo gracias a su capacidad de efectuar el proceso de fundición.

Durante la Edad Media (de 400 a 1400 d.C.), la religión fue una influencia importante para perpetuar las habilidades del fundidor. La construcción de catedrales y templos requería la fundición de las campanas que se empleaban en esas estructuras. En realidad, el tiempo y esfuerzo necesarios para fundir las grandes campanas de bronce de esa época ayudaron a que el proceso de fundición pasara del ámbito del arte al de la tecnología. Hubo avances en las técnicas de fundición y hechura de moldes. Se mejoró el procedimiento de fundición que consistía en el moldeo por fosos, en el que los moldes se formaban en un pozo profundo ubicado frente al horno para simplificar el proceso de vertido. Además, el fundidor de campanas aprendió la relación que había entre el tono de éstas, que era la medición importante de la calidad del producto, y su tamaño, forma, espesor y composición del metal.

Otro producto importante asociado con el desarrollo de la fundición fue el cañón. Cronológicamente, siguió

a la campana y por ello muchas de las técnicas que se usaron para fundirlas se aplicaban a la fabricación de cañones. El primero de ellos se elaboró en Ghent, Bélgica, en el año 1313. De entre todas las personas posibles, lo hizo un monje. Estaba hecho de bronce y el agujero se formó por medio de un núcleo durante la fundición. Debido a la rugosidad del agujero que se creaba durante el proceso

de fundición, estas armas primeras no eran exactas y tenían que dispararse en un rango relativamente corto para que fueran eficaces. Pronto se hizo manifiesto que la exactitud y rango se podrían mejorar si el agujero se hacía suave mediante la maquinación de la superficie. Este proceso de maquinado recibió el nombre muy apropiado de perforado (taladrado) (sección 22.1.5).

La fundición incluye la obtención tanto de lingotes como de formas. El término **lingote** por lo general se asocia con las industrias primarias de metales; describe un fundido grande de forma sencilla que se espera adopte otras formas por medio de procesos tales como rolado o forjado. En el capítulo 6 se estudió la formación de lingotes. Una **fundición de forma** involucra la producción de formas más complejas que están mucho más cerca de la forma final que se desea que tenga la pieza o producto. Este capítulo y el siguiente tienen que ver más con la fundición de formas que con la de lingotes.

Existe una variedad de métodos de fundición de formas, lo que la hace uno de los procesos de manufactura más versátiles. Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de **forma neta**. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de **forma casi neta**, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.

Asociadas con la fundición también hay algunas desventajas, distintas para métodos diferentes. Entre éstas se incluyen limitaciones de las propiedades mecánicas; porosidad, exactitud dimensional y acabado de la superficie defectuosa para ciertos procesos de fundición; peligros para la seguridad de los seres humanos cuando procesan metales fundidos y problemas ambientales.

Las piezas fabricadas con procesos de fundición varían su tamaño desde componentes pequeños que pesan unas cuantas onzas hasta productos muy grandes de varias toneladas. La lista de piezas incluye coronas dentales, joyería, estatuas, estufas para quemar madera, bloques y cabezas de motores para vehículos automotrices, armazones de maquinaria, ruedas de ferrocarril, cacerolas para freír, tubería y carcasas de bombas. Todas las variedades de metales pueden fundirse, ferrosos y no ferrosos.

La fundición también se emplea con materiales tales como polímeros y cerámicos; sin embargo, los detalles son suficientemente distintos como para posponer el estudio de los procesos de fundición de esos materiales a capítulos posteriores. Este capítulo y el siguiente tienen que ver en forma exclusiva con la fundición de metales. En éste se examinan los fundamentos que se aplican prácticamente a todas las operaciones de fundido. En el capítulo que sigue se describen los procesos individuales de fundición, así como algunos de los temas del diseño de productos que deben considerarse cuando se fabrican piezas fundidas.

10.1 PANORAMA DE LA TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

Como proceso de producción, la fundición se lleva a cabo por lo general en una fundidora. Una **fundidora** es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar metal en forma derretida, ejecutar el proceso de fundición y limpiar el fundido terminado. Los trabajadores que llevan a cabo las operaciones de fundido en estas fábricas reciben el nombre de **fundidores**.

10.1.1 Procesos de fundición

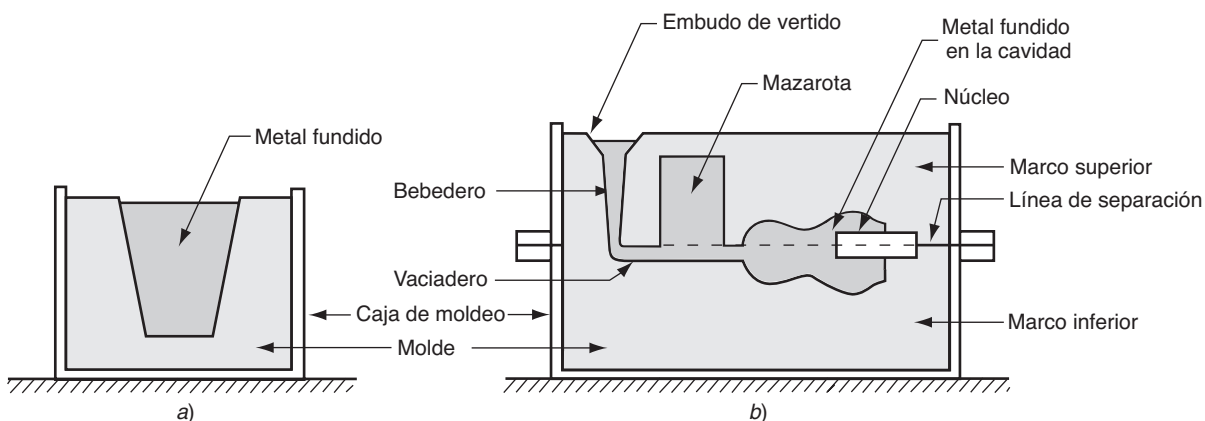
El estudio de la fundición comienza en forma lógica con el molde. El **molde** contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida. El tamaño y forma reales de la cavidad deben sobredimensionarse un poco para permitir la contracción de metal que ocurre durante la solidificación y enfriamiento. A metales diferentes corresponden cantidades distintas de contracción, por lo que la cavidad del molde debe diseñarse para el metal en particular que se va a fundir, si la exactitud dimensional es de importancia crítica. Los moldes están hechos de varios materiales, que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Es frecuente que los procesos varios de fundición se clasifiquen de acuerdo con estos tipos diferentes de moldes.

Para llevar a cabo la operación de fundido, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido. Después se vierte, o se dirige, hacia la cavidad del molde. En un **molde abierto**, figura 10.2a, el metal líquido simplemente se vierte hasta que llena la cavidad abierta. En un **molde cerrado**, figura 10.2b, se adapta un pasaje denominado sistema de paso, que permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es con mucho la categoría más importante de las operaciones productivas de fundición.

Tan pronto como el metal fundido llega al molde, comienza a enfriarse. Cuando la temperatura baja lo suficiente (por ejemplo, al punto de congelación para un metal puro), empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal. Se requiere de tiempo para completar el cambio de fase, y en el proceso se pierde una cantidad considerable de calor. Es durante esta etapa del proceso que el metal adopta la forma sólida de la cavidad del molde, y también cuando se establecen muchas de las propiedades y características del fundido.

Una vez que el fundido se ha enfriado lo suficiente, se retira del molde. En función del método de fundido y el metal empleado, podría requerirse un procesamiento adicional.

FIGURA 10.2 Dos formas de molde: a) molde abierto es tan sólo un contenedor con la forma de la pieza que se desea y b) molde cerrado, en la que la forma del molde es más compleja y requiere un sistema de paso (pasaje) que conduzca a la cavidad.



Esto incluye cortar el exceso de metal de la pieza fundida real, limpiar la superficie, inspeccionar el producto y dar tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, quizá se requiera maquinar (véase el capítulo 22), con objeto de lograr tolerancias más estrechas para ciertas características de las piezas, y eliminar la superficie del fundido.

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias, de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con molde permanente. **Molde desechable** significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirar el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables. En la fundición con arena, se vierte metal derretido en un molde de arena. Una vez que el metal se endurece, debe destruirse el molde a fin de recuperar el fundido.

Un **molde permanente** es el que se utiliza una vez y otra para producir muchos fundidos. Está hecho de metal (o de un material refractario cerámico, lo que es menos común) que soporte las temperaturas elevadas de la operación de fundido. En la fundición con molde permanente, éste consiste en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada. El troquel de fundición es el proceso más familiar de este grupo.

Con los procesos de molde desechable por lo general son posibles formas más intrincadas para el fundido. En los procesos con molde permanente las formas de la pieza están limitadas por la necesidad de abrir el molde. Por otro lado, algunos de los procesos con molde permanente tienen ciertas ventajas económicas en operaciones de producción elevada. En el capítulo 11 se estudian los procesos de fundición con moldes desechables y permanentes.

10.1.2 Moldes para fundición en arena

La fundición con arena es por mucho el proceso de fundición más importante. Para describir las características básicas de un molde se usará un molde para fundición en arena. Muchas de estas características y términos son comunes a los moldes que se emplean en otros procesos de fundición. La figura 10.2b) muestra la sección transversal de un molde común de fundición de arena, en la que se indica parte de la terminología. El molde consiste en dos mitades: el marco superior y el marco inferior. El **marco superior** es la mitad superior del molde y el **marco inferior** es la mitad inferior. Estas dos partes del molde están contenidas en una caja, llamada **caja de moldeo**, que también está dividida en dos mitades, una para el marco superior y la otra para el inferior. Las dos mitades del molde se separan en la **línea de separación**.

En la fundición con arena (y en otros procesos con moldes desechables), la cavidad del molde se forma por medio de un **modelo**, hecho de madera, metal, plástico u otro material, y tiene la forma de la pieza por fundir. La cavidad se forma apisonando arena alrededor del modelo, sobre las mitades del marco superior y el inferior, de modo que cuando se retira el modelo, el vacío que queda tiene la forma que se desea para la pieza. El modelo por lo general está sobredimensionado a fin de permitir la contracción del metal cuando éste se solidifica y se enfría. La arena del molde está húmeda y contiene un aglutinante para que conserve su forma.

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la pieza fundida. Además, un fundido puede tener superficies internas. Éstas quedan determinadas por medio de un **núcleo**, forma que se coloca dentro de la cavidad del molde para definir la forma interior de la pieza. En la fundición con arena, los núcleos por lo general están hechos también de arena, aunque pueden emplearse otros materiales tales como metales, yeso y cerámicos.

El **sistema de paso** de un molde de fundición es el canal, o red de canales, por los que fluye el metal derretido desde el exterior hacia la cavidad. Como se aprecia en la figura, es común que el sistema de paso conste de un **bebedero de vertido** (también llamado sólo **bebedero**), por la que el metal ingresa por un **vaciadero** que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero, es frecuente que se use un **embudo de vertido**

para minimizar las salpicaduras y turbulencia conforme el metal fluye en el bebedero. En el diagrama aparece como un embudo sencillo en forma de cono. Algunos embudos de vertido están diseñados en forma de tazón, con un canal abierto que lleva al bebedero.

Además del sistema de paso, cualquier fundido en el que la contracción sea significativa requiere una mazarota conectada a la cavidad principal. La *mazarota* es un almacenamiento en el molde que sirve como fuente de metal líquido para que el fundido compense la contracción durante la solidificación. La mazarota debe estar diseñada para que se solidifique después del fundido principal a fin de que cumpla su función.

Conforme el metal pasa al molde, el aire que ocupaba en forma previa la cavidad, o bien los gases calientes que se forman por las reacciones del metal fundido, deben ser evacuados de modo que el metal llene por completo el espacio vacío. Por ejemplo, en la fundición con arena la porosidad natural de ésta permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los moldes permanentes de metal se perforan pequeños agujeros en el molde, o se maquinan hacia la línea de separación, para permitir la salida del aire y gases.

10.2 CALENTAMIENTO Y VERTIDO

Para llevar a cabo una operación de fundido, el metal debe calentarse a una temperatura algo más elevada que su punto de fusión y luego verterse a la cavidad del molde para que se solidifique. En esta sección se estudian aspectos diversos de estas dos etapas de la fundición.

10.2.1 Calentamiento del metal

Para calentar el metal a una temperatura de fusión suficiente para la fundición se utilizan hornos de varias clases (véase la sección 11.4.1). La energía calorífica que se requiere es la suma de 1) el calor para elevar la temperatura al punto de fusión, 2) el calor de fusión para convertirlo de sólido a líquido y 3) el calor para poner el metal fundido a la temperatura deseada para verterlo. Esto se expresa así:

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m) \} \quad (10.1)$$

donde H = calor total que se requiere para subir la temperatura del metal a la temperatura a que se vierte, J (Btu); ρ = densidad, g/cm³ (lbm/in³); C_s = calor específico por peso para el metal sólido, J/g-°C (Btu/lbm-F); T_m = temperatura de fusión del metal, °C (F); T_o = temperatura de inicio, la ambiental, por lo general, °C (F); H_f = calor de fusión, J/g (Btu/lbm); C_l = calor específico por peso del metal líquido, J/g-°C (Btu/lbm-F); T_p = temperatura de vertido, °C (F); y V = volumen del metal que se calienta, cm³ (in³).

Ejemplo 10.1 Calentamiento de metal para fundición

Un metro cúbico de cierta aleación eutéctica se calienta en un crisol, desde la temperatura ambiente a 100 °C por arriba de su punto de fusión para fundirlo. La densidad de la aleación es de 7.5 g/cm³, el punto de fusión es de 800 °C, calor específico de 0.33 J/g °C en estado sólido y 0.29 J/g °C en estado líquido; y el calor de fusión es de 160 J/g. ¿Cuánta energía calorífica debe agregarse para completar el calentamiento si se supone que no hay pérdidas?

Solución: Se supone que en la fundidora la temperatura ambiente es de 25 °C y que la densidad de los estados líquido y sólido del metal es la misma. Como un m³ es igual a 10⁶ cm³, al sustituir los valores apropiados en la ecuación (10.1) se tiene que

$$H = (7.5)(10^6) \{ 0.33(800 - 25) + 160 + 0.29(100) \} = 3335(10^6) \text{ J}$$

La ecuación anterior tiene valor conceptual; sin embargo, su valor de cálculo es limitado y no representa al ejemplo del cálculo. El empleo de la ecuación (10.1) es complicado por los factores siguientes: 1) el calor específico y otras propiedades térmicas del metal

sólido varían con la temperatura, en especial si el metal sufre un cambio de fase durante el calentamiento. 2) El calor específico de un metal puede ser diferente en los estados sólido y líquido. 3) La mayoría de los metales que se funden son aleaciones, y la mayor parte de éstas se funden por arriba de una temperatura que varía entre la de solidus y liquidus, más bien que con un solo punto de fusión; así, el calor de fusión no puede aplicarse en forma tan simple como la que se ilustró. 4) En la mayoría de los casos, no se dispone de los valores apropiados que se requieren en la ecuación para una aleación particular. 5) Existen pérdidas caloríficas significativas hacia el ambiente durante el calentamiento.

10.2.2 Vertido del metal fundido

Después del calentamiento, el metal está listo para verterlo. La introducción del metal derretido en el molde, que incluye el flujo a través del sistema de paso y hacia la cavidad, es una etapa crítica del proceso de fundición. Para que esta etapa tenga éxito, el metal debe fluir hacia todas las regiones del molde antes de solidificarse. Los factores que afectan la operación de vertido incluyen los siguientes: temperatura a la que se vierte, velocidad de vertido y turbulencia.

La **temperatura de vertido** es aquella que tiene el metal derretido cuando se introduce al molde. Lo que importa aquí es la diferencia entre la temperatura a que se vierte y la que tiene al comenzar la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura de liquidus para una aleación). Esta diferencia de temperatura en ocasiones se conoce como la de **sobrecalentamiento**. Este término también se emplea para la cantidad de calor que debe retirarse del metal derretido entre el vertido y el inicio de la solidificación [6].

La **velocidad de vertido** se refiere a la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde. Si la tasa es demasiado baja, el metal se enfriará y solidificará antes de llenar la cavidad. Si la tasa de vertido es excesiva, la turbulencia se vuelve un problema serio. La **turbulencia** en el flujo de un fluido se caracteriza por variaciones erráticas en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido. El flujo se agita y es irregular en vez de ser suave y seguir líneas de corriente, como ocurre con el flujo laminar. Debe evitarse el flujo turbulento durante el vertido, por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos de metal que pueden quedar atrapados durante la solidificación, lo que degrada la calidad del fundido. La turbulencia también agrava la **erosión del molde**, que es la pérdida gradual de superficies del molde debido al impacto del flujo de metal derretido. Las densidades de la mayoría de los metales que se funden son mucho mayores que la del agua y otros fluidos que se estudia normalmente. Estos metales fundidos también tienen una química mucho más reactiva que cuando se encuentran a temperatura ambiente. En consecuencia, el desgaste ocasionado por el flujo de ellos en el molde es significativo, en especial en condiciones de turbulencia. La erosión es seria en especial si ocurre en la cavidad principal debido a que la forma de la pieza fundida resulta afectada.

10.2.3 Análisis de ingeniería del vertido

Hay varias relaciones que gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de paso y dentro del molde. Una importante es el **teorema de Bernoulli**, que establece que la suma de las energías (piezométrica, presión, cinética y fricción) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye son iguales. Esto se escribe de la forma siguiente:

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (10.2)$$

donde h = altura piezométrica, cm (in); p = presión del líquido, N/cm² (lb/in²); ρ = densidad, g/cm³ (lbm/in³); v = velocidad de flujo, cm/s (in/s); g = constante de la aceleración de la gravedad, 981 cm/s² (32.2 × 12 = 386 in/s²); y F = pérdidas piezométricas debidas a la fricción, cm (in). Los subíndices 1 y 2 indican dos ubicaciones cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli se simplifica de varias maneras. Si se ignoran las pérdidas por fricción (seguramente, la fricción afectará el flujo del líquido a través de un molde de arena) y se supone que entre tanto el sistema permanece a presión atmosférica, entonces la ecuación se reduce a

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

Esto se utiliza para determinar la velocidad del metal derretido en la base del bebedero. Se define como punto 1 la parte superior de la mazarota, y punto 2 la base. Si el punto 2 se usa como el plano de referencia, entonces la altura piezométrica en él es igual a cero ($h_2 = 0$) y h_1 es la altura (longitud) de la entrada. Cuando el metal se vierte en el embudo y fluye por el bebedero, su velocidad inicial en la parte superior es de cero ($v_1 = 0$). Así, la ecuación (10.3) se simplifica aún más y queda

$$h_1 = \frac{v_2^2}{2g}$$

que se resuelve para la velocidad de flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (10.4)$$

donde v = velocidad del metal líquido en la base de la mazarota, cm/s (in/s); $g = 981$ cm/s/s (386 in/s/s); y h = altura del bebedero, cm (in).

Otra relación importante durante el vertido es la **ley de continuidad**, que establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través del líquido. El gasto volumétrico es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del líquido que fluye. La ley de la continuidad se expresa como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (10.5)$$

donde Q = gasto volumétrico, cm³/s (in³/s); v = velocidad; A = área de la sección transversal del líquido, cm² (in²); y los subíndices se refieren a dos puntos cualesquiera del sistema de flujo. Así, un incremento del área da lugar a una disminución de la velocidad, y viceversa.

Las ecuaciones (10.4) y (10.5) indican que el bebedero debe ser ahusado. Conforme el metal acelera durante su descenso por la abertura del bebedero, el área de la sección transversal del canal debe reducirse; de otro modo, mientras la velocidad del metal aumenta en su camino hacia la base del bebedero, el líquido podría aspirar aire y llevarlo a la cavidad del molde. Para impedir esta condición, el bebedero se diseña con un ahusamiento, de modo que el gasto volumétrico vA siempre es el mismo en las partes superior e inferior de ella.

Si se supone que el vaciadero que va de la base del bebedero a la cavidad del molde es horizontal (y por tanto la altura piezométrica h es la misma que en la base del bebedero), entonces el gasto volumétrico a través del paso hacia la cavidad del molde permanece igual a vA en la base. En consecuencia, es posible estimar el tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de volumen V , así:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q} \quad (10.6)$$

donde T_{MF} = tiempo de llenado del molde, s; V = volumen de la cavidad del molde, cm³ (in³); y Q = gasto volumétrico. El tiempo de llenado del molde calculado por medio de la ecuación (10.6) debe considerarse un tiempo mínimo. Esto se debe a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible obstrucción del flujo en el sistema de paso; así, el tiempo de llenado del molde debe ser mayor que el que se obtiene con la ecuación (10.6).

El bebedero de un molde mide 20 cm de largo, y el área de la sección transversal en su base es de 2.5 cm². El bebedero alimenta un vaciadero horizontal que conduce a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 1 560 cm³. Determine: a) la velocidad del metal derretido

Ejemplo 10.2 Cálculos del vertido

en la base del bebedero, *b*) la tasa de flujo volumétrico, y *c*) el tiempo que toma llenar el molde.

Solución: *a*) La velocidad del flujo de metal en la base de la entrada está dada por la ecuación (10.4):

$$v = \sqrt{2(981)(20)} = 198.1 \text{ cm/s}$$

b) El gasto volumétrico es

$$Q = (2.5 \text{ cm}^2)(198.1 \text{ cm/s}) = 495 \text{ cm}^3/\text{s}$$

c) El tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde de 100 in³ con ese gasto es

$$T_{MF} = 1560 / 495 = 3.2 \text{ s}$$

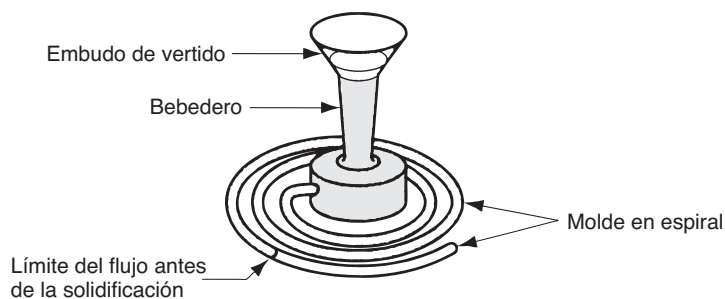
10.2.4 Fluidez

Es frecuente que las características del flujo de un metal derretido se describan con el término **fluidez**, medida de la capacidad de un metal para fluir hacia un molde y llenarlo antes de solidificarse. La fluidez es el inverso de la viscosidad (véase la sección 3.4); conforme la viscosidad se incrementa, la fluidez disminuye. Existen métodos estándar de prueba para evaluar la fluidez, incluida la prueba del molde espiral que se ilustra en la figura 10.3, en el que la fluidez queda indicada por la longitud del metal que se solidifica en el canal espiral. Una espiral más larga de fundido significa fluidez mayor del metal derretido.

Los factores que afectan la fluidez incluyen la temperatura de vertido respecto del punto de fusión, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y la transferencia de calor al ambiente. Una temperatura de vertido más elevada respecto del punto de solidificación del metal aumenta el tiempo que permanece en estado líquido, lo que permite que fluya más antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas del fundido tales como la formación de óxidos, porosidad por gases y penetración de metal líquido en los espacios intersticiales entre los granos de arena que forman el molde. Este último problema ocasiona que la superficie del fundido contenga partículas de arena incrustadas, lo que la hace más áspera y abrasiva que lo normal.

La composición también afecta la fluidez, en particular respecto al mecanismo de solidificación del metal. La mejor fluidez se obtiene con metales que se solidifican a temperatura constante (por ejemplo, metales puros y aleaciones eutécticas). Cuando la solidificación ocurre en un rango de temperatura (la mayor parte de aleaciones pertenecen a esta categoría), la porción solidificada en forma parcial interfiere con el flujo de la porción líquida, lo que reduce la fluidez. Además del mecanismo de solidificación, la composición del metal también determina el **calor de fusión**, la cantidad de calor que se requiere para solidificar el metal a partir de su estado líquido. Un calor de fusión más elevado tiende a incrementar la medida de la fluidez en la fundición.

FIGURA 10.3 Prueba del molde espiral para la fluidez, en la que ésta se mide como la longitud del canal espiral que se llena con metal derretido antes de que ocurra la solidificación.



10.3 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

Después de que se vierte al molde, el metal derretido se enfría y solidifica. En esta sección se estudia el mecanismo físico de la solidificación que ocurre durante la fundición. Los temas asociados con ella incluyen el tiempo que necesita un metal para solidificarse, las contracciones, la solidificación direccional y el diseño de la mazarota.

10.3.1 Solidificación de los metales

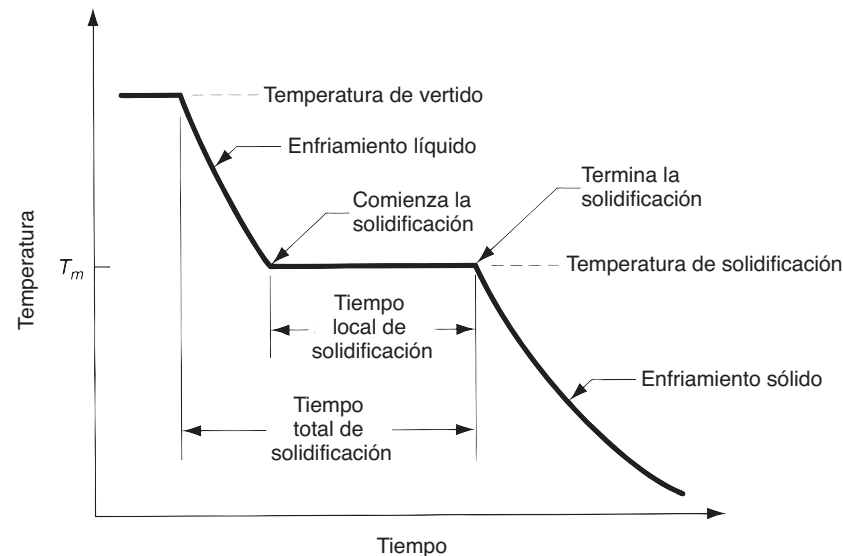
La solidificación involucra la transformación del metal derretido de nuevo al estado sólido. El proceso de solidificación difiere en función de si el metal es un elemento puro o una aleación.

Metales puros Un metal puro se solidifica a una temperatura constante igual a su punto de adhesión, el cual es el mismo punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros se conocen y están bien documentados (véase la tabla 4.1). El proceso ocurre a lo largo del tiempo, como se ilustra en la gráfica que aparece en la figura 10.4, que se denomina curva de enfriamiento. La solidificación real toma tiempo, llamado **tiempo local de solidificación** del fundido, durante el cual el calor de fusión latente del metal se libera hacia el molde que lo rodea. El **tiempo total de solidificación** es aquel que transcurre entre el vertido y la solidificación completa. Después de que el fundido se ha solidificado por completo, el enfriamiento continúa a la tasa indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción enfriadora de la pared del molde, al principio se forma una capa delgada de metal sólido en la interfaz inmediatamente después del vertido. El espesor de esta capa se incrementa y forma una costra alrededor del metal derretido conforme la solidificación avanza hacia el centro de la cavidad. La tasa a la que la solidificación sucede depende de la transferencia de calor al molde, así como de las propiedades térmicas del metal.

Es de interés examinar la formación de granos metálicos y su crecimiento durante el proceso de solidificación. El metal que forma la capa inicial se ha enfriado con rapidez por la extracción de calor a través de la pared del molde. Esta acción de enfriamiento ocasiona que los granos de la capa sean finos, de ejes iguales y orientados al azar. Conforme el enfriamiento continúa, se forman más granos y crecen en dirección opuesta a la de la transferencia de calor. Como ésta ocurre a través de la capa y pared del molde, los granos

FIGURA 10.4 Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.



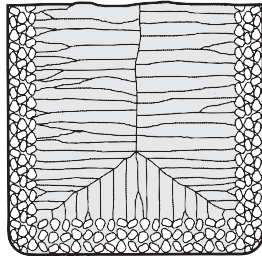
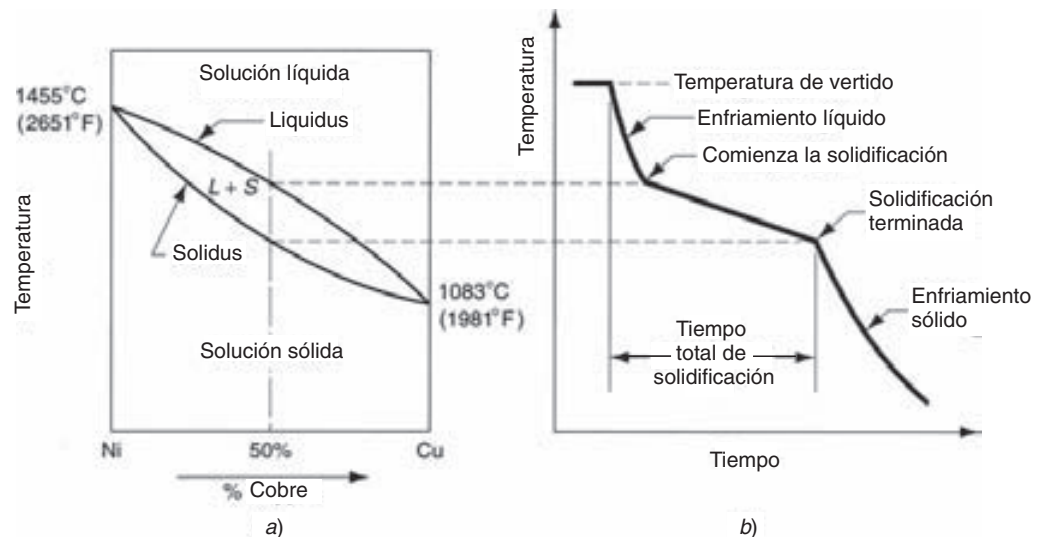


FIGURA 10.5 Estructura característica de los granos en un fundido de metal puro, en la que se ilustran los granos de tamaño pequeño orientados al azar cerca de la pared del molde, y granos grandes alargados orientados hacia el centro del fundido.

crecen hacia el interior como agujas o espinas de metal sólido. Conforme estas espinas crecen se forman ramas laterales, y mientras éstas también crecen se forman otras ramas a ángulos rectos de las primeras. Este tipo de crecimiento de granos se conoce como **crecimiento dendrítico**, y ocurre no sólo en la solidificación de los metales puros sino también en la de aleaciones. Estas estructuras parecidas a árboles se llenan en forma gradual durante la solidificación, conforme se deposita más metal en las dendritas, hasta que ocurre la solidificación completa. Los granos que resultan de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente, tienden a ser gruesos y hay granos alargados en dirección del centro del fundido. En la figura 10.5 se ilustra la formación de granos que resulta.

Mayoría de aleaciones La mayor parte de aleaciones se solidifican en un rango de temperaturas en vez de a una temperatura única. El rango exacto depende del sistema de aleación y la composición particular. La solidificación de una aleación se explica con auxilio de la figura 10.6, que muestra el diagrama de fase para un sistema particular de aleación (véase la sección 6.1.2) y la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme la temperatura cae, comienza la solidificación a la temperatura indicada por el **liquidus** y termina cuando se alcanza el **solidus**. El comienzo de la solidificación es similar a la de un metal puro. Se forma una capa delgada en la pared del molde debido al gradiente de temperatura mayor en esa superficie. Luego, la solidificación continúa igual que se describió antes, con la formación de dendritas que crecen hacia afuera de las paredes. Sin embargo, debido a la dispersión de temperatura entre el liquidus y el solidus, la naturaleza del crecimiento dendrítico es tal que se forma una zona de avance en la que coexiste metal tanto líquido como sólido. Las porciones sólidas son las estructuras dendríticas que se formaron lo suficiente como para atrapar islas pequeñas de metal

FIGURA 10.6 a) Diagrama de fase para un sistema de aleación cobre-níquel y b) curva de enfriamiento asociada para una composición de 50% Ni y 50% Cu, durante la fundición.



líquido en la matriz. Esta región sólida-líquida tiene consistencia suave que ha dado lugar a su nombre de **zona blanda**. En función de las condiciones de solidificación, la zona blanda puede ser relativamente angosta, o existir a través de la mayor parte del fundido. Esta última condición la favorecen factores tales como la transferencia lenta de calor a partir del metal caliente, y una diferencia grande entre las temperaturas del liquidus y el solidus. En forma gradual, las islas de líquido en la matriz dendrítica se solidifican conforme disminuye la temperatura del fundido hacia la de solidus para la composición de la aleación dada.

Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es que cuando comienzan a formarse las dendritas su composición favorece al metal con el punto de fusión más elevado. En tanto la solidificación continúa y las dendritas crecen, se desbalancea la composición entre el metal que ya se solidificó y el restante que sigue derretido. Este desbalanceo en la composición se manifiesta al final, en el fundido terminado, en forma de la segregación de los elementos. La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. Microscópicamente, la composición química varía entre los granos individuales. Esto se debe al hecho de que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción mayor de uno de los elementos de la aleación. Conforme las dendritas crecen, deben expandirse con el uso del metal líquido restante que ha disminuido parcialmente del primer componente. Al final, el último metal en solidificarse en cada grano es el que ha sido atrapado por las ramas de las dendritas, y su composición está aún más fuera de balance. Así, se tiene una variación de la composición química dentro de los granos individuales del fundido.

Macroscópicamente, la composición química varía en todo el fundido. Como sus regiones que se solidificaron primero (hacia fuera, cerca de las paredes del molde) son más ricas en un componente que en otro, la aleación derretida restante queda privada de él en el momento en que ocurre la solidificación en el interior. Así, hay una segregación general a través de la sección transversal del fundido, que a veces se denomina **segregación de lingote**, como se ilustra en la figura 10.7.

Aleaciones eutécticas Éstas constituyen una excepción al proceso general por el que se solidifican las aleaciones. Una **aleación eutéctica** es una composición particular de un sistema de aleación para el que el solidus y el liquidus están a la misma temperatura. Así, la solidificación ocurre a temperatura constante en lugar de en un rango, como se describió antes. El efecto se observa en el diagrama de fase del sistema plomo-estaño que aparece en la figura 6.3. El plomo puro tiene un punto de fusión de 327 °C (621 °F), mientras que el estaño puro se funde a 232 °C (450 °F). Aunque la mayor parte de las aleaciones plomo-estaño presentan el rango de temperatura frecuente solidus-liquidus, la composición particular de 61.9% de estaño y 38.1% de plomo tiene un punto de fusión (solidificación) de 183 °C (362 °F). Esta composición es la **composición eutéctica** del sistema de la aleación plomo-estaño, y 183 °C es su **temperatura eutéctica**. No es común utilizar aleaciones plomo-estaño para hacer fundiciones, pero las aleaciones Pb-Sn casi eutécticas se emplean en las soldaduras eléctricas, en las que el punto de fusión bajo es una ventaja. Algunos ejemplos de aleaciones eutécticas que se encuentran en la fundición incluyen aluminio-silicio (11.6%) y hierro fundido (4.3% de C).

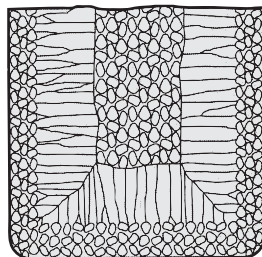


FIGURA 10.7 Estructura de grano característica de un fundido de aleación, en la que se aprecia la segregación de los componentes de la aleación en el centro del fundido.

10.3.2 Tiempo de solidificación

Sea que el fundido consista en un metal puro o en una aleación, la solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el que se requiere para que el fundido se solidifique después del vertido. Este tiempo depende del tamaño y forma del fundido, en una relación empírica conocida como **regla de Chvorinov**, que establece lo siguiente:

$$T_{TS} = C_m \left(\frac{V}{A} \right)^n \quad (10.7)$$

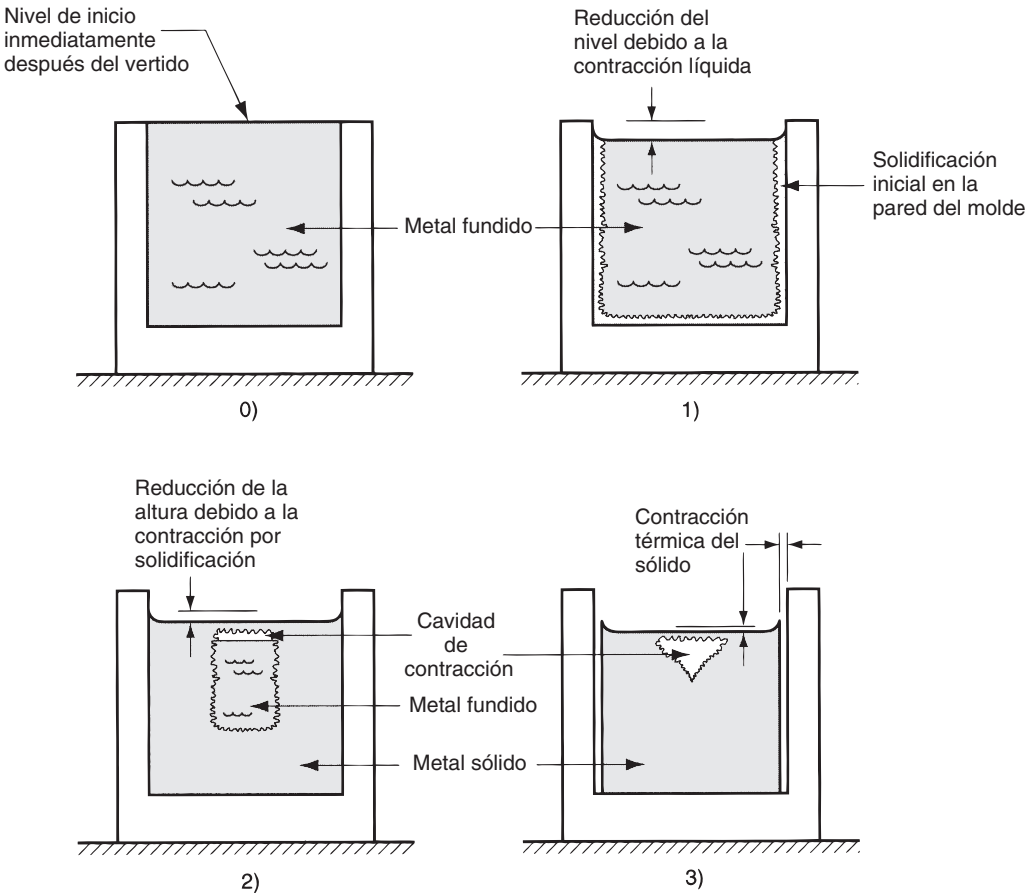
donde T_{TS} = tiempo total de solidificación, min; V = volumen del fundido, cm^3 (in^3); A = área de la superficie del fundido, cm^2 (in^2); n es un exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2; y C_m es la **constante del molde**. Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son min/cm^2 (min/in^2), y su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, incluido el material del molde (por ejemplo, calor específico, conductividad térmica), propiedades térmicas del metal que se funde (por ejemplo, calor de fusión, calor específico, conductividad térmica) y la temperatura de vertido respecto al punto de fusión del metal. El valor de C_m para una operación de fundido se basa en datos experimentales de operaciones anteriores efectuadas con el empleo del mismo material del molde, metal, y temperatura de vertido, aun si la forma de la pieza fuera muy diferente.

La regla de Chvorinov indica que un fundido con una razón grande de volumen a superficie se enfriará y solidificará con más lentitud que otra con una razón menor. Este principio se emplea para diseñar la mazarota de un molde. Para que desempeñe su función de alimentar el metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase sólida más tiempo que el fundido. En otras palabras la T_{TS} para la mazarota debe exceder la T_{TS} del fundido principal. Como las condiciones del molde son las mismas tanto para la mazarota como para el fundido, sus constantes de molde deben ser iguales. Si se diseña la mazarota para que tenga una razón mayor de volumen a área, se puede tener seguridad razonable en que el fundido principal se solidifique primero y que los efectos de la contracción se minimicen. Antes de considerar la manera en que se diseña la mazarota con la regla de Chvorinov, se estudiará el tema de la contracción, que es la razón por la que se necesitan las mazarotas.

10.3.3 Contracción

El estudio presente de la solidificación ha ignorado el efecto de la contracción que tiene lugar durante el enfriamiento y solidificación. La contracción ocurre en tres etapas: 1) contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación, 2) contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida, llamada **contracción por solidificación**, y 3) contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente. Las tres etapas se explican en relación con un fundido cilíndrico hecho en un molde abierto, como se ilustra en la figura 10.8. El metal fundido inmediatamente después del vertido aparece en el inciso 0 de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento desde la temperatura de vertido hasta la de solidificación hace que la altura del líquido se reduzca de su nivel inicial, como se ilustra en el inciso 1 de la figura. La cantidad de esta contracción líquida por lo general es de alrededor de 0.5%. La contracción por solidificación que se observa en el inciso 2 tiene dos efectos. En primer lugar, ocasiona una reducción adicional en la altura del fundido. En segundo, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción central superior del fundido se ve restringida. En general ésta es la última región que se solidifica, y la ausencia de metal crea un vacío en esa ubicación del fundido. Los trabajadores de la fundición llaman **rechupe** a esa cavidad por contracción. Una vez que se solidifica, el fundido experimenta más contracción de su altura y diámetro durante su enfriamiento, como se aprecia en el inciso 3 de la figura. Esta contracción está determinada por el coeficiente de expansión térmica del metal, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

FIGURA 10.8 Contracción de un fundido cilíndrico durante la solidificación y enfriamiento: 0) nivel de inicio del metal fundido inmediatamente después del vertido, 1) reducción del nivel ocasionado por la contracción líquida durante el enfriamiento, 2) disminución de la altura y formación de una cavidad de contracción ocasionada por la contracción de la solidificación y 3) reducción adicional de la altura y diámetro debido a la contracción térmica durante el enfriamiento del metal sólido. Por claridad, las reducciones dimensionales se han exagerado en los dibujos.



En la tabla 10.1 se presentan algunos valores comunes de contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la contracción del sólido, etapas 2 y 3. La contracción por solidificación ocurre en casi todos los metales porque la fase sólida tiene una densidad mayor que la líquida. La transformación de fase que acompaña a la solidificación ocasiona una reducción del volumen por unidad de peso del metal. La excepción de la tabla 10.1 es el hierro colado con alto contenido de carbono, cuya solidificación se complica por la existencia de un periodo de grafitización durante las

TABLA 10.1 Contracción volumétrica para distintos metales de fundición, debido a la contracción por solidificación y a la del sólido.

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación, %	Contracción térmica del sólido, %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (común)	7.0	5.0
Hierro colado gris	1.8	3.0
Hierro colado gris, alto C	0	3.0
Acero fundido al bajo C	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (Cu-Sn)	5.5	6.0

Recopilada a partir de la referencia [3].

etapas finales de la solidificación, lo que origina una expansión que tiende a compensar la disminución volumétrica que se asocia con el cambio de fase [6].

Los modelistas intervienen en la contracción por solidificación y en la térmica, porque hacen que las cavidades del molde aumenten su tamaño. La cantidad en la que el molde debe hacerse más grande en relación con el tamaño del fundido final se denomina **tolerancia por contracción del modelo**. Aunque la contracción es volumétrica, las dimensiones del fundido casi siempre se expresan linealmente, por lo que las tolerancias deben aplicarse en concordancia. Para hacer los modelos y moldes más grandes que el fundido que se desea en la cantidad apropiada, se usan “reglas de contracción” especiales con escalas elongadas ligeramente. En función del metal que se va a fundir, estas reglas de contracción son entre 1% y 5% mayores que la regla estándar.

10.3.4 Solidificación direccional

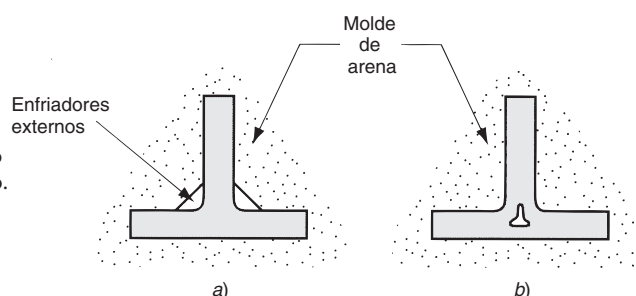
A fin de minimizar los efectos del daño que causa la contracción, es deseable que las regiones del fundido más lejos del suministro de metal líquido se solidifiquen primero, y que este proceso avance desde ellas hacia la(s) mazarota(s). De esta manera, se dispone en forma continua de metal derretido en los vertedores para impedir que se formen vacíos de contracción durante la solidificación. El término **solidificación direccional** se utiliza para describir este aspecto del proceso de solidificación y los métodos con los que se controla. La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov en el diseño del fundido en sí, su orientación dentro del molde y el diseño del sistema de la mazarota que lo alimenta. Por ejemplo, si se colocan secciones del fundido con razones V/A menores lejos de la mazarota, la solidificación ocurrirá primero en esas regiones y el suministro de metal líquido para el resto del fundido permanecerá abierto hasta que se solidifiquen dichas secciones voluminosas.

Otra manera de facilitar la solidificación direccional es el empleo de **enfriadores**, sumideros de calor internos o externos que ocasionan el enfriamiento rápido de ciertas regiones del fundido. Los **enfriadores internos** son piezas metálicas pequeñas que se sitúan dentro de la cavidad antes del vertido, de modo que el metal derretido se solidificará primero alrededor de ellas. El enfriador interno debe tener una composición química similar a la del metal que se vierte, lo que se logra con mayor facilidad si se le fabrica del mismo metal que el fundido mismo.

Los **enfriadores externos** son inserciones de metal en las paredes de la cavidad del molde, que absorben calor del metal fundido con más rapidez que la arena circundante a fin de que faciliten la solidificación. Se usan con frecuencia con eficacia en secciones del fundido que son difíciles de alimentar con metal derretido, con lo que se facilita la solidificación rápida de esas secciones mientras la conexión al metal líquido sigue abierta. En la figura 10.9 se ilustra una aplicación posible de enfriadores externos y el resultado probable en el fundido si no se emplearan.

Tan importante como el inicio de la solidificación en regiones apropiadas de la cavidad, es evitar la solidificación prematura en las secciones del molde más cerca de la mazarota. El pasaje entre la mazarota y la cavidad principal tiene importancia particular.

FIGURA 10.9 a) Enfriador externo para favorecer la solidificación rápida del metal derretido en una sección delgada del fundido y b) resultado probable si no se usara el enfriador externo.



Esta conexión debe diseñarse de modo que no se solidifique antes que el fundido, lo que aislaría al fundido del metal fundido de la mazarota. Aunque por lo general es deseable minimizar el volumen en la conexión (para reducir el desperdicio de metal), el área de la sección transversal debe ser suficiente a fin de retrasar la solidificación. Este objetivo se facilita si se hace corto el pasaje, de modo que absorba calor del metal fundido en la mazarota y en el fundido.

10.3.5 Diseño de la mazarota

Como ya se describió, la mazarota (véase la figura 10b) se emplea en un molde de fundición con arena para alimentar el metal líquido al fundido durante la solidificación, con objeto de compensar la contracción por solidificación. Para que funcione, la mazarota debe permanecer derretida hasta después de que el fundido se solidifica. La regla de Chvorinov se utiliza para calcular el tamaño de la mazarota que satisfará ese requerimiento. El ejemplo siguiente ilustra el cálculo.

Ejemplo 10.3 Diseño de la mazarota con la regla de Chvorinov

Debe diseñarse la mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. El fundido en sí es una placa rectangular de acero con dimensiones de 7.5 cm × 12.5 cm × 2.0 cm. Observaciones anteriores indican que el tiempo total de solidificación (T_{TS}) para este fundido es de 1.6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación diámetro a altura de 1.0. Determine las dimensiones del vertedor de modo que $T_{TS} = 2.0$ min.

Solución: En primer lugar se determina la relación V/A para la placa. Su volumen es $V = 7.5 \times 12.5 \times 2.0 = 187.5 \text{ cm}^3$ y el área de su superficie es $A = 2(7.5 \times 12.5 + 7.5 \times 2.0 + 12.5 \times 2.0) = 267.5 \text{ cm}^2$. Dado que $T_{TS} = 1.6$ min, se determina la constante del molde, C_m , a partir de la ecuación (10.7), con el uso de un valor de $n = 2$ en ella.

$$C_m = \frac{T_{TS}}{(V/A)^2} = \frac{1.6}{(187.5/267.5)^2} = 3.26 \text{ min/cm}^2$$

A continuación debe diseñarse la mazarota de modo que su tiempo total de solidificación sea de 2.0 min, con el empleo del mismo valor de la constante del molde. El volumen de la mazarota está dado por

$$V = \frac{\pi D^2 h}{4}$$

y el área de la superficie está dada por $A = \pi Dh + \frac{2\pi D^2}{4}$

Como se está usando una razón $D/H = 1.0$, entonces, $D = H$. Al sustituir D por H en las fórmulas del volumen y área, se obtiene

$$V = \pi D^3/4$$

y

$$A = \pi D^2 + 2\pi D^2/4 = 1.5\pi D^2$$

Así, la razón $V/A = D/6$. Con el uso de esta razón en la ecuación de Chvorinov, se tiene

$$T_{TS} = 2.0 = 3.26 \left(\frac{D}{6} \right)^2 = 0.09056 D^2$$

$$D^2 = 2.0/0.09056 = 22.086 \text{ cm}^2$$

$$D = 4.7 \text{ cm}$$

Como $H = D$, entonces también $H = 4.7 \text{ cm}$.

La mazarota representa un desperdicio de metal que debe separarse de la pieza fundida y volverse a fundir en operaciones posteriores. Es deseable que el volumen de metal

en la mazarota sea mínimo. Como la forma de la mazarota normalmente se selecciona para maximizar la razón V/A , esto tiende a reducir el volumen de aquél tanto como sea posible. Obsérvese que el volumen de la mazarota del ejemplo es $V = \pi(4.7)^3/4 = 81.5$, que es sólo 44% del volumen de la placa (fundido), aun cuando su tiempo total de solidificación es mayor en 25%.

Las mazarotas se diseñan de formas distintas. El diseño que se muestra en la figura 10.2b) es una **mazarota lateral**. Se adjunta al lado del fundido por medio de un canal pequeño. Una **mazarota superior** es aquella que se conecta a la superficie superior del fundido. Las mazarotas son abiertas o ciegas. Una **mazarota abierta** está expuesta al exterior en la superficie superior del marco superior. Esto tiene la desventaja de permitir que escape más calor, lo que favorece la solidificación más rápida. Una **mazarota ciega** está cerrada por completo dentro del molde, como se ve en la figura 10.2b).

REFERENCIAS

- [1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., *Manufacturing Processes*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.
- [2] Beeley, P. R., *Foundry Technology*, Butterworths-Heinemann, Oxford, Inglaterra, 2001.
- [3] Datsko, J., *Material Properties and Manufacturing Processes*, John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.
- [4] Edwards L. y Endean, M., *Manufacturing with Materials*, Open University, Milton Keynes y Butterworth Scientific Ltd., Londres, 1990.
- [5] Flinn, R. A., *Fundamentals of Metal Casting*, American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1987.
- [6] Heine, R. W., Loper, Jr., C. R. y Rosenthal, C., *Principles of Metal Casting*, 2a. ed., McGraw-Hill Book Co. Nueva York, 1967.
- [7] Kotzin, E. L. (ed.), *Metallcasting and Molding Processes*, American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Illinois, 1981.
- [8] Lessiter, M. J. y K. Kirgin, "Trends in the Casting Industry," *Advanced Materials & Processes*, enero de 2002, pp. 42-43.
- [9] *Metals Handbook*, 9a. ed., vol. 15: *Casting*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.
- [10] Mikelonis, P. J. (ed.), *Foundry Technology*, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.
- [11] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A., *Modern Manufacturing Process Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.
- [12] Simpson, B. L., *History of the Metallcasting Industry*, American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1997.
- [13] Taylor, H. F., Flemings, M. C. y Wulff, J., *Foundry Engineering*, 2a. ed., American Foundrymen's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, 1987.
- [14] Wick, C., Blenedict, J. T. y Veilleux, R. F., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed. Vol. II, *Forming*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1984.

PREGUNTAS DE REPASO

- 10.1. Identifique algunas de las ventajas importantes de los procesos de obtener formas con fundición.
- 10.2. ¿Cuáles son algunas de las limitaciones y desventajas de la fundición?
- 10.3. ¿Cómo se llama por lo general a la fábrica que ejecuta operaciones de fundición?
- 10.4. ¿Cuál es la diferencia entre un molde abierto y uno cerrado?
- 10.5. Mencione los dos tipos básicos de molde que diferencian a los procesos de fundición.
- 10.6. ¿Cuál es el proceso de fundición de mayor importancia comercial?
- 10.7. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo y un núcleo, en el moldeo en arena?
- 10.8. ¿Qué significa el término sobrecalentamiento?
- 10.9. ¿Por qué debe evitarse el flujo turbulento de un metal fundido en el molde?
- 10.10. ¿Cuál es la ley de la continuidad según se aplica al flujo de metal derretido en la fundición?
- 10.11. ¿Cuáles son algunos de los factores que afectan la fluidez de un metal derretido durante el vertido en la cavidad de un molde?
- 10.12. ¿Qué significa calor de fusión en el contexto de la fundición?
- 10.13. ¿En qué difiere la solidificación de aleaciones de la solidificación de los metales puros?

- 10.14. ¿Qué es una aleación eutéctica?
- 10.15. ¿Cuál es la relación conocida como regla de Chvorinov en la fundición?
- 10.16. Identifique las tres fuentes de contracción en la fundición de un metal después del vertido.
- 10.17. ¿Qué es un enfriador en el contexto de la fundición?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 15 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 10.1. ¿En cuál de los tipos siguientes se realiza la fundición en arena?: *a)* molde desechable o *b)* molde permanente.
- 10.2. De las siguientes denominaciones, ¿cuál es la de la mitad superior de un molde de fundición con arena: *a)* marco superior o *b)* marco inferior?
- 10.3. En la fundición, ¿cuál de los siguientes es una caja de molde?: *a)* botella de bebida de los fundidores, *b)* caja que contiene el marco superior y el inferior, *c)* contenedor de metal líquido o *d)* metal que se extruye entre las mitades del molde.
- 10.4. En el trabajo de fundición, ¿cuál de los siguientes es un vaciadero?: *a)* canal en el molde que conduce del bebedero a la cavidad principal del molde, *b)* hombre que transporta el metal derretido hacia el molde o *c)* canal vertical por el que el metal fundido se vierte al molde.
- 10.5. La turbulencia durante el vertido de metal fundido es indeseable, ¿por cuáles de las razones siguientes? (dos razones son las mejores): *a)* ocasiona decoloramiento de la superficie del molde, *b)* disuelve el aglutinante que se emplea para mantener unido el molde de arena, *c)* incrementa la erosión de las superficies del molde, *d)* aumenta la formación de óxidos metálicos que quedan atrapados durante la solidificación, *e)* incrementa el tiempo de llenado del molde y *f)* aumenta el tiempo total de solidificación.
- 10.6. El tiempo total de solidificación se define ¿como cuál de los siguientes?: *a)* tiempo entre el vertido y la solidificación completa, *b)* tiempo entre el vertido y el enfriamiento a temperatura ambiente, *c)* tiempo entre la solidificación y el enfriamiento a temperatura ambiente o *d)* tiempo para que se disipe el calor de fusión.
- 10.7. Durante la solidificación de una aleación cuando está presente una mezcla de metales sólido y líquido, ¿la mezcla sólido-líquida se refiere a cuál de las siguientes?: *a)* composición eutéctica, *b)* segregación de lingote, *c)* liquidus, *d)* zona blanda o *e)* solidus.
- 10.8. La regla de Chvorinov establece que el tiempo total de solidificación es proporcional a cuál de las cantidades siguientes: *a)* $(A/V)^n$, *b)* H_f , *c)* T_m , *d)* V , *e)* V/A o *f)* $(V/A)^2$; donde A = área superficial del fundido, H_f = calor de fusión, T_m = temperatura de fusión y V = volumen del fundido.
- 10.9. En la fundición, una mazarota se describe ¿como cuál de los siguientes? (hay tres respuestas correctas): *a)* inserto en el fundido que inhibe la flotabilidad del núcleo, *b)* sistema de paso en el que el bebedero alimenta directamente a la cavidad, *c)* metal que no es parte del fundido, *d)* fuente de metal derretido que alimenta al fundido y compensa la contracción durante la solidificación y *e)* metal que se desperdicia y que por lo general se recicla.
- 10.10. En un molde de fundición con arena, la razón V/A de la mazarota debe ser: *a)* igual a, *b)* mayor que o *c)* menor que, la razón V/A del fundido en sí.
- 10.11. ¿Cuál de los tipos siguientes de mazarota queda encerrado por completo en el molde de arena y conectado a la cavidad principal por medio de un canal que alimenta el metal fundido? (dos respuestas correctas): *a)* mazarota ciega, *b)* mazarota abierta, *c)* mazarota lateral y *d)* mazarota superior.

PROBLEMAS

Calentamiento y vertido

- 10.1. Va a fundirse un disco de aluminio puro de 40 cm de diámetro y 5 cm de espesor, en una operación de fundición con molde abierto. La temperatura de fundición del aluminio es de 660 °C, y durante el vertido es de 800 °C. Suponga que la cantidad de aluminio por calentar será 5% más que lo que se necesita para llenar la cavidad del molde. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal para calentarlo a la temperatura de vertido, si se inicia a la temperatura ambiente de 25 °C. El calor de fusión del aluminio es de 389.3 J/g. Otras propiedades se pueden obtener de las tablas 4.1 y 4.2 del texto. Suponga que el calor específico tiene el mismo valor para el aluminio sólido y fundido.
- 10.2. Va a calentarse una cantidad suficiente de cobre puro para fundir una placa grande en un molde abierto. La placa tiene estas dimensiones: largo = 20 in, ancho = 10 in y espesor = 3 in. Calcule la cantidad de calor que debe agregarse al metal

para calentarlo a la temperatura de 2 150 °F para verterlo. Suponga que la cantidad de metal que se va a calentar es 10% más que lo necesario para llenar la cavidad del molde. Las propiedades del metal son: densidad = 0.324 lbm/in³, punto de fusión = 1 981 °F, calor específico del metal = 0.093 Btu/lbm-F en estado sólido y 0.090 Btu/lbm-F en estado líquido y calor de fusión = 80 Btu/lbm.

- 10.3. El bebedero que conduce al vaciadero de cierto molde tiene una longitud de 175 mm. El área de la sección transversal en la base del bebedero es de 400 mm². La cavidad del molde tiene un volumen de 0.001 m³. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.
- 10.4. Un molde tiene un bebedero con longitud de 6.0 in. El área de la sección transversal en el fondo del bebedero es de 0.5 in². El bebedero lleva a un vaciadero horizontal que alimenta la cavidad del molde, cuyo volumen es de 75 in³. Determine *a*) la velocidad del metal fundido que fluye a través de la base del bebedero, *b*) el gasto volumétrico y *c*) el tiempo que se requiere para llenar la cavidad del molde.
- 10.5. El gasto del metal líquido en el bebedero de un molde es de 1 litro/s. El área de la sección transversal en la parte superior del bebedero es de 800 mm² y su longitud es de 175 mm. ¿Cuál es el área que debe usarse en la base del bebedero para evitar la aspiración de metal fundido?
- 10.6. El gasto volumétrico de metal fundido hacia el bebedero desde el embudo es de 50 in³/s. En la parte superior, donde el embudo lleva al bebedero, el área de la sección transversal es de 1.0 in². Determine cuál debe ser el área en la parte

inferior del bebedero si su longitud es de 8.0 in. Se desea mantener un gasto constante arriba y abajo, a fin de evitar la aspiración del metal líquido.

- 10.7. Va a verterse metal fundido al embudo de un molde de arena, a una tasa estable de 1 000 cm³/s. El metal fundido sobrepasa al embudo y fluye hacia el bebedero. La sección transversal del bebedero es redonda, con diámetro superior de 3.4 cm. Si el bebedero mide 25 cm de largo, determine el diámetro apropiado en su base de modo que se mantenga el mismo gasto volumétrico.
- 10.8. Durante el vertido hacia un molde de arena, el metal fundido se vierte al bebedero con un gasto constante durante el tiempo que toma llenar el molde. Al final del vertido, el bebedero se llena y hay una cantidad despreciable de metal en el embudo. El bebedero mide 6.0 in de largo. El área de la sección transversal en la parte superior es de 0.8 in², y en la base es de 0.6 in². El área de la sección transversal del vaciadero que lleva al bebedero también es de 0.6 in² y tiene 8.0 in de largo antes de llegar a la cavidad de un molde cuyo volumen es de 65 in³. El volumen de la mazarota que se ubica a lo largo del vaciadero cerca de la cavidad del molde es de 25 in³. Toma un total de 3.0 s para que se llene todo el molde (incluidos la cavidad, mazarota, vaciadero y bebedero). Esto es más que el tiempo teórico que se requiere, lo que indica una pérdida de velocidad debida a la fricción en el bebedero y el vaciadero. Encuentre *a*) la velocidad teórica y gasto en la base del bebedero, *b*) el volumen total del molde, *c*) la velocidad real y gasto en la base del bebedero y *d*) la pérdida de altura piezométrica en el sistema de paso debido a la fricción.

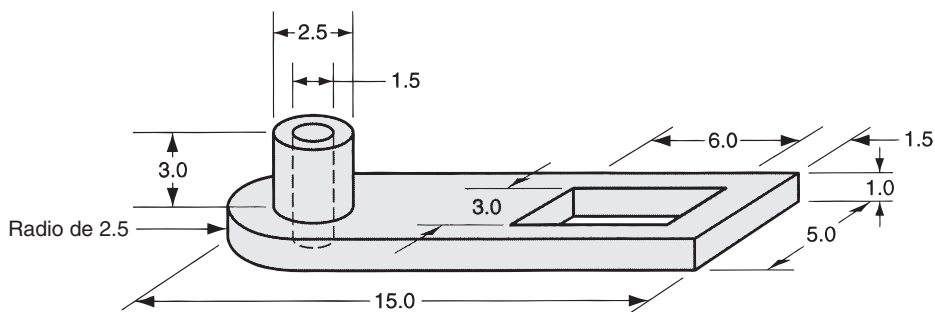
Contracción

- 10.9. La cavidad de un molde tiene la forma de un cubo de 100 mm por lado. Determine las dimensiones y volumen del cubo final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es cobre. Suponga que el molde está lleno al principio de la solidificación, y que ocurre una contracción uniforme en todas direcciones. Use los valores de la contracción que se dan en la tabla 10.1.
- 10.10. La cavidad de un molde para fundición tiene las dimensiones siguientes: $L = 250$ mm, $W = 125$ mm, y $H = 20$ mm. Determine las dimensiones del fundido final después de que se enfría a temperatura ambiente, si el metal que se funde es aluminio. Suponga que al principio de la solidificación el molde se encuentra lleno y que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.
- 10.11. Determine la escala de una “regla de contracción” que van a usar los modelistas para el acero al bajo carbono. Expresé su respuesta en términos de fracciones decimales de pulgadas de elongación por pie de longitud, en comparación con una regla estándar. Utilice los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.
- 10.12. Determine la escala de una “regla de contracción” que se va a emplear por parte de los modelistas para el latón que consiste en 70% de cobre y 30% de zinc. Expresé la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, comparada con una regla estándar. Use los valores de contracción que se dan en la tabla 10.1.
- 10.13. Determine la escala de una “regla de contracción” que van a emplear los modelistas para el hierro colado gris. El hierro colado gris tiene una contracción volumétrica de -2.5%, lo que significa que se expande durante la solidificación. Expresé la respuesta en términos de milímetros de elongación por metro de longitud, en comparación con una regla estándar. Emplee los valores de contracción que se proporcionan en la tabla 10.1.
- 10.14. Las dimensiones finales de un fundido en forma de disco de acero al bajo carbono son: diámetro = 12.0 in, y espesor = 0.75 in. Determine las dimensiones de la cavidad del molde de modo que se tome en cuenta la contracción. Suponga que la contracción ocurre de manera uniforme en todas direcciones. Use los valores de contracción que aparecen en la tabla 10.1.

Tiempo de solidificación y diseño de la mazarota

- 10.15. En el fundido de acero en ciertas condiciones de molde, por experiencias anteriores se sabe que la constante de éste para la regla de Chvorinov es de 4.0 min/cm^2 . El fundido es una placa plana que mide 30 cm de longitud, 10 cm de ancho y 20 mm de espesor. Determine cuánto tiempo tomará para que el molde se solidifique.
- 10.16. Resuelva para el tiempo de solidificación total del problema anterior, con el uso de un exponente de 1.9 en lugar de 2.0 en la regla de Chvorinov. ¿Qué ajuste debe hacerse en las unidades de la constante del molde?
- 10.17. Una parte con forma de disco va a fundirse con aluminio. El diámetro del disco es de 500 mm y su espesor de 20 mm. Si la constante del molde es de 2.0 s/mm^2 en la regla de Chvorinov, ¿cuánto tiempo tomará que el fundido se solidifique?
- 10.18. En experimentos de fundición llevados a cabo con cierta aleación y tipo de molde de arena, tomó 155 s para que se solidificara un fundido en forma de cubo. El cubo medía 50 mm de lado. *a)* Determine el valor de la constante del molde en la regla de Chvorinov. *b)* Si se utiliza la misma aleación y tipo de molde, encuentre el tiempo total de solidificación para un fundido cilíndrico con diámetro de 30 mm y longitud de 50 mm.
- 10.19. Un fundido de acero tiene una forma cilíndrica de 4.0 in de diámetro y pesa 20 libras. A este fundido le toma 6.0 minutos solidificarse por completo. Otro fundido de forma cilíndrica con la misma razón de diámetro a longitud pesa 12 libras. Está hecho del mismo acero, y se emplearon las mismas condiciones de molde y contracción. Determine: *a)* la constante del molde en la regla de Chvorinov, *b)* las dimensiones y *c)* el tiempo total de solidificación del fundido más ligero. La densidad del acero es de 490 lb/ft^3 .
- 10.20. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) una esfera con diámetro de 10 cm, 2) un cilindro con diámetro de 10 cm y la misma medida de longitud y 3) un cubo con lado de 10 cm. En los tres casos va a emplearse la misma aleación para la fundición. *a)* Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b)* Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mejor mazarota? *c)* Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.
- 10.21. Van a compararse los tiempos totales de solidificación de tres formas de fundido: 1) esfera, 2) cilindro, en el que la razón longitud a diámetro es de 1.0 y 3) cubo. Para las tres formas el volumen es de $1\,000 \text{ cm}^3$ y va a emplearse la misma aleación para el fundido. *a)* Determine los tiempos relativos de solidificación para cada forma. *b)* Con base en los resultados del inciso a diga, ¿cuál elemento geométrico sería la mazarota mejor? *c)* Si la constante del molde es de 3.5 min/cm^2 en la regla de Chvorinov, calcule el tiempo total de solidificación para cada fundido.
- 10.22. Va a usarse una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. Para un volumen dado de cilindro, determine la razón diámetro a longitud que maximiza el tiempo de solidificación.
- 10.23. Va a diseñarse una mazarota de forma esférica para un molde de fundición con arena. El fundido es una placa rectangular con longitud de 200 mm, ancho de 100 mm y espesor de 18 mm. Si se sabe que el tiempo total de solidificación del fundido en sí es de 3.5 min, determine el diámetro de la mazarota de modo que a éste le tome 25% más tiempo para solidificarse.
- 10.24. Se va a diseñar una mazarota cilíndrica para un molde de fundición con arena. La longitud del cilindro va a ser 1.25 veces su diámetro. El fundido es una placa cuadrada con lado de 10 in y espesor de 0.75 in. Si el metal es hierro colado y la constante del molde es de 16.0 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que le tome 30% más tiempo solidificarse.
- 10.25. Se diseñará una mazarota cilíndrica con razón diámetro a longitud de 1.0 para un molde de fundición con arena. La forma del fundido se ilustra en la figura P10.25, en la que las unidades son pulgadas. Si la constante del molde es de 19.5 min/in^2 en la regla de Chvorinov, determine las dimensiones de la mazarota de modo que solidificarse le tome 0.5 min más que al fundido en sí.

FIGURA P10.25 Forma del fundido para el problema 10.25 (las unidades son in).



11

PROCESOS DE FUNDICIÓN DE METALES

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 11.1 Fundición en arena
 - 11.1.1 Modelos y núcleos
 - 11.1.2 Moldes y su fabricación
 - 11.1.3 La operación de fundición
- 11.2 Otros procesos de fundición con moldes desechables
 - 11.2.1 Moldeo en cascarón
 - 11.2.2 Moldeo al vacío
 - 11.2.3 Procesos de poliestireno expandido
 - 11.2.4 Fundición por revestimiento
 - 11.2.5 Fundición con moldes de yeso y de cerámica
- 11.3 Procesos de fundición con moldes permanentes
 - 11.3.1 El proceso básico con moldes permanentes
 - 11.3.2 Variaciones de la fundición con moldes permanentes
 - 11.3.3 Fundición con troquel
 - 11.3.4 Fundición centrífuga
- 11.4 La práctica de la fundición
 - 11.4.1 Hornos
 - 11.4.2 Vertido, limpieza y tratamiento térmico
- 11.5 Calidad del fundido
- 11.6 Los metales para fundición
- 11.7 Consideraciones sobre el diseño del producto

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías, con base en el tipo de molde: 1) moldes desechables y 2) moldes permanentes. En las operaciones de fundición con un molde desechable, debe sacrificarse éste con objeto de retirar la pieza fundida. Como para cada fundido se requiere un molde nuevo, es frecuente que las tasas de producción con procesos de moldes desechables estén limitadas por el tiempo que se requiere para hacer el molde, más que por el que se necesita para el fundido en sí. Sin embargo, para ciertas formas de las piezas, los moldes de arena pueden producirse y hacerse los fundidos a tasas de 400 piezas por hora y aún más. En los procesos de fundición con moldes permanentes, se fabrica el molde con metal (u otro material duradero) y se emplea muchas veces para elaborar fundidos numerosos. En consecuencia, estos procesos tienen una ventaja natural en términos de tasas de producción.

El estudio de los procesos de fundición está organizado en este capítulo como sigue: 1) fundición en arena, 2) otros procesos de fundición con moldes desechables y 3) procesos de fundición con moldes permanentes. El capítulo también incluye el equipo y prácticas de fundición que se emplean en las fundidoras. Otra sección se ocupa de la inspección y temas de calidad. En la sección final se presentan los lineamientos para el diseño de productos.

11.1 FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición con arena es, por mucho, el proceso que se usa con más amplitud, pues es responsable de la mayoría del total del peso de los fundidos. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, níqueles y titanios. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande (véase la figura 11.1) y en cantidades de producción que van desde uno a millones.

La **fundición en arena**, también conocida como **fundición en molde de arena**, consiste en verter metal derretido en un molde de arena y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar el fundido. El fundido debe limpiarse e inspeccionarse, y a veces se requiere darle tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas. La cavidad del molde de arena se forma por la compresión de arena alrededor de un modelo (un duplicado aproximado de la pieza por fundir), y luego se retira el modelo separando el molde en dos mitades. El molde también contiene el sistema de paso o sistema de vaciado y la mazarota. Además, si el fundido va a tener superficies interiores (por ejemplo, partes huecas o con agujeros), debe incluirse un núcleo en el molde. Como éste se sacrifica para retirar el fundido, debe hacerse un molde nuevo por cada pieza que se produce. De esta descripción breve, se considera que la fundición con arena no sólo es la operación de fun-

FIGURA 11.1 Pieza grande fundida con arena, pesa más de 680 kg (1 500 lb), para la estructura de un compresor de aire. (Cortesía de Elkhart Foundry, fotografía por Paragon Inc., Elkhart, Indiana).



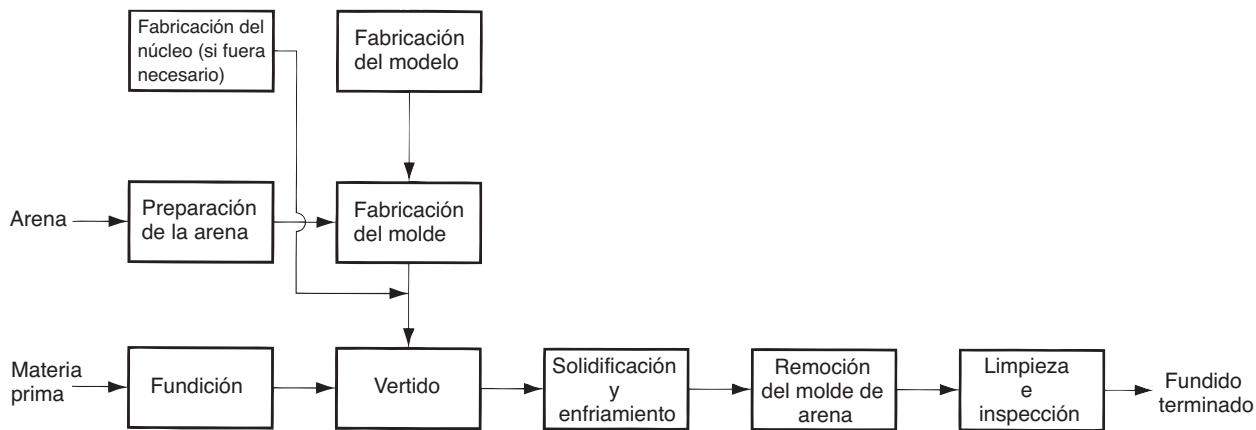


FIGURA 11.2 Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena. Se incluye no sólo la operación de fundición sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde.

dido en sí, sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde. La secuencia de producción se presenta en la figura 11.2.

En las secciones siguientes el estudio tiene que ver con: modelos, núcleos, moldes y su fabricación, la operación de fundido, y limpieza e inspección.

11.1.1 Modelos y núcleos

La fundición con arena requiere un **modelo**, es decir, un "patrón" de tamaño real de la pieza, aunque más grande para que se tome en cuenta las tolerancias por contracción y maquinado en el fundido final. Los materiales que se usan para fabricar modelos incluyen madera, plásticos y metales. La madera es un material común para hacer modelos debido a la facilidad para darle forma. Sus desventajas son que tiende a deformarse y la arena que se compacta alrededor de ella la erosiona, lo que limita el número de veces que puede volver a utilizarse. Los modelos de metal son más caros, pero duran mucho más. Los plásticos representan un acomodo entre la madera y el metal. La selección del material apropiado para el modelo depende mucho de la cantidad total de fundidos por hacer.

Como se ilustra en la figura 11.3, hay varios tipos de modelos. El más simple está hecho de una sola pieza y recibe el nombre de **modelo sólido**, tiene la misma forma que el fundido y su tamaño está ajustado para la contracción y el maquinado. Aunque es el modelo más fácil de fabricar, no es el más fácil de usar para hacer moldes de arena. La determinación de la ubicación de la línea de separación de las dos mitades del molde de un modelo sólido puede ser un problema, y la incorporación del sistema de paso y la mazarota al molde queda a juicio y habilidad del trabajador que funde. En consecuencia, los modelos sólidos se limitan por lo general a cantidades muy bajas de producción.

Los **modelos deslizantes** consisten en dos piezas, que dividen la parte a lo largo de un plano que coincide con la línea divisoria del molde. Los modelos deslizantes son apropiados para piezas con configuraciones geométricas complejas y cantidades moderadas de producción. La línea de división del molde está predeterminada por las dos mitades del modelo, y no se deja al criterio del operador.

Para cantidades de producción mayores se emplean modelos de placas ajustadas o de capucha y base. En los modelos de **placas ajustadas**, las dos piezas del modelo deslizante están sujetas a los lados opuestos de una placa de madera o metal. Los agujeros en la placa permiten que los marcos superior e inferior (capucha y base) del molde se alineen en

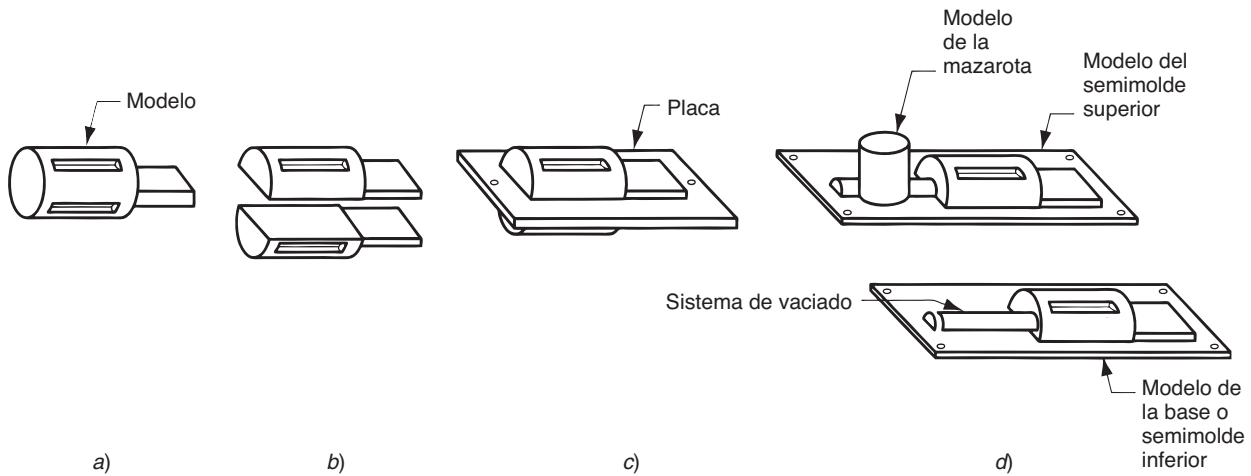
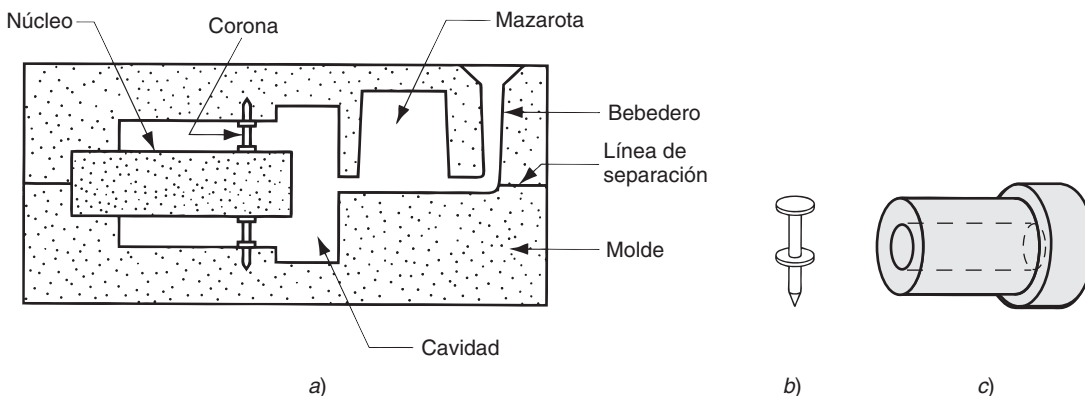


FIGURA 11.3 Tipos de modelos que se emplean en la fundición con moldes de arena: a) sólido, b) de deslizamiento, c) de placas ajustadas y d) de capucha y base.

forma adecuada. Los **modelos de capucha y base** son similares a los de placas ajustadas, excepto porque las mitades que se separan están ajustadas a placas diferentes, de modo que las secciones de la capucha y base del molde se fabrican de manera independiente en lugar de usar las mismas herramientas para ambas. En el inciso d de la figura se muestra el sistema de paso y mazarota de los modelos de capucha y base.

Los modelos definen la forma externa del vertido de la pieza por fundir. Si el fundido va a tener superficies internas se requiere un núcleo. Un **núcleo (corazón)** es un modelo a tamaño real de las superficies interiores de la pieza. Se inserta en la cavidad del molde antes del vertido, de modo que el metal derretido fluirá y se solidificará entre la cavidad del molde y el núcleo, para formar las superficies externa e interna del fundido. Por lo general, el núcleo está hecho de arena, compactada para que tenga la forma que se desea. Igual que el modelo, el tamaño real del núcleo debe incluir tolerancias para la contracción y el maquinado. En función de la forma de la pieza, el núcleo quizá requiera soportes para quedar en posición en la cavidad del molde durante el vertido. Estos soportes, llamados **coronas**, están hechos de un metal con temperatura de fusión más alta que la del metal que se va a fundir. Por ejemplo, para hacer fundidos de hierro se usarían coronas de acero. En el vertido y solidificación, las coronas se unen en el fundido. En la figura 11.4 se ilustra un arreglo posible de un núcleo en un molde con coronas. La parte de la corona que sobresale del fundido se corta posteriormente.

FIGURA 11.4 a) Núcleo mantenido en su sitio dentro de la cavidad del molde por medio de coronas, b) diseño posible de las coronas, c) fundido con cavidad interna.



11.1.2 Moldes y su fabricación

Las arenas de fundición son sílice (SiO_2) o sílice mezclado con otros minerales. La arena debe tener buenas propiedades refractarias, es decir, capacidad de soportar temperaturas altas sin que se funda o sufra algún otro tipo de degradación. Otras características importantes de la arena son el tamaño del grano, su distribución en la mezcla y la forma de los granos individuales (véase la sección 16.1). Los granos pequeños dan una mejor superficie al terminado de la pieza fundida, pero los de tamaño grande son más permeables (para permitir el escape de los gases durante el vertido). Los moldes elaborados con granos irregulares tienden a ser más fuertes que los hechos con granos redondeados debido a la imbricación, aunque ésta tiende a restringir la permeabilidad.

Al hacer el molde, los granos de arena se mantienen unidos por una mezcla de agua y arcilla adhesiva. Una mezcla común (en volumen) es de 90% de arena, 3% de agua y 7% de arcilla. Para mantener a la arcilla en su sitio se emplean distintos agentes adhesivos, como resinas orgánicas (por ejemplo, resinas fenólicas) y aglutinantes inorgánicos (por ejemplo, silicato de sodio y fosfato). Además de la arena y el aglutinante, en ocasiones se agregan aditivos a la mezcla a fin de mejorar propiedades tales como la resistencia o la permeabilidad del molde.

Para formar la cavidad del molde, el método tradicional consiste en compactar la arena alrededor del modelo para la capucha y base, en un contenedor llamado **caja de moldeo**. El proceso de compactación se lleva a cabo con métodos diferentes. El más simple es golpear con la mano, lo que lleva a cabo un trabajador de la fundición. Además, se han inventado diversas máquinas para mecanizar el procedimiento de compactación. Éstas operan con distintos mecanismos, entre ellos: 1) comprimir la arena alrededor del modelo por medio de presión neumática, 2) ejecutar una acción de golpeteo en la que la arena, contenida en la caja de moldeo con el modelo, se deja caer repetidas veces a fin de que se comprima en su sitio y 3) realizar una acción de lanzamiento en la que los granos de arena chocan a gran velocidad contra el modelo.

Una alternativa a las cajas tradicionales para cada molde de arena es el **moldeo sin caja de moldeo**, que se refiere al uso de una caja de moldeo maestra, en un sistema mecanizado de producción de moldes. Cada molde de arena se produce por medio de la misma caja de moldeo maestra. Con este método se afirma que la producción de moldes alcanza los 600 por hora [6].

Para determinar la calidad del molde de arena se emplean diferentes indicadores [5]: 1) **resistencia**, capacidad del molde para conservar su forma y resistir la erosión ocasionada por el flujo de un metal fundido; depende de la forma del grano, cualidades adhesivas del aglutinante, y otros factores; 2) **permeabilidad**, capacidad del molde para permitir que pasen el aire y los gases calientes a través de los vacíos de la arena, durante la operación de fundido; 3) **estabilidad térmica**, característica de la arena en su superficie de la cavidad del molde para resistir el agrietamiento y la deformación ante el contacto con el metal fundido; 4) **colapsabilidad**, facilidad de que el molde se retire y permita que el fundido se contraiga sin que se agriete; también se refiere a la facilidad con que se quita la arena del fundido durante su limpieza, y 5) **reutilización**, ¿es posible reutilizar la arena del molde roto para hacer otros moldes? En ocasiones, estas medidas son incompatibles: por ejemplo, un molde con mucha resistencia es menos colapsable.

Con frecuencia, los moldes de arena se clasifican como de arena verde, arena seca o de superficie seca. Los **moldes de arena verde** están elaborados con una mezcla de arena, arcilla y agua; la palabra **verde** se refiere al hecho de que el molde contiene humedad en el momento del vertido. Los moldes de arena verde tienen resistencia suficiente para la mayoría de aplicaciones, buenas colapsabilidad, permeabilidad y posibilidades de reuso, y son los menos caros de todos los moldes. Son el tipo de molde que más se emplea, pero no carecen de problemas. La humedad de la arena ocasiona defectos a ciertos fundidos, lo que depende del metal y forma de la pieza. Un **molde de arena seca** está hecho con aglutinantes orgánicos en lugar de arcilla, y se cuece en un horno grande a temperaturas

que van de 200 °C a 320 °C (400 °F a 600 °F) [6]. El horneado da resistencia al molde y endurece la superficie de la cavidad. Los moldes de arena seca proporcionan mejor control dimensional del producto fundido, en comparación con los de arena verde. Sin embargo, es más caro hacer moldes de arena seca, y la tasa de producción disminuye debido al tiempo de secado. Las aplicaciones se limitan por lo general a fundidos medios y grandes con tasas de producción pequeñas o medianas. Con un **molde de superficie seca**, se obtienen las ventajas de los de arena seca secando la superficie de un molde de arena verde hasta una profundidad de 10 a 25 mm (0.4 a 1 in) de la cavidad del molde, mediante sopletes, lámparas de calor u otros medios. Para dar resistencia a la superficie de la cavidad debe agregarse a la mezcla de arena materiales adhesivos especiales.

Las clasificaciones anteriores de los moldes se refieren al uso de aglutinantes convencionales que consisten en arcilla y agua o aquellos que requieren curado con calor. Además de estas clasificaciones, se han creado moldes aglutinados en forma química que no se basan en ninguno de los ingredientes de unión tradicionales. Algunos de los materiales aglutinantes que se emplean en estos sistemas “sin horno” incluyen resinas de furanos (que consisten en alcohol, urea y formaldehído), fenoles y aceites alquidálicos. Los moldes sin horno se usan cada vez más debido a su buen control dimensional y aplicaciones de alta producción.

11.1.3 La operación de fundición

Después de colocar en posición el núcleo (si lo hay) y de que las dos mitades del molde se hacen embonar, se procede a hacer la fundición. Ésta consiste en el vertido, solidificación y enfriamiento de la pieza fundida (véanse las secciones 10.2 y 10.3). El sistema de paso y la mazarota del molde deben diseñarse para llevar metal líquido a la cavidad y proporcionarle almacenamiento suficiente durante la contracción por solidificación. Debe permitirse que escapen el aire y los gases.

Uno de los peligros durante el vertido es que la flotación inducida por el metal fundido desplace al núcleo. La flotación resulta, según el principio de Arquímedes, del peso del metal fundido que desplaza el núcleo. Dicha fuerza tiende a elevar el núcleo y es igual al peso del líquido desplazado menos el peso del núcleo en sí. En forma de ecuación se expresa así:

$$F_b = W_m - W_c \quad (11.1)$$

donde F_b = fuerza de flotación, N (lb); W_m = peso del metal fundido desplazado, N (lb) y W_c = peso del núcleo, N (lb). Los pesos se determinan como el volumen del núcleo multiplicado por las densidades respectivas del material que lo constituye (arena, por lo común) y del metal por fundir. La densidad de un núcleo de arena es de aproximadamente 1.6 g/cm³ (0.058 lb/in³). En la tabla 1.1 se dan las densidades de varias aleaciones de fundición comunes.

TABLA 11.1 Densidades de aleaciones de fundición seleccionadas.

Material	Densidad		Material	Densidad	
	g/cm ³	lb/in ³		g/cm ³	lb/in ³
Aluminio (con pureza de 99%)	2.70	0.098	Hierro colado, gris ^a	7.16	0.260
Aleación de aluminio-silicio	2.65	0.096	Cobre (con pureza de 99%)	8.73	0.317
Aluminio-cobre (92% de aluminio)	2.81	0.102	Plomo (puro)	11.30	0.410
Latón ^a	8.62	0.313	Acero	7.82	0.284

Fuente: [5].

^a La densidad depende de la composición de la aleación; los valores que se dan son los más comunes.

Ejemplo 11.1 La flotación en el moldeo con arena

Un núcleo de arena tiene un volumen de $1\,875\text{ cm}^3$ y se localiza dentro de la cavidad de un molde de arena. Determine la fuerza de flotación que tiende a elevar el núcleo durante el vertido de plomo dentro del molde.

Solución: La densidad del núcleo de arena es de 1.6 g/cm^3 . El peso del núcleo es de $1\,875(1.6) = 3\,000\text{ g} = 3.0\text{ kg}$. Con base en la tabla 11.1, la densidad del plomo es de 11.3 g/cm^3 . El peso del plomo que desplaza el núcleo es de $1\,875(11.3) = 21\,188\text{ g} = 21.19\text{ kg}$. La diferencia es de $21.19 - 3.0 = 18.19\text{ kg}$. Dado que $1\text{ kg} = 9.81\text{ N}$, la fuerza de flotación es $F_b = 9.81(18.19) = \mathbf{178.4\text{ N}}$.

Después de la solidificación y enfriamiento, se rompe el molde de arena que contiene al fundido para retirar éste. Luego, se limpia la pieza, el sistema de paso y la mazarota se separan y se quita la arena. Después, se inspecciona el fundido (véase la sección 11.5).

11.2 OTROS PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES DESECHABLES

No obstante que la fundición con arena es tan versátil, existen otros procesos de fundición creados para satisfacer necesidades especiales. Las diferencias entre dichos métodos estriban en la composición del material del molde o la manera en que se le fabrica, o bien en la forma en que se hace el modelo.

11.2.1 Moldeo en cascarón o concha

El **moldeo en cascarón o concha** es un proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado (es común que mida 9 mm o $3/8\text{ de in}$) hecho de arena y que se mantiene cohesionado por medio de un aglutinante de resina termofija. Se inventó en Alemania a principios de la década de 1940 y el proceso se describe e ilustra en la figura 11.5.

El proceso de moldeo en cascarón tiene muchas ventajas. La superficie de la cavidad de un molde en cascarón es más suave que la del molde convencional de arena verde, y esta suavidad permite un flujo más fácil durante el vertido del metal líquido y un acabado mejor de la superficie del fundido final. Es posible obtener acabados de $2.5\text{ }\mu\text{m}$ ($100\text{ }\mu\text{-in}$). También se alcanza una exactitud dimensional buena, con tolerancias posibles de $\pm 0.25\text{ mm}$ ($\pm 0.010\text{ in}$) en piezas de tamaño pequeño a medio. Es frecuente que el acabado y exactitud buenos excluyan la necesidad de maquinado adicional. La colapsabilidad del molde por lo general es suficiente para evitar la rugosidad y agrietamiento del fundido.

Las desventajas del moldeo en cascarón incluyen un modelo de metal más caro que el correspondiente al moldeo con arena verde. Esto hace que el moldeo con concha sea difícil de justificar para cantidades pequeñas de piezas, pero puede mecanizarse para la producción masiva y es muy económico para cantidades grandes. Parece apropiado en especial para fundidos de acero de menos de 20 libras. Algunos ejemplos de piezas fabricadas con el empleo de moldeo con concha incluyen engranajes, cuerpos de válvulas, boquillas y árboles de levas.

11.2.2 Moldeo al vacío

El **moldeo al vacío**, también llamado **proceso V**, se inventó en Japón alrededor de 1970. Utiliza un molde de arena que se mantiene unido por medio de una presión de vacío en lugar de emplear un aglutinante químico. En consecuencia, el término **vacío** se refiere, en el contexto de este proceso, a la fabricación del molde en lugar de a la operación de fundido en sí. En la figura 11.6 se explican las etapas del proceso.

Una de las varias ventajas del moldeo al vacío es la recuperación de arena, debido a que no se emplean aglutinantes. Asimismo, la arena no requiere el reacondicionamiento

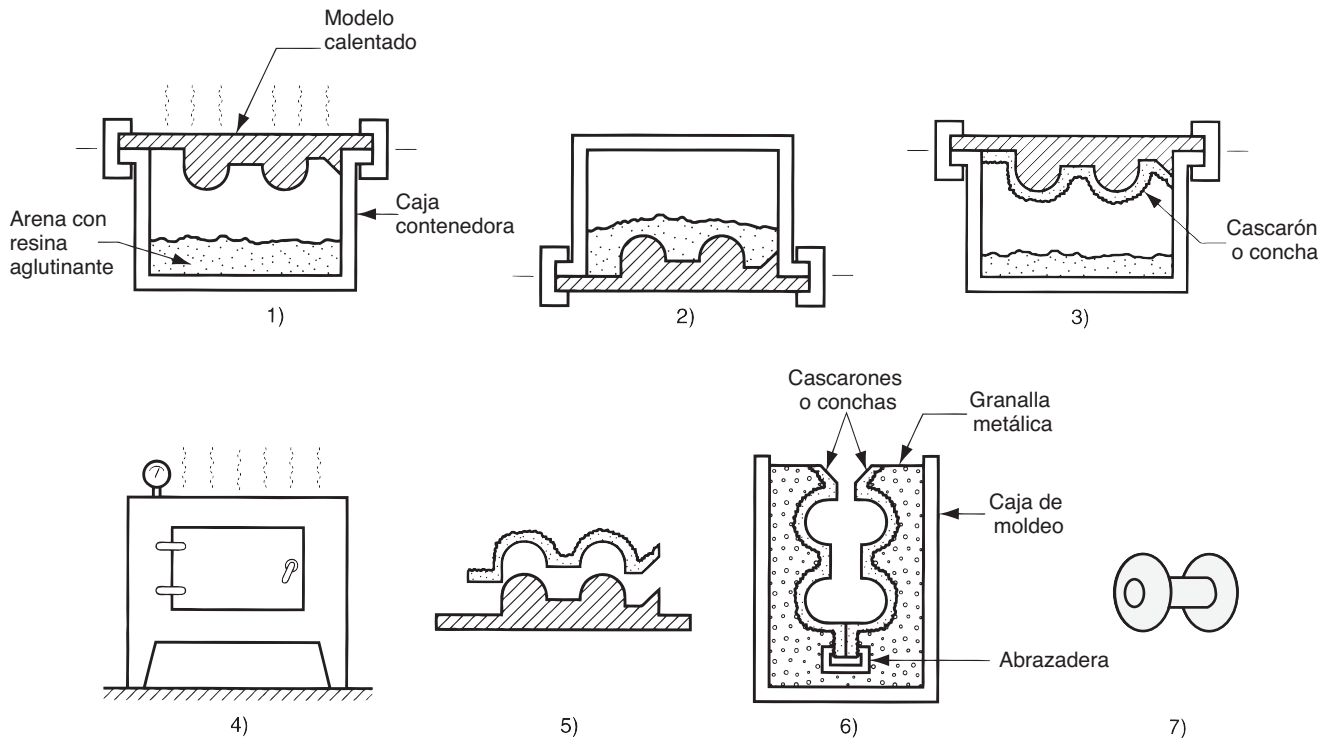


FIGURA 11.5 Etapas del moldeo en cascarón: 1) se calienta una placa de ajuste o de capucha y base, y se coloca sobre una caja que contiene arena mezclada con alguna resina termofija; 2) se invierte la caja de modo que la arena y la resina caigan sobre el modelo caliente, lo que ocasiona que una capa de la mezcla se cure parcialmente sobre la superficie y forme una concha dura; 3) la caja vuelve a su posición original de modo que caigan las partículas sueltas que no resultaron curadas; 4) el cascarón de arena se calienta en un horno durante varios minutos, a fin de completar el curado; 5) el molde en cascarón se separa del modelo; 6) se ensamblan dos mitades del molde en cascarón, apoyadas en dosis de arena o metal en el interior de una caja; y se realiza el vertido. Se retira el fundido terminado, con el bebedero removido, como se aprecia en el 7) de la figura.

mecánico intenso que es normal hacer cuando se emplean aglutinantes para la arena. Como no se mezcla agua con la arena, el producto no tiene los defectos relacionados con la humedad. Las desventajas del proceso V son que es relativamente lento y que no se adapta con facilidad a la mecanización.

11.2.3 Procesos de poliestireno expandido

El **proceso de fundición con poliestireno expandido** usa un molde de arena compactada alrededor de un modelo de espuma de poliuretano que se vaporiza cuando el metal fundido se vierte en el molde. El proceso y sus variaciones se conocen también con otros nombres, tales como **proceso de espuma perdida**, **proceso de patrón perdido**, **proceso de evaporación de espuma** y **proceso de molde lleno** (este último es una marca registrada). El modelo de poliestireno incluye la mazarota, vertedores y sistema de paso, y también contiene núcleos internos (de ser necesarios), lo que elimina la necesidad de contar con un núcleo por separado en el molde. Asimismo, dado que el modelo de espuma en sí se convierte en la cavidad en el molde, se puede ignorar otras consideraciones sobre las líneas de separación y dibujo. El molde no tiene que estar abierto en las secciones de capucha y base. En la figura 11.7 se ilustra y describe la secuencia de este proceso de fundición. Se usan diferentes métodos para hacer el modelo, en función de la cantidad de fundidos por producir. Para fundidos de una sola clase, la espuma se corta en forma manual de rollos grandes y se ensambla para formar el modelo. Para corridas grandes de producción, se

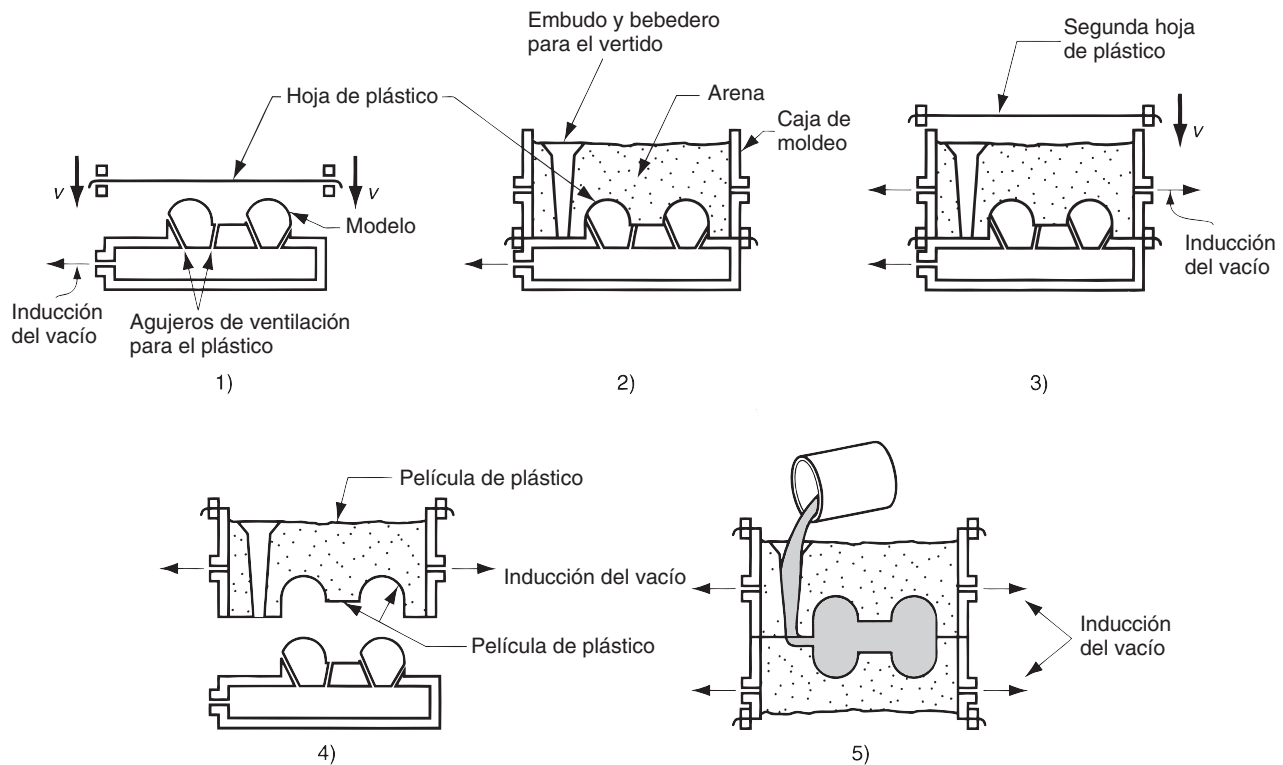


FIGURA 11.6 Etapas del moldeo al vacío: 1) Se precalienta una película delgada de plástico y se coloca sobre una placa de ensamble o modelo de capucha y base por medio de vacío; el modelo tiene agujeros de ventilación pequeños para facilitar la formación del vacío; 2) sobre la placa del modelo se coloca una caja de moldeo de diseño especial y se llena con arena, en la que se forma un bebedero y embudo de vertido; 3) sobre la caja de moldeo se pone otra película de plástico delgada y se induce un vacío que hace que los granos de arena permanezcan unidos, lo que forma un molde rígido; 4) el vacío sobre el modelo del molde se libera para permitir que éste salga del molde; 5) este molde se ensambla con su mitad correspondiente para formar la capucha y base, y manteniendo el vacío sobre ambas mitades se hace el vertido. La película de plástico se quema con rapidez al contacto del metal fundido. Después de la solidificación, se recupera casi toda la arena para volver a emplearla.

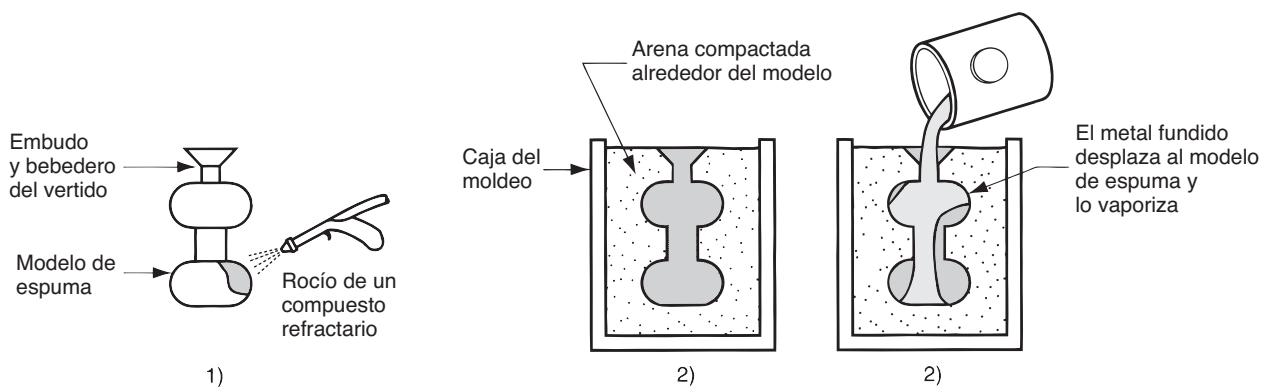


FIGURA 11.7 Proceso de fundición con poliestireno expandido: 1) el modelo de poliestireno se recubre con un compuesto refractario; 2) el modelo de espuma se coloca en la caja del molde, y alrededor de él se compacta arena; 3) se vierte metal fundido en la porción del patrón que constituye el embudo y el bebedero del vertido. Conforme el metal ingresa al molde, la espuma de poliestireno se vaporiza al contacto con el líquido, lo que permite que se llene la cavidad del molde.

prepara una operación de moldeo automatizada para moldear los modelos antes de fabricar los moldes para la fundición. Normalmente, éste se recubre con un compuesto refractario que proporciona una superficie más suave sobre él y para mejorar su resistencia a la alta temperatura. Por lo general, los moldes de arena incluyen agentes de unión. Sin embargo, en ciertos procesos de este grupo se emplea arena seca, lo que ayuda al recubrimiento y reuso.

Una ventaja significativa de este proceso es que el modelo no necesita retirarse del molde. Esto simplifica y agiliza la fabricación de éste. En un molde convencional de arena verde, se requiere de dos mitades con líneas de separación apropiadas, se debe proveer de tolerancias en el diseño del molde, los núcleos deben insertarse y debe agregarse el sistema de paso y mazarota. Con el proceso de poliestireno expandido, estas etapas se incluyen en el modelo mismo. La desventaja del proceso es que se necesita un modelo nuevo para cada fundición. La justificación económica del proceso de poliestireno expandido depende mucho del costo de producción de los modelos. El proceso de fundido con poliestireno expandido se ha aplicado para producir en masa fundiciones para motores de automóviles. A fin de moldear los modelos de espuma de poliestireno para estas aplicaciones, se instalan sistemas de producción automatizada.

11.2.4 Fundición por revestimiento

En la ***fundición por revestimiento***, se elabora un modelo de cera y se recubre con un material refractario para formar el molde, después de lo cual se derrite la cera antes de verter el metal fundido. El término ***revestimiento*** proviene de una de las definiciones menos familiares de la palabra ***revestir***, que es “cubrir por completo”, lo que se refiere al recubrimiento del material refractario alrededor del modelo de cera. Es un proceso de precisión para fundir, debido a que es capaz de generar fundidos de gran exactitud y detalles intrincados. El proceso se remonta al antiguo Egipto (véase la nota histórica 11.1) y también se le conoce como ***proceso de la cera perdida***, debido a que el modelo de ese material se pierde en el molde antes de la fundición.

En la figura 11.8 se describen las etapas de la fundición por revestimiento. Como el modelo de cera se derrite después de hacer el molde refractario, debe elaborarse un

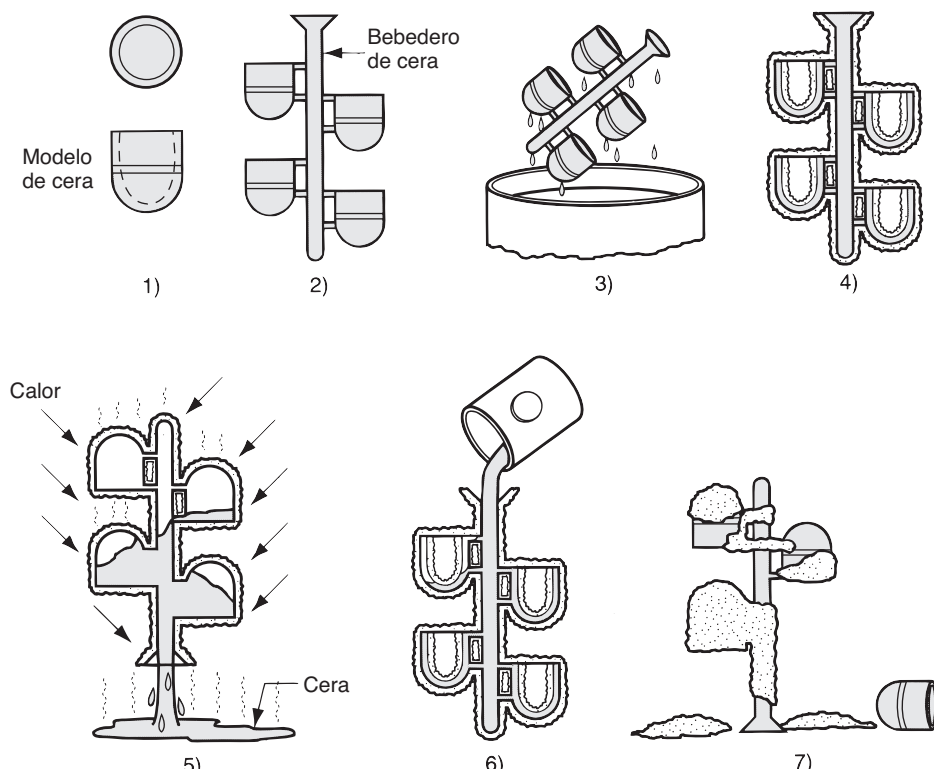
Nota histórica 11.1 Fundición por revestimiento

El proceso de fundición por cera perdida fue creado por los antiguos egipcios hace 3 500 años. Aunque los registros escritos no identifican cuándo ocurrió el invento o el artesano que lo hizo, los historiadores especulan que el proceso resultó de la asociación cercana entre la cerámica y el moldeo en tiempos remotos. Fue el ceramista quien elaboró los moldes que se usaban para fundir. La idea del proceso de la cera perdida debe haberse originado con un ceramista que estaba familiarizado con el proceso de fundición. Un día, mientras trabajaba en una pieza de cerámica, quizá un vaso o tazón ornamental, se le ocurrió que el artículo debería ser más atractivo y durable si se hiciera de metal, por lo que elaboró un núcleo con la forma general de la pieza, pero más pequeño que las dimensiones finales que deseaba, y lo recubrió con cera para establecer el tamaño. La cera proporcionó un material fácil de conformar,

y los artesanos fueron capaces de crear diseños y formas intrincados. Sobre la superficie de la cera, empastó con cuidado varias capas de arcilla y vislumbró un medio de mantener unidos los componentes resultantes. Después, horneó el molde, de modo que la arcilla se endureció y la cera se fundió y drenó para formar una cavidad. Al fin, vertió bronce derretido en ésta y, después de que el fundido se hubiera solidificado y enfriado, rompió el molde para recuperar la pieza. Si se considera la educación y experiencia de este fabricante ancestral de vasijas y las herramientas que tenía para trabajar, el desarrollo del proceso de la fundición con cera perdida demostró gran innovación y percepción. “Los arqueólogos no podrían mencionar ningún otro proceso tan pleno de deducción, capacidad de ingeniería e ingenio” [1].

FIGURA 11.8 Etapas de la fundición por revestimiento:

- 1) se producen los modelos de cera;
- 2) se unen varios modelos a un bebedero para formar un árbol con ellos;
- 3) el árbol de modelos se recubre con una capa delgada de material refractario;
- 4) se forma el molde con el árbol recubierto con material refractario suficiente para volverlo rígido;
- 5) se mantiene el molde en posición invertida y se calienta para fundir la cera y permitir que salga de la cavidad;
- 6) el molde se precalienta a temperatura elevada, lo que garantiza que todos los contaminantes del molde se eliminen; eso también permite que el metal líquido fluya con más facilidad dentro de la cavidad detallada; se vierte el metal fundido; se solidifica; y
- 7) se rompe el molde del fundido terminado. Se separan las partes del bebedero.



modelo separado por cada fundido. La producción de modelos por lo general se lleva a cabo por medio de una operación de moldeo, vertiendo o inyectando la cera caliente en un **troquel maestro** diseñado con tolerancias apropiadas para permitir la contracción tanto de la cera como del fundido metálico subsecuente. En los casos en que la forma de la pieza es complicada, pueden unirse varias piezas separadas de cera para formar el modelo. En operaciones de producción grande, se unen varios modelos a un bebedero, también hecho de cera, para formar un **árbol de modelos**; ésta es la configuración geométrica que se fundirá con el metal.

El recubrimiento con material refractario (etapa 3) por lo general se lleva a cabo con la inmersión del árbol de modelos en una masa muy fina de sílice granular u otro refractario (casi en polvo) mezclado con la pasta para unir el molde a la forma. El grano pequeño del material refractario proporciona una superficie suave y captura los detalles intrincados del modelo de cera. El molde final (etapa 4) se lleva a cabo sumergiendo el árbol repetidas veces en la masa refractaria o compactando con suavidad el material refractario alrededor del árbol en un contenedor. Se deja secar el molde alrededor de ocho horas para endurecer el aglutinante.

Las ventajas de la fundición por revestimiento incluyen las siguientes: 1) es posible fundir piezas de gran complejidad y detalle, 2) se puede tener mucho control dimensional, tolerancias de ± 0.075 mm (± 0.003 in), 3) se tiene un acabado bueno de la superficie, 4) por lo general se puede recuperar la cera para volver a emplearla y 5) normalmente no se requiere maquinado adicional; éste es un proceso de forma neta. Debido a que en esta operación de fundido están involucradas muchas etapas, es un proceso relativamente caro. Lo normal es que las piezas elaboradas por medio de fundición por revestimiento sean pequeñas, aunque se ha llegado a fundir con éxito piezas con formas complejas que pesan hasta 75 libras. Todos los tipos de metales, incluidos aceros, aceros inoxidables y otras



FIGURA 11.9 Estator de una pieza para un compresor, con 108 aletas aerodinámicas separadas, elaborado por medio de fundición por revestimiento (cortesía de Howmet Corp.).

aleaciones de temperatura alta, son susceptibles de usarse en la fundición por revestimiento. Algunos ejemplos de piezas incluyen elementos complejos de maquinaria, aspas y otros componentes de motores de turbina, joyería y piezas dentales. En la figura 11.9 se ilustra una pieza que muestra las características intrincadas que son posibles con la fundición por revestimiento.

11.2.5 Fundición con moldes de yeso y de cerámica

La **fundición con molde de yeso** es similar a aquella con arena, excepto que el molde está hecho de yeso de París ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en vez de arena. Con el yeso se mezclan aditivos tales como el talco y polvo de sílice para controlar la contracción y el tiempo de preparación, reducir el agrietamiento y aumentar la resistencia. Para hacer el molde, se vierte la mezcla de yeso y agua sobre un modelo de plástico o metal en un recipiente y se deja reposar. Por lo general los modelos de madera son insatisfactorios debido al contacto largo con el agua del yeso. La consistencia del fluido permite que la mezcla de yeso fluya con facilidad alrededor del modelo y capture sus detalles y acabado de la superficie. Así, el producto que se funde en moldes de yeso es notable por tener dichos atributos.

Una de las desventajas del proceso es la cura del molde de yeso, al menos en producción elevada. El molde debe permanecer en reposo alrededor de 20 minutos antes de que el modelo se desmonte. Después, el molde se hornea durante varias horas a fin de eliminar la humedad. Aun con el horneo, no todo el contenido de humedad llega a eliminarse. El dilema que enfrentan los fundidores es que la resistencia del molde se pierde cuando la

pasta se deshidrata demasiado, por lo que el contenido de humedad ocasiona defectos en la fundición del producto. Debe llegarse a un balance entre estas alternativas indeseables. Otra desventaja con el molde de yeso es que no es permeable, lo que limita el escape de los gases de la cavidad del molde. Este problema se puede resolver de distintos modos: 1) con la evacuación del aire de la cavidad del molde antes del vertido 2) por medio del oreo de la masa de yeso antes de fabricar el molde, de modo que la pasta dura que resulte contenga vacíos dispersados finamente y 3) con el uso de una composición especial del molde y el tratamiento conocido como *proceso de Antioquia*. Éste consiste en usar 50% de arena mezclada con el yeso, calentar el molde en un autoclave (horno que utiliza vapor supercaliente y a presión) y después dejar que se seque. El molde que resulta tiene una permeabilidad considerablemente mayor que la de uno de yeso convencional.

Los moldes de yeso no resisten temperaturas tan altas como las de los moldes de arena. Por tanto, están limitados a la fundición de aleaciones con puntos de fusión bajos, como las de aluminio, magnesio y algunas con base de cobre. Las aplicaciones incluyen moldes de metal para moldear caucho y plástico, impulsores de turbinas y bombas, y otras piezas de forma relativamente intrincada. Los tamaños de los fundidos van de alrededor de 20 g (menos de 1 onza) a más de 100 kg (más de 200 libras). Las más comunes son las piezas que pesan 10 kg (20 libras), aproximadamente. Las ventajas de los moldes de yeso para estas aplicaciones son el buen terminado de la superficie, la exactitud dimensional y la capacidad de fabricar fundidos de sección transversal delgada.

El *fundido con moldes cerámicos* es similar al fundido con aquéllos de yeso, excepto que el molde se elabora con materiales cerámicos refractarios que resisten temperaturas más elevadas que los de yeso. Así, los moldes cerámicos se emplean para fundir aceros, hierro y otras aleaciones de alta temperatura. Sus aplicaciones (moldes y piezas relativamente intrincadas) son similares a las de las fundiciones hechas en moldes de yeso, excepto para la fundición de metales. Sus ventajas (exactitud y terminado buenos) también son parecidas.

11.3 PROCESOS DE FUNDICIÓN CON MOLDES PERMANENTES

La desventaja económica de cualquiera de los procesos con molde desechable es que se requiere uno nuevo para cada fundido. En la fundición con molde permanente, el molde se reutiliza muchas veces. En esta sección se trata la fundición con moldes permanentes como el proceso básico del grupo de procesos de fundido que emplean moldes de metal susceptibles de volver a emplearse; otros procesos del grupo son la fundición a troquel y la fundición centrífuga.

11.3.1 El proceso básico con moldes permanentes

La *fundición con moldes permanentes* usa un molde de metal construido con dos secciones diseñadas para tener facilidad de apertura y cierre. Es común que estos moldes estén hechos de acero o hierro fundido. La cavidad, con el sistema de paso incluido, se maquina en las dos mitades para proporcionar dimensiones exactas y buen acabado de la superficie. Los metales que es común fundir en moldes permanentes son aluminio, magnesio, aleaciones a base de cobre y hierro colado. Sin embargo, el hierro colado requiere una temperatura de vertido elevada, de 1 250 °C a 1 500 °C (2 300 °F a 2 700 °F), que tiene un efecto grande en la vida del molde. Las temperaturas de vertido muy altas del acero hacen que los moldes permanentes no sean apropiados para este metal, a menos que el molde se fabrique con material refractario.

Es posible usar núcleos en los moldes permanentes a fin de formar superficies internas en el producto fundido. Los núcleos están hechos de metal, pero su forma debe permitir la

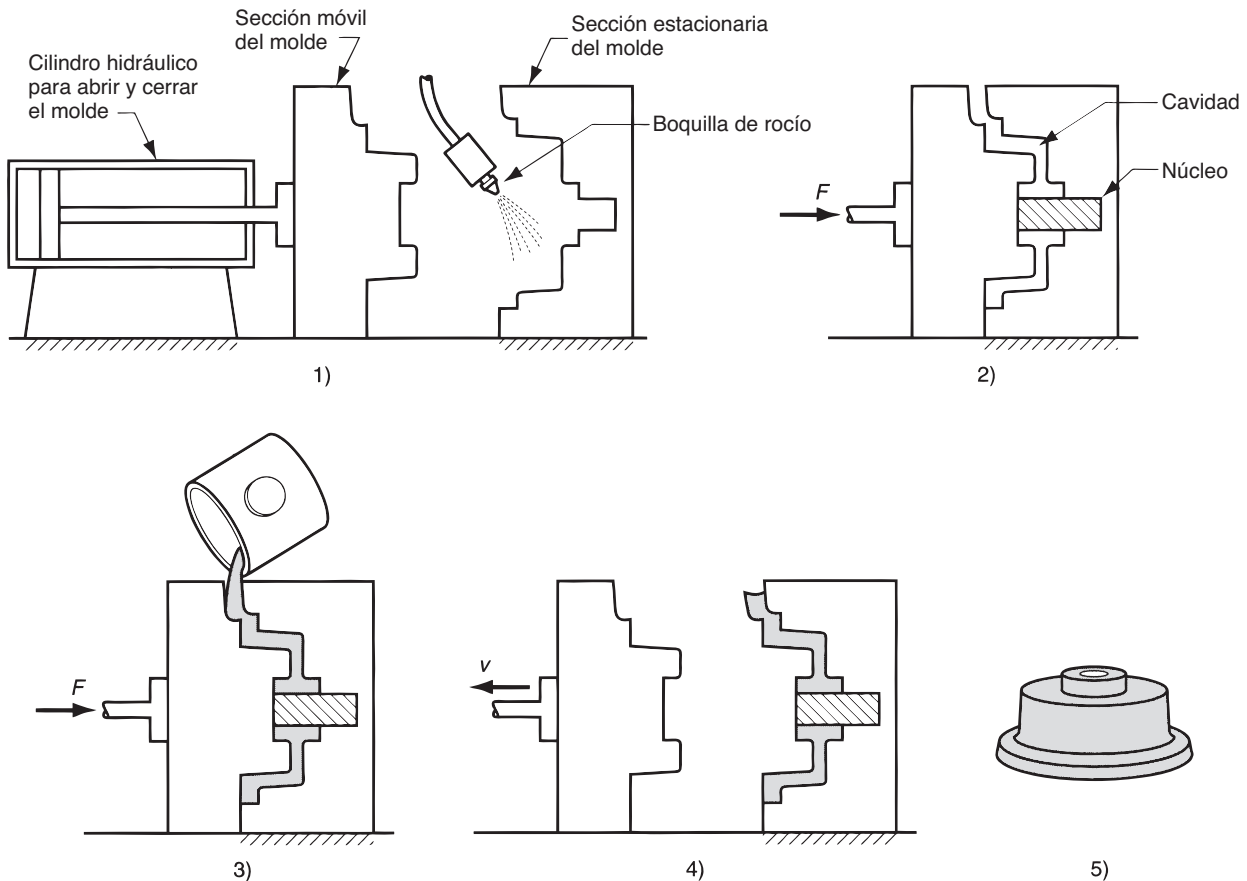


FIGURA 11.10 Etapas del fundido con moldes permanentes: 1) se precalienta y recubre el molde, 2) se insertan los núcleos (si los hay) y se cierra el molde, 3) se vierte metal derretido en el molde y 4) se abre el molde. La pieza terminada se presenta en 5).

remoción del fundido o bien deben colapsarse en forma mecánica para lograr ese cometido. Si el retiro del núcleo de metal es difícil o imposible, hay que usar moldes de arena, caso en el que es frecuente referirse al proceso como **fundición con molde semipermanente**.

En la figura 11.10 se describe el proceso básico de fundición con moldes permanentes. En la preparación del fundido, primero se precalienta el molde y se rocían uno o más recubrimientos sobre la cavidad. El precalentamiento facilita que el metal fluya a través del sistema de paso y hacia la cavidad. Los recubrimientos ayudan a disipar el calor y lubrican las superficies del molde para que sea más fácil la separación del producto fundido. Después del vertido, tan pronto como se solidifica el metal, se abre el molde y se retira el fundido. A diferencia de los moldes desechables, los permanentes no se colapsan, por lo que deben abrirse antes de que ocurra una contracción apreciable por el enfriamiento a fin de impedir la formación de grietas en el fundido.

Las ventajas de la fundición con moldes permanentes incluyen buen acabado de la superficie y control dimensional estrecho, como ya se dijo. Además, la solidificación más rápida ocasionada por el molde metálico da como resultado una estructura de grano más fina, por lo que se producen fundidos más fuertes. El proceso se limita por lo general a metales con puntos de fusión bajos. Otras limitaciones son que las formas de las piezas son más sencillas, en comparación con las de la fundición con arena (debido a la necesidad de abrir el molde), y lo caro del molde. Debido a que el costo del molde es elevado, el proceso se adapta mejor a una producción elevada y se puede automatizar en consecuencia. Los productos comunes incluyen pistones de automóviles, cuerpos de bombas y ciertos fundidos para aeronaves y misiles.

11.3.2 Variaciones de la fundición con moldes permanentes

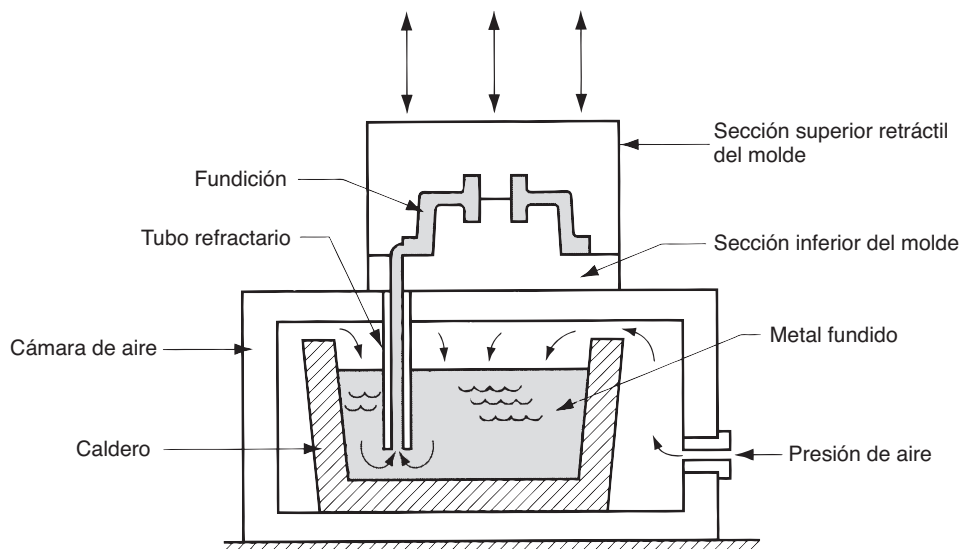
Varios procesos de fundición son muy parecidos al método básico con molde permanente. Éstos incluyen la fundición con molde permanente en hueco, a baja presión y al vacío.

Fundición en hueco La *fundición en hueco* es un proceso con molde permanente en el que un fundido hueco se forma por medio de la inversión del molde después de la solidificación parcial de la superficie a fin de drenar el metal líquido del centro. La solidificación comienza en las paredes del molde porque están relativamente frías, y con el paso del tiempo avanza hacia la mitad del fundido (véase la sección 10.3.1). El espesor del cascarón o concha se controla por el tiempo que se permite transcurra antes del drenado. La fundición en hueco se emplea para hacer estatuas, pedestales de lámparas y juguetes, con metales de punto de fusión bajo, tales como plomo, zinc y estaño. En esos artículos es importante la apariencia exterior, pero la resistencia y la forma interior del fundido son consideraciones menores.

Fundición a baja presión En el proceso básico de molde permanente y en la fundición en hueco, el flujo del metal hacia la cavidad del molde está ocasionado por la gravedad. En la *fundición a baja presión* el metal líquido se fuerza a pasar a la cavidad sujeto a baja presión, aproximadamente 0.1 MPa (15 lb/in²), desde abajo, de modo que el flujo es hacia arriba, como se ilustra en la figura 11.11. La ventaja de este enfoque sobre el vertido tradicional es que al molde se introduce metal derretido limpio desde el centro del recipiente, en vez de metal que ya se haya expuesto al aire. De ese modo se minimizan los defectos de porosidad por gas y oxidación, y mejoran las propiedades mecánicas.

Fundición al vacío con molde permanente La *fundición al vacío con molde permanente* (no confundir con el molde al vacío, véase la sección 11.2.2) es una variación de aquélla a baja presión, en la cual se emplea un vacío para impulsar el metal derretido hacia la cavidad del molde. La configuración general del proceso de fundición al vacío con molde permanente es similar a la de la operación de fundición a baja presión. La diferencia está en que se utiliza la presión reducida del aire desde el vacío del molde para llevar metal líquido hacia la cavidad, en lugar de forzarlo con presión positiva de aire desde abajo. Hay varios beneficios en la técnica de vacío, relacionados con la fundición a baja presión: se reduce la porosidad por aire y los defectos relacionados con ésta, y se da mayor resistencia al producto fundido.

FIGURA 11.11 Fundición a baja presión. El diagrama muestra el uso de la presión baja del aire para forzar al metal fundido en el recipiente a que pase a la cavidad del molde. La presión se mantiene hasta que el fundido se ha solidificado.



11.3.3 Fundición con troquel

La **fundición con troquel** es un proceso de fundición con molde permanente en el que se inyecta a presión elevada metal fundido a la cavidad del molde. Las presiones comunes son de 7 a 350 MPa (1 000 a 50 000 lb/in²). La presión se mantiene durante la solidificación, después de la cual el molde se abre y se retira la pieza. Los moldes para esta operación de fundido reciben el nombre de troqueles, de donde deriva su nombre el proceso. La característica más notable que diferencia a este proceso de los demás de la categoría de moldes permanentes, es el uso de presión elevada para forzar el paso del metal a la cavidad del troquel.

Las operaciones de fundición con troquel se llevan a cabo en máquinas especiales (véase la nota histórica 11.2). Éstas se diseñan para que las dos mitades del molde embonen y cierren con exactitud, y las mantengan cerradas mientras se fuerza al metal líquido a pasar a la cavidad. En la figura 11.12 se aprecia la configuración general. Hay dos tipos principales de máquinas para fundición con troquel: 1) cámara caliente y 2) cámara fría, que se diferencian en la manera en que el metal derretido se inyecta a la cavidad.

Nota histórica 11.2 Máquinas de fundición con troquel.

La máquina moderna de fundición con troquel tiene sus orígenes en la industria de la impresión, y en la necesidad que hubo en la segunda mitad del siglo XIX de satisfacer a una población cada vez más letrada con apetito creciente por la lectura. El linotipo, inventado y desarrollado por O. Mergenthaler a finales del siglo XIX, es una máquina que produce tipos de imprenta. Es una máquina fundidora porque funde una línea de caracteres de tipos hechos de plomo, para que se utilicen en la preparación de placas de imprenta. El nombre **linotipo** se deriva del hecho de que la máquina produce una línea de caracteres de tipos durante cada ciclo de operación.

La máquina fue usada por primera vez con éxito en forma comercial en la ciudad de Nueva York, en 1886, por **The Tribune**.

El linotipo dio factibilidad a las máquinas de fundición mecanizadas. La primera de éstas la patentó H. Doehler en 1905 (esta máquina está en exhibición en Smithsonian Institution, en Washington, D.C.). En 1907, E. Wagner inventó la primera máquina de fundición con troquel que utilizó el diseño de cámara caliente. Se empleó por vez primera durante la Segunda Guerra Mundial para fundir partes de binoculares y máscaras de gas.

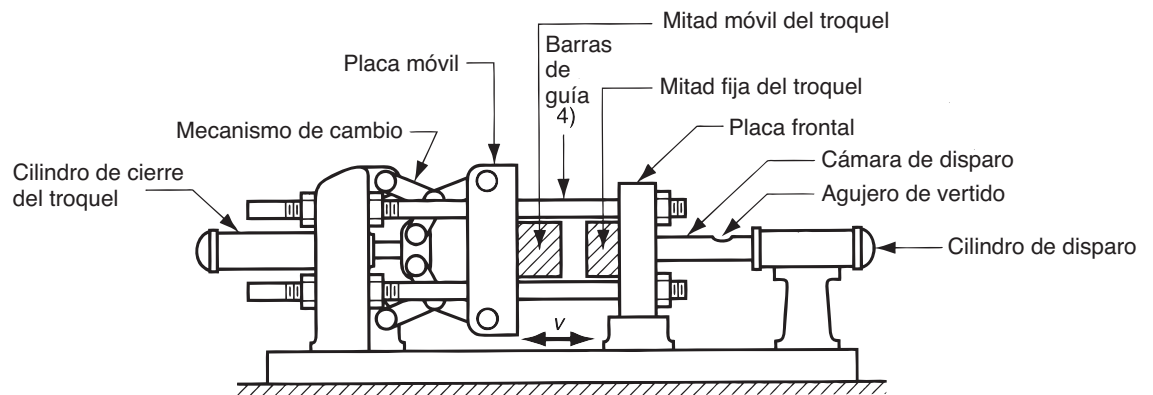


FIGURA 11.12 Configuración general de una máquina de fundición con troquel (cámara fría).

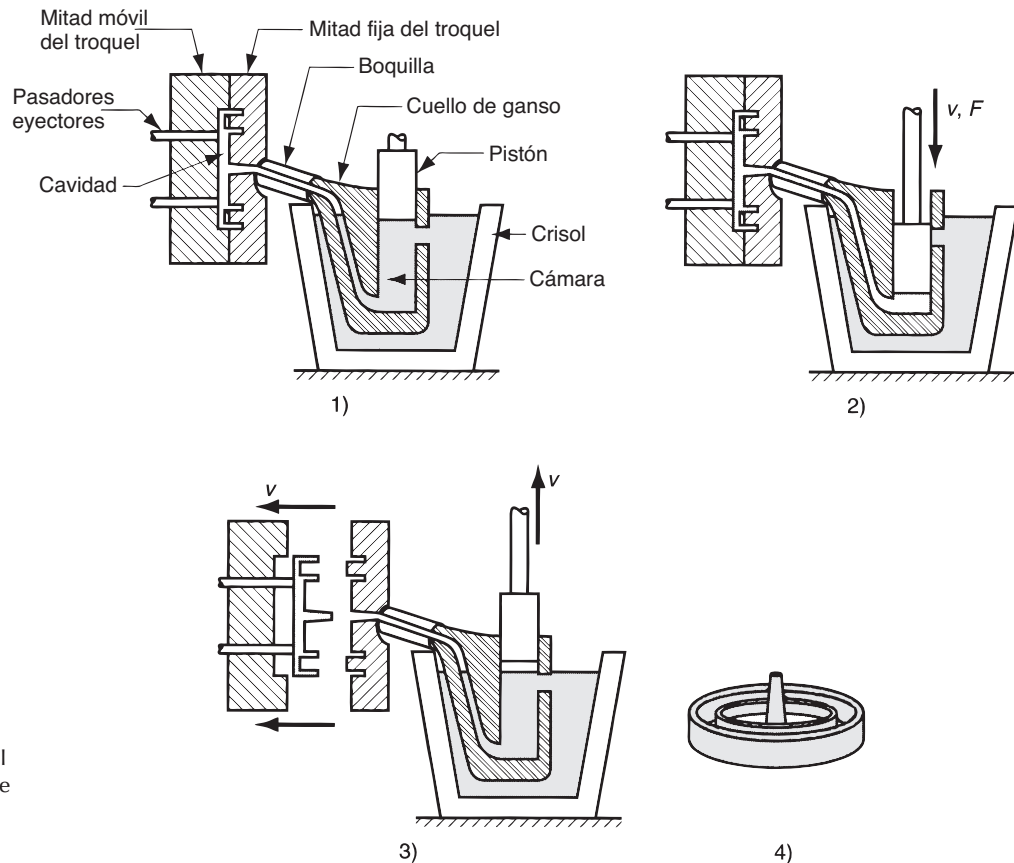


FIGURA 11.13 Ciclo de la fundición con cámara caliente: 1) con troquel cerrado y pistón fuera, el metal derretido fluye a la cámara; 2) el pistón fuerza al metal a fluir hacia la cámara para que pase al troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el pistón, se abre el troquel y se expulsa la pieza solidificada. En el inciso 4 se ilustra el elemento terminado.

En las **máquinas de cámara caliente** el metal se derrite en un contenedor adosado a la máquina, y se emplea un pistón para inyectar metal líquido a alta presión hacia el troquel. Las presiones de inyección comunes son de 7 a 35 MPa (1 000 a 5 000 lb/in²). El ciclo de fundición se resume en la figura 11.13. No son raras tasas de producción de hasta 500 piezas por hora. La fundición con troquel de cámara caliente plantea un reto especial al sistema de inyección debido a que gran parte de éste se encuentra sumergido en el metal fundido. Por tanto, el proceso está limitado a aplicaciones con metales de punto bajo de fusión que no impongan ataque químico al pistón y otros componentes mecánicos. Los metales incluyen zinc, estaño, plomo y en ocasiones magnesio.

En las **máquinas de fundición con troquel de cámara fría** se vierte metal derretido hacia una cámara que no está caliente, desde un contenedor externo, y se emplea un pistón para inyectarlo a alta presión hacia la cavidad del troquel. Las presiones de inyección comunes que se usan en estas máquinas son de 14 a 140 MPa (2 000 a 20 000 lb/in²). En la figura 11.14 se explica el ciclo de producción. En comparación con las máquinas de cámara caliente, las tasas del ciclo por lo general no son tan rápidas debido a la necesidad de una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa hacia la cámara. No obstante, este proceso de fundición es una operación de producción elevada. Las máquinas de cámara fría se usan por lo común para fundir aleaciones de aluminio, latón y magnesio. Aleaciones con punto de fusión bajo (zinc, estaño, plomo) también pueden fundirse en máquinas de cámara fría, pero por lo general las ventajas del proceso con cámara caliente favorecen su uso sobre estos metales.

Generalmente, los moldes que se usan en operaciones de fundición con troquel están hechos de acero para herramientas, acero para moldes o acero al níquel con bajo contenido de carbono. También se emplean tungsteno y molibdeno con calidades refractarias buenas, en especial para fundir acero con troquel y hierro colado. Los troqueles pueden ser de una cavidad o varias. En las figuras 11.13 y 11.14 se ilustran troqueles de una sola cavidad.

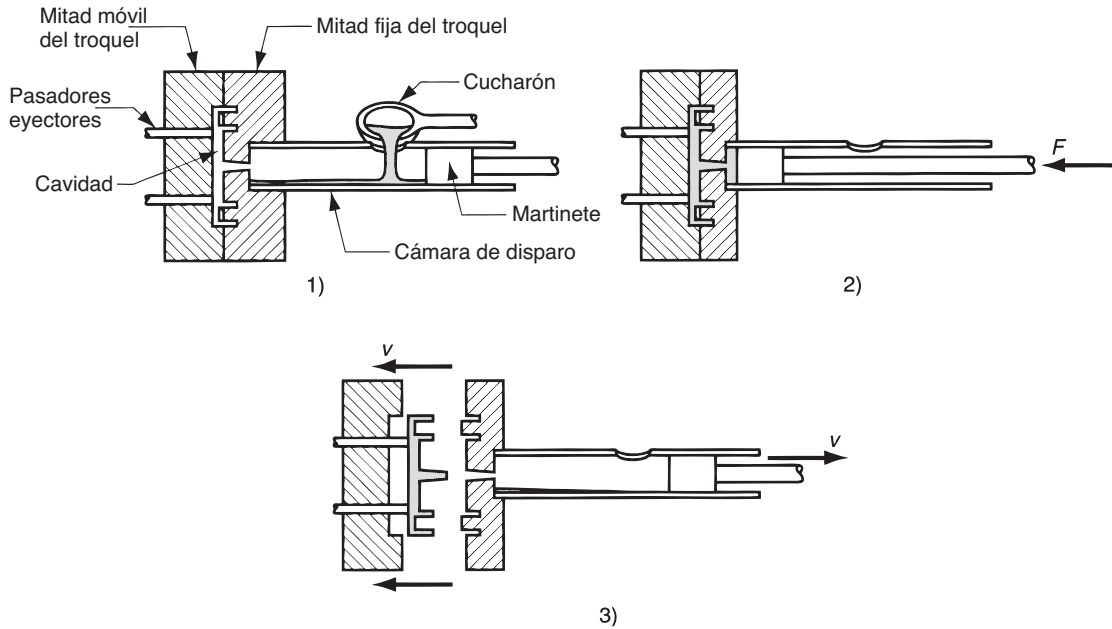


FIGURA 11.14 Ciclo de fundición con cámara fría: 1) con troquel cerrado y martinete retirado, el metal fundido se vierte a la cámara; 2) el martinete fuerza al metal a fluir en el troquel, manteniendo la presión durante el enfriamiento y solidificación; y 3) se retira el martinete, el troquel se abre y la pieza es expulsada. (El sistema de paso está simplificado).

Los pasadores eyectores se requieren para retirar la pieza del troquel cuando éste se abre, como se observa en los diagramas. Estos pasadores empujan la pieza hacia afuera de la superficie del molde de modo que pueda retirarse. También deben rociarse lubricantes en las cavidades, a fin de impedir que estén pegajosas.

Debido a que los materiales del troquel no tienen porosidad natural, y que el metal fundido fluye con rapidez hacia éste durante la inyección, deben hacerse agujeros de ventilación y vías de paso en los troqueles, en la línea de separación, para evacuar el aire y gases de la cavidad. Las ventilaciones son muy pequeñas; en realidad se llenan con metal durante la inyección. Este metal debe recortarse de la pieza más tarde. Asimismo, en la fundición con troquel es común la formación de una **rebaba**, que entra como metal líquido a presión alta al espacio pequeño entre las mitades del troquel, en la línea de separación o en los claros alrededor de los núcleos y los pasadores eyectores. Esta rebaba debe recortarse del fundido, junto con el bebedero y el sistema de paso.

Entre las ventajas de la fundición con troquel se incluyen las siguientes: 1) son posibles tasas elevadas de producción, 2) es económica para cantidades grandes de producción, 3) se pueden tener tolerancias estrechas, del orden de ± 0.076 mm (± 0.003 in) para piezas pequeñas, 4) buen acabado de la superficie, 5) son posibles las secciones delgadas, por debajo de 0.5 mm (0.020 in) y 6) el enfriamiento rápido proporciona un tamaño pequeño del grano y buena resistencia al fundido. La limitación de este proceso, además de los metales por fundir, es la restricción de la forma. La configuración geométrica de la pieza debe permitir su retiro de la cavidad del troquel.

11.3.4 Fundición centrífuga

La **fundición centrífuga** se refiere a varios métodos de fundición en los que el molde gira a gran velocidad de modo que la fuerza centrífuga distribuye el metal derretido a las regiones externas de la cavidad del troquel. El grupo incluye 1) fundición centrífuga real, 2) fundición semicentrífuga y 3) fundición centrífugada.

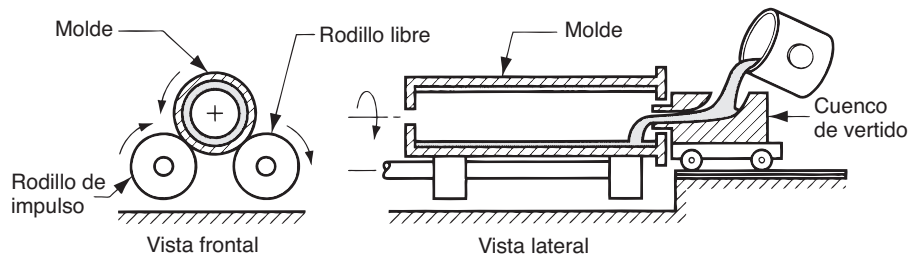


FIGURA 11.15 Arreglo para la fundición centrífuga real.

Fundición centrífuga real En la fundición centrífuga real, se vierte metal fundido a un molde rotatorio para producir una pieza tubular. Algunos ejemplos de las piezas que se fabrican con este proceso incluyen tuberías, tubos, boquillas y anillos. En la figura 11.15 se ilustra un arreglo posible. Se vierte metal derretido por un extremo del molde horizontal rotatorio. En algunas operaciones, la rotación del molde comienza después del vertido y no antes. La gran velocidad de rotación ocasiona que las fuerzas centrífugas hagan que el metal adopte la forma de la cavidad del molde. Así, la forma exterior del fundido puede ser redonda, octagonal, hexagonal, etcétera. Sin embargo, la forma interior del fundido es (en teoría) perfectamente circular, debido a las fuerzas con simetría radial que actúan.

La orientación del eje de rotación del molde es horizontal o vertical, y el más común es el primero. A continuación se estudiará cuán rápido debe girar el molde en una **fundición centrífuga horizontal**, a fin de que el proceso tenga éxito. La fuerza centrífuga está definida por la siguiente ecuación de física:

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad (11.2)$$

donde F = fuerza, N (lb); m = masa, kg (lbm); v = velocidad, m/s (ft/s); y R = radio interior del molde, m (ft). La fuerza de gravedad es su peso, $W = mg$, donde W se expresa en kg (lb), y g = aceleración de la gravedad, 9.8 m/s^2 (32.2 ft/s^2). El llamado factor G , GF , es la razón de la fuerza centrífuga dividida entre el peso:

$$GF = \frac{mv^2}{R} = \frac{mv^2}{Rmg} = \frac{v^2}{Rg} \quad (11.3)$$

La velocidad, v , se expresa como $2\pi RN/60 = \pi RN/30$, donde N = velocidad rotacional, rev/min. Al sustituir esta expresión en la ecuación (11.3), se obtiene

$$GF = \frac{R \left(\frac{\pi N}{30} \right)^2}{g} \quad (11.4)$$

Al reacomodar ésta a fin de resolverla para la velocidad rotatoria, N , y con el uso del diámetro, D , en vez del radio en la ecuación resultante, se tiene

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gGF}{D}} \quad (11.5)$$

donde D es el diámetro interior del molde, m (ft). Si el factor G es demasiado pequeño en la fundición centrífuga, el metal líquido no se verá forzado a permanecer contra la pared del molde durante la mitad superior de la trayectoria circular, sino que “lloverá” dentro de la cavidad. Hay un deslizamiento entre el metal fundido y la pared del molde, lo que significa que la velocidad rotacional del metal es menor que la del molde. Con una base empírica, se ha encontrado [2] que para la fundición centrífuga horizontal son apropiados valores de GF de 60 a 80, aunque esto depende hasta cierto punto del metal que se funde.

Ejemplo 11.2

Velocidad de rotación en la fundición centrífuga real

Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal, a fin de fabricar secciones de tubo de cobre con diámetro exterior (DE) de 25 cm y diámetro interior (DI) de 22.5 cm. ¿Cuál es la velocidad rotacional que se requiere si se va a usar un factor G de 65 para fundir el tubo?

Solución: El diámetro interior del molde $D = DE$ del fundido es de 25 cm = 0.25 m. Con la ecuación (11.5) se calcula la velocidad rotacional requerida, como sigue:

$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2(9.8)(26)}{0.25}} = 681.7 \text{ rev / min.}$$

En la **fundición centrífuga vertical**, el efecto de la gravedad sobre el metal líquido ocasiona que la pared del fundido sea más gruesa en la base que en la parte superior. El perfil interior de la pared del fundido adopta una forma parabólica. La diferencia de los radios interiores en las partes superior e inferior está relacionada con la velocidad de rotación, del modo siguiente:

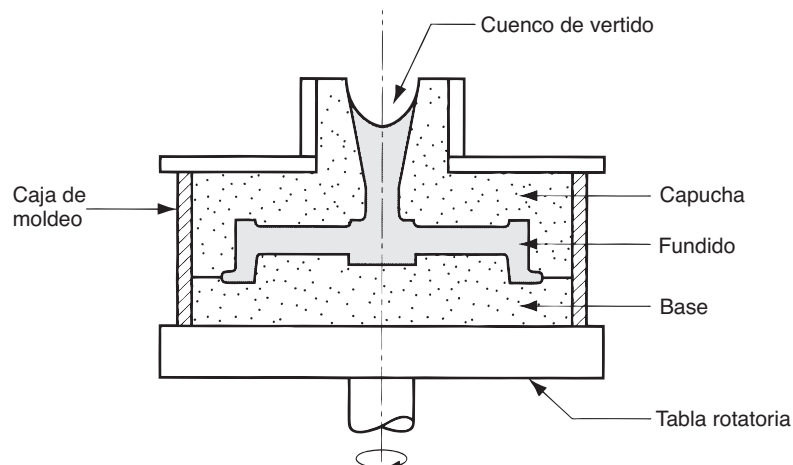
$$N = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{2gL}{R_i^2 - R_b^2}} \quad (11.6)$$

donde L es la longitud vertical del fundido, m (ft); R_i es el radio interior en la parte superior del fundido, m (ft); y R_b es el radio interior en la parte inferior del fundido, m (ft). La ecuación (11.6) se utiliza para determinar la velocidad rotacional requerida para la fundición centrífuga vertical, dadas las especificaciones para los radios interiores superior e inferior. En la fórmula se observa que para R_i igual a R_b , la velocidad de rotación N tendría que ser infinita, lo que es imposible, por supuesto. Como algo práctico, las longitudes de las piezas que se fabrican con fundición centrífuga vertical por lo general no son más del doble que sus diámetros. Esto es muy satisfactorio para rodamientos y otros elementos que tienen diámetros grandes en relación con sus longitudes, en especial si va a emplearse maquinado para dar la medida exacta al diámetro interior.

Los fundidos hechos con fundición centrífuga real se caracterizan por su densidad elevada, en especial en las regiones exteriores de la pieza, donde F es máxima. La contracción por la solidificación en el exterior del tubo fundido no es un factor, porque la fuerza centrífuga distribuye continuamente metal derretido en dirección de la pared del molde durante la solidificación. Cualesquiera impurezas del fundido tienden a estar en la pared interna y de ser necesario se eliminan con maquinado.

Fundición semicentrífuga Con este método, se emplea la fuerza centrífuga para producir fundiciones sólidas, como se aprecia en la figura 11.16, en vez de piezas tubulares. La

FIGURA 11.16 Fundición semicentrífuga



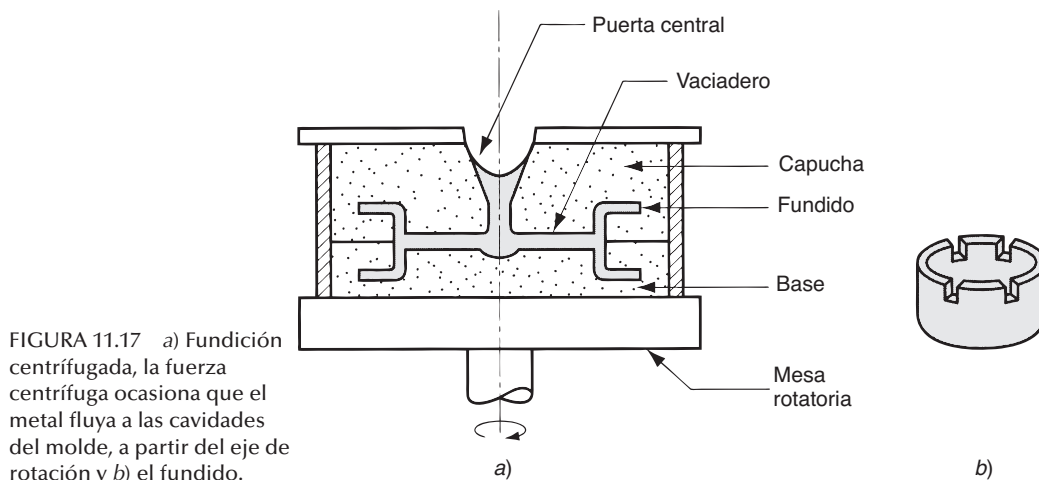


FIGURA 11.17 a) Fundición centrífuga, la fuerza centrífuga ocasiona que el metal fluya a las cavidades del molde, a partir del eje de rotación y b) el fundido.

velocidad de rotación en la fundición semicentrífuga, por lo general se establece de modo que se obtengan factores G de alrededor de 15 [2], y los moldes se diseñan con mazarotas en el centro a fin de suministrar metal. La densidad del metal en el fundido final es mayor en las secciones exteriores que en el centro de la rotación. El proceso se emplea con frecuencia para piezas en las que el centro de la fundición se maquina, lo que elimina la porción donde la calidad es más baja. Ejemplos de fundidos elaborados con este proceso son las ruedas y las poleas. Para la fundición semicentrífuga es frecuente emplear moldes desechables, como lo sugiere la ilustración del proceso.

Fundición centrífuga En la fundición centrífuga, véase la figura 11.17, el molde está diseñado con las cavidades de la pieza localizada hacia afuera del eje de rotación, de modo que el metal vertido en el molde se distribuya hacia ellas por medio de la fuerza centrífuga. El proceso se emplea para piezas pequeñas y no es un requerimiento la simetría radial de la pieza, como sí lo es para los otros dos métodos de fundición centrífuga.

11.4 LA PRÁCTICA DE LA FUNDICIÓN

En todos los procesos de fundido, debe calentarse el metal hasta alcanzar el estado líquido para verterlo o forzarlo de algún modo a que pase al molde. El calentamiento y la fusión se llevan a cabo en un horno. Esta sección se ocupa de los diversos tipos de hornos que se emplean en las fundidoras, así como de las prácticas de vertido para llevar el metal derretido del horno al molde.

11.4.1 Hornos

Los tipos de hornos más comunes que se emplean en las fundidoras son: 1) cubilotes, 2) hornos de combustible directo, 3) crisoles, 4) hornos de arco eléctrico y 5) hornos de inducción. La selección del tipo más apropiado de horno depende de factores tales como: aleación por fundir; sus temperaturas de fusión y vertido; requerimientos de capacidad del horno; costos de la inversión, la operación y el mantenimiento; y las consideraciones sobre contaminación ambiental.

Cubilotes Un cubilote es un horno cilíndrico vertical equipado con un canal de paso (o bebedero de sangrado) cerca de su base. Los cubilotes sólo se usan para hierros colados, y aunque también se emplean otros hornos, el mayor peso en toneladas de hierro colado se obtiene en cubilotes. En la figura 11.18 se ilustra la construcción general y características

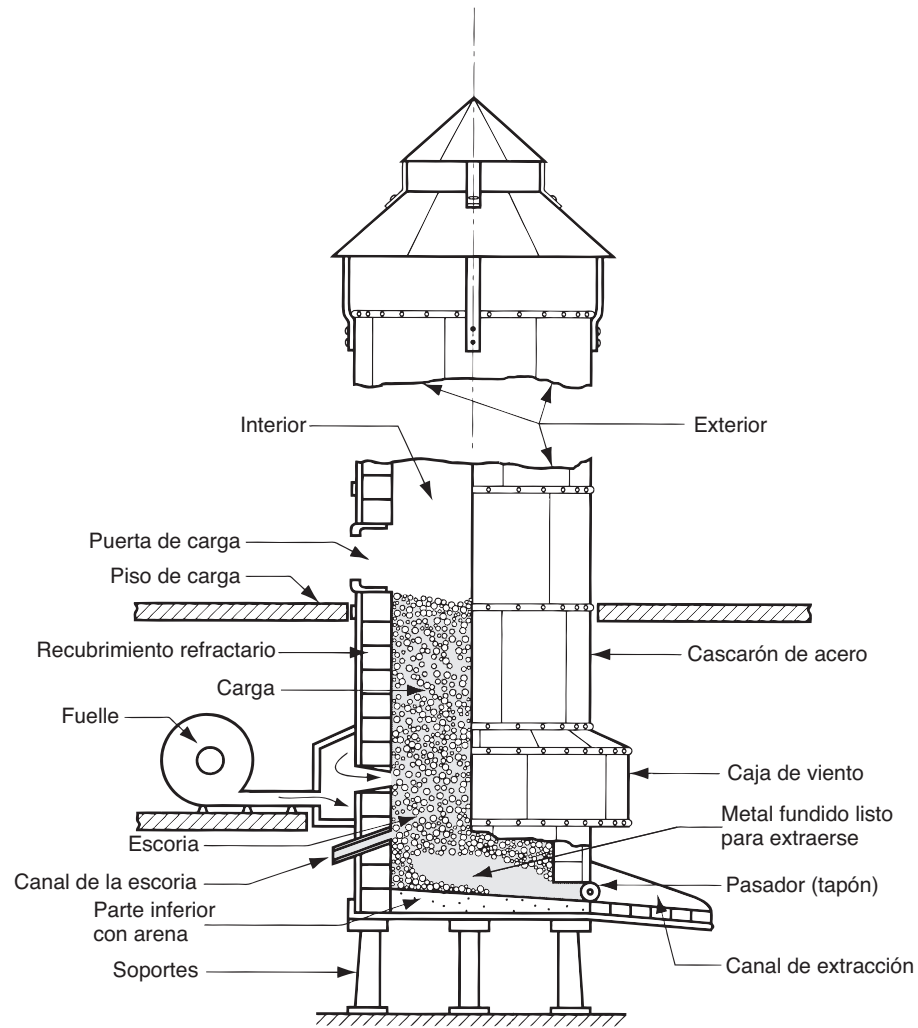


FIGURA 11.18 Cubilote que se usa para obtener hierro colado. El horno que se muestra es común para una fundidora pequeña y se omiten los detalles del sistema de control de emisiones que se requiere para un cubilote moderno.

de operación. Consiste en un cascarón grande de placa de acero recubierta con material refractario. La “carga” consiste en hierro, coque, fundente y tal vez elementos de aleación, y se introduce a través de una puerta que se localiza a menos de la mitad de la altura del cubilote. Por lo general, el hierro es una mezcla del tipo de primera fundición (arrabio) y chatarra (incluidos mazarotas, vaciaderos y bebederos solidificados, procedentes de fundidos anteriores). El coque es el combustible que se usa para calentar el horno. Se introduce aire forzado a través de las aberturas cerca de la base del cascarón para la combustión del coque. El fundente es un compuesto básico como la caliza, que reacciona con la ceniza del coque y otras impurezas para formar la escoria. Ésta sirve para cubrir el fundido, e impide que reaccione con el ambiente dentro del cubilote, y también reduce la pérdida de calor. Conforme la mezcla se calienta y ocurre la fundición del hierro, se desaloja periódicamente el horno para verter metal líquido.

Hornos de combustible directo Un horno de combustible directo contiene un hogar abierto pequeño en el que se calienta la carga de metal por medio de quemadores de combustible ubicados en uno de sus lados. El techo del horno ayuda a la acción de calentar por medio de reflejar la flama hacia abajo contra la carga. El combustible común es gas natural, y los productos de la combustión salen del horno a través de un cañón. En la parte inferior del hogar hay un agujero de salida para extraer el metal fundido. Los hornos de combustible directo por lo general se emplean en el fundido de metales no ferrosos tales como aleaciones a base de cobre y aluminio.

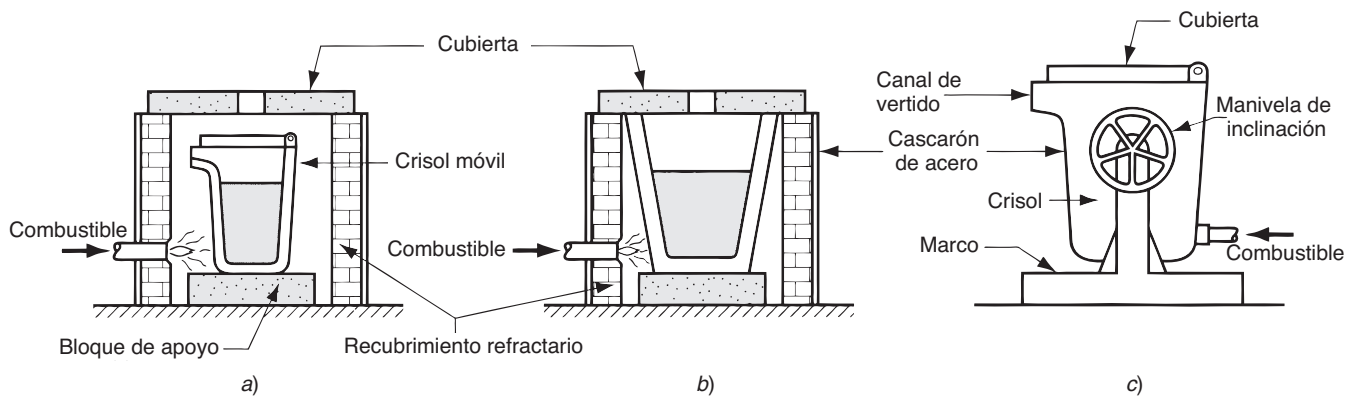


FIGURA 11.19 Tres tipos de crisoles: a) crisol móvil, b) crisol estacionario y c) crisol de volteo.

Crisoles Estos hornos funden el metal sin que tenga contacto directo con una mezcla combustible. Por esta razón, en ocasiones se les llama **hornos de combustible indirecto**. En las fundidoras se utilizan tres tipos de crisoles: a) móvil, b) estacionario y c) de volteo, los cuales se ilustran en la figura 11.19. Todos emplean un contenedor (el crisol) hecho de material refractario apropiado (por ejemplo, una mezcla de arcilla y grafito) o una aleación de acero de alta temperatura, para contener la carga. En el **crisol móvil**, éste se coloca en un horno y se calienta lo suficiente para derretir la carga de metal. Los combustibles comunes para estos hornos son petróleo, gas o carbón en polvo. Cuando el metal se derrite, el crisol se eleva fuera del horno y se usa como cuenco de vertido. Los otros dos tipos, que en ocasiones reciben el nombre de **hornos de vasija**, tienen el horno para calentar y el contenedor como unidad integrada. En el **horno de crisol estacionario**, el horno es estacionario y el metal fundido se extrae del contenedor con un cucharón. En el **horno de crisol de volteo**, todo el conjunto se inclina para hacer el vertido. Los crisoles se emplean para metales no ferrosos tales como bronce, latón y aleaciones de zinc y aluminio. Las capacidades de los hornos por lo general están limitadas a varios cientos de libras.

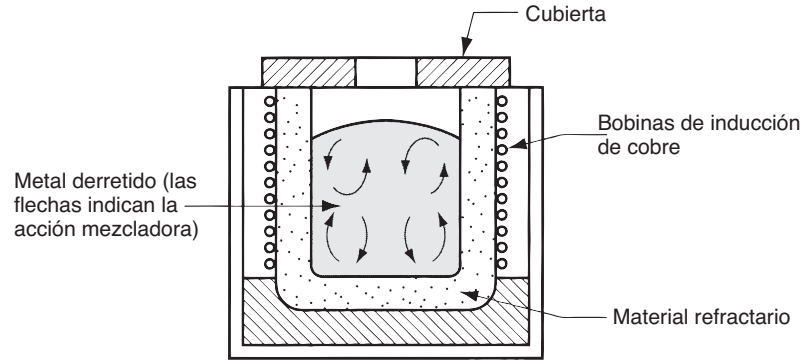
Hornos de arco eléctrico En este tipo de horno, la carga se funde debido al calor generado por un arco eléctrico. Existen varias configuraciones, con dos o tres electrodos (véase la figura 6.9). El consumo de energía es alto, pero los hornos eléctricos se diseñan para que tengan capacidad alta de fundición (23 000 a 45 000 kg/h, o 25 a 50 ton/h), y se usan sobre todo para fundir acero.

Hornos de inducción Un horno de inducción emplea corriente alterna que pasa a través de una bobina para desarrollar un campo magnético en el metal, y la corriente inducida que resulta ocasiona el calentamiento rápido y la fundición del metal. En la figura 11.20 se ilustran las características de un horno de inducción para las operaciones de fundición. El campo de fuerza electromagnética hace que ocurra una acción mezcladora en el metal líquido. Asimismo, como el metal no entra en contacto directo con los elementos calientes, el ambiente en que tiene lugar se puede controlar de cerca. Todo esto da como resultado metales fundidos de calidad y pureza altas, y los hornos de inducción se emplean para casi cualquier aleación cuando esos requerimientos son importantes. En el trabajo de fundición son comunes las aplicaciones de fundir aleaciones de acero, hierro y aluminio.

11.4.2 Vertido, limpieza y tratamiento térmico

En ocasiones se lleva el metal derretido del horno de fundición al molde por medio de crisoles. Con más frecuencia, la transferencia se lleva a cabo por medio de **cuencos** de varias

FIGURA 11.20 Horno de inducción.



clases. Estos cuencos reciben el metal del horno y permiten que se vierta de manera conveniente en los moldes. En la figura 11.21 se ilustran dos cuencos comunes, uno es para manejar volúmenes grandes de metal derretido por medio de una grúa elevada y el otro es un “cuenco para dos hombres”, para moverlo en forma manual y verter cantidades pequeñas.

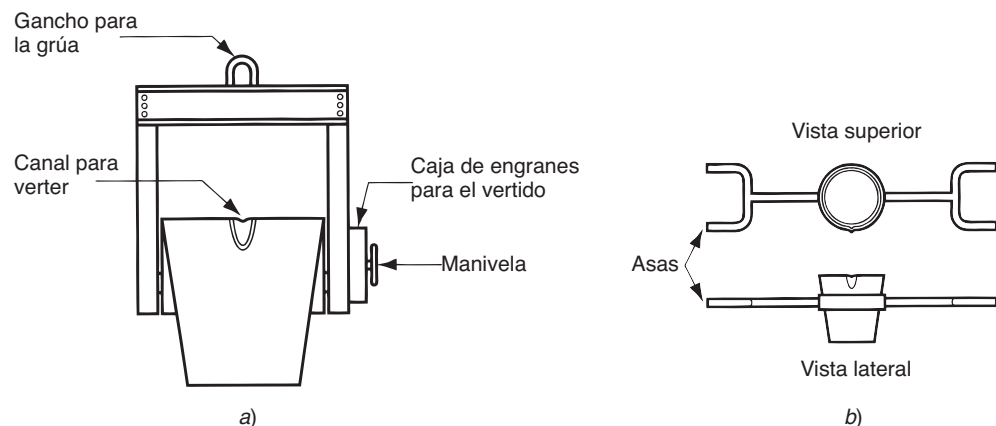
Uno de los problemas del vertido es que podría introducirse metal fundido oxidado al molde. Los óxidos de metal reducen la calidad del producto y quizás hagan que el fundido sea defectuoso, por lo que se toman medidas para minimizar la entrada de estos óxidos en el molde durante el vertido. En ocasiones se emplean filtros para capturar los óxidos y otras impurezas conforme se vierte el metal desde el canal, y se emplean fundentes para cubrir el metal derretido a fin de retardar la oxidación. Además, se han creado cuencos para verter el metal líquido desde el fondo, ya que los óxidos se acumulan en la superficie de arriba.

Después de que el fundido se ha solidificado y retirado del molde, por lo general se requiere cierto número de etapas adicionales. Estas operaciones incluyen 1) recortar, 2) retirar el núcleo, 3) limpiar las superficies, 4) inspeccionar, 5) reparar, si se requiriera, y 6) dar tratamiento térmico. En las fundidoras, se conoce al conjunto de las etapas 1 a 5 como “limpieza”. El grado en que se requieren estas operaciones adicionales varía según los procesos de fundido y los metales. Cuando se necesitan, por lo general son intensivas en mano de obra y costosas.

El **recorte** involucra la remoción de los bebederos, vaciaderos, mazarotas, rebabas en la línea de separación, coronas y cualquier exceso de metal de la pieza fundida. En el caso de aleaciones fundidas frágiles y cuando las secciones transversales sean relativamente pequeñas, es posible romper estos apéndices del fundido. De otro modo, hay que martillar, cortar, cortar con sierra, esmerilar o usar varios métodos de corte con soplete.

Si se usan núcleos para fundir la pieza, hay que retirarlos. La mayor parte de núcleos están unidos por medio químico o con arena y aceite, y es frecuente que caigan del fundido

FIGURA 11.21 Dos tipos comunes de cuencos: a) cuenco de grúa y b) cuenco para dos hombres.



si el aglutinante se deteriora. En ciertos casos se retiran por medio del golpeo al fundido, ya sea en forma manual o mecánica. En instancias raras los núcleos se retiran en forma química con la disolución del agente aglutinante que se usó en el núcleo de arena. Los núcleos sólidos deben martillarse o presionarse.

La limpieza de las superficies es lo más importante en el caso de la fundición con arena. En muchos de los otros métodos de fundición, en especial en los procesos con molde permanente, puede evitarse este paso. La **limpieza de las superficies** involucra la remoción de la arena de la superficie del fundido y otras maneras de mejorar su apariencia. Los métodos que se usan para limpiar superficies incluyen la agitación, el soplo de aire con granos de arena gruesa o balines de metal, uso de cepillos de alambre, pulido y limpieza con baño químico (véase el capítulo 28).

Es posible que el fundido tenga defectos, por lo que se necesita inspección para detectar su presencia. En la sección siguiente se estudian esos temas de la calidad.

Es frecuente que los fundidos reciban tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades, ya sea con operaciones subsecuentes tales como maquinarse o resaltar las propiedades que se desean para la aplicación de la pieza en el servicio.

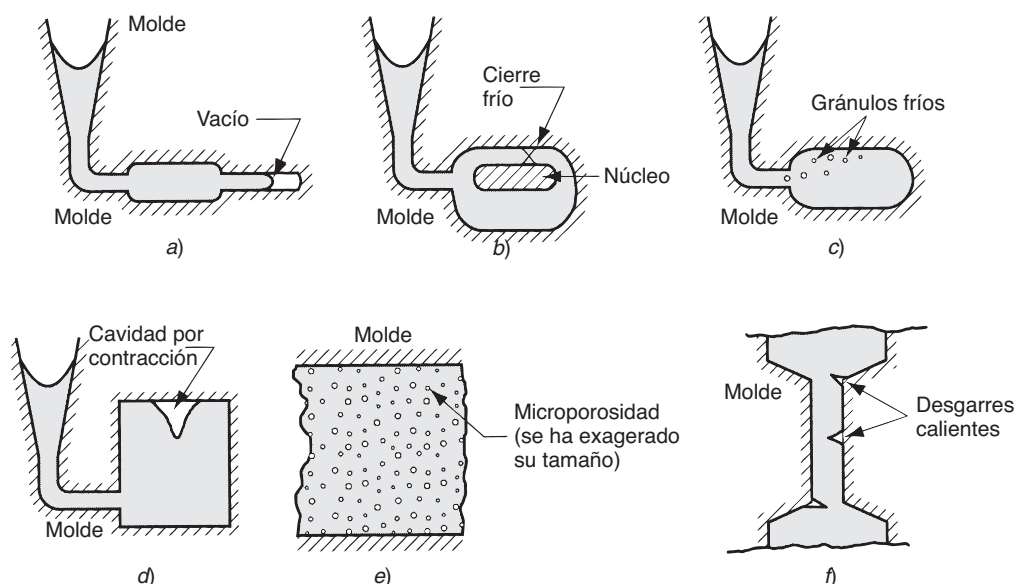
11.5 CALIDAD DEL FUNDIDO

Hay muchas formas de que las cosas salgan mal en una operación de fundición, lo que da como resultado defectos de calidad del producto. En esta sección se recopila una lista de los defectos comunes que ocurren durante el fundido y se indican los procedimientos de inspección para detectarlos.

Defectos de fundición Algunos defectos son comunes a todos los procesos de fundición; se ilustran en la figura 11.22 y se describen brevemente a continuación:

- a) **Vacíos** son fundidos que se solidifican antes de llenar por completo la cavidad del molde. Las causas comunes incluyen: 1) insuficiente fluidez del metal derretido, 2) temperatura de vertido muy baja, 3) vertido muy despacio y 4) sección transversal de la cavidad del molde muy delgada.

FIGURA 11.22 Algunos defectos comunes de los fundidos: a) vacíos, b) cierre frío, c) gránulos fríos, d) cavidad por contracción, e) microporosidad y f) desgarre caliente.

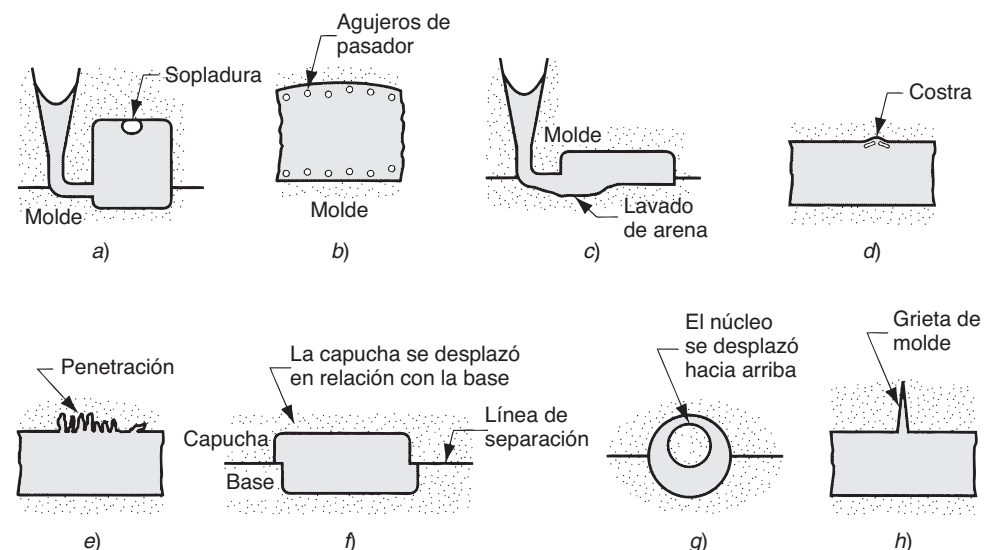


- b) **Cierres fríos** ocurren cuando dos porciones del metal fluyen juntas, pero no hay fusión entre ellas debido a la solidificación prematura. Sus causas son similares a las de los vacíos.
- c) **Gránulos fríos** resultan de las salpicaduras durante el vertido, lo que ocasiona la formación de glóbulos sólidos de metal que quedan atrapados en el fundido. Este defecto puede evitarse con procedimientos de vertido y diseños del sistema de paso que eviten las salpicaduras.
- d) **Cavidad de fuga** es una depresión en la superficie o un vacío interno en el fundido, ocasionado por fugas en la solidificación que restringen la cantidad de metal derretido disponible en la última región que se solidifica. Es frecuente que ocurra cerca de la parte superior del fundido, en cuyo caso se conoce como “rechupe” [véase la figura 10.8(3)]. Con frecuencia, el problema se resuelve con el diseño apropiado de la mazarota.
- e) **Microporosidad** consiste en una red de vacíos pequeños distribuidos en el fundido, ocasionados por la falta de solidificación localizada del metal derretido final en la estructura dendrítica. Este defecto se asocia por lo general con aleaciones, debido a la manera fraccionada en que ocurre la solidificación en esos metales.
- f) **Desgarre caliente** también llamado **agrietamiento caliente**, ocurre cuando el fundido se ve impedido de contraerse por un molde que no lo propicia durante las etapas finales de la solidificación, o en las primeras del enfriamiento después de solidificarse. El defecto se manifiesta como la separación del metal (de ahí los términos **desgarre** y **agrietamiento**) en un punto de esfuerzo grande a la tensión ocasionado por la incapacidad del metal de contraerse en forma natural. En la fundición con arena y otros procesos con moldes desechables, se evita haciendo que el molde sea colapsable. En los procesos con molde permanente, el desgarre caliente disminuye si se retira la pieza del molde inmediatamente después de la solidificación.

Algunos defectos se relacionan con el uso de moldes de arena, y por ello ocurren sólo en los fundidos con arena. En menor grado, otros procesos con moldes desechables también son susceptibles de provocar estos problemas. En la figura 11.23 se ilustran los defectos que ocurren sobre todo en la fundición con arena, y se describen en seguida:

- a) **Sopladura** es un defecto que consiste en una cavidad de gas en forma de globo, ocasionada por la liberación de gases del molde durante el vertido. Ocurre en o cerca de la

FIGURA 11.23 Defectos comunes en los fundidos con arena: a) sopladura, b) agujeros de pasador, c) lavado de arena, d) costras, e) penetración, f) desplazamiento del molde, g) desplazamiento del núcleo y h) agrietamiento del molde.



superficie del fundido, cerca de la parte superior de éste. Las causas habituales son baja permeabilidad, mala ventilación y contenido de humedad alto del molde de arena.

- b) **Agujeros de pasador** también los ocasiona la liberación de gases durante el vertido y consisten en muchas cavidades pequeñas por gases formadas en o ligeramente debajo de la superficie del fundido.
- c) **Lavado de arena** es una irregularidad en la superficie del fundido que se genera por la erosión del molde de arena durante el vertido; el contorno de la erosión se forma en la superficie de la pieza fundida final.
- d) **Costras** son áreas rugosas en la superficie del fundido debido a incrustaciones de arena y metal. Las ocasionan porciones de la superficie del molde que se desprenden durante la solidificación y quedan incrustadas en la superficie del fundido.
- e) **Penetración** se refiere a un defecto de la superficie que ocurre cuando la fluidez del metal líquido es alta y penetra en el molde de arena o núcleo de arena. Una vez solidificado, la superficie del fundido consiste en una mezcla de granos de arena y metal. La compactación estrecha del molde de arena ayuda a disminuir esta condición.
- f) **Desplazamiento del molde** se refiere a un defecto ocasionado por el movimiento lateral de la capucha del molde en relación con la base, lo que da por resultado un escalón en el producto fundido, en la línea de separación.
- g) **Desplazamiento del núcleo** es similar al del molde, pero es el núcleo el que se mueve, y por lo general su desplazamiento es vertical. El desplazamiento del núcleo y molde es ocasionado por la flotación del metal fundido (véase la sección 11.1.3).
- h) **Agrietamiento del molde** ocurre cuando la resistencia del molde es insuficiente y se presenta una grieta, en la que entra metal líquido y forma una “rebaba” en el fundido final.

Métodos de inspección Los procedimientos de inspección en una fundidora incluyen los siguientes: 1) inspección visual para detectar defectos obvios tales como vacíos, cierres fríos y defectos superficiales severos; 2) mediciones dimensionales para garantizar que se cumple con las tolerancias, y 3) pruebas metalúrgicas, químicas, físicas y de otro tipo, relacionadas con la calidad inherente del metal que se funde [5]. Las pruebas de la categoría 3 incluyen: a) pruebas de presión, para localizar fugas en el fundido; b) métodos radiográficos, pruebas de partículas magnéticas, uso de penetradores fluorescentes y pruebas supersónicas, para detectar defectos superficiales o internos en el fundido; y c) pruebas mecánicas para determinar propiedades tales como resistencia a la tensión y dureza. Si los defectos que se descubren no son demasiado serios, con frecuencia es posible salvar el fundido por medio de soldadura, esmerilado u otros métodos de rescate con los que el cliente esté de acuerdo.

11.6 LOS METALES PARA FUNDICIÓN

La mayoría de fundidos comerciales están hechos con aleaciones y no con metales puros. Por lo general, las aleaciones son más fáciles de fundir y las propiedades del producto resultante son mejores. Las aleaciones de fundición se clasifican así: 1) ferrosas o 2) no ferrosas. La categoría de las ferrosas se subdivide en hierro colado y acero fundido.

Aleaciones ferrosas de fundición: hierro colado El hierro fundido es el más importante de todas las aleaciones para fundición (véase la nota histórica: 11.3). El peso en toneladas de las fundiciones hechas con hierro es varias veces el de todos los demás metales combinados. Hay varios tipos de hierro colado: 1) hierro colado gris, 2) hierro nodular, 3) hierro colado blanco, 4) hierro maleable y 5) hierros colados de aleación (véase la sección 6.2.4). Las temperaturas comunes de vertido para el hierro colado son alrededor de 1 400 °C (2 500 °F), lo que depende de su composición.

Nota histórica 11.3 *Primeros productos de hierro fundido.*

Durante los primeros siglos que se practicó la fundición, se prefería al bronce y al latón por sobre el hierro como metales para fundir. El hierro era más difícil de fundir, debido a sus temperaturas de fusión más elevadas y a la falta de conocimiento de su metalurgia. Asimismo, había poca demanda de productos de hierro fundido. Todo esto cambió al comenzar los siglos *xvi* y *xvii*.

El arte de fundir con arena al hierro llegó a Europa procedente de China, donde se fundía en moldes de arena hacía más de 2 500 años. En 1550, se fundieron en Europa los primeros cañones de hierro. Las balas para estas armas se fabricaron de hierro colado alrededor de 1568. Las armas y sus proyectiles crearon una demanda grande de hierro colado. Pero estos artículos eran para uso militar, no civil. Dos productos de hierro colado que fueron significativos para el público general fueron la estufa y el tubo de agua.

Un producto tan poco espectacular como pueda parecer hoy, la estufa de hierro colado, trajo confort, salud y mejora de las condiciones de vida para mucha gente en Europa y el continente americano. Durante el siglo *xviii*, la manufactura

de estufas de hierro colado era una de las industrias más grandes y rentables en ambos continentes. El éxito comercial de la fabricación de estufas se debió a la gran demanda del producto, y al arte y tecnología de la fundición de hierro que se habían desarrollado para producirlo.

El tubo de agua de hierro colado fue otro producto que disparó el crecimiento de esa industria. Hasta el advenimiento de los tubos de hierro colado, se habían probado diferentes métodos para llevar agua en forma directa a los hogares y talleres. Incluso tubos de madera huecos (que se rompían rápido), de plomo (demasiado caros) y trincheras abiertas (susceptibles de contaminarse). El desarrollo del proceso de fundir hierro proveyó la capacidad de fabricar secciones de tubo para agua a un costo relativamente bajo, en Francia, al comenzar 1664, y después en otras partes de Europa. Al iniciar el siglo *xix*, en Inglaterra se instalaban muchas líneas de tubo de hierro colado para conducir agua y gas. La primera instalación significativa de tubos de agua en Estados Unidos ocurrió en Filadelfia, en 1817, con el empleo de tubería importada de Inglaterra.

Aleaciones ferrosas de fundición: acero Las propiedades mecánicas del acero lo hacen un material atractivo para la ingeniería (véase la sección 6.2.3), y la capacidad de crear formas complejas hace que la fundición sea un proceso llamativo. Sin embargo, las fundidoras que se especializan en acero enfrentan dificultades grandes. En primer lugar, el punto de fusión del acero es considerablemente más alto que el de la mayoría de metales que es común fundir. El rango de solidificación para aceros al bajo carbono (véase la figura 6.4) comienza apenas por debajo de 1 540 °C (2 800 °F). Esto significa que la temperatura que se requiere para verter acero es muy alta, cerca de 1 650 °C (3 000 °F). A esas temperaturas tan elevadas el acero tiene una química muy reactiva. Se oxida con rapidez, por lo que deben emplearse procedimientos especiales durante la fundición y vertido a fin de aislar al metal derretido del aire. Asimismo, el acero fundido tiene relativamente poca fluidez, y esto limita el diseño de secciones delgadas en componentes fundidos de acero.

Son varias las características de los fundidos de acero que hacen benéfico el esfuerzo de resolver estos problemas. La resistencia a la tensión es mayor que la de la mayoría de metales para fundición, y es de 410 MPa (60 000 lb/in²), aproximadamente [7]. Los fundidos de acero tienen mejor tenacidad que la mayor parte de otras aleaciones fundidas. Las propiedades de los fundidos de acero son isotrópicas; su resistencia es virtualmente la misma en todas direcciones. Por el contrario, las piezas conformadas mecánicamente (por ejemplo, rolado, forjado) presentan propiedades que varían con la dirección. En función de los requerimientos del producto, puede ser deseable que el comportamiento de un material sea isotrópico. Otra ventaja de los fundidos de acero es la facilidad con que se sueldan. Se sueldan sin que haya pérdida significativa de su resistencia, para reparar el fundido o para fabricar estructuras con otros componentes de acero.

Aleaciones no ferrosas de fundición Los metales no ferrosos para fundición incluyen aleaciones de aluminio, magnesio, cobre, estaño, zinc, níquel y titanio (véase la sección 6.3). Las **aleaciones de aluminio** por lo general se consideran muy susceptibles de fundirse. El punto de fusión del aluminio puro es de 660 °C (1 220 °F), por lo que las temperaturas de vertido de las aleaciones fundidas de aluminio son bajas en comparación con el hierro colado y el acero. Sus propiedades las hacen atractivas para los fundidos: poco peso, rango amplio de propiedades de resistencia que se logran por medio de tratamiento térmico y facilidad de maquinado. Las **aleaciones de magnesio** son las más ligeras de todos los

metales para fundición. Otras propiedades incluyen resistencia a la corrosión, así como buenas resistencias a peso y rigidez a peso.

Las **aleaciones de cobre** incluyen bronce, latón y aluminio-bronce. Las propiedades que los hacen atractivos son la resistencia a la corrosión, apariencia atractiva y buenas cualidades para servir como boquillas. El costo elevado del cobre es una limitación en el uso de sus aleaciones. Las aplicaciones incluyen juntas para tubos, aspas de propelas marinas, componentes de bombas y joyería.

El estaño tiene el punto de fusión más bajo de los metales para fundición. Las **aleaciones basadas en estaño** por lo general son fáciles de fundir. Tiene buena resistencia a la corrosión pero mala resistencia mecánica, lo que limita sus aplicaciones a jarras de peltre y productos similares que no requieren mucha resistencia. Las **aleaciones de zinc** se emplean comúnmente en la fundición con troquel. El zinc tiene un punto de fusión bajo y buena fluidez, lo que lo hace muy susceptible de ser fundido. Su principal desventaja es que tiene poca resistencia al agrietamiento, por lo que sus fundidos no pueden sujetarse a esfuerzos grandes prolongados.

Las **aleaciones de níquel** tienen buena resistencia al calor y a la corrosión, lo que las hace apropiadas para aplicaciones de temperaturas altas tales como motores a chorro y componentes de cohetes, escudos de calor y otros productos similares. Las aleaciones de níquel también tienen un punto de fusión alto y no son fáciles de fundir. Las **aleaciones de titanio** para fundición son resistentes a la corrosión y poseen razones elevadas de resistencia a peso. Sin embargo, el titanio tiene un punto de fusión alto, poca fluidez y propensión a oxidarse a temperaturas elevadas. Estas propiedades hacen difícil fundirlo, a él y a sus aleaciones.

11.7 CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO DEL PRODUCTO

Si el diseñador del producto elige a la fundición como el proceso de manufactura principal de cierto componente, entonces deben seguirse ciertos lineamientos para facilitar la producción de la pieza y evitar muchos de los defectos que se enumeran en la sección 11.5. A continuación se presentan algunos de los lineamientos importantes y consideraciones para la fundición.

- **Sencillez geométrica.** Aunque la fundición es un proceso que puede usarse para producir piezas de forma compleja, la simplificación del diseño de ésta mejorará su facilidad para fundirse. Evitar complejidades innecesarias simplifica la fabricación del molde, reduce la necesidad de núcleos y mejora la resistencia del fundido.
- **Esquinas.** Deben evitarse las esquinas y ángulos agudos, porque son fuentes de concentración de esfuerzos y ocasionan agrietamientos calientes y fisuras en el fundido. Deben diseñarse bisels generosos para las esquinas internas, y las aristas agudas deben suavizarse.
- **Espesores de sección.** Los espesores de la sección deben ser uniformes a fin de evitar cavidades por fugas. Las secciones gruesas crean **puntos calientes** en el fundido, debido a que un volumen mayor requiere más tiempo para solidificarse y enfriarse. Éstas son ubicaciones probables de las cavidades por fuga. La figura 11.24 ilustra el problema y ofrece algunas soluciones posibles.
- **Inclinación.** Las secciones de la pieza que se proyectan en el interior del molde deben tener una inclinación o desviación, como se define en la figura 11.25. En la fundición con moldes desechables, el propósito de esa inclinación es ayudar a extraer del molde la pieza. Debe permitirse desviaciones similares si se emplean núcleos sólidos en el

FIGURA 11.24 a) Una sección gruesa en la intersección puede dar como resultado una cavidad por fuga. Las soluciones incluyen b) el rediseño para disminuir el espesor y c) usar un núcleo.

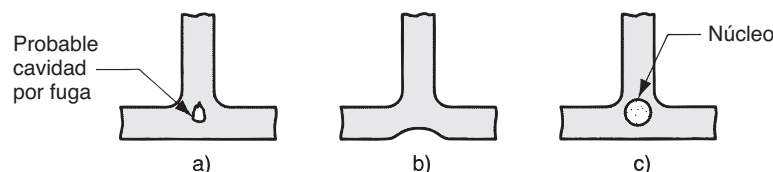
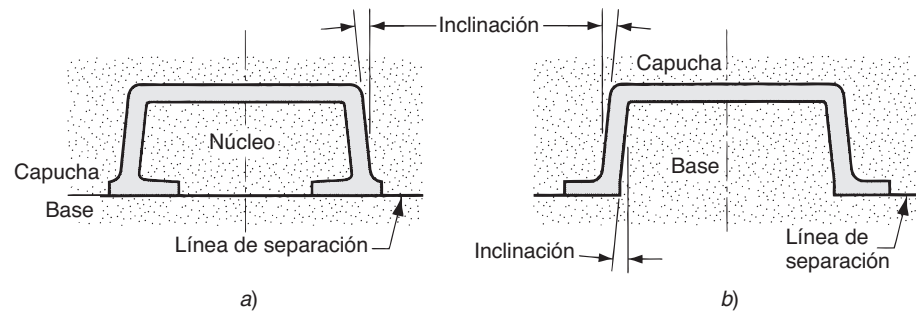


FIGURA 11.25 Cambio del diseño para eliminar la necesidad de utilizar un núcleo; a) diseño original y b) rediseño.



proceso de fundido. Para la fundición con moldes de arena la inclinación que se requiere necesita ser de sólo 1°, y de 2° a 3° para procesos con moldes permanentes.

- **Uso de núcleos.** Ciertos cambios pequeños en el diseño de la pieza reducen la necesidad de utilizar núcleos, como se ilustra en la figura 11.25.
- **Tolerancias dimensionales.** Hay diferencias significativas en la exactitud dimensional que puede alcanzarse en los fundidos, lo que depende del proceso que se utilice. En la tabla 11.2 se presenta una recopilación de tolerancias comunes para piezas con diferentes procesos y metales de fundición.
- **Acabado de las superficies.** La rugosidad superficial común que se logra en la fundición con arena es de alrededor de $6\ \mu\text{m}$ ($250\ \mu\text{-in}$). De manera similar, con los moldes de cascarón se obtiene malos acabados, en tanto que los moldes de yeso y la fundición por revestimiento producen valores mucho mejores de rugosidad: $0.75\ \mu\text{m}$ ($30\ \mu\text{-in}$). Entre los procesos con molde permanente es notable la fundición con troquel debido a los buenos acabados de superficie que produce, alrededor de $1\ \mu\text{m}$ ($40\ \mu\text{-in}$).
- **Tolerancias de maquinado.** En muchos procesos de fundición las tolerancias que pueden alcanzarse son insuficientes para satisfacer las necesidades de funcionamiento en muchas aplicaciones. La fundición con arena es el ejemplo más notable de esta deficiencia. En estos casos, deben maquinarse piezas del fundido para darles las dimensiones requeridas. Casi todos los fundidos con arena deben maquinarse hasta cierto grado a fin de que la pieza sea funcional. Por tanto, en ésta se deja material adicional, llamado **tolerancia de maquinado**, para maquinar esas superficies donde sea necesario. Las tolerancias comunes de maquinado para fundidos con arena varían entre 1.5 mm y 3 mm ($1/16\ \text{in}$ y $1/4\ \text{in}$).

TABLA 11.2. Tolerancias dimensionales comunes para los diferentes procesos de fundición y metales.

Proceso de fundido	Tamaño de la pieza	Tolerancia		Proceso de fundido	Tamaño de la pieza	Tolerancia	
		mm	in			mm	in
Fundición con arena				Molde permanente			
Aluminio ^a	Pequeño	±0.5	±0.020	Aluminio ^a	Pequeño	±0.25	±0.010
Hierro colado	Pequeño	±1.0	±0.040	Hierro colado	Pequeño	±0.8	±0.030
	Grande	±1.5	±0.060	Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.4	±0.015
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.4	±0.015	Acero	Pequeño	±0.5	±0.020
Acero	Pequeño	±1.3	±0.050	Fundición con troquel			
	Grande	±2.0	±0.080	Aluminio ^a	Pequeño	±0.12	±0.005
Moldes en cascarón				Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.12	±0.005
Aluminio ^a	Pequeño	±0.25	±0.010	Revestimiento			
Hierro colado	Pequeño	±0.5	±0.020	Aluminio ^a	Pequeño	±0.12	±0.005
Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.4	±0.015	Hierro colado	Pequeño	±0.25	±0.010
Acero	Pequeño	±0.8	±0.030	Aleaciones de cobre	Pequeño	±0.12	±0.005
Molde de yeso	Pequeño	±0.12	±0.005	Acero	Pequeño	±0.25	±0.010
	Grande	±0.4	±0.015				

Recopilada de las referencias [5], [12] y otras.

^a Los valores para el aluminio también se aplican para el magnesio.

REFERENCIAS

- [1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L. *Manufacturing Processes*. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.
- [2] Beeley, P. R. *Foundry Technology*. Newnes-Butterworths, Londres, 1972.
- [3] Datsko, J. *Material Properties and Manufacturing Processes*. John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1966.
- [4] Flinn, R. A. *Fundamentals of Metal Casting*. American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaine, Ill., 1987.
- [5] Heine, R. W., Loper, Jr., C. R. y Rosenthal, C. *Principles of Metal Casting*, 2a. ed. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1967.
- [6] Kotzin, E. L., *Metalcasting & Molding Processes*. American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1981.
- [7] *Metals Handbook*, 9a. ed., vol. 15: *Casting*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1988.
- [8] Mikelonis, P. J. (ed.). *Foundry Technology*. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1982.
- [9] Mueller, B. "Investment Casting Trends," *Advanced Materials & Processes*, marzo de 2005, pp. 30-32.
- [10] Niebel, B. W., Draper, A. B., Wysk, R. A. *Modern Manufacturing Processes Engineering*. McGraw-Hill Book Co., Nueva York, 1989.
- [11] Simpson, B. L. *History of the Metalcasting Industry*. American Foundrymen's Society, Inc., Des Plaines, Ill., 1997.
- [12] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, 4a. ed. Vol. II: *Forming*. Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich., 1984, Ch. 16.

PREGUNTAS DE REPASO

- 11.1. Mencione las dos categorías básicas de los procesos de fundición.
- 11.2. Existen varios tipos de modelos que se usan en el moldeo con arena. ¿Cuál es la diferencia entre un modelo deslizante y otro de placa ajustada?
- 11.3. ¿Qué es una corona?
- 11.4. ¿Qué propiedades determinan la calidad de un molde con arena para la fundición con ésta?
- 11.5. ¿Cuál es el proceso de Antioquia?
- 11.6. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición con un molde permanente al vacío y el moldeo al vacío?
- 11.7. ¿Cuáles son los metales más comunes que se emplean en la fundición con troquel?
- 11.8. ¿Cuáles máquinas de fundición con troquel tienen por lo general una tasa de producción más elevada, las de cámara fría o las de cámara caliente, y por qué?
- 11.9. ¿Qué es la rebaba, en la fundición con troquel?
- 11.10. ¿Cuál es la diferencia entre la fundición centrífuga real y la semicentrífuga?
- 11.11. ¿Qué es una cubilote?
- 11.12. ¿Cuáles son algunas de las operaciones que se requieren en la fundición con arena, después de que el fundido se retira del molde?
- 11.13. ¿Cuáles son algunos de los defectos generales que se encuentran en los procesos de fundición? Mencione y describa tres, en forma breve.

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 27 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 11.1. ¿Cuál de los procesos de fundición siguientes es el que se usa más?: a) fundición centrífuga, b) fundición con troquel, c) fundición por revestimiento, d) fundición con arena o e) fundición en cascarón.
- 11.2. En la fundición con arena, ¿el tamaño volumétrico del modelo es a) mayor que, b) del mismo tamaño que o c) más pequeño que, la pieza fundida?
- 11.3. ¿Cuál de las siguientes composiciones tiene la arena de sílice?: a) Al_2O_3 , b) SiO , c) SiO_2 o d) $SiSO_4$.
- 11.4. ¿Por cuál de las razones siguientes recibe su nombre un molde verde? a) el molde es de color verde, b) la humedad que contiene el molde, c) el molde está curado o d) el molde está seco.
- 11.5. Dado que W_m = peso del metal fundido desplazado por un núcleo, y W_c = peso del núcleo, cuál de las siguientes es la fuerza de flotación: a) fuerza hacia abajo = $W_m + W_c$, b) fuerza hacia abajo = $W_m - W_c$, c) fuerza hacia arriba = $W_m + W_c$, d) fuerza hacia arriba = $W_m - W_c$.
- 11.6. ¿Cuáles de los siguientes procesos de fundición son operaciones con moldes desechables? (hay cuatro respuestas correctas): a) fundición centrífuga, b) fundición con troquel, c) fundición por revestimiento, d) fundición a baja presión, e) fundición con arena, f) moldeo en cascarón, g) fundición en hueco y h) moldeo al vacío.
- 11.7. ¿Cuál de los siguientes describe mejor al moldeo en cascarón?: a) operación de fundición en la que el metal derretido

se vierte después de que se ha solidificado una concha delgada en el molde, *b*) proceso de fundición en el que el molde es un cascarón delgado de arena aglutinada por una resina termofija, *c*) operación de fundición con arena en la que el modelo es un cascarón en vez de una forma sólida o *d*) operación de fundición que se emplea para fabricar conchas marinas artificiales.

- 11.8. ¿Con cuál de los nombres siguientes se conoce también a la fundición por revestimiento?: *a*) moldeo de recuperación rápida, *b*) proceso de molde completo, *c*) proceso de espuma perdida, *d*) proceso de modelo perdido o *e*) proceso de cera perdida.
- 11.9. En la fundición con moldes de yeso, ¿con cuál de los materiales siguientes está hecho el molde?: *a*) Al_2O_3 , *b*) $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$, *c*) SiC , *d*) SiO_2 .
- 11.10. ¿Cuál de los siguientes califica como un proceso de fundición de precisión? (dos respuestas correctas): *a*) fundición de lingote, *b*) fundición por revestimiento, *c*) fundición con molde de yeso, *d*) fundición en arena y *e*) moldeo en cascarón.
- 11.11. ¿Cuáles de los procesos de fundición siguientes son operaciones con molde permanente? (tres respuestas correctas): *a*) fundición centrífuga, *b*) fundición con troquel, *c*) proceso de poliestireno expandido, *d*) fundición con arena, *e*) moldeo con concha, *f*) fundición en hueco y *g*) moldeo al vacío.

- 11.12. ¿Cuál de los metales siguientes sería común emplear en la fundición con troquel? (tres respuestas correctas): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero, *d*) estaño, *e*) tungsteno y *f*) zinc.
- 11.13. ¿Cuáles de las siguientes son ventajas que tiene la fundición con troquel sobre la fundición con arena? (cuatro respuestas mejores): *a*) mejor acabado de la superficie, *b*) tolerancias más estrechas, *c*) metales con temperatura de fusión más elevada, *d*) tasas de producción más altas, *e*) es posible fundir piezas más grandes y *f*) el molde puede volver a usarse.
- 11.14. ¿Los cubilotes son hornos que se emplean para fundir a cuál de los metales siguientes? (una respuesta es la mejor): *a*) aluminio, *b*) hierro colado, *c*) acero o *d*) zinc.
- 11.15. ¿Cuál de los defectos siguientes de la fundición corresponde a un vacío, *a*) quedan atrapados en el fundido glóbulos de metal, *b*) el metal no se vierte en forma apropiada en el bebedero, *c*) el metal se solidifica antes de llenar la cavidad, *d*) microporosidad y *e*) formación de un “rechupe”?
- 11.16. ¿Cuál de los siguientes metales de fundición es el de mayor importancia comercial?: *a*) el aluminio y sus aleaciones, *b*) bronce, *c*) hierro colado, *d*) acero fundido o *e*) aleaciones de zinc.

PROBLEMAS

Fuerza de flotación

- 11.1. Un fundido de aleación de aluminio-cobre se fabrica con un molde de arena que emplea un núcleo de arena que pesa 20 kg. Determine la fuerza de flotación, en newtons, que tiende a elevar al núcleo durante el vertido.
- 11.2. Un núcleo de arena se localiza dentro de una cavidad de un molde que tiene un volumen de 157.0 in^3 . Se emplea para fundir la carcasa de hierro de una bomba. Calcule la fuerza de flotación que tenderá a levantar al núcleo durante el vertido.
- 11.3. Se emplean comprimidos para dar apoyo a un núcleo de arena que está en la cavidad de un molde del mismo material. El diseño de los comprimidos y la manera en que se colocan en la superficie de la cavidad del molde permite que cada uno de ellos soporte una fuerza de 10 libras. Se colocan varios comprimidos debajo del núcleo para darle apoyo antes de verter; y varios se sitúan arriba de él para oponerse a la fuerza de flotación durante el vertido. Si el volumen del núcleo es de 325 in^3 , y el metal que se vierte es latón, determine el número mínimo de comprimidos que debe colocarse *a*) abajo del núcleo, *b*) arriba del núcleo.
- 11.4. Un núcleo de arena que se usa para conformar las superficies internas de un fundido de acero experimenta una fuerza de flotación de 23 kg. El volumen de la cavidad del molde que forma la superficie exterior del fundido es de $5\,000 \text{ cm}^3$. ¿Cuál es el peso del fundido final? Ignore las consideraciones acerca de las contracciones.

Fundición centrífuga

- 11.5. Una operación de fundición centrífuga real horizontal va a emplearse para fabricar tubería de cobre. Las longitudes serán de 1.5 m, con diámetro exterior de 15.0 cm y con diámetro interior de 12.5 cm. Si la velocidad rotacional del tubo es de 1 000 rev/min, determine el factor G.
- 11.6. Una operación de fundición centrífuga real se llevará a cabo con una configuración horizontal, para fabricar secciones de tubos de hierro. Las secciones tendrán una longitud de 42.0 in, el diámetro exterior es de 8.0 in y el espesor de la pared es de 0.50 in. Si la velocidad rotacional del tubo es de 500 rev/min, determine el factor G. ¿Es probable que la operación vaya a tener éxito?
- 11.7. Un proceso de fundición centrífuga real horizontal se emplea para fabricar boquillas de latón de las dimensiones siguientes: longitud de 10 cm, diámetro exterior de 15 cm y diámetro interior de 12 cm. *a*) Determine la velocidad rotacional que se requiere a fin de obtener un factor G de 70. *b*) Cuando opera a esta velocidad, ¿cuál es la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) que el metal fundido impone sobre la pared interior del molde?
- 11.8. Una operación de fundición centrífuga real se lleva a cabo en forma horizontal para fabricar secciones de tubo de cobre de diámetro grande. Los tubos tienen una longitud de 1.0 m, diámetro de 0.25 m y espesor de pared de 15 mm. *a*) Si la velocidad de rotación del tubo es de 700 rev/min, determine el factor G sobre el metal derretido. *b*) ¿La velocidad de rotación es suficiente para evitar la “lluvia”?

- c) ¿Qué volumen de metal fundido debe verterse en el molde para hacer el fundido, si se toman en cuenta las pérdidas por solidificación y la contracción después de la solidificación?
- 11.9. Si se realizara una operación de fundición centrífuga real en una estación espacial que circula alrededor de la Tierra, ¿cómo afectaría al proceso la falta de peso?
- 11.10. Se emplea un proceso de fundición centrífuga real horizontal para hacer anillos de aluminio con las dimensiones siguientes: longitud de 5 cm, diámetro exterior de 65 cm y diámetro interior de 60 cm. *a)* Determine la velocidad rotacional que dará un factor G de 60. *b)* Suponga que el anillo estuviera hecho de acero en vez de aluminio. Si en la operación de fundido del acero se empleara la velocidad rotacional que se calculó en el inciso *a)*, determine el factor G y *c)* la fuerza centrífuga por metro cuadrado (Pa) sobre la pared del molde. *d)* ¿Esta velocidad rotacional daría como resultado una operación exitosa?
- 11.11. Para el anillo de acero del problema anterior, 11.10b), determine el volumen de metal fundido que debe verterse al molde, dado que la pérdida de líquido es de 0.5% y las de solidificación y contracción sólida después de la solidificación pueden determinarse con la tabla 10.1.
- 11.12. Se usa un proceso de fundición centrífuga real horizontal para fabricar tubo de plomo para plantas químicas. El tubo tiene una longitud de 0.5 m, diámetro exterior de 70 mm y espesor de pared de 6.0 mm. Determine la velocidad de rotación que dará un factor G de 60.
- 11.13. Se emplea un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer secciones de tubo con longitud de 10.0 in y diámetro exterior de 6.0 in. El diámetro interior del tubo es de 5.5 in en la parte superior y 5.0 in en la inferior. ¿A qué velocidad debe girar el tubo durante la operación a fin de que se cumplan las especificaciones.
- 11.14. Un proceso de fundición centrífuga real vertical se emplea para producir boquillas que miden 200 mm de largo y 200 mm de diámetro exterior. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 500 rpm, determine el diámetro interior en la parte superior de la boquilla si el diámetro interior en la base es de 150 mm.
- 11.15. Se usa un proceso de fundición centrífuga real vertical para hacer tubos de latón que miden 15.0 in de largo y cuyo diámetro exterior es de 8.0 in. Si la velocidad rotacional durante la solidificación es de 1 000 rpm, determine los diámetros interiores en las partes superior e inferior del tubo si el peso total del fundido final es de 75.0 libras.

Defectos y consideraciones de diseño

- 11.16. La carcasa de cierto producto de maquinaria está hecho con dos componentes, ambos fundidos de aluminio. El componente más grande tiene la forma de lavabo y el segundo es una cubierta plana que se adjunta al primero para crear un espacio cerrado para las piezas de la maquinaria. Se utiliza fundición con arena para producir los dos fundidos, los cuales están llenos de defectos en forma de vacíos y cierres fríos. El supervisor se queja de que las piezas son demasiado delgadas y afirma que ésta es la razón de los defectos. Sin embargo, se sabe que en otras fundidoras se elaboran con éxito los mismos componentes. ¿Qué otra explicación podría haber para los defectos?
- 11.17. Un fundido en arena, de acero, grande, presenta los signos característicos del defecto de penetración, superficie que consiste en una mezcla de arena y metal. *a)* ¿Qué medidas pueden tomarse para corregir el defecto? *b)* ¿Qué otros defectos posibles podrían resultar si se implantara cada una de esas medidas?

Parte IV

Procesamiento de partículas para metales y cerámicos

16

METALURGIA DE POLVOS

CONTENIDO DEL CAPÍTULO

- 16.1 Características de los polvos en ingeniería
 - 16.1.1 Características geométricas
 - 16.1.2 Otras características
- 16.2 Producción de polvos metálicos
 - 16.2.1 Atomización
 - 16.2.2 Otros métodos de producción
- 16.3 Prensado convencional y sinterizado
 - 16.3.1 Combinación y mezclado de polvos
 - 16.3.2 Compactación
 - 16.3.3 Sinterizado
 - 16.3.4 Operaciones secundarias
- 16.4 Alternativas de prensado y técnicas de sinterizado
 - 16.4.1 Prensado isostático
 - 16.4.2 Moldeo por inyección de polvos
 - 16.4.3 Laminado de polvos, extrusión y forjado
 - 16.4.4 Combinación de prensado y sinterizado
 - 16.4.5 Sinterizado en fase líquida
- 16.5 Materiales y productos para metalurgia de polvos
 - 16.5.1 Materiales para la metalurgia de polvos
 - 16.5.2 Productos de la metalurgia de polvos
- 16.6 Consideraciones de diseño en metalurgia de polvos
 - 16.6.1 Sistema de clasificación de piezas
 - 16.6.2 Lineamientos para el diseño de piezas en metalurgia de polvos

En esta parte del libro se estudia el procesamiento de metales y cerámicas que se encuentran en la forma de polvos, partículas sólidas muy pequeñas. En el caso de las cerámicas tradicionales, los polvos se forman aplastando y moliendo materiales que comúnmente se encuentran en la naturaleza, tales como los minerales de silicato (arcilla) y el cuarzo. En el caso de los metales y los nuevos materiales cerámicos (sección 7.3), los polvos se producen mediante una gran variedad de procesos industriales. En dos capítulos se estudiarán dichos procesos, así como los métodos que se utilizan para formar productos a partir de estos materiales: el capítulo 16 trata acerca de la metalurgia de polvos, mientras que el capítulo 17 estudia el procesamiento de cerámicas a nivel partícula.

La metalurgia de polvos (PM, por sus siglas en inglés) es una tecnología de procesamiento de metales en la que se producen piezas a partir de polvos metálicos. En la secuencia usual de producción de la PM, los polvos se comprimen para darles la forma deseada y luego se calientan para ocasionar la unión de partículas en una masa dura y rígida. La compresión, llamada **prensado**, se realiza en una máquina tipo prensa cuyas herramientas se diseñan específicamente para la pieza que se va a producir. Las herramientas, que consisten generalmente en un troquel y uno o más punzones, pueden ser costosas y es por esto que la PM es más adecuada para niveles medios o altos de producción. El tratamiento térmico, llamado **sinterizado**, se realiza a una temperatura por debajo del punto de fusión del metal. El video clip titulado Metalurgia de Polvos ilustra la tecnología de producción de PM. Las consideraciones que hacen de la metalurgia de polvos un proceso importante desde el punto de vista comercial y tecnológico son las siguientes:

- Las piezas de PM se pueden producir masivamente en **forma neta** o **casi neta**, eliminando o reduciendo la necesidad de procesos posteriores.
- Los procesos de la PM implican muy poco desperdicio de material: cerca de 97% de los polvos iniciales se convierten en producto. Esto se compara favorablemente con los procesos de fundición en los cuales las coladas, alimentadores y mazarotas son material de desperdicio en cada ciclo de producción.
- Debido a la naturaleza del material inicial en la PM, se pueden hacer piezas con un nivel específico de porosidad. Esta característica se presta a la producción de piezas de metal poroso, como rodamientos y engranes impregnados con aceite, así como filtros.
- Ciertos metales que son difíciles de fabricar por otros métodos se pueden formar por metalurgia de polvos. El tungsteno es un ejemplo: los filamentos de tungsteno que se usan en las lámparas incandescentes se fabrican con tecnología de PM.
- Ciertas combinaciones de aleaciones metálicas y cermets que no se pueden producir por otros métodos se pueden hacer por PM.
- La PM se compara favorablemente con la mayoría de los procesos de fundición en lo que se refiere al control dimensional de los productos. Las tolerancias rutinarias que se pueden lograr son de ± 0.13 mm (± 0.005 in).
- Los métodos de producción de PM se pueden automatizar para hacer más económica la operación.

Hay limitaciones y desventajas asociadas con el procesamiento de PM. Éstas incluyen: 1) alto costo del equipo y de las herramientas, 2) alto costo de los polvos metálicos, 3) dificultades en el almacenamiento y manejo de polvos metálicos (tales como degradación del metal a través del tiempo y riesgos de incendio del metal en polvo fino), 4) limitaciones en la forma de las piezas, debido a que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección lateral dentro del troquel durante el prensado, y las tolerancias deben permitir que la pieza pueda expulsarse del troquel después del prensado, y 5) las variaciones de la densidad del material a través de la pieza pueden ser un problema, especialmente para piezas de forma compleja.

Aunque se pueden producir piezas grandes hasta de 22 kg (50 lb), la mayoría de los componentes hechos por PM son menores de 2.2 kg (5 lb). Una colección típica de estas piezas se muestra en la figura 16.1. Las aleaciones de hierro, acero y aluminio constituyen el mayor tonelaje de metales que se usan en la PM. Otros metales incluyen cobre, níquel y metales refractarios como el molibdeno y el tungsteno. Los carburos metálicos como el carburo de tungsteno se incluyen frecuentemente dentro del campo de la metalurgia de polvos; sin embargo, como estos materiales son cerámicos, se estudiarán en el capítulo siguiente.

El desarrollo del campo moderno de la metalurgia de polvos se remonta al siglo XIX (véase nota histórica 16.1). El alcance de la tecnología moderna incluye no solamente la

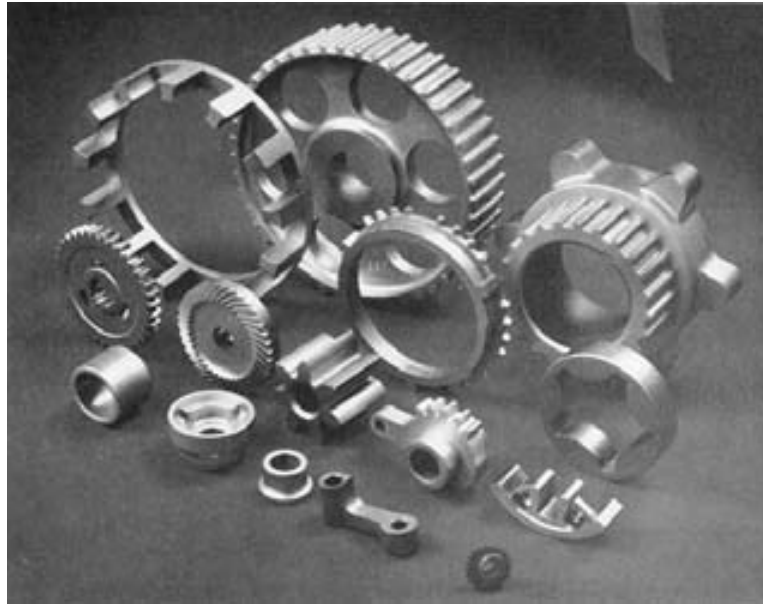


FIGURA 16.1 Una colección de piezas fabricadas mediante metalurgia de polvos (cortesía de Dorst America, Inc.).

producción de piezas, sino también la preparación de los polvos iniciales. El éxito en la metalurgia de polvos depende en gran parte de las características de los polvos iniciales; este tema se analizará en la sección 16.1. Las secciones siguientes describen la producción de polvos, el prensado y el sinterizado. Hay una correlación estrecha entre la tecnología de la PM y los aspectos del procesamiento de cerámicos (capítulo 17). En cerámica los materiales de partida son también polvos, así que los métodos para caracterizar los polvos están estrechamente relacionados con la PM. Varios de los métodos de formado son también similares.

Nota histórica 16.1 Metalurgia de polvos

Desde tiempos antiguos se ha usado polvos de metales como oro y cobre, así como algunos de los óxidos metálicos, con propósitos decorativos. Se usaban para decorar piezas de cerámica, como base de pinturas y cosméticos. Se cree que los egipcios usaban metalurgia de polvos para hacer herramientas desde fechas tan antiguas como el año 3000 a. C.

El campo moderno de la metalurgia de polvos data de los inicios del siglo XIX, al despertarse un gran interés por el platino. Alrededor de 1815, el inglés William Wollaston creó una técnica para preparar polvos de platino, compactarlos a alta presión y cocerlos (sinterizarlos) al rojo vivo. El proceso de Wollaston marca el principio de la metalurgia de polvos tal como se practica actualmente.

En 1870 se expidieron en Estados Unidos unas patentes de Gwynn relacionadas con rodamientos autolubricantes hechos por metalurgia de polvos. Él usó una mezcla de 99% de estaño pulverizado y 1% de petróleo, que mezclaba, calentaba y finalmente sometía a alta presión para elaborar la forma deseada dentro de la cavidad de un molde.

Hacia los primeros años del siglo XX, las lámparas incandescentes se habían convertido en un producto comercial importante. Se probó una serie de metales para los

filamentos, como carbono, circonio, vanadio y osmio, pero se concluyó que el tungsteno era el mejor material para estos filamentos. El problema era la dificultad de procesar el tungsteno debido a su alto punto de fusión y a sus propiedades únicas. En 1908 William Coolidge creó un procedimiento que hizo posible la producción de filamentos para lámparas incandescentes. En este procedimiento se usaba polvo fino de óxido de tungsteno (WO_3) que se reducía a polvo metálico, se prensaba en piezas compactas, se presinterizaba, se forjaba en caliente en barras redondas, se sinterizaban y finalmente se estiraban con el fin de formar alambre para filamentos. El proceso Coolidge se sigue usando hoy para producir los filamentos de los focos de luz incandescente.

En la década de 1920 se fabricaron herramientas de carburo cementado (WC-Co) mediante técnicas de metalurgia de polvos (véase nota histórica 7.2). A partir de la década 1930 se produjeron rodamientos autolubricantes. En las décadas 1960 y 1970 se produjeron en masa, particularmente en la industria automotriz, engranes y otros componentes mediante la metalurgia de polvos. Y en la década de 1980 se crearon piezas de metalurgia de polvos para motores de turbina para aviones.

16.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS POLVOS EN INGENIERÍA

Polvo es un sólido dividido en partículas finas. En esta sección se presentan las características de los polvos metálicos. Sin embargo, la revisión se aplica también a la mayoría de los polvos cerámicos.

16.1.1 Características geométricas

La forma de los polvos individuales se puede definir mediante los siguientes atributos: 1) tamaño de las partículas y su distribución, 2) forma y estructura interna de las partículas y 3) área superficial.

Tamaño de las partículas y su distribución El tamaño de las partículas se refiere a las dimensiones de los polvos individuales. Si la forma de la partícula es esférica, una sola dimensión es adecuada. Para otras formas, se necesitan dos o más dimensiones. Se dispone de varios métodos para obtener datos sobre el tamaño de las partículas. El método más común usa cribas de diferentes tamaños de malla. Se usa el término **número de malla** para referirse al número de aberturas por pulgada lineal de la criba. Un número de malla 200 significa que hay 200 aberturas por pulgada lineal. Como la malla es cuadrada, la cuenta es la misma en ambas direcciones, y el número total de aberturas por in² es $200^2 = 40\,000$. En consecuencia, un número alto de malla indica menor tamaño de partícula.

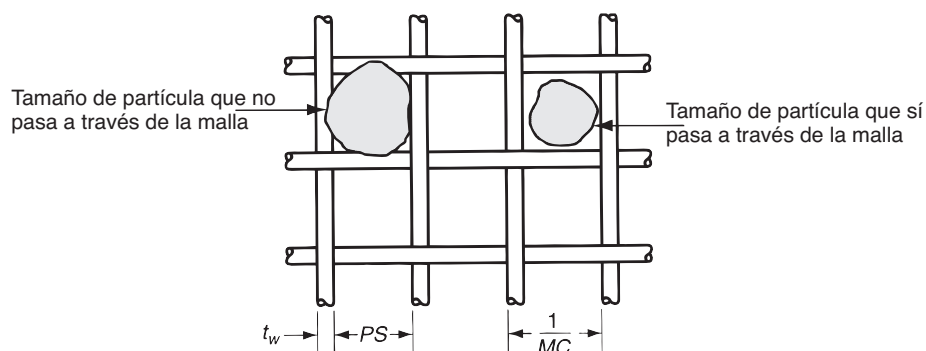
Las partículas se separan haciéndolas pasar a través de una serie de cribas de tamaños progresivamente menores de malla. Los polvos se colocan sobre una criba de un cierto número de malla y ésta se hace vibrar para que las partículas pequeñas que caben en las aberturas caigan a la siguiente criba. La segunda criba se vacía en la tercera y así sucesivamente, de manera que las partículas se seleccionan de acuerdo con su tamaño. Se puede designar a un cierto tamaño de polvo 230 por 200, lo cual indica que los polvos han pasado por la malla 200, pero no por la 230. Para simplificar la especificación, se dice que el tamaño de la partícula es de 200. El procedimiento para seleccionar los polvos por su tamaño se llama **clasificación**.

Las aberturas en la criba son menores que el recíproco del número de malla debido al espesor del alambre en la criba, como se ilustra en la figura 16.2. Suponiendo que la dimensión limitante de la partícula es igual a la abertura de la criba, se tiene

$$PS = \frac{1}{MC} - t_w \quad (16.1)$$

donde PS = tamaño de partícula, in; MC = número de malla, aberturas por in lineal; y t_w = grueso del alambre de la malla, in. La figura muestra cómo pasarían las partículas pequeñas a través de las aberturas, mientras que las grandes se quedarían retenidas. Las variaciones que ocurren en la selección de tamaños de partículas mediante cribado se deben a las diferencias en la forma de las partículas, al rango de tamaños entre los números sucesivos de malla y a las variaciones de tamaños de las aberturas dentro de un número dado

FIGURA 16.2 Malla de criba para seleccionar tamaños de partícula.



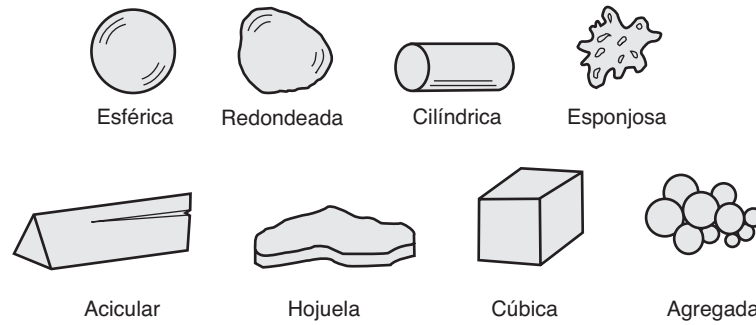


FIGURA 16.3 Varias formas posibles (ideales) de partícula en metalurgia de polvos.

de malla. Además, el método de cribado tiene un límite práctico superior de $MC = 400$ (aproximadamente) debido a la dificultad de hacer mallas tan finas y a la aglomeración de los polvos tan finos. Otros métodos para medir el tamaño de las partículas son por microscopía y técnicas de rayos X.

Los tamaños típicos de las partículas que se utilizan en la metalurgia de polvos convencional (comprimido y sinterizado) varían entre 25 y 300 μm (0.001 y 0.012 in).¹

El extremo alto de este rango corresponde a un número de malla de aproximadamente 65. El otro extremo es muy pequeño para poderse medir mediante el método de número de malla.

Forma y estructura interna de las partículas La forma de los polvos metálicos puede catalogarse en varios tipos; algunos de ellos se ilustran en la figura 16.3. Existen variaciones tanto en la forma de las partículas de una colección de polvos como en sus tamaños. Una manera simple y útil de medir la forma es la razón del aspecto, la razón de la dimensión máxima y la mínima de una partícula dada. La razón del aspecto para una partícula esférica es 1.0; sin embargo, para un grano acicular puede ser de 2 a 4. Se requieren técnicas microscópicas para determinar las características de la forma.

Cualquier volumen de polvos sueltos contendrá poros entre las partículas. Éstos se llaman **poros abiertos** porque son externos a las partículas individuales. Los poros abiertos son espacios dentro de los cuales puede penetrar un fluido, como agua, aceite o un metal fundido. Además hay **poros cerrados**, que son vacíos internos en la estructura de una partícula individual. La existencia de estos poros internos generalmente es mínima, y sus efectos, cuando existen, son menores; no obstante, pueden influir en las medidas de la densidad, como se verá posteriormente.

Área superficial Suponiendo que la forma de la partícula sea una esfera perfecta, su área A y su volumen V están dados por:

$$A = \pi D^2 \quad (16.2)$$

$$V = \frac{\pi D^3}{6} \quad (16.3)$$

donde D = diámetro de la partícula esférica, mm (in). La razón de área a volumen A/V para una esfera se determina entonces por:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{D} \quad (16.4)$$

En general, la razón de área a volumen puede expresarse para cualquier forma de partícula, esférica o no esférica, como sigue:

$$\frac{A}{V} = \frac{K_s}{D} \quad \text{o} \quad K_s = \frac{AD}{V} \quad (16.5)$$

¹ Estos valores son proporcionados por el profesor Wojciech Misiolek, mi colega en el Department of Materials Science and Engineering de la Universidad de Lehigh. La metalurgia de polvos es una de sus principales áreas de investigación.

donde K_s = factor de forma; y D en el caso general = diámetro de una esfera de volumen equivalente al de una partícula no esférica, mm (in). Entonces $K_s = 6.0$ para una esfera. Para formas de partícula diferentes a la esférica, $K_s > 6$.

De estas ecuaciones se puede inferir lo siguiente. A tamaños menores de partícula y factores de forma más altos (K_s), el área superficial será más alta para el mismo peso total de polvo metálico. Esto significa una mayor área donde puede ocurrir la oxidación. El tamaño más pequeño del polvo también conduce a una mayor aglomeración de las partículas, lo cual es una desventaja para la alimentación automática de los polvos. La razón para usar tamaños más pequeños de partículas es que suministran una contracción más uniforme y mejores propiedades mecánicas en los productos finales de la PM.

16.1.2 Otras características

Otras características de los polvos en ingeniería incluyen fricción interparticular, características de flujo, compactado, densidad, porosidad, composición química y películas superficiales.

Fricción interparticular y características de flujo La fricción entre las partículas afecta la disposición del polvo a fluir con facilidad y a compactarse firmemente. Una medida común de la fricción interparticular es el **ángulo de reposo**, el cual es el ángulo formado por un montón de polvo cuando éste se vacía a través de un embudo angosto, tal como se muestra en la figura 16.4. Los ángulos más grandes indican mayor fricción entre partículas. Las partículas de menor tamaño por lo general muestran mayor fricción y grandes ángulos. Las formas esféricas producen la menor fricción interparticular, porque al desviarse de la forma esférica, se incrementa la fricción entre las partículas.

Las características de flujo son importantes durante el llenado del troquel y el prensado. El llenado automático del troquel depende de un flujo fácil y consistente de los polvos. En el prensado, la resistencia a fluir incrementa las variaciones de densidad en la parte compactada; estos gradientes de densidad son generalmente indeseables. Una medida común del flujo es el tiempo requerido para que una cierta cantidad de polvo (en peso) fluya a través de un embudo de tamaño estándar. Los tiempos menores de flujo indican mayor facilidad de flujo y menor fricción interparticular. Para reducir la fricción interparticular y facilitar el flujo durante el prensado, frecuentemente se añaden a los polvos pequeñas cantidades de lubricantes.

Empaquetamiento densidad y porosidad Las características de empaquetamiento dependen de dos medidas de densidad. Primero, la **densidad real**, que es la densidad del volumen verdadero del material. Ésta es la densidad del material cuando los polvos se funden en una masa sólida, cuyos valores se dan en la tabla 4.1. Segundo, la **densidad volumétrica** es la densidad de los polvos en el estado suelto después de vaciado; éste incluye el efecto de los poros entre las partículas. Debido a los poros, la densidad volumétrica es menor que la densidad real.

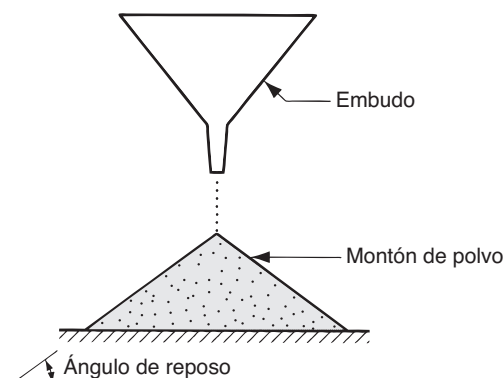


FIGURA 16.4 Fricción interparticular indicada por el ángulo de reposo de un montón de polvo vaciado desde un embudo angosto. A mayor ángulo, mayor fricción interparticular.

El **factor de empaquetamiento** es la densidad volumétrica dividida entre la densidad real. Los valores típicos para los polvos sueltos fluctúan entre 0.5 y 0.7. El factor de empaquetamiento depende de la forma y de la distribución de los tamaños de la partícula. Si están presentes polvos de varios tamaños, los polvos más finos se ajustarán entre los intersticios de los grandes, que de otra manera podrían ser tomados por el aire, lo que daría por resultado un factor de empaquetamiento más alto. Éste puede aumentarse también vibrando los polvos, lo cual ocasiona que se asienten más firmemente. Por último, se debe observar que la presión externa que se aplica durante la compactación, incrementa en gran medida el empaquetamiento de los polvos a través del rearreglo y deformación de las partículas.

La porosidad representa un camino alternativo para considerar las características de empaquetamiento de un polvo. **La porosidad** se define como la razón del volumen de los poros (espacios vacíos) en el polvo, respecto al volumen volumétrico. En principio,

$$\text{Porosidad} + \text{factor de empaquetamiento} = 1.0 \quad (16.6)$$

Este asunto se complica por la posible existencia de poros cerrados en algunas de las partículas. Si el volumen interno de estos poros se incluye en la porosidad, entonces la ecuación es exacta.

Composición química y películas superficiales La caracterización del polvo no sería completa sin una identificación de su composición química. Los polvos metálicos se clasifican como elementales; esto significa que consisten en un metal puro o prealeado, en donde cada partícula es una aleación. Se revisarán estas clases y los metales que se usan comúnmente en la PM más detenidamente en la sección 16.5.1.

Las películas superficiales son un problema en la metalurgia de polvos debido a la gran área por unidad de peso del metal cuando se trata con polvos. Las posibles películas incluyen óxidos, sílice, materiales orgánicos adsorbidos y humedad [5]. Por lo general, estas películas deben removerse antes de procesar la forma.

16.2 PRODUCCIÓN DE POLVOS METÁLICOS

En general, los productores de polvos metálicos no son las mismas compañías que hacen las piezas de PM. Los productores de polvo son los proveedores y las plantas que manufacturan los componentes a partir de polvos metálicos son los clientes. Por tanto es apropiado separar la revisión de la producción de polvos (esta sección) de los procesos que se usan para hacer productos a partir de la PM (las siguientes secciones).

Prácticamente cualquier metal puede reducirse a la forma de polvo. Hay tres métodos principales para producir comercialmente polvos metálicos, cada uno de los cuales implica consumo de energía para incrementar el área superficial del metal. Los métodos son: 1) atomización, 2) químicos y 3) electrolíticos [10]. Ocasionalmente se usan métodos mecánicos para reducir el tamaño de los polvos; sin embargo, estos métodos se asocian más comúnmente con la producción de polvos cerámicos que se tratarán en el capítulo siguiente.

16.2.1 Atomización

La atomización implica la conversión de un metal fundido en un rocío de pequeñas gotas que se solidifican formando polvos. Es el método más versátil y popular para producir polvos metálicos en la actualidad, y aplicable a casi todos los metales, aleaciones o metales puros. Hay muchas maneras de crear el rocío de metal fundido; varias de ellas se ilustran en la figura 16.5. Dos de los métodos se basan en la **atomización con gas**, en los que se utiliza una corriente de gas a alta velocidad (aire o gas inerte) para atomizar el metal líquido. En el inciso a de la misma figura, el gas fluye a través de una boquilla de expansión, succionando

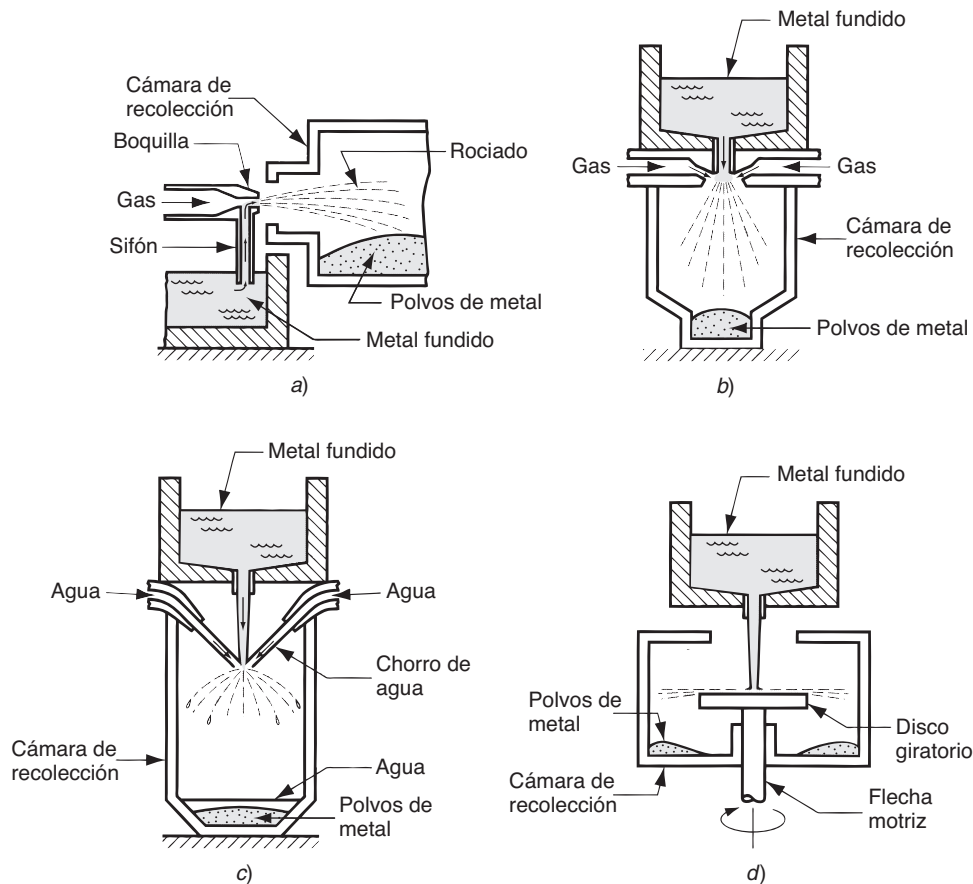


FIGURA 16.5 Varios métodos de atomización para producir polvos metálicos: a) y b) dos métodos de atomización por gas; c) atomización con agua y d) atomización centrífuga por el método de disco giratorio.

el metal líquido de la fusión que se encuentra debajo y rociándolo en un recipiente. Las gotas se solidifican en forma de polvo. En un método parecido que se muestra en el inciso b) de la misma figura, el metal fundido fluye por gravedad a través de una boquilla y se atomiza inmediatamente por chorros de aire. Los polvos metálicos resultantes, los cuales tienden a ser esféricos, se recolectan en una cámara situada debajo.

El método que se ilustra en el inciso c) es similar al b), excepto que se utiliza una corriente de agua a alta velocidad en lugar de aire. Éste se conoce como **atomizado por agua** y es el más común de los métodos de atomizado, particularmente apropiado para metales que funden por abajo de $1\,600\,^{\circ}\text{C}$ ($2\,900\,^{\circ}\text{F}$). El enfriamiento es más rápido y la forma del polvo resultante es más irregular que esférica. La desventaja de usar agua es la oxidación en la superficie de las partículas. Una reciente innovación usa aceite sintético en lugar de agua para reducir la oxidación. En ambos procesos de atomizado con aire o agua, el tamaño de las partículas se controla en gran parte por la velocidad de la corriente de fluido; el tamaño de partícula varía en relación inversa con la velocidad.

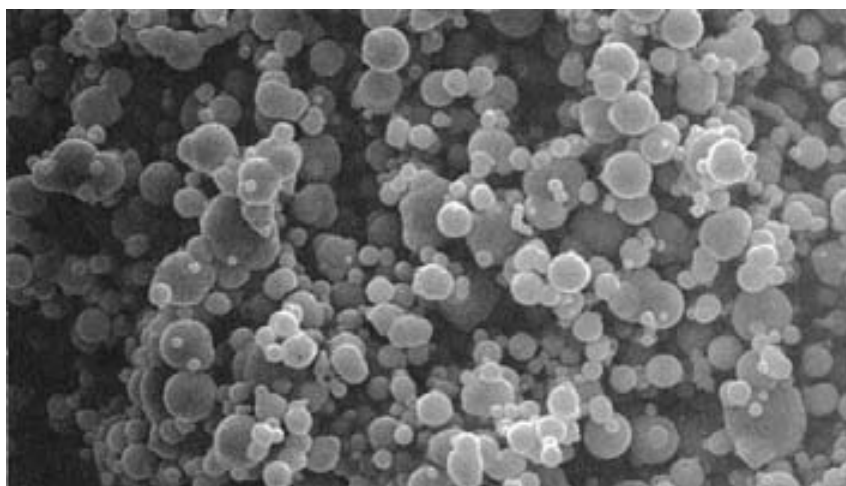
Varios métodos se basan en el **atomizado centrífugo**. Una versión es el **método de disco rotatorio**, mostrado en el inciso d) de la figura, donde se vacía una corriente de metal líquido en un disco que gira rápidamente y que rocía el metal en todas direcciones, pulverizándolo.

16.2.2 Otros métodos de producción

Entre otros métodos de producción de polvos se incluyen varios procesos de reducción química, métodos de precipitación y electrólisis.

La reducción química comprende una serie de reacciones químicas que reducen los compuestos metálicos a polvos metálicos elementales. Un proceso común consiste en

FIGURA 16.6 Polvos de hierro producidos por descomposición de pentacarbonilo de hierro; los tamaños de partícula fluctúan de 0.25 a 3.0 μm (10 a 125 $\mu\text{-in}$) (foto cortesía de GAF Chemicals Corporation, Advanced Materials Division).



la liberación de los metales de sus óxidos mediante el uso de agentes reductores como hidrógeno o monóxido de carbono. El agente reductor se produce para combinarlo con el oxígeno del compuesto y liberar el elemento metálico. Por este método se producen polvos de hierro, de tungsteno y de cobre. Otro proceso químico para polvos de hierro implica la descomposición del pentacarbonilo de hierro para producir partículas esféricas de alta pureza. Los polvos producidos por este método se ilustran en la fotomicrografía de la figura 16.6. Otros procesos químicos incluyen la **precipitación** de elementos metálicos de sus sales disueltas en agua. Los polvos de cobre, níquel y cobalto se pueden producir por este método.

En la **electrólisis** se prepara una celda electrolítica en la cual la fuente del metal a pulverizar es el ánodo. El ánodo se disuelve lentamente por la acción del voltaje aplicado, se mueve a través del electrolito y se deposita en el cátodo. El depósito se retira, se lava y se seca, obteniéndose un polvo metálico de alta pureza. Esta técnica se usa para obtener polvos de berilio, cobre, hierro, plata, tantalio y titanio.

16.3 PRENSADO CONVENCIONAL Y SINTERIZADO

Después de la producción de polvos metálicos, la secuencia convencional de la metalurgia de polvos consiste en tres pasos: 1) combinación y mezclado de los polvos, 2) compactación, en la cual se prensan los polvos para obtener la forma deseada, y 3) sinterizado, que implica calentamiento a una temperatura por debajo del punto de fusión para provocar la unión de las partículas en estado sólido y el fortalecimiento de la pieza. Estos tres pasos que algunas veces se aluden como operaciones primarias de la metalurgia de polvos se ilustran en la figura 16.7. En ocasiones también se ejecutan operaciones secundarias destinadas a mejorar la precisión dimensional, incrementar la densidad y para otros propósitos.

16.3.1 Combinación y mezclado de polvos

Para lograr buenos resultados en la compactación y el sinterizado, los polvos metálicos necesitan homogeneizarse por completo antes del proceso. Los términos combinación y mezclado se usan en este contexto. La **combinación** se refiere al intermezclado de polvos de la misma composición química, pero posiblemente con diferentes tamaños de partícula. Los tamaños diferentes de partículas se combinan frecuentemente para reducir la porosidad. El **mezclado** se refiere a la mezcla de polvos de distinta composición química.

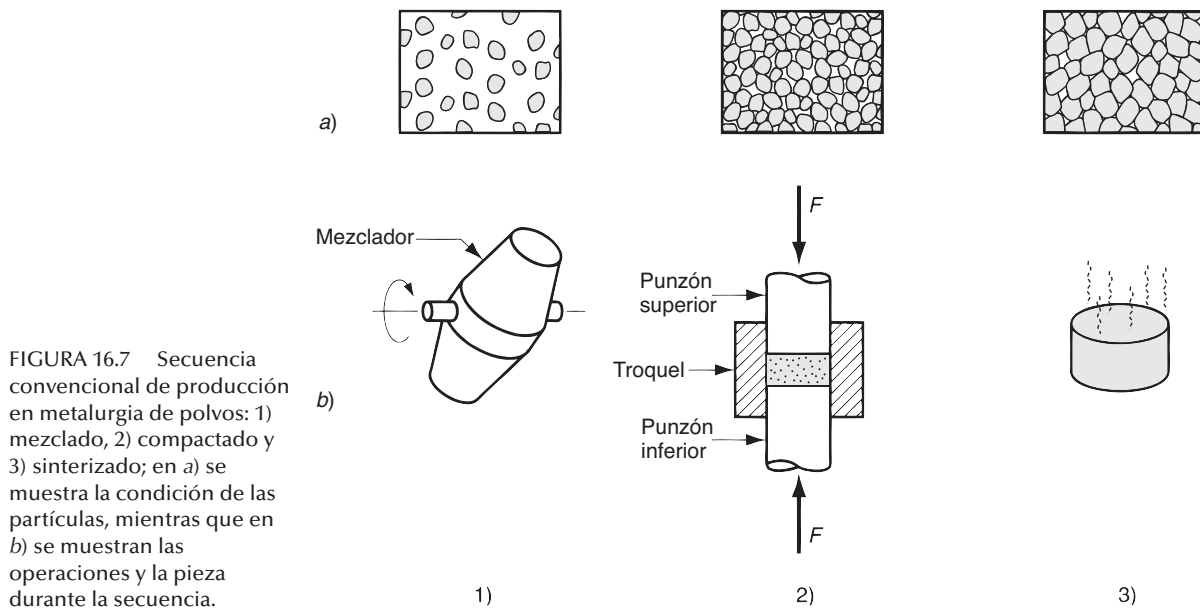


FIGURA 16.7 Secuencia convencional de producción en metalurgia de polvos: 1) mezclado, 2) compactado y 3) sinterizado; en a) se muestra la condición de las partículas, mientras que en b) se muestran las operaciones y la pieza durante la secuencia.

Una ventaja de la tecnología de metalurgia de polvos es la oportunidad de combinar varios metales en aleaciones que sería difícil o imposible producir por otros medios. La diferencia entre mezclado y combinación no siempre es precisa en la práctica industrial.

El mezclado y la combinación se realizan por medios mecánicos. Algunas alternativas se ilustran en la figura 16.8; éstas son: a) por rotación en tambor, b) por rotación en un recipiente de cono doble, c) por agitación en un mezclador de tornillo y d) por agitación en un mezclador de paletas. En estos dispositivos hay más ciencia de la que se puede sospechar. Los mejores resultados se obtienen cuando se llenan entre 20% y 40% de su capacidad. Los recipientes se diseñan generalmente con deflectores internos u otras formas para impedir la caída libre durante el mezclado de polvos de diferentes tamaños, debido a que las variaciones en la velocidad de asentamiento de los distintos tamaños generan segregación, precisamente lo contrario de lo que se busca con la combinación. No es conveniente que los polvos se sometan a vibración, ya que esto también produce segregación.

Generalmente se añaden otros ingredientes a los polvos metálicos durante el paso de combinación o mezclado. Estos aditivos son: 1) **lubricantes**, como los estearatos de zinc y de aluminio en pequeñas cantidades para reducir la fricción entre las partículas y en las paredes del troquel durante la compactación; 2) **aglutinantes**, que se requieren en algunos casos para lograr una resistencia adecuada en las piezas prensadas pero no sinterizadas; y 3) **desfloculantes**, que inhiben la aglomeración de los polvos para mejorar sus características de flujo durante el procesamiento subsecuente.

FIGURA 16.8 Varios dispositivos de combinación y mezclado: a) tambor rotatorio, b) doble cono rotatorio, c) mezclador de tornillo y d) mezclador de paletas.

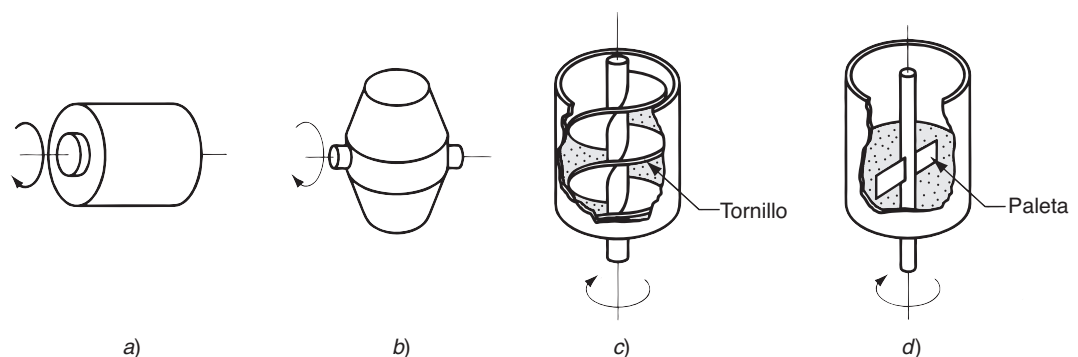
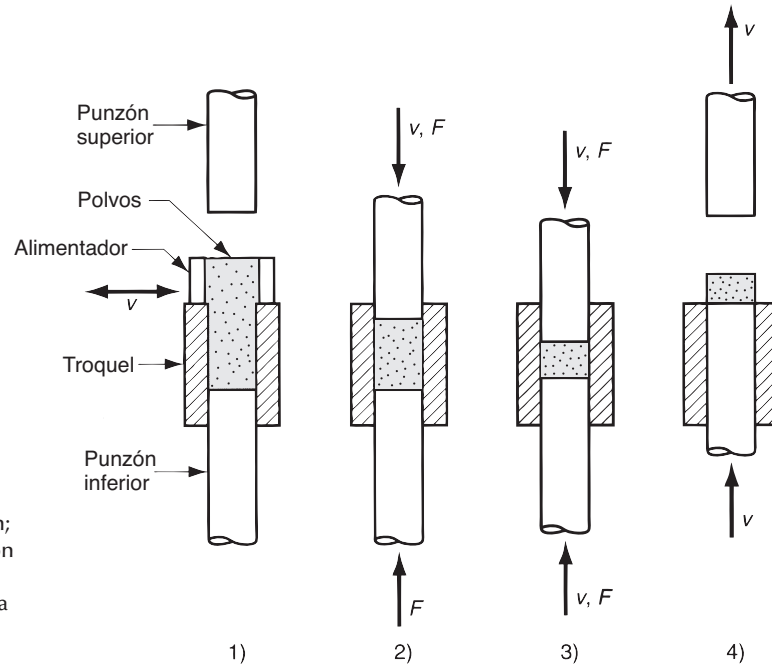


FIGURA 16.9 Prensado, el método convencional de compactación de polvos metálicos en metalurgia de polvos: 1) llenado de la cavidad del troquel con polvos, por alimentación automática en la producción; 2) posición inicial, 3) posición final de los punzones inferior y superior durante la compactación y 4) eyección de la pieza.

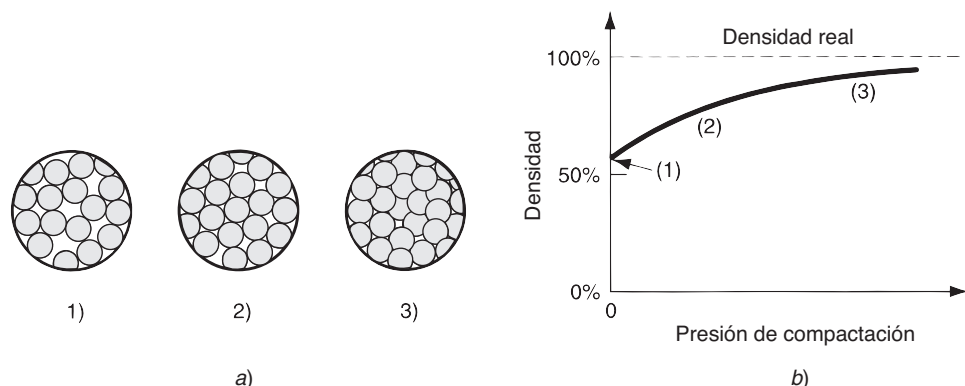


16.3.2 Compactación

En la compactación se aplica alta presión a los polvos para darles la forma requerida. El método convencional de compactación es el **prensado**, en el cual punzones opuestos aprietan el polvo contenido en un troquel. Los pasos en el ciclo de prensado se muestran en la figura 16.9. A la pieza de trabajo después de prensada se le llama **compactado fresco**; el término **fresco** significa que la pieza no está completamente procesada. Como resultado del prensado, la densidad de la pieza, llamada **densidad fresca**, es mucho más grande que la densidad volumétrica inicial. La **resistencia fresca** de la pieza es adecuada para el manejo cuando es prensada, pero mucho menor que la que se logra después del sinterizado.

La presión que se aplica en la compactación produce inicialmente un rempaquetamiento de los polvos en un arreglo más eficiente, eliminando los “puentes” que se forman durante el llenado, reduciendo el espacio de los poros e incrementando el número de puntos de contacto entre las partículas. Al incrementarse la presión, las partículas se deforman plásticamente, ocasionando que el área de contacto interparticular aumente y entren en contacto partículas adicionales. Esto viene acompañado de una reducción posterior del volumen de los poros. La progresión se ilustra en la figura 16.10 para partículas iniciales de forma

FIGURA 16.10 a) Efecto de la presión aplicada durante la compactación: 1) polvos sueltos iniciales después del llenado, 2) rempaquetamiento y 3) deformación de las partículas; y b) densidad de los polvos en función de la presión. La secuencia corresponde a los pasos 1, 2 y 3 de la figura 16.9.



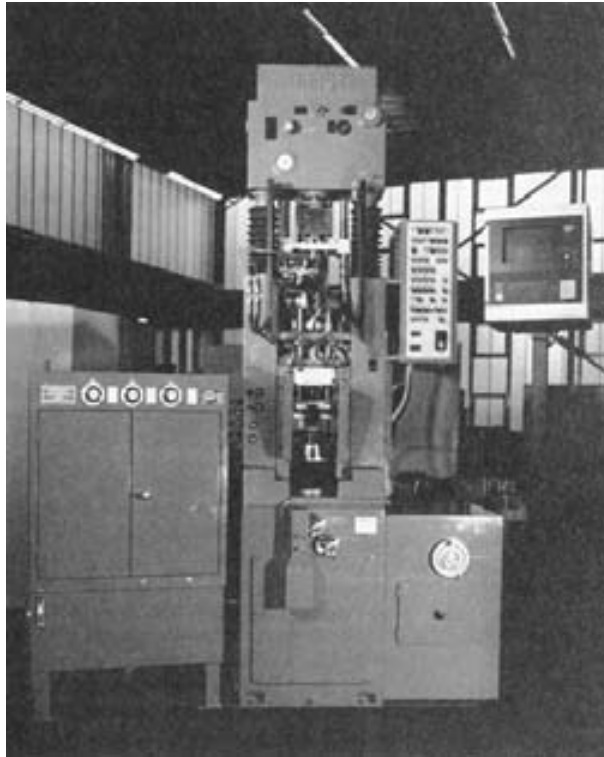


FIGURA 16.11 Prensa hidráulica de 450 kN (50 ton) para compactación de componentes de metalurgia de polvos. Esta prensa tiene la capacidad de actuar en niveles múltiples para producir piezas de formas complejas en metalurgia de polvos. (Foto cortesía de Dorst America, Inc.).

esférica. También se muestra la densidad asociada, representada para las tres vistas como una función de la presión aplicada.

Las prensas usadas en la compactación convencional en la metalurgia de polvos son mecánicas, hidráulicas o una combinación de las dos. En la figura 16.11 se muestra una unidad hidráulica de 450 kN (50 ton). Debido a diferencias en la complejidad de las piezas asociadas a los requerimientos de prensado, las prensas se pueden clasificar en 1) prensado en una dirección, con prensas de acción simple; o 2) prensado en dos direcciones, con prensas de varios tipos, incluyendo las de arietes hidráulicos opuestos, de doble acción o de múltiple acción. La tecnología de las prensas comúnmente disponibles puede suministrar hasta diez acciones de control separadas para producir piezas de forma bastante compleja. Se examinará la complejidad de las piezas y otros aspectos de diseño en la sección 16.6.

La capacidad de una prensa para producción en PM se da generalmente en toneladas, o kN o MN. La fuerza requerida para el prensado depende del área proyectada de la pieza (área en el plano horizontal para una prensa vertical) multiplicada por la presión necesaria para compactar los polvos del metal; expresando esto en forma de ecuación,

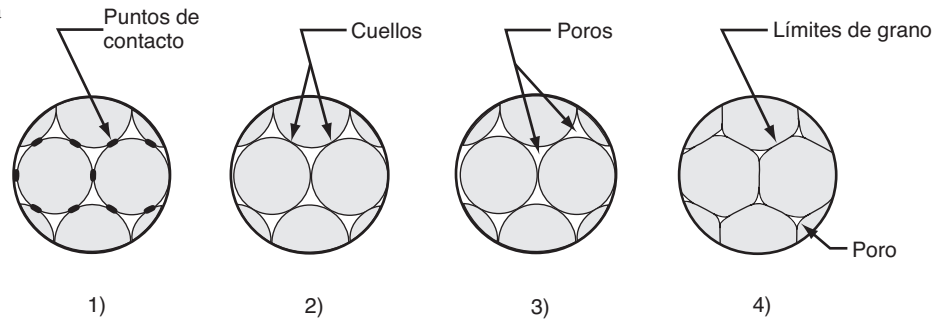
$$F = A_p p_c \quad (16.7)$$

donde F = fuerza requerida, N (lb); A_p = área proyectada de la pieza, mm² (in²); y p_c = presión de compactación requerida para el material del polvo dado, MPa (lb/in²). Las presiones típicas de compactación fluctúan entre 70 MPa (10 000 lb/in²) para polvos de aluminio y 700 MPa (100 000 lb/in²) para polvos de hierro y acero.

16.3.3 Sinterizado

Después del prensado, el compactado fresco carece de fuerza y resistencia: se desmorona fácilmente al menor esfuerzo. El **sinterizado** es una operación de tratamiento térmico

FIGURA 11.12 Sinterizado a escala microscópica: 1) la unión de las partículas se inicia en los puntos de contacto, 2) los puntos de contacto crecen para convertirse en "cuellos", 3) los poros entre las partículas reducen su tamaño y 4) se desarrollan límites de grano entre las partículas, en las regiones donde había cuellos.



que se ejecuta sobre el compactado para unir sus partículas metálicas, incrementando de esta manera su fuerza y resistencia. El tratamiento se lleva a cabo generalmente a temperaturas entre 0.7 y 0.9 del punto de fusión del metal (en la escala absoluta). El término **sinterizado en estado sólido** o **sinterizado en fase sólida** se usa algunas veces para este sinterizado convencional debido a que el metal permanece sin fundir a la temperatura del tratamiento.

En opinión de los investigadores, la fuerza básica que mueve al sinterizado es la reducción de la energía superficial [5], [12]. El compactado fresco consiste en muchas partículas distintas que tienen su propia superficie; por tanto, el área superficial total contenida en el compactado es muy alta. Bajo la influencia del calor, el área se reduce por la formación y crecimiento de las uniones entre las partículas; esto implica la reducción de la energía superficial. Mientras más fino sea el polvo inicial, más alta será la superficie del área total y más grande la fuerza que mueve al proceso.

La serie de dibujos en la figura 16.12 muestra en escala microscópica los cambios que ocurren durante el sinterizado de los polvos metálicos. El sinterizado implica transporte de masa para crear los cuellos y transformarlos en límites de grano. El principal mecanismo para que esto ocurra es la difusión; otro posible mecanismo es el flujo plástico. La contracción ocurre durante el sinterizado como resultado de la reducción del tamaño de los poros. Esto depende en gran medida de la densidad del compactado fresco, y ésta a su vez de la presión durante la compactación. Cuando las condiciones del procesamiento se controlan estrechamente, la contracción generalmente es predecible.

Dado que las aplicaciones de la PM involucran generalmente producciones medianas o altas, la mayoría de los hornos de sinterizado se diseñan con dispositivos mecanizados para el traslado de las piezas de trabajo durante el proceso. El tratamiento térmico consiste en tres pasos realizados en tres cámaras de hornos continuos: 1) precalentado, en el cual se queman los lubricantes y los aglutinantes, 2) sinterizado y 3) enfriado. El tratamiento se ilustra en la figura 16.13. Las temperaturas típicas y los tiempos de sinterizado se proporcionan en la tabla 16.1 para metales seleccionados.

En la práctica moderna del sinterizado se controla la atmósfera del horno. Los propósitos de la atmósfera controlada son: 1) proteger de la oxidación, 2) proporcionar una atmósfera reductora para remover los óxidos existentes, 3) suministrar una atmósfera carburizadora y 4) ayudar a la remoción de los lubricantes y aglutinantes que se usan en el prensado. Las atmósferas de los hornos de sinterizado comunes son: de gas inerte, basadas en nitrógeno, de amoníaco disociado, de hidrógeno y basadas en gas natural [5]. Las atmósferas al vacío se usan para ciertos metales, como los aceros inoxidable y el tungsteno.

16.3.4 Operaciones secundarias

Las funciones de las operaciones secundarias son varias, incluidas la densificación, el dimensionamiento, la impregnación, la infiltración, el tratamiento térmico y el acabado.

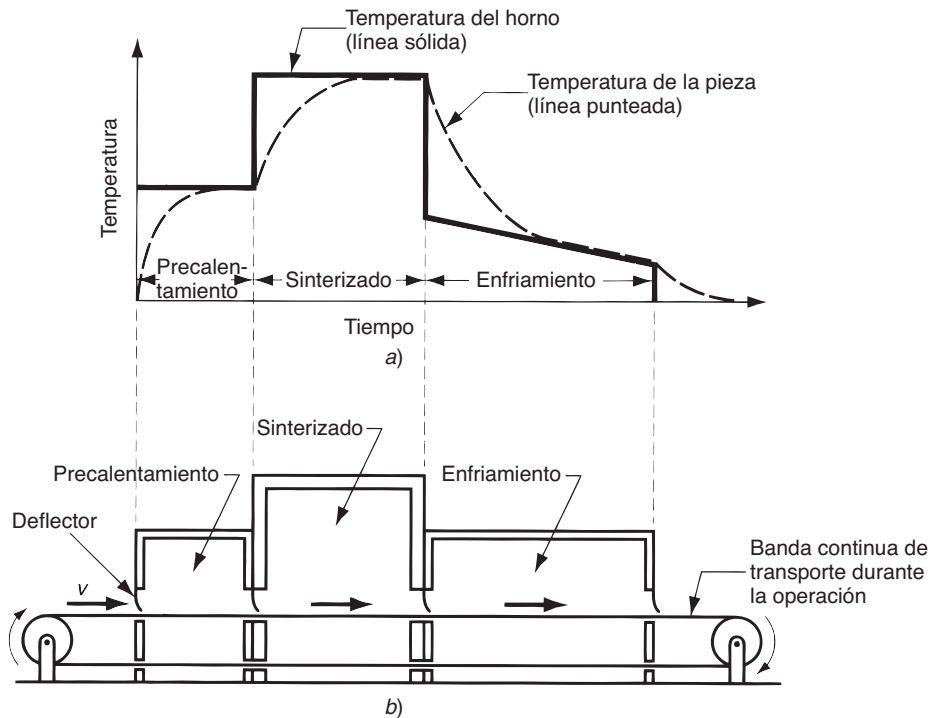


FIGURA 16.13
a) Ciclo típico de tratamiento térmico durante el sinterizado y b) sección transversal esquemática de un horno continuo de sinterizado.

Densificación y dimensionamiento Numerosas operaciones secundarias se ejecutan para aumentar la densidad y mejorar la precisión, o para lograr formas adicionales en las piezas sinterizadas. El **reprensado** es una operación de prensado en la cual se aprieta la pieza en un troquel cerrado para aumentar la densidad y mejorar las propiedades físicas. El **dimensionamiento** es la compresión de una pieza sinterizada para mejorar su precisión dimensional. El **acuñado** es una operación de prensado sobre una pieza sinterizada para imprimir detalles en su superficie.

Algunas piezas sinterizadas requieren un **maquinado** posterior. Rara vez se utiliza el maquinado para dimensionar las piezas; más bien se usa para crear características geométricas que no se pueden lograr por prensado, como son cuerdas internas o externas, perforaciones laterales y otros detalles.

Impregnación e infiltración La porosidad es una característica única e inherente a la tecnología de metalurgia de polvos. Ésta se puede aprovechar para crear productos especiales, llenando el espacio disponible en los poros con aceite, polímeros o metales que tienen un punto de fusión más bajo que la base del metal en polvo.

TABLA 16.1 Temperaturas y tiempos típicos de sinterizado para polvos de metales seleccionados.

Metal	Temperaturas de sinterizado		Tiempo típico
	°C	°F	
Latón	850	1 600	25 min
Bronce	820	1 500	15 min
Cobre	850	1 600	25 min
Hierro	1 100	2 000	30 min
Acero inoxidable	1 200	2 200	45 min
Tungsteno	2 300	4 200	480 min

Recopilada de [8] y [13].

Impregnación es el término que se usa cuando se introduce aceite u otro fluido dentro de los poros de una pieza sinterizada. Los productos más comunes de este proceso son los rodamientos impregnados con aceite: los engranes y componentes similares de maquinaria. Los rodamientos autolubricados, fabricados usualmente de bronce o hierro con 10 a 30% de aceite en volumen, se usan ampliamente en la industria automotriz. Los tratamientos se realizan mediante inmersión de las piezas sinterizadas en un baño de aceite caliente.

Una aplicación alterna de la impregnación involucra a las piezas de la metalurgia de polvos, a las que se les debe ejercer una presión fuerte o impenetrable a los fluidos. En este caso, las piezas se impregnan con varios tipos de resinas de polímeros que ingresan en los espacios de los poros en forma líquida y luego se solidifican. En algunos casos, la impregnación de resina se utiliza para facilitar el procesamiento subsecuente, por ejemplo, para permitir el uso de soluciones de procesamiento (como los químicos para chapado) que de otra forma empaparían los poros y degradarían el producto, o mejorarían el maquinado de la pieza de la metalurgia de polvos.

La **infiltración** es una operación en la cual se llenan los poros de las piezas de PM con un metal fundido. El punto de fusión del metal de relleno debe ser menor que el de la pieza. El proceso implica calentar el metal de relleno en contacto con el componente sinterizado, de manera que la acción de capilaridad haga fluir al relleno dentro de los poros. La estructura resultante es relativamente no porosa y la pieza infiltrada tiene una densidad más uniforme, así como una tenacidad y una resistencia mejoradas. Una aplicación de este proceso es la infiltración con cobre de las piezas con PM de hierro sinterizado.

Tratamiento térmico y acabado Los componentes de polvos metálicos pueden tratarse térmicamente (capítulo 27) y terminarse (galvanoplastia o pintura, capítulo 29) por la mayoría de las operaciones que se usan en las piezas fabricadas por fundición y otros procesos de trabajo de metales. Debido a la porosidad de las piezas sinterizadas, se debe tener cuidado con algunos de estos tratamientos por ejemplo, no deben usarse los baños de sales para calentar estas piezas. Se pueden; aplicar a las piezas sinterizadas operaciones de chapeado y recubrimiento con fines de apariencia y resistencia a la corrosión. Se debe tener cuidado para evitar que las soluciones químicas queden atrapadas en los poros; frecuentemente se usan la impregnación y la infiltración para este propósito. Los chapeados comunes para piezas sinterizadas incluyen cobre, níquel, cromo, zinc y cadmio.

16.4 ALTERNATIVAS DE PRENSADO Y TÉCNICAS DE SINTERIZADO

La secuencia convencional de prensado y sinterizado es la más utilizada en la tecnología de la metalurgia de polvos. Los métodos para procesamientos adicionales se analizan en esta sección. Estos métodos se ubican en tres categorías: 1) métodos de compactación alternativa, 2) combinación de compactación y sinterizado, y 3) métodos alternativos de sinterizado.

16.4.1 Prensado isostático

Una característica del prensado convencional es que la presión se aplica uniaxialmente. Esto impone limitaciones sobre la forma de la pieza, ya que los polvos metálicos no fluyen fácilmente en dirección perpendicular a la aplicación de la presión. El prensado uniaxial produce también variaciones de densidad en la compactación, después del prensado. En el **prensado isostático**, la presión se aplica en todas direcciones contra los polvos contenidos en el molde flexible; para lograr la compactación se usa la presión hidráulica. El prensado isostático puede hacerse de dos formas: 1) prensado isostático frío y 2) prensado isostático caliente.

El **prensado isostático frío** (CIP, por sus siglas en inglés) es un compactado que se realiza a temperatura ambiente. El molde, hecho de caucho u otro material elastómero, se

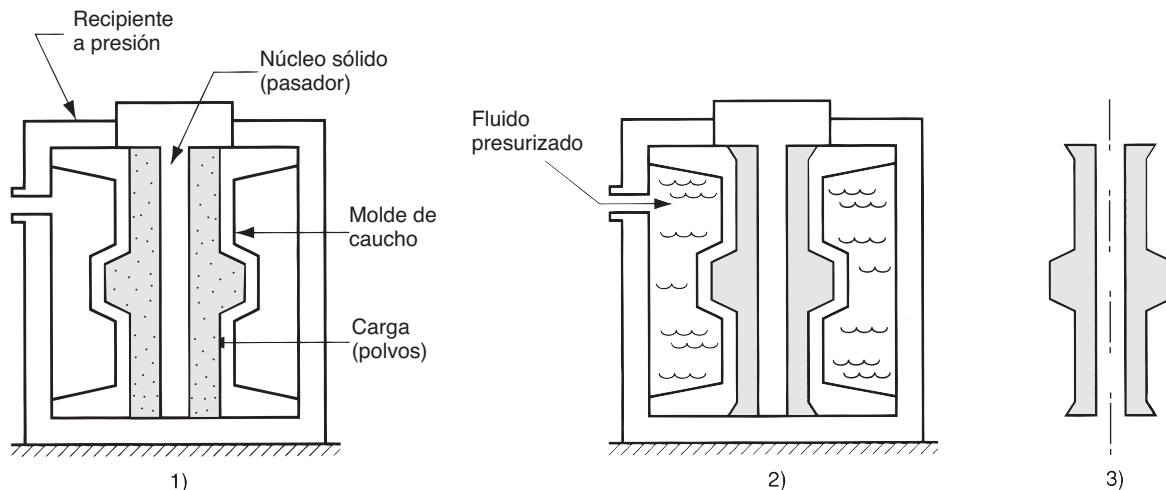


FIGURA 16.14 Prensado isostático en frío: 1) se colocan los polvos en el molde flexible, 2) se aplica presión hidrostática sobre el molde para compactar los polvos y 3) se reduce la presión y se retira la pieza.

sobredimensiona para compensar la contracción. Se usa agua o aceite para ejercer la presión hidrostática contra el molde dentro de la cámara. La figura 16.14 ilustra la secuencia del proceso en prensado isostático en frío. Las ventajas del CIP incluyen una densidad más uniforme, herramientas menos costosas y mayor aplicación a corridas cortas de producción. Es difícil lograr una buena precisión dimensional en el prensado isostático debido a la flexibilidad del molde. En consecuencia, se requieren operaciones de formado y acabado antes o después del sinterizado, para obtener las dimensiones requeridas.

El prensado isostático caliente (HIP, por sus siglas en inglés) se lleva a cabo a alta presión y temperatura, usando como medio de compresión un gas que puede ser argón o helio. El molde que contiene los polvos se hace de lámina de metal para resistir altas temperaturas. El HIP realiza en un paso el prensado y la sinterización. A pesar de esta aparente ventaja, es un proceso relativamente costoso y sus aplicaciones parecen concentrarse actualmente en la industria aeroespacial. Las piezas de PM hechas por HIP se caracterizan por su alta densidad (porosidad cercana a cero), unión interparticular completa y buena resistencia mecánica.

16.4.2 Moldeo por inyección de polvos

El moldeo por inyección se asocia estrechamente con la industria de los plásticos (sección 13.6). Se puede aplicar el mismo proceso básico para formar piezas de polvos metálicos o cerámicos; la diferencia es que el polímero inicial contiene una alta proporción de materia particulada, típicamente entre 50% y 85% en volumen. En metalurgia de polvos, se usa el término **moldeo por inyección metálica** (MIM). El proceso más general es el **moldeo por inyección de polvos** (PIM, por sus siglas en inglés), que incluye polvos metálicos y cerámicos. En MIM, los pasos son los siguientes [6]: 1) los polvos metálicos se mezclan con un aglutinante apropiado; 2) se forman pelets granulares con la mezcla; 3) los pelets se calientan a la temperatura de moldeo, se inyectan en la cavidad de un molde y la pieza se enfría y retira del molde; 4) se procesa la pieza para remover el aglomerante mediante varias técnicas térmicas o por solvente; 5) la pieza se sinteriza y 6) se ejecutan las operaciones secundarias que se requieran.

El aglutinante actúa como un portador de partículas en el moldeo por inyección de polvos. Sus funciones son aportar características apropiadas de flujo durante el moldeo y sostener los polvos en la forma moldeada hasta el sinterizado. Los cinco tipos básicos de aglutinantes en PIM son: 1) los polímeros termofijos, como los fenólicos, 2) los polímeros

termoplásticos, como el polietileno, 3) el agua, 4) los geles, 5) los materiales inorgánicos [6]. Los tipos que se usan con mayor frecuencia son los polímeros.

El moldeado por inyección de polvos es apropiado para formar piezas similares a las del moldeado por inyección de plásticos. Su costo no es competitivo para piezas de simetría axial simple, ya que en estos casos es adecuado el método de prensado convencional y sinterizado. El PIM parece más económico para pequeñas piezas complejas de alto valor. La contracción que acompaña a la densificación durante el sinterizado limita la precisión dimensional.

16.4.3 Laminado de polvos, extrusión y forjado

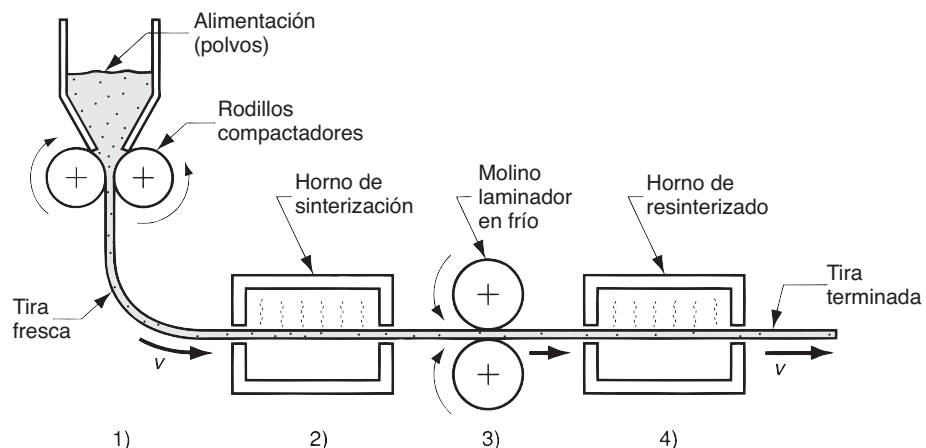
La laminación, la extrusión y el forjado son procesos volumétricos característicos del formado de metales (capítulo 19). Se describen en este contexto de la metalurgia de polvos.

Laminación de polvos Los polvos pueden comprimirse en una operación de laminado para formar material metálico en tiras. El proceso se dispone comúnmente para operar de manera continua o semicontinua, como se muestra en la figura 16.15. Los polvos metálicos se compactan entre dos rodillos para formar una tira fresca con la que se alimenta directamente a un horno de sinterizado. Después se enfría, se lamina y se vuelve a sinterizar.

Extrusión de polvos La extrusión es un proceso básico de manufactura (sección 1.3.1). En la extrusión de polvos, el polvo inicial puede tener formas diferentes. En el método más popular, los polvos se colocan al vacío en una lata de lámina metálica hermética, se calientan y se extruyen junto con el recipiente. En otra variante, se preforman los tochos por un proceso de prensado convencional y sinterización, y después se extruyen en caliente. Estos métodos alcanzan un alto grado de densificación en los productos de PM.

Forjado de polvos El forjado es un proceso importante en el formado de metal (sección 1.3.1). En el *forjado de polvos*, la parte inicial es una pieza de metalurgia de polvos preformada mediante prensado y sinterizado al tamaño apropiado. Las ventajas de este método son: 1) la densificación de la pieza de PM; 2) el costo de las herramientas es más bajo y se requieren pocos “golpes” durante la forja (y por tanto mayor velocidad de producción), ya que la pieza inicial está preformada y 3) poco desperdicio de material.

FIGURA 16.15 Laminado de polvos: 1) se alimentan los polvos a través de los rodillos compactadores para formar una tira fresca, 2) sinterizado, 3) laminado en frío y 4) resinterizado.



16.4.4 Combinación de prensado y sinterizado

El prensado isostático caliente (sección 16.4.1) alcanza la compactación y el sinterizado en un solo paso. Otras técnicas que combinan los dos pasos son el prensado caliente y el sinterizado por chispas.

Prensado caliente La disposición de un proceso de prensado caliente uniaxial es muy similar al prensado de PM convencional, excepto que el calor se aplica durante la compactación. El producto resultante es generalmente duro, denso, fuerte y bien dimensionado. A pesar de estas ventajas, el proceso presenta ciertos problemas técnicos que limitan su adopción. Los principales problemas son: 1) la selección del material del molde que pueda soportar las altas temperaturas de sinterización, 2) los largos ciclos de producción que se requieren para realizar la sinterización y 3) el calentamiento y el mantenimiento de un control atmosférico en el proceso [1]. El prensado caliente tiene algunas aplicaciones en la producción de productos sinterizados de carburo usando moldes de grafito.

Sinterizado por chispas Es una alternativa que combina el prensado y el sinterizado, pero que supera algunos de los problemas del prensado caliente. El proceso consiste en dos pasos básicos [1], [13]: 1) los polvos o un compactado fresco preformado se colocan en un troquel; y 2) los punzones superior e inferior, que también sirven como electrodos, comprimen la pieza aplicando una corriente eléctrica de alta energía que al mismo tiempo quema los contaminantes de la superficie y sinteriza los polvos, y forma una pieza densa y sólida en cerca de 15 s. El proceso se ha aplicado a varios metales.

16.4.5 Sinterizado en fase líquida

El sinterizado convencional (sección 16.3.3) es un sinterizado en estado sólido, en el cual el metal se sinteriza a una temperatura por debajo de su punto de fusión. En sistemas que involucran una mezcla de dos polvos metálicos, donde existe una diferencia de temperatura de fusión entre los metales, se usa un tipo alterno de sinterización, llamado sinterizado en fase líquida. En este proceso, se mezclan los dos polvos iniciales y luego se calientan a una temperatura lo suficientemente alta para fundir el metal de más bajo punto de fusión, pero no el otro. El metal fundido moja perfectamente las partículas sólidas, creando una estructura densa con uniones fuertes entre los metales una vez solidificados. Un calentamiento prolongado puede generar la aleación de los metales por una disolución gradual de las partículas sólidas en el metal líquido o la difusión del metal líquido en el sólido, dependiendo de los metales involucrados. En cualquier caso, el producto resultante está completamente densificado (sin poros) y es fuerte. Ejemplos de sistemas que involucran sinterización en fase líquida son: Fe-Cu, W-Cu y Cu-Co [5].

16.5 MATERIALES Y PRODUCTOS PARA METALURGIA DE POLVOS

Las materias primas para el procesamiento en metalurgia de polvos son más costosas que para otros trabajos de metal, debido a la energía adicional requerida para reducir el metal a polvo. Por consiguiente, la metalurgia de polvos solamente es competitiva en ciertos tipos de aplicaciones. En esta sección se identificarán los materiales y productos que parecen más apropiados para la metalurgia de polvos.

16.5.1 Materiales para la metalurgia de polvos

Desde un punto de vista químico, los polvos metálicos se pueden clasificar en elementales y prealeados. Los polvos *elementales* consisten en un metal puro y se usan en aplicaciones

donde la alta pureza es importante. Por ejemplo, el hierro puro puede usarse donde importan sus propiedades magnéticas. Los polvos elementales más comunes son de hierro, de aluminio y de cobre.

Los polvos elementales se mezclan también con otros polvos metálicos para producir aleaciones especiales que son difíciles de formular por métodos convencionales. Las herramientas de acero son un ejemplo; la metalurgia de polvos permite combinar ingredientes que son difíciles o imposibles por las técnicas tradicionales de aleación. El uso de mezclas de polvos elementales facilita el procesamiento para formar una aleación, aun cuando no involucre aleaciones especiales. Ya que los polvos son metales puros, no son tan fuertes como los metales prealeados. Por tanto se deforman más fácilmente durante el prensado, así que la densidad y la resistencia fresca son más altas que los compactados prealeados.

En los **polvos prealeados**, cada partícula es una aleación que tiene la composición química deseada. Los polvos prealeados se usan cuando la aleación no puede formularse mediante la mezcla de polvos elementales; el acero inoxidable es un ejemplo importante. Los polvos prealeados más comunes son ciertas aleaciones de cobre, acero inoxidable y acero de alta velocidad.

Los polvos elementales y prealeados de uso más común en orden aproximado de tonelaje son: 1) el hierro, con mucho el metal más usado en PM, mezclado frecuentemente con grafito para hacer piezas de acero, 2) el aluminio, 3) el cobre y sus aleaciones, 4) el níquel, 5) el acero inoxidable, 6) el acero de alta velocidad y 7) otros materiales de metalurgia de polvos como el tungsteno, el molibdeno, el titanio, el estaño y los metales preciosos.

16.5.2 Productos de la metalurgia de polvos

La ventaja sustancial de la tecnología de polvos es que las piezas se hacen en forma neta o casi neta; requieren poco o ningún formado adicional después de procesarse en metalurgia de polvos. Algunos de los componentes comúnmente fabricados mediante metalurgia de polvos son engranes, rodamientos, catarinas, sujetadores, contactos eléctricos, herramientas de corte y varias piezas de maquinaria. La producción en grandes cantidades de engranes y rodamientos se adapta particularmente bien a la metalurgia de polvos por dos razones: 1) tienen una forma definida principalmente en dos dimensiones (la superficie superior tiene cierta forma y hay pocas o ninguna forma lateral) y 2) se necesita porosidad en el material para servir como depósito de lubricantes. Mediante la metalurgia de polvos también se pueden hacer piezas más complejas con forma tridimensional, añadiendo operaciones secundarias como maquinado para completar la forma de las piezas prensadas y sinterizadas, y observando ciertos lineamientos de diseño, como los que se reseñan en la siguiente sección.

16.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO EN METALURGIA DE POLVOS

El uso de técnicas de la metalurgia de polvos es generalmente apropiado para cierta clase de situaciones de producción y diseño de piezas. En esta sección se intenta definir las características de estas aplicaciones donde la metalurgia de polvos es más apropiada. Se presenta primero un sistema de clasificación para piezas de metalurgia de polvos, y luego se ofrecen algunos lineamientos sobre el diseño de los componentes.

16.6.1 Sistema de clasificación de piezas

La Metal Powder Industries Federation (MPIF) define cuatro clases de diseño de piezas de metalurgia de polvos, atendiendo al nivel de dificultad en el prensado convencional. El sistema es útil porque indica alguna de las limitaciones que deben hacerse en las formas

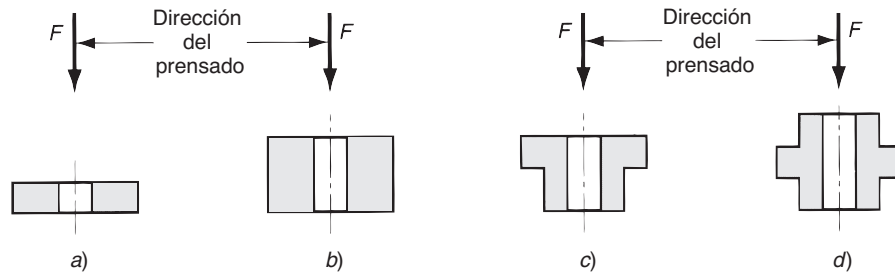


FIGURA 16.16 Cuatro clases de piezas en metalurgia de polvos (vista lateral, la sección transversal es circular): a) clase I, formas delgadas simples que se pueden presionar en una dirección; b) clase II, formas simples pero más gruesas que requieren presión en dos direcciones; c) clase III, dos niveles de espesor presionados en dos direcciones, y d) clase IV, múltiples niveles de espesor presionados en dos direcciones, con controles separados para cada nivel a fin de lograr una densificación apropiada a través de la compactación.

cuando se usan los procesamientos convencionales de metalurgia de polvos. Las cuatro clases de piezas se ilustran en la figura 16.16.

16.6.2 Lineamientos para el diseño de piezas en metalurgia de polvos

El sistema de clasificación de la MPIF suministra algunos lineamientos aplicables a la forma de las piezas, apropiada a las técnicas de prensado convencional en metalurgia de polvos. En los siguientes lineamientos se ofrecen sugerencias de diseño adicionales, recopiladas de [2], [10] y [13].

- La economía de los procesamientos mediante metalurgia de polvos usualmente requiere grandes cantidades de piezas para justificar el costo del equipo y las herramientas especiales necesarias. Se sugieren cantidades mínimas de 10 000 unidades [13], aun cuando hay excepciones.
- La capacidad de fabricar piezas con un nivel controlado de porosidad es una característica única de la metalurgia de polvos. Son posibles porosidades hasta de 50%.
- La metalurgia de polvos se puede usar para hacer piezas de metales y aleaciones inusuales, materiales que podrían ser difíciles o imposibles de producir por otros medios.
- La forma de la pieza debe permitir su remoción del troquel después del prensado; esto significa en términos generales que la pieza debe tener lados verticales o casi verticales, aunque se pueden hacer escalonados como sugiere el sistema de clasificación de la MPIF (figura 16.16). Deben evitarse características de diseño como muescas y perforaciones laterales como las que se muestran en la figura 16.17. Son permisibles las

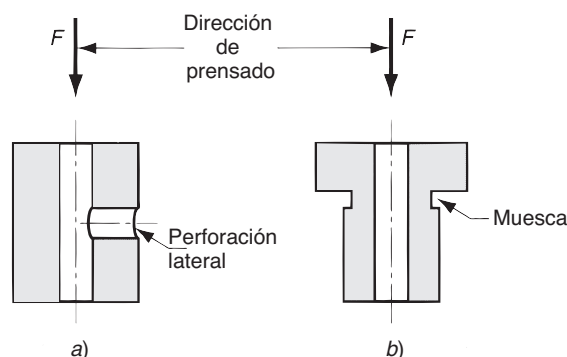


FIGURA 16.17 Formas de las piezas que deben evitarse en metalurgia de polvos, a) perforaciones laterales y b) muescas laterales. La remoción de la pieza es imposible.

FIGURA 16.18 Formas permisibles de las piezas en metalurgia de polvos: a) perforaciones verticales ocultas y abiertas, b) perforaciones verticales abocardadas y c) muescas en dirección vertical. Estas formas permiten la remoción de la pieza.

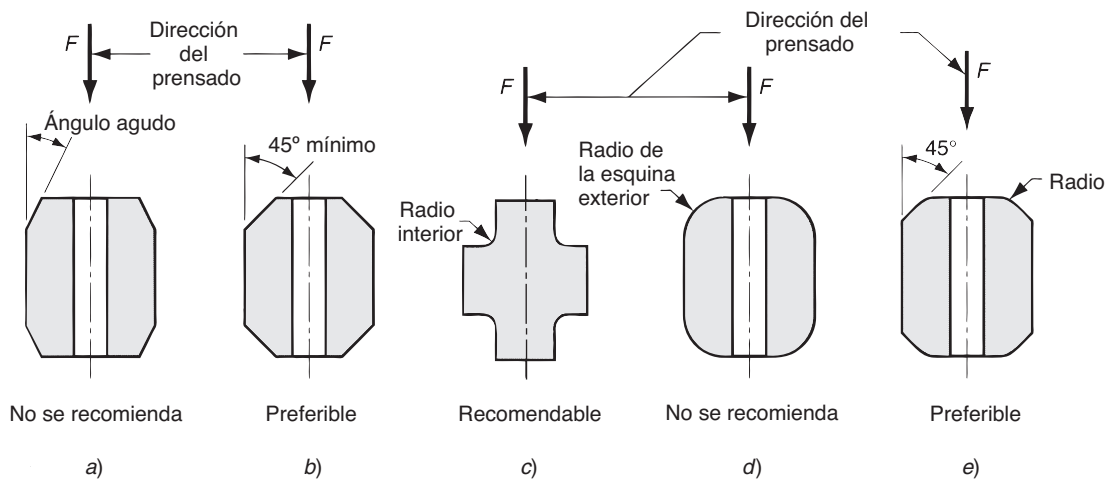
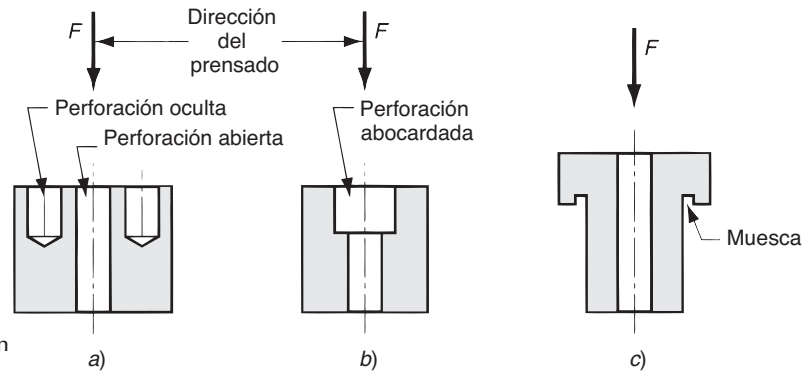


FIGURA 16.19 Se puede lograr chaflanes y esquinas redondeadas, pero deben observarse ciertas reglas: a) evitar ángulos agudos del chaflán, b) son preferibles ángulos mayores para la rigidez del punzonado, c) son deseables los radios interiores pequeños, d) los radios completos en las esquinas exteriores son difíciles porque el punzonado es frágil en los bordes de las esquinas, e) los problemas en las esquinas exteriores pueden solucionarse combinando radios y chaflanes.

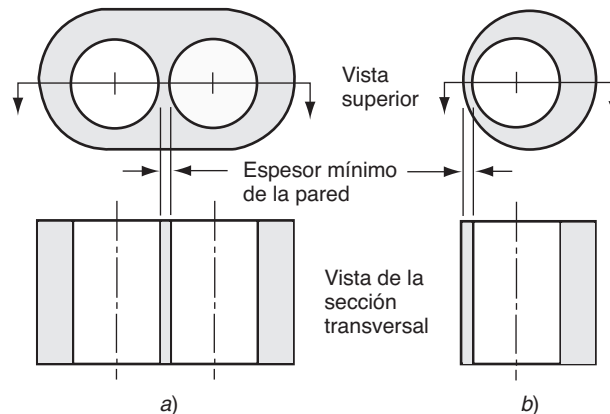


FIGURA 16.20 El espesor mínimo recomendado para las paredes a) entre perforaciones o b) entre una perforación y la pared exterior debe ser 1.5 mm (0.060 in).

muestras y perforaciones verticales, como las de la figura 16.18, porque no interfieren con la remoción. Las perforaciones verticales pueden hacerse de sección transversal no redonda (por ejemplo, cuadradas o estriadas) sin aumentar significativamente las herramientas o las dificultades de procesamiento.

- Las cuerdas roscadas no se pueden fabricar en metalurgia de polvos; si se necesitan, deben maquinarse en la pieza ya tratada por PM.
- Los chaflanes y esquinas redondeadas son posibles en el prensado de metalurgia de polvos, como se muestra en la figura 16.19. Cuando los ángulos son muy agudos se encuentran problemas con la rigidez de los punzones.
- El espesor de la pared debe tener un mínimo de 1.5 mm (0.060 in) entre dos perforaciones o entre una perforación y la pared exterior de la pieza, como se indica en la figura 16.20. El diámetro mínimo recomendado de la perforación es de 1.5 mm (0.060 in).

REFERENCIAS

- | | |
|--|---|
| <p>[1] Amstead, B. H., Ostwald, P. F. y Begeman, M. L., Manufacturing Processes, 8a. ed., John Wiley & Sons, Inc., Nueva York, 1987.</p> <p>[2] Bralla, J. G. (ed.), Design form Manufacturability Handbook, 2a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1998.</p> <p>[3] Bulger, M., "Metal Injection Molding," Advanced Materials & Processes, marzo de 2005, pp. 39-40.</p> <p>[4] Dixon, R. H. T. y Clayton, A., Powder metallurgy for Engineers, The Machinery Publishing Co. Ltd., Brighton, U.K., 1971.</p> <p>[5] German, R. M., Powder Metallurgy Science, 2a. ed., Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J., 1994.</p> <p>[6] German, R. M., Powder Injection Molding, Metal Powder Industries Federation, Princeton, N. J. 1990.</p> <p>[7] Johnson, P. K., "P/M Industry Trends in 2005", Advanced Materials & Processes, marzo de 2005, pp. 25-28.</p> | <p>[8] Metals Handbook, 9a. ed., vol. 7. Powder Metallurgy. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1984.</p> <p>[9] Pease, L. F., "A Quick Tour of Powder Metallurgy", Advanced Materials & Processes, marzo de 2005, pp. 36-38.</p> <p>[10] Powder Metallurgy Design Handbook, Metal Powder Industries Federation, Princeton, Nueva Jersey, 1989.</p> <p>[11] Schey, J. A., Introduction to Manufacturing Processes, 3a. ed. McGraw-Hill Book Company, Nueva York, 1999.</p> <p>[12] Waldron, M. B. y Daniell, B. L., Sintering, Heyden, Londres, U. K., 1978.</p> <p>[13] Wick, C., Benedict, J. T. y Veilleux, R. F. (eds.), Tools and Manufacturing Engineers Handbook, 4a. ed., vol. II, Forming. Society of Manufacturing Engineers. Dearborn, Mich. 1984.</p> |
|--|---|

PREGUNTAS DE REPASO

- | | |
|---|---|
| <p>16.1. Mencione algunas razones que explican la importancia comercial de la metalurgia de polvos.</p> <p>16.2. ¿Cuáles son algunas desventajas de los métodos de metalurgia de polvos?</p> <p>16.3. ¿Qué significa el número de malla en el cribado de polvos para su clasificación?</p> <p>16.4. ¿Cuál es la diferencia entre poros abiertos y poros cerrados en los polvos metálicos?</p> <p>16.5. ¿Qué significa el término razón de aspecto para una partícula metálica?</p> <p>16.6. ¿Cómo se mide el ángulo de reposo para una cantidad dada de polvo metálico?</p> <p>16.7. Defina la densidad real y la densidad volumétrica para polvos metálicos.</p> | <p>16.8. ¿Cuáles son los principales métodos para producir polvos metálicos?</p> <p>16.9. ¿Cuáles son los tres pasos básicos de los procesos de formado convencionales en la metalurgia de polvos?</p> <p>16.10. ¿Cuál es la diferencia técnica entre mezclado y combinado en la metalurgia de polvos?</p> <p>16.11. ¿Cuáles son algunos de los ingredientes que se añaden usualmente a los polvos metálicos durante el mezclado o combinado?</p> <p>16.12. ¿Qué se entiende por el término compactado fresco?</p> <p>16.13. Describa lo que les pasa a las partículas individuales durante la compactación.</p> <p>16.14. ¿Cuáles son los tres pasos en el ciclo de sinterizado en metalurgia de polvos?</p> |
|---|---|

- 16.15. ¿Cuáles son algunas razones por las que convienen hornos con atmósfera controlada en el sinterizado?
- 16.16. ¿Cuáles son las ventajas de la infiltración en la metalurgia de polvos?
- 16.17. ¿Qué diferencia hay entre moldeo por inyección de polvos y moldeo por inyección metálica?
- 16.18. ¿Cómo se distingue el prensado isostático del prensado convencional y sinterizado en metalurgia de polvos?
- 16.19. Describa el sinterizado en fase líquida.
- 16.20. ¿Cuáles son las dos clases básicas de polvos metálicos desde el punto de vista químico?
- 16.21. ¿Por qué la metalurgia de polvos es tan apropiada para la producción de engranes y rodamientos?

CUESTIONARIO DE OPCIÓN MÚLTIPLE

En las siguientes preguntas de opción múltiple hay un total de 19 respuestas correctas (algunas preguntas tienen varias respuestas correctas). Para obtener una calificación perfecta hay que dar todas las respuestas correctas del cuestionario. Cada respuesta correcta vale un punto. Por cada respuesta omitida o errónea, la calificación se reduce en un punto, y cada respuesta adicional que sobrepase el número correcto de respuestas reduce la calificación en un punto. El porcentaje de calificación se basa en el número total de respuestas correctas.

- 16.1. El tamaño de las partículas que pueden pasar a través de una criba se obtiene por el recíproco del número de malla de la criba: *a)* verdadero o *b)* falso.
- 16.2. Para un peso dado de polvo metálico, el área superficial total de los polvos se incrementan por (dos respuestas mejores): *a)* mayor tamaño de partícula, *b)* menor tamaño de partícula, *c)* mayor factor de forma o *d)* menor factor de forma.
- 16.3. Al aumentar el tamaño de partícula, la fricción interparticular *a)* disminuye, *b)* aumenta o *c)* permanece igual.
- 16.4. ¿Cuál de las siguientes formas de polvo tiende a poseer la menor fricción interparticular? *a)* acicular, *b)* cúbica, *c)* hojuelas, *d)* esférica y *e)* redondeada.
- 16.5. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta en el contexto de los polvos metálicos? (tres respuestas correctas) *a)* porosidad + factor de empaquetamiento = 1.0, *b)* factor de empaquetamiento = $1/\text{porosidad}$, *c)* factor de empaquetamiento = $1.0 - \text{porosidad}$, *d)* factor de empaquetamiento = $-\text{porosidad}$, *e)* factor de empaquetamiento = densidad volumétrica/densidad real?
- 16.6. ¿Cuál de las siguientes fórmulas tipifica de manera más precisa las temperaturas de sinterizado en la metalurgia de polvos? *a)* $0.5 T_m$, *b)* $0.8 T_m$, *c)* T_m , donde T_m = temperatura de fundido del metal.
- 16.7. El reprensado se refiere a una operación de prensado que se usa para comprimir una pieza no sinterizada de un troquel cerrado y lograr así su dimensionado y un mejor acabado de la superficie: *a)* verdadero o *b)* falso.
- 16.8. ¿A cuál de las siguientes opciones se refiere la impregnación? (dos respuestas son más apropiadas): *a)* llenar los poros de una pieza de metalurgia de polvos con un metal fundido, *b)* colocar polímeros en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos, *c)* empapado de aceite por acción de capilaridad en los poros de una pieza de la metalurgia de polvos y *d)* algo que no debe pasar en una fábrica.
- 16.9. En el prensado isostático, ¿con cuál de los siguientes materiales está hecho típicamente el molde? *a)* caucho, *b)* lámina de metal, *c)* textiles, *d)* polímero termofijo o *e)* acero de herramienta.
- 16.10. ¿Cuál de los siguientes procesos combina el prensado y el sinterizado de polvos metálicos? (tres respuestas mejores): *a)* prensado isostático caliente, *b)* prensado caliente, *c)* moldeo por inyección de metal, *d)* prensado y sinterizado y *e)* sinterizado por chispas.
- 16.11. ¿Cuál de las características de diseño dificultaría o imposibilitaría la realización del prensado y sinterizado convencionales? (tres respuestas mejores): *a)* esquinas exteriores redondeadas, *b)* perforaciones laterales, *c)* perforaciones roscadas, *d)* perforaciones verticales abocardadas y *e)* paredes verticales de 1/8 in (3 mm) de espesor.

PROBLEMAS

Caracterización de los polvos en ingeniería

- 16.1. Una criba con un número de malla 325 tiene alambres con un diámetro de 0.001377 in. Utilizando la ecuación (16.1) determine: *a)* el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b)* la proporción de espacios abiertos en la criba.
- 16.2. Una criba con número de malla 10 tiene alambres con un diámetro de 0.0213 in. Utilizando la ecuación (16.1), determine: *a)* el tamaño máximo de partícula que pasaría a través de la malla de alambre y *b)* la proporción de espacios abiertos en la criba.

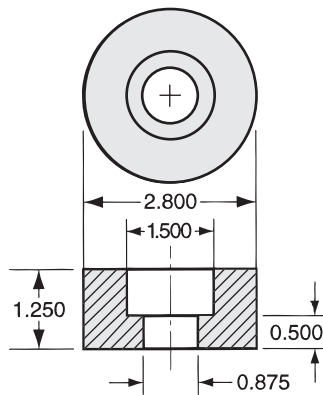
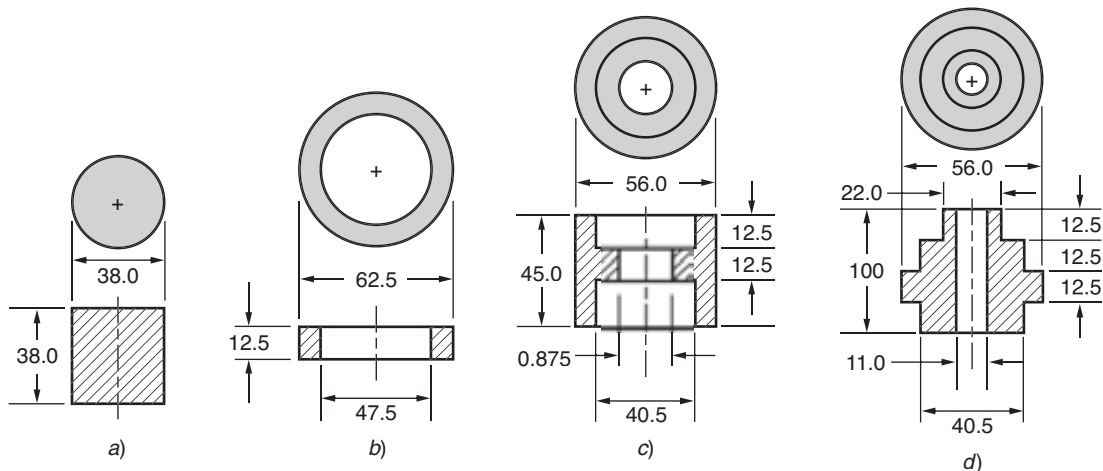


FIGURA P16.13 Pieza para el problema 16.13 (dimensiones en in.).

- 16.3. ¿Cuál es la razón de aspecto de una partícula con forma cúbica?
- 16.4. Determine el factor de forma para partículas metálicas de las siguientes formas ideales: *a)* esférica, *b)* cúbica, *c)* cilíndrica con una razón de longitud al diámetro de 1:1, *d)* cilíndrica con razón de longitud al diámetro de 2:1 y *e)* hojuela en forma de disco cuya razón de espesor a diámetro es 1:10.
- 16.5. Un montón de polvo de hierro pesa 2 libras. Las partículas son de forma esférica y todas tienen el mismo diámetro de 0.002 in. *a)* Determine el área superficial total de todas las partículas que estén apiladas. *b)* Si el factor de empaquetamiento es igual a 0.6, determine el volumen de la pila de partículas. Nota: la densidad del hierro es igual a 0.284 lb/in³.
- 16.6. Resuelva el problema 16.5, si el diámetro de las partículas es de 0.004 in. Suponga el mismo factor de empaquetamiento.
- 16.7. En el problema 16.5 suponga que el diámetro promedio de la partícula es igual a 0.002 in; sin embargo, los tamaños varían formando una distribución estadística como sigue: 25% en peso de las partículas miden 0.001 in, 50% miden 0.002 in y 25% miden 0.003 in. Dada esta distribución, ¿cuál es área superficial total de todas las partículas en el montón?
- 16.8. En un cubo sólido de cobre cuyo lado = 1.0 ft se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas, ¿cuál es el porcentaje de incremento en el área superficial total si el diámetro de cada partícula es de 0.004 in? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).
- 16.9. En cubo sólido de aluminio, cuyos lados = 1.0 m, se convierte en polvo metálico de forma esférica por atomización con gas. ¿Cuánta superficie se añade por este proceso si el diámetro de la partícula es de 100 micras? (Suponga que todas las partículas tienen el mismo tamaño).
- 16.10. Dado un volumen grande de polvos metálicos, en el cual todos son perfectamente esféricos y tienen exactamente el mismo diámetro, ¿cuál es el factor de empaquetamiento máximo posible que pueden tener?

FIGURA P16.14 Piezas para el problema 16.14 (dimensiones en milímetros).



Consideraciones de diseño y compactación

- 16.11. En cierta operación de prensado los polvos metálicos que se le alimentan a un molde abierto tienen un factor de empaquetamiento de 0.5. La operación de prensado reduce el polvo a dos terceras partes de su volumen inicial. En la operación de sinterizado posterior, la contracción asciende a 10% sobre base volumétrica. Dado que éstos son los únicos factores que afectan la estructura de la pieza terminada, determine su porosidad final.
- 16.12. Se va a prensar un rodamiento de forma simple a partir de polvos de bronce usando una presión de compactación de 207 MPa. El diámetro exterior es de 44 mm, el diámetro interior de 22 mm y la longitud del rodamiento es de 25 mm. ¿Cuál es el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación?
- 16.13. La pieza que se muestra en la figura P16.13 se va a prensar a partir de polvos de hierro, usando una presión de compactación de 75 000 lb/in². Las dimensiones están en in. Determine *a*) la dirección más apropiada del prensado, *b*) el tonelaje requerido de la prensa para desempeñar esta operación y *c*) el peso final de la pieza si la porosidad es de 10%. Suponga que la contracción durante el sinterizado se puede despreciar.
- 16.14. Indique a qué clase de piezas de metalurgia de polvos pertenece cada uno de los cuatro dibujos que aparecen en la figura P16.14; indique también si la pieza debe ser prensada en una o dos direcciones y cuántos niveles de control de prensa se requerirán. Las dimensiones están en milímetros.