
CAPÍTULO II

Fundición, Moldeo y Procesos Afines

2.1 FUNDAMENTOS DE LA FUNDICIÓN DE METALES

La fundición es un proceso en el cual se hace fluir metal fundido dentro la cavidad de un molde, donde solidifica y adquiere la forma del molde. Es uno de los procesos más antiguos de formado que remonta 6 mil años atrás y son muchos los factores y variables que debemos considerar para lograr una operación de fundición exitosa.

La fundición incluye: la fundición de lingotes y la fundición de formas. El lingote es una fundición en grande de forma simple (barras rectangulares largas), diseñada para volver a formarse en otros procesos subsiguientes como laminado o forjado. La fundición de formas involucra la producción de piezas complejas que se aproximan más a la forma final deseada del producto. Este capítulo se ocupa de estas formas de fundición más que de los lingotes.

Existen diversos métodos para la fundición de formas, lo cual hace de este proceso uno de los más versátiles en manufactura. Sus posibilidades y ventajas son las siguientes:

- La fundición se puede usar para crear partes de compleja geometría, incluyendo formas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición pueden producir partes de forma neta que no requieren operaciones subsecuentes para llenar los requisitos de la geometría y dimensiones de la parte.
- Se puede usar la fundición para producir partes de unos cuantos gramos hasta formas que pesan más de 100 toneladas (coronas dentales, joyería, estatuas, bloques y cabezas para motores automotrices, bases para máquinas, ruedas para ferrocarril, tubos, carcasas para bombas, etc.).
- El proceso de fundición puede realizarse en cualquier metal que pueda calentarse y pasar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son altamente adaptables a la producción en masa.

Se debe mencionar también las desventajas asociadas con el proceso de fundición. Estas incluyen:

- Las limitaciones de algunos procesos
- Se pueden obtener piezas con propiedades mecánicas no homogéneas
- Piezas con porosidad
- Baja precisión dimensional
- Acabado deficiente de la superficie
- Los riesgos que los trabajadores corren durante el procesamiento
- Problemas ambientales.

Se pueden fundir todas las variedades de metales ferrosos y no ferrosos polímeros y cerámicos. En este tema revisamos los fundamentos que se aplican prácticamente a todas las operaciones de fundido; se describen los procesos de fundición individualizados, junto con los aspectos que deben considerarse en el diseño de productos de fundición.

2.1.1. TECNOLOGÍA DE FUNDICIÓN

El proceso de fundiciones realiza en una fundidora. Una *fundidora* es una fábrica equipada para hacer moldes, fundir y manejar el metal en estado líquido, desempeñar los procesos de fundición y limpieza de las piezas terminadas. Los trabajadores que realizan estas operaciones se llaman *fundidores*.

El primer paso que se da en el proceso de fundición es la fabricación del molde. El *molde* contiene una cavidad que dará la forma geométrica de la parte a fundir. La cavidad debe diseñarse de forma y tamaño ligeramente sobredimensionados, esto permitirá la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento. Cada metal sufre diferentes porcentajes de contracción, por tanto, la cavidad debe diseñarse para el metal particular que se va a fundir. La cavidad del molde proporciona la superficie externa de la fundición; pero además puede tener superficies internas, que se definen por medio de corazones, los cuales son formas colocadas en el interior de la cavidad del molde para formar la geometría interior de la pieza. Los moldes se hacen de varios materiales que incluyen arena, yeso, cerámica y metal. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo a los diferentes tipos de moldes.

En una operación de fundición, se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente en líquido. Después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un *molde abierto* figura 2.1(a), el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad abierta. En un *molde cerrado* figura 2.1(b) y 2.1(c) una vía de paso llamada sistema de vaciado permite el flujo del metal fundido desde fuera del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es la forma más importante de producción en operaciones de fundición. El *sistema de vaciado* en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior. El sistema de vaciado, consiste típicamente en un *bebedero de colada* (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación o corredor que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del bebedero existe frecuentemente una *copa de vaciado* para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero. En el diagrama aparece como un simple embudo en forma de cono. Algunas copas de vaciado se diseñan en forma de tazón como en la figura 2.1(c) con un canal abierto que conduce al bebedero.

En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. La mazarota es una reserva en el molde que sirve como fuente de metal líquido para compensar la contracción de la fundición durante la solidificación. A fin de que la mazarota cumpla adecuadamente con su función, debe diseñarse de tal forma que solidifique después de la fundición principal.

Una vez que la fundición se ha enfriado lo suficiente, se remueve del molde. Pueden necesitarse procesamientos posteriores, dependiendo del método de fundición y del metal que se usa. Entre éstos se encuentran el desbaste del metal excedente de la fundición, la limpieza de la superficie, la inspección del producto y el tratamiento térmico para mejorar sus propiedades. Además, puede requerirse maquinado para lograr tolerancias estrechas en ciertas partes de la pieza y para remover la superficie fundida y microestructura metalúrgica asociada.

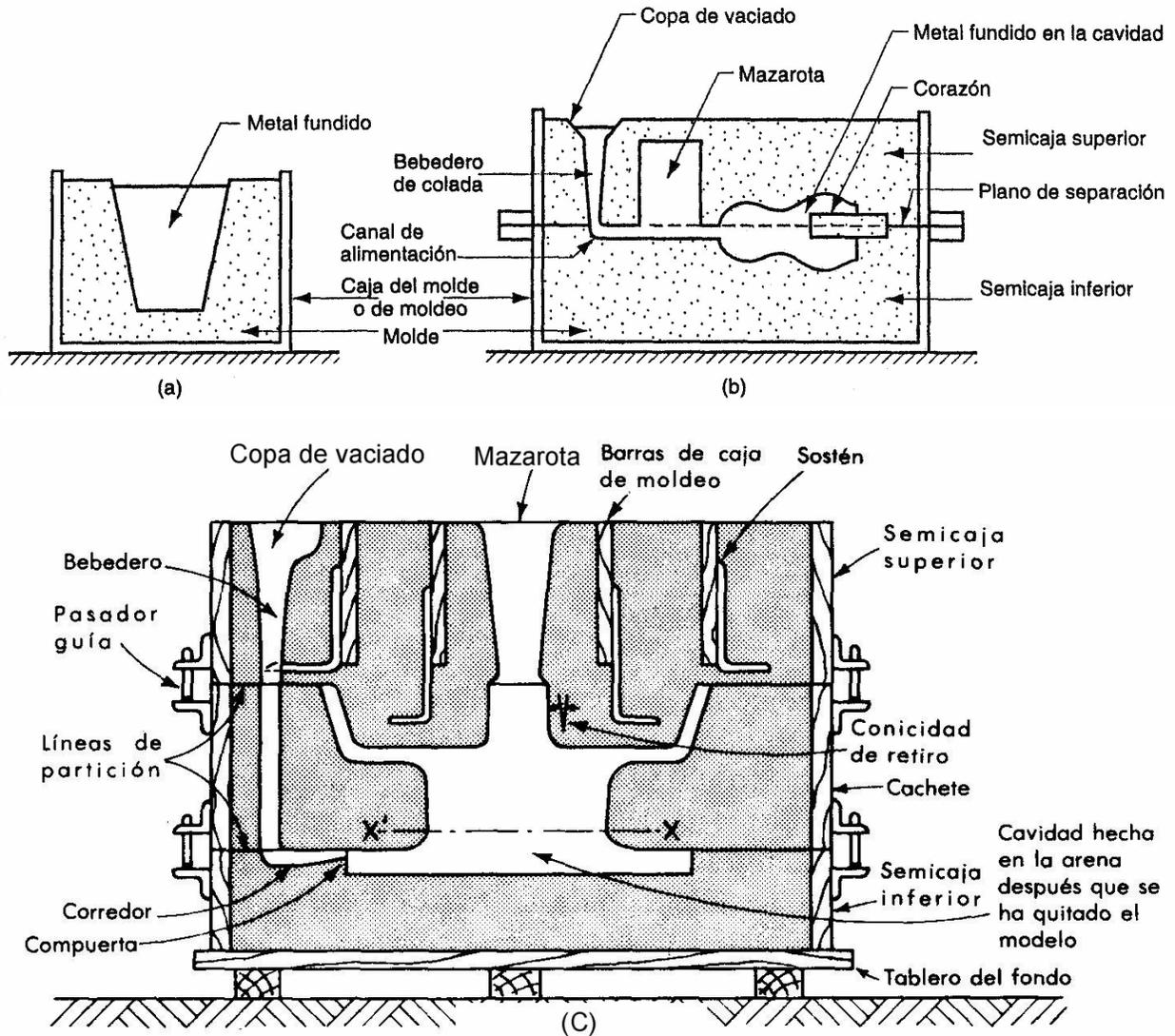


FIGURA 2.1 Dos formas de molde: (a) molde abierto, simplemente un recipiente con la forma de la parte de fundición; (b) molde cerrado, de forma más compleja que requiere un sistema de vaciado (vía de paso) conectado con la cavidad; y c) Sección transversal de un molde en tres partes

Modelos El modelo es una forma usada para preparar y producir la cavidad en el molde. El diseño debe ser lo más simple que sea posible para facilitar el retiro del molde. El modelo tiene en esencia la forma de la pieza a fundir con formas para bebederos, mazarotas, etc. El modelo puede estar en dos piezas una para la semicaja superior y la otra para la semicaja inferior para facilitar la construcción de la cavidad del molde, algunas piezas pueden ser sueltas para que sean removidas por separado y evitar la destrucción del modelo o del molde. La madera es el material que generalmente se usa para fabricar los modelos ya que es sencilla de trabajar y se la encuentra fácilmente, la madera empleada deberá estar casi seca con 5 a 6 % de humedad para evitar que se tuerza o la formación de grietas lo que ocasionaría una distorsión en el molde final. Se usa el modelo en madera cuando se tiene un número discreto de piezas a fabricar, o cuando la pieza es demasiado grande lo cual facilitara el manejo de la misma.

Cuando aumenta el número de piezas es común encontrar modelos de metal hechos de aluminio o magnesio que pueden estar sueltos o empotrados en soportes para modelos, también son muy comunes los modelos de yeso ya que son fáciles de elaborar pero muy quebradizos a la hora fabricar la cavidad. El plástico también juega un papel importante en la fabricación de modelos es un intermedio entre la madera y el metal y puede producir cantidades considerables de moldes

Tolerancias en el Modelo El modelo con el cual se fabrica la cavidad del molde debe ser un tanto diferente de la pieza a producir tanto en forma como en dimensiones. Estas diferencias intencionales incorporadas al modelo se llaman *tolerancias del modelo*. La tolerancia por *contracción* compensa la disminución de tamaño que experimenta la pieza al solidifican y enfriar. La tabla 2.1 muestra valores para contracción volumétrica para distintos metales. La tolerancia de *maquinado* es la cantidad que compensa al material que se desperdicia en operaciones de maquinado que darán el acabado final a la pieza

2.1.2. CALENTAMIENTO Y VACIADO

Para desarrollar la operación de fundición, el metal se calienta hasta una temperatura ligeramente mayor a su punto de fusión y después se vacía en la cavidad del molde para que se solidifique. En esta sección consideramos varios aspectos de estos dos pasos en la fundición.

2.1.2.1. Calentamiento del metal

Se usan varias clases de hornos, para calentar el metal a la temperatura necesaria. La energía calorífica requerida es la suma de 1) calor para elevar la temperatura hasta el punto de fusión, 2) calor de fusión para convertir el metal sólido a líquido y 3) calor para elevar al metal fundido a la temperatura de vaciado. Esto se puede expresar como:

$$H = \rho V \{ C_s (T_m - T_o) + H_f + C_l (T_p - T_m) \} \quad 2.1$$

Donde:

H = Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión, (J)

ρ = Densidad, (Kg/m³)

C_s = Calor específico del material sólido, (J/Kg °C)

T_m = Temperatura de fusión del metal, (°C)

T_o = Temperatura inicial, generalmente la ambiente, (°C);

H_f = Calor de fusión, (J/Kg)

C_l = Calor específico en peso del metal líquido, (J/Kg°C)

T_p = Temperatura de vaciado, (°C)

V = Volumen del metal que se calienta, (m³).

Ejemplo 2.1: Calentamiento del metal para fundición.

Un volumen de 0.03 m^3 de una cierta aleación eutéctica se va a calentar en un crisol desde la temperatura ambiente hasta $100 \text{ }^\circ\text{C}$ por encima de su punto de fusión. Las propiedades de la aleación son densidad = 4160 kg/m^3 , punto de fusión = $700 \text{ }^\circ\text{C}$, calor específico del metal = $343.32 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ en el estado sólido y $297.26 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ en el estado líquido; y el calor de fusión = 167120.85 J/kg . ¿Cuánta energía calorífica se debe añadir para alcanzar el calentamiento, asumiendo que no hay pérdidas?

Solución: Si aceptamos que la temperatura ambiente en la fundición = $26 \text{ }^\circ\text{C}$ y que las densidades en los estados líquido y sólido del metal son las mismas, al sustituir los valores de las propiedades en la ecuación (2.1) se tiene:

$$\begin{aligned} H &= (4160)(0.03)\{343.32(700-26) + 167120.85 + 297.26(800-700)\} \\ &= 53444917.34 \text{ J} \end{aligned}$$

La ecuación 2.1 tiene un valor conceptual y su cálculo es de utilidad limitada, no obstante se usa como ejemplo. El cálculo de la ecuación 2.1 es complicado por los siguientes factores: 1) el calor específico y otras propiedades térmicas del metal sólido varían con la temperatura, especialmente si el metal sufre un cambio de fase durante el calentamiento; 2) el calor específico de un metal puede ser diferente en el estado sólido y en estado líquido; 3) la mayoría de los metales de fundición son aleaciones que funden en un intervalo de temperaturas entre sólidos y líquidos en lugar de un punto único de fusión, por lo tanto, el calor de fusión no puede aplicarse tan fácilmente como se indica arriba; 4) en la mayoría de los casos no se dispone de los valores requeridos en la ecuación para una aleación particular y 5) durante el calentamiento hay pérdidas de calor significativas.

2.1.2.2 Vaciado del metal fundido

Después del calentamiento, el material está listo para vaciarse. La introducción del metal fundido en el molde y su flujo dentro del sistema de vaciado y de la cavidad es un paso crítico en el proceso. Para que este paso tenga éxito, el metal debe fluir antes de solidificarse a través de todas las regiones del molde, incluida la región más importante que es la cavidad principal. Los factores que afectan la operación de vaciado son la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia.

La *temperatura de vaciado* es la temperatura del metal fundido al momento de su introducción en el molde. Lo importante aquí es la diferencia entre la temperatura de vaciado y la temperatura a la que empieza la solidificación (el punto de fusión para un metal puro, o la temperatura líquida para una aleación). A esta diferencia de temperaturas se le llama algunas veces *sobrecalentamiento*.

La *velocidad de vaciado* es el caudal con que se vierte el metal fundido dentro del molde. Si la velocidad es muy lenta, el metal puede enfriarse antes de llenar la cavidad. Si la velocidad de vaciado es excesiva provoca turbulencia y puede convertirse en un problema serio.

La *turbulencia de flujo* se caracteriza por variaciones erráticas de la velocidad del fluido; cuando éste se agita, genera corrientes irregulares en lugar de fluir en forma laminar. El flujo turbulento debe evitarse durante el vaciado por varias razones. Tiende a acelerar la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación, degradando así la calidad de la fundición. La turbulencia provoca una erosión excesiva del molde, que es el desgaste gradual de las superficies del molde debido al impacto del flujo de metal fundido. La erosión es especialmente seria cuando ocurre en la cavidad principal porque afecta la forma de la parte fundida.

2.1.2.2.1 Análisis ingenieril del vaciado

Varias relaciones gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de vaciado y dentro del molde. Una relación importante es el *teorema de Bernoulli*, el cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica, energía cinética y fricción) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye es igual. Esto se puede escribir en la siguiente forma:

$$h_1 + \frac{P_1}{g\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{g\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + F_{1-2} \quad 2.2$$

Donde:

h = Altura, (m)

P = Presión en el líquido, (N/m²)

ρ = Densidad, (Kg/m³)

v = Velocidad de flujo en (m/seg)

g = Constante de la aceleración gravitacional, (9.81 m/seg²);

F = Pérdidas de carga debidas a la fricción, (metros).

Los subíndices 1 y 2 indican los dos puntos cualesquiera en el flujo del líquido.

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Si ignoramos las pérdidas por fricción (de seguro, la fricción afectará el flujo del líquido a través del molde de arena) y asumimos que el sistema permanece a presión atmosférica en toda su extensión, entonces la ecuación puede reducirse a:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad 2.3$$

La cual puede usarse para determinar la velocidad del metal fundido en la base del bebedero de colada. Definamos un punto (1) en la parte superior del bebedero y un punto (2) en la base. Si el punto (2) se usa como referencia, entonces la altura en ese punto es cero ($h_2 = 0$) y h_1 es la altura (longitud) del bebedero. Cuando se vierte el metal en la copa de vaciado y fluye hacia abajo, su velocidad inicial en la parte superior es cero ($v_1 = 0$). Entonces la ecuación 1.3 se simplifica a

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

que se puede resolver para la velocidad del flujo:

$$v = \sqrt{2gh} \quad 2.4$$

Donde:

v = Velocidad del metal líquido en la base del bebedero de colada, (m/seg);

g = 9.81 m/seg²

h = Altura del bebedero (m)

Otra relación de importancia durante el vaciado es la ley de continuidad, la cual establece que la velocidad volumétrica del flujo permanece constante a través del líquido. La velocidad del flujo volumétrico m³/seg es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del flujo líquido. La ley de continuidad puede expresarse como:

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad 2.5$$

Donde:

Q = Velocidad de flujo volumétrico, (m³/seg);

v = Velocidad, (m/seg);

A = Área de la sección transversal del líquido, (m²)

Los subíndices se refieren a cualquiera de los dos puntos en el sistema de flujo. Entonces, un incremento en el área produce un decremento en la velocidad y viceversa.

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 indican que el bebedero debe ser ahusado. El área de la sección transversal del canal debe reducirse conforme el metal se acelera durante su descenso en el bebedero de colada; de otra manera, puede aspirar aire dentro del líquido debido al incremento de la velocidad del metal que fluye hacia la base del bebedero y conducirlo a la cavidad del molde. Para prevenir esta condición, se diseña el bebedero con un ahusamiento de manera que la velocidad volumétrica de flujo vA sea misma en la parte superior y en el fondo del bebedero.

Si aceptamos que el canal alimentador de la base del bebedero a la cavidad del molde sea horizontal (y por tanto que la altura sea la misma que la de la base del bebedero), la velocidad volumétrica de flujo a través del sistema de vaciado y dentro de la cavidad del molde permanece igual a vA en la base. Por consiguiente, podemos estimar el tiempo requerido para llenar una cavidad de volumen V como sigue:

$$MFT = \frac{V}{Q} \quad 2.6$$

Donde:

MFT = Tiempo de llenado del molde, seg. (s);

V = Volumen de la cavidad del molde, (m³);

Q = Velocidad volumétrica de flujo. (m³/seg)

El tiempo de llenado del molde calculado por la ecuación 2.6 debe considerarse como tiempo mínimo, debido a que el análisis ignora las pérdidas por fricción y la posible constricción del flujo en el sistema de vaciado; por tanto, el tiempo de llenado del molde será mayor que el resultante de la ecuación 2.6

Ejemplo 2.2: Cálculos de vaciado.

Un molde tiene un bebedero de colada cuya longitud es 0.20 m y el área de la sección transversal en la base del bebedero es 0.000258 m². El bebedero alimenta a un canal horizontal que conduce a la cavidad del molde cuyo volumen es 0.0016387 m³. Determine a) la velocidad del metal fundido en la base del bebedero, b) la velocidad volumétrica de flujo y c) el tiempo de llenado del molde.

Solución: a) La velocidad del flujo de metal en la base del bebedero está dada por la ecuación 2.4

$$v = \sqrt{2hg} = \sqrt{2 \cdot 9.81 \cdot 0.20} = 1.98 \text{ m /seg}$$

b) La velocidad volumétrica de flujo es

$$Q = (0.000258 \text{ m}^2)(1.98 \text{ m/seg}) = 0.00051107 \text{ m}^3/\text{seg}$$

c) El tiempo requerido para llenar una cavidad de 0.0016387 m³ con este flujo es

$$MFT = 0.0016387/0.0005152 = 3.2 \text{ seg.}$$

2.1.2.3 Fluidez

Las características del metal fundido se describen frecuentemente con el término fluidez, una medida de la capacidad del metal par llenar el molde antes de enfriar. Existen métodos normales de ensayo para valorar la fluidez, como el molde espiral de prueba que se muestra en la figura 2.2, donde la fluidez se mide por la longitud del metal solidificado en el canal espiral. A mayor longitud, mayor fluidez del metal fundido.

Los factores que afectan la fluidez son la temperatura de vaciado, la composición del metal, la viscosidad del metal líquido y el calor transferido de los alrededores. Una temperatura mayor, con respecto al punto de solidificación del metal, incrementa el tiempo que el metal permanece en estado líquido permitiéndole avanzar más, antes de solidificarse. Esto tiende a agravar ciertos problemas como la formación de óxido, la porosidad gaseosa y la penetración del metal líquido en los espacios

intersticiales entre los granos de arena que componen el molde. Este último problema causa que la superficie de la fundición incorpore partículas de arena que la hacen más rugosa y abrasiva de lo normal.

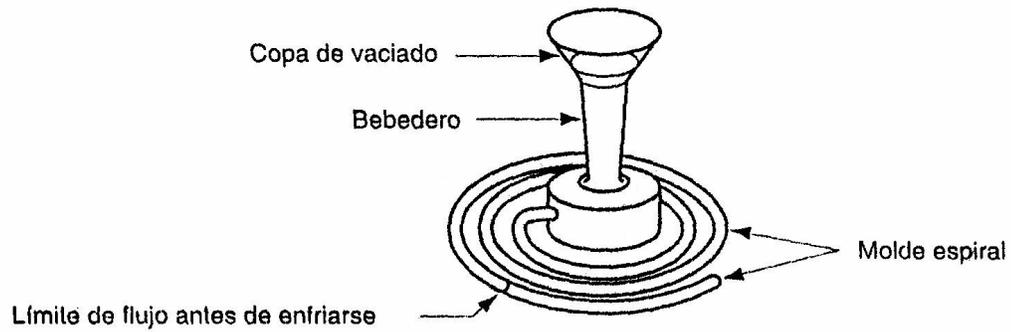


FIGURA 2.2 Molde espiral para ensayo de la fluidez, ésta se mide por la longitud del canal espiral lleno antes de la solidificación