

CAPÍTULO 2

MÉTODOS DE FUNDICIÓN O COLADA

2.1 CONCEPTOS GENERALES

En el proceso de fundición, el metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza dentro de un molde donde se solidifica y toma la forma de la cavidad del molde (figura 2.1). El término **fundición** se aplica también a la parte resultante de este proceso. Es uno de los más antiguos procesos de formado que se remonta 6 mil años atrás. El principio de la fundición es simple: se funde el metal, se vacía en un molde y se deja enfriar.

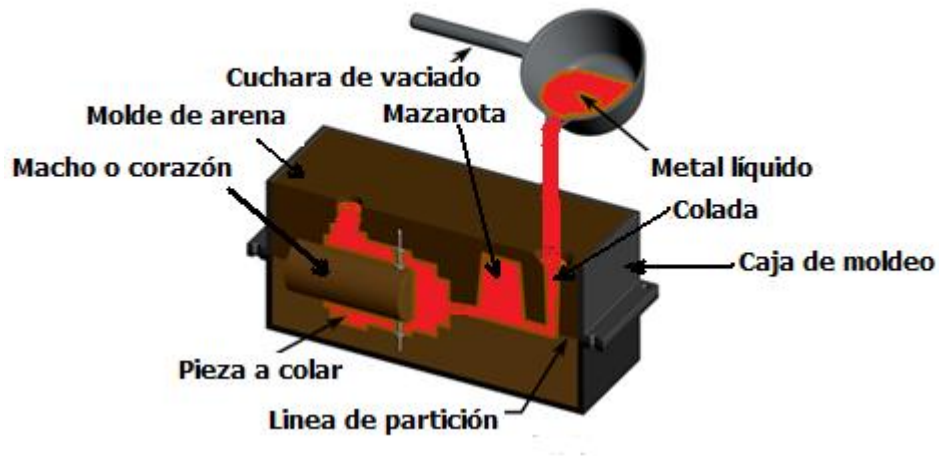


FIGURA 2.1 Descripción esquemática del proceso de colada

La fundición incluye la producción de lingotes y la fundición de piezas de forma particular. El término **lingote** se asocia usualmente con las industrias de metales primarios; describe la producción de una pieza generalmente grande de forma simple, diseñada para volver a formarse en procesos subsiguientes como laminado o forjado. La producción de piezas de geometría

compleja involucra la producción de elementos que solo serán modificados, en su geometría y dimensiones, mediante procesos con arranque de viruta.

Existen diversos métodos utilizados en la producción de piezas de geometría irregular, 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 geometría compleja (figura 2.2)
- Algunos procesos de fundición pueden producir partes de forma neta que no requieren operaciones subsecuentes para llenar los requisitos geométricos y dimensionales de la pieza.
- Se puede usar la fundición para producir partes muy grandes. Se han fabricado piezas fundidas que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición puede realizarse en cualquier metal o aleación que pueda calentarse y pasar al estado líquido. En este caso el proceso está limitado a materiales con temperaturas de fusión menores a los 1750 °C, por lo que los metales refractarios no son procesados mediante estas técnicas.
- La factibilidad de aproximarse a la geometría y dimensiones finales vuelve a los procesos de fundición una opción muy económica en el caso de que el diseño conlleve a una geometría irregular.

No obstante, también hay **desventajas** asociadas con la fundición y sus diferentes métodos. Éstas incluyen la porosidad y las propiedades mecánicas inherentes al proceso de solidificación y enfriamiento.

Las piezas de fundición fluctúan en **tamaño**, desde pequeños componentes que pesan solamente unos cuantos gramos hasta grandes productos de más de 100 toneladas. La lista incluye coronas dentales, joyería, estatuas, estufas de hierro fundido, bloques y cabezas para motores automotrices, bases para máquinas, ruedas para ferrocarril, utensilios de cocina, carcasas para bombas. Se pueden fundir casi todas las variedades de metales ferrosos y no ferrosos.



FIGURA 2.2 Algunos ejemplos de piezas obtenidas por fundición

Para llevar a cabo un proceso de fundición se requiere del metal líquido y el molde o matriz en que se depositará el metal (figura 2.3). Es por consecuencia que al analizar el proceso es necesario referirse al molde o matriz, sus materiales, duración y su producción; al metal líquido y a las técnicas de fusión utilizadas, tipo de hornos y mecanismos de preparación y desgasificación.

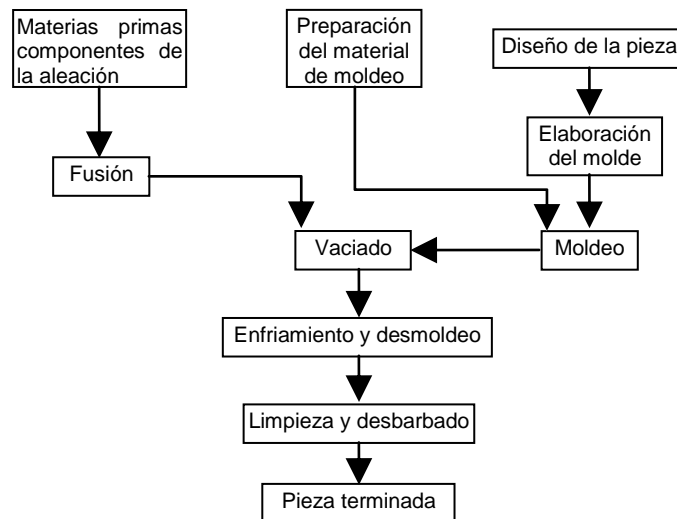


FIGURA 2.3 Etapas principales del proceso de fundición

Tipos de molde

La cavidad en donde se deposita el metal recibe el nombre de molde o matriz y está en función de su duración. Si sólo permitirá un vaciado y posteriormente se destruye se denomina como molde, mientras que el término matriz corresponde con aquel molde que permite más de una operación de vaciado. Si la duración de la matriz es de unas cuantas operaciones se considera como semipermanente, mientras que si su duración es mayor a las 1000 operaciones de vaciado se denomina como permanente.

En el caso de colada en molde desechable el proceso de fundición se inicia con la producción de un molde, para lo cual se requiere de un modelo de la forma y dimensiones de la pieza a producir. Usualmente el molde contiene una o varias cavidades cuya forma geométrica determina la forma de la parte a fundir. La cavidad debe ser ligeramente sobredimensionada, esto permitirá compensar la contracción del metal durante la solidificación y enfriamiento; asimismo, se deberán considerar sobre-espesores para el maquinado de aquellas superficies que así lo demanden. Los moldes se producen de varios materiales que incluyen arena, yeso y cerámica. Los procesos de fundición se clasifican frecuentemente de acuerdo con los diferentes tipos de moldes.

El modelo es la pieza que se pretende reproducir, pero con algunas modificaciones derivadas de la naturaleza del proceso de fundición:

Debe ser ligeramente más grande que la pieza final, ya que se debe tener en cuenta la contracción de la misma una vez se haya enfriado a temperatura ambiente. El porcentaje de contracción estará asociado con el material a vaciar en el molde. Como ya ha sido mencionado, a esta dimensión se debe dar una sobre medida en los casos en el que se dé un proceso adicional de maquinado o acabado por arranque de viruta.

Las superficies del modelo deberán respetar unos ángulos mínimos con la dirección de desmoldeo (la dirección en la que se extraerá el modelo), con objeto de no dañar el molde de arena durante su extracción. Este ángulo se denomina *ángulo de salida*, que generalmente es del orden de 0.5° a 2° . En el caso de que el modelo se extraiga de la cavidad en forma líquida (fundición a la cera perdida) o gaseosa (lost foam casting o colada sin cavidad) no se requerirá de ángulos de salida.

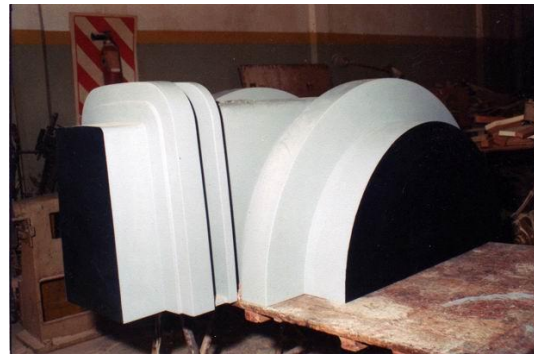
Para permitir que el metal llene la cavidad del molde será necesario contar con canales de alimentación (coladas) y elementos que garanticen que la solidificación termina en zonas externas a la pieza (mazarotas). Asimismo, el molde contendrá cavidades para la colocación de los machos o corazones (los cuales permiten generar cavidades complejas en la pieza fundida).

Producción del modelo

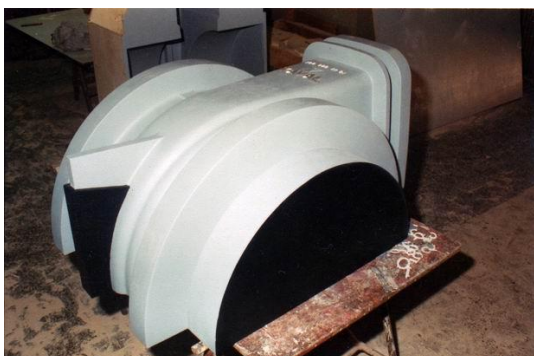
Los modelos (figura 2.4) deben de ser resistentes a la compresión, humedad o temperatura (esto de acuerdo con el proceso de moldeo seleccionado), en ocasiones pueden servir para la producción de una sola pieza (modelos desechables) como es el caso de las técnicas de colada sin cavidad (lost foam casting) o a la cera perdida (precisión casting); en los que son producidos de poliestireno expandido o una mezcla de parafina con polietileno, respectivamente. Lo más usual es que el modelo sirva para varias operaciones de moldeo; en este caso se puede emplear desde madera o plásticos, como el uretano hasta metales como el aluminio o el hierro fundido.



(a)



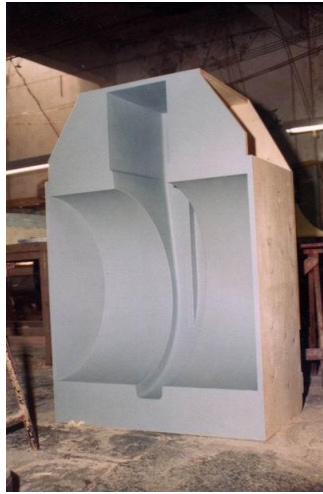
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)

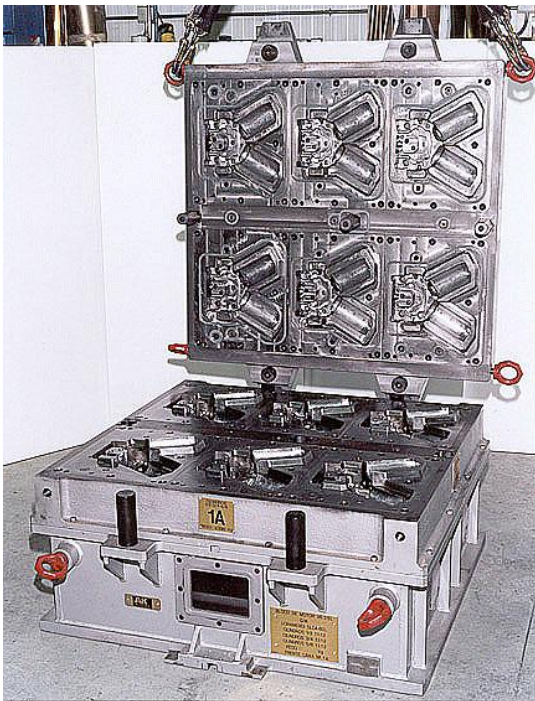


(h)

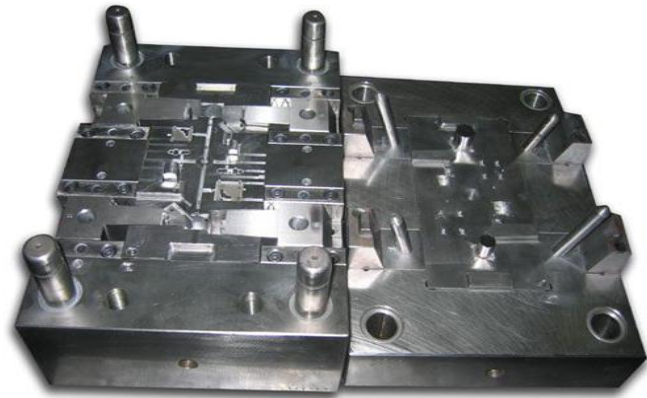
FIGURA 2.4 Modelos para fundición: (a) Impulsor, (b, c) Válvula de compuerta de 36", (d, e) Caja de machos o corazón para la válvula de exclusiva, (f) Modelo de espuma de poliestireno para un block de motor de 4 cilindros, (g) Placa modelo para proceso Shell, (h) Modelo de aluminio para rotor

Usualmente se fabrican dos semimodelos correspondientes a sendas partes del molde que es necesario fabricar.

Existen métodos de fundición en los que el molde es permanente (figura 2.5), dándosele la denominación de matriz, tal es el caso de los procesos de fundición a presión (pressure casting), colada por gravedad en matriz (die casting) y colada a baja presión (low pressure die casting). En el caso de que los moldes sean desechables (arena, cáscara cerámica o yeso), normalmente el llenado será por acción de la gravedad.



(a)



(b)

FIGURA 2.5 Matrices, (a) Colada por gravedad, (b) Inyección

En general, los procesos de fundición con molde no permanente requieren en primera instancia de la generación del molde lo cual consiste de:

- a. Compactación de la arena alrededor del modelo. Operación que puede ser manual o mecánica (generalmente por medios automáticos mediante sistemas neumáticos).
- b. Si la pieza que se quiere fabricar es hueca, será necesario disponer machos o corazones que eviten que el metal fundido rellene dichas cavidades. Para la fabricación del corazón se emplean técnicas (cáscara, caja caliente, CO_2) de aglomerado que garanticen una mayor resistencia (dadas las dimensiones de éstos), una vez formados y endurecidos se procederá a su colocación, para el posterior cerrado del molde.

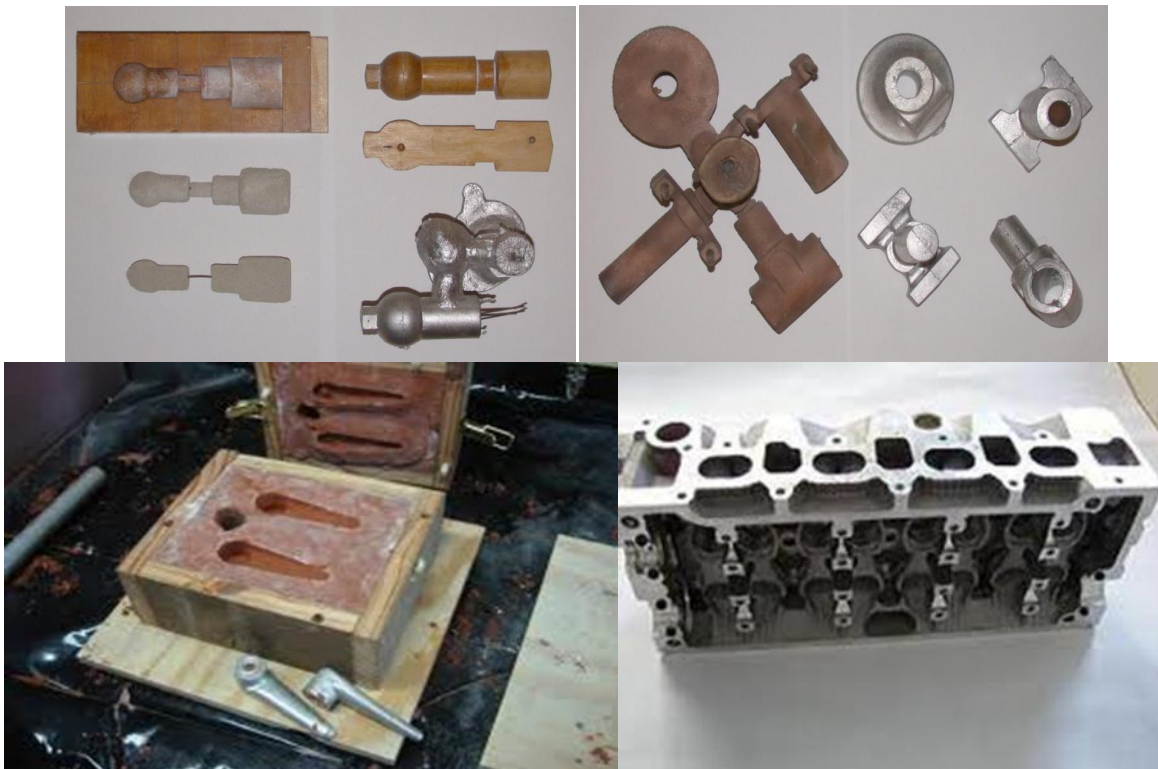


FIGURA 2.6 En la imagen superior de la izquierda se puede observar el modelo, su corazón de arena y la pieza ya vaciada todavía con sistema de alimentación. Por su parte a la derecha arriba se observa un conjunto ya vaciado, así como diversas piezas una vez retiradas de la colada. Abajo a la izquierda se observa un molde de arena con las piezas que obtienen de éste. En la figura inferior derecha observa una cabeza de un motor diesel.

Una vez terminado el molde e instalados los machos (corazones) se produce, el colado del metal líquido, para que una vez que éste se ha solidificado y enfriado hasta una temperatura en que se pueda manipular sin mayor inconveniente, se proceda al desmoldeo, limpieza y corte de coladas y mazarotas. La etapa de enfriamiento y solidificación es crítica en todo el proceso, ya que un enfriamiento excesivamente rápido puede provocar tensiones mecánicas en la pieza, e incluso la aparición de grietas, mientras que si es demasiado lento disminuye la productividad. El desmoldeo implica la destrucción del molde y la extracción de la pieza. En el desmoldeo también debe retirarse la arena del macho. Toda esta arena es comúnmente reciclada (esto dependerá de la técnica de aglomerado utilizada) para la producción de nuevos moldes. El desbarbado consiste en la eliminación de los conductos de alimentación, mazarota y rebabas procedentes de la línea de partición y de las regiones de acoplamiento de los corazones. Durante el acabado y limpieza se eliminan los restos de arena adheridos. Posteriormente, la pieza puede ser maquinada o sufrir algún tipo de tratamiento térmico que garantice las propiedades requeridas.

Métodos más comunes

Moldeo en arena en verde. Consiste en la elaboración del molde (figuras 2.6 y 2.7) con arena y arcillas, tal como la bentonita, las cuales se activan por la presencia de humedad. Es el método más empleado y económico, puede ser utilizado para casi cualquier metal o aleación sin importar mayormente las dimensiones de las piezas. No se emplea en el caso de piezas muy grandes o de geometrías complejas, ni cuando se requiera de buenos acabados superficiales o tolerancias reducidas.



FIGURA 2.7 Izquierda vaciado de aluminio en moldes de arena en verde. Derecha, compactado de la arena alrededor del modelo

Procesos CO₂, con resinas autofraguantes y de resinas con caja caliente. En estos casos se adiciona a la arena seca un aglomerante tal como el silicato de sodio Na₂SiO₃ o resinas de origen orgánico, todos los cuales se caracterizan, después de su fraguado o endurecimiento, por la obtención de moldes o machos con una elevada resistencia mecánica, lo que permite fundir piezas de mayor tamaño y mejor acabado superficial.

Moldeo en arena seca. En este tipo de proceso antes de la colada, el molde se seca. De este modo se incrementa la rigidez del molde, lo que permite fundir piezas de mayor tamaño, sin inconvenientes debidos a la presencia de humedad durante el vaciado (en este caso se emplean arcillas como la bentonita sódica).

Moldeo en cáscara (Shell molding). En ocasiones se utilizan mezclas secas de arena con resinas fenólicas, que se polimerizan (se endurecen) a temperaturas entre 200 y 300°C incrementando sensiblemente su rigidez, lo cual permite la producción de moldes (cáscaras) que solamente conllevan el contorno de la pieza, y facilitan la producción de piezas pequeñas y medianas con una alta precisión y un excelente acabado (figura 2.8).

El empleo de yeso de ceramista (plaster mold casting) (figura 2.9) es usual en aplicaciones odontológicas o artísticas empleando para tal fin procesos a la cera perdida (lost wax casting) o microfundición. En este caso, el modelo se fabrica en cera o plástico. Una vez que se ha completado el molde, se calienta para endurecer el recubrimiento y derretir la cera o el plástico para extraerla del molde en el que se verterá posteriormente el metal fundido. Este método tiene dos ventajas principales, la ausencia de machos y de líneas de partición, con lo que se logran fieles reproducciones del modelo original sin defectos superficiales (líneas de junta y rebabas), todo esto aunado a una excelente precisión. Para estos métodos también se emplean cáscaras cerámicas denominándose en este caso como fundición de alta precisión (investment casting). Estos procesos se destinan sobre todo a la producción de piezas pequeñas y medianas en metales ferrosos o de alto punto de fusión con orientación industrial. En estos casos, el modelo se recubre de una serie de capas (formando una cáscara cerámica), que garanticen un buen acabado superficial y rigidez al conjunto.

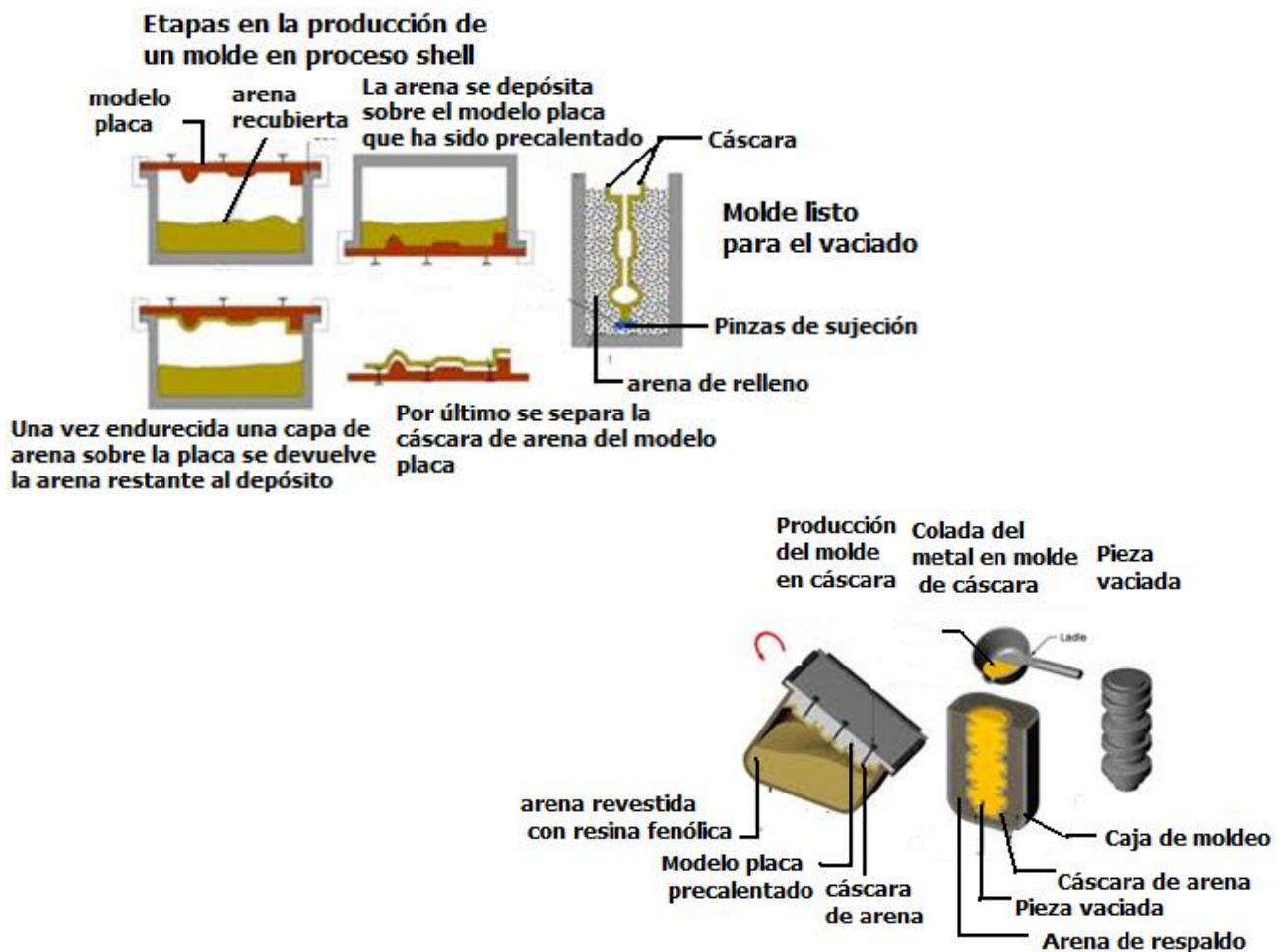


FIGURA 2.8a Moldeo en cáscara (Shell)

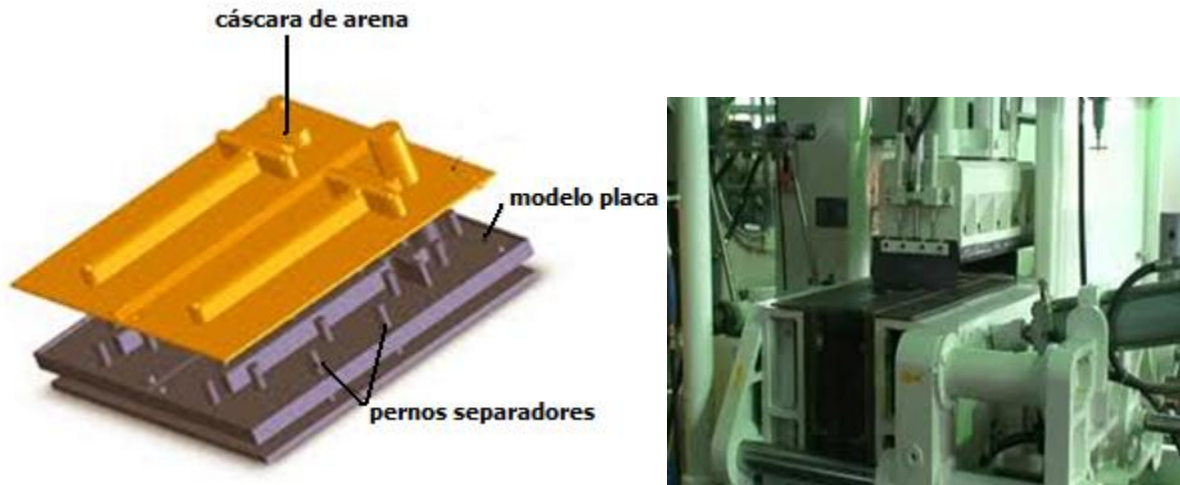


FIGURA 2.8b Moldeo en cáscara (Shell)

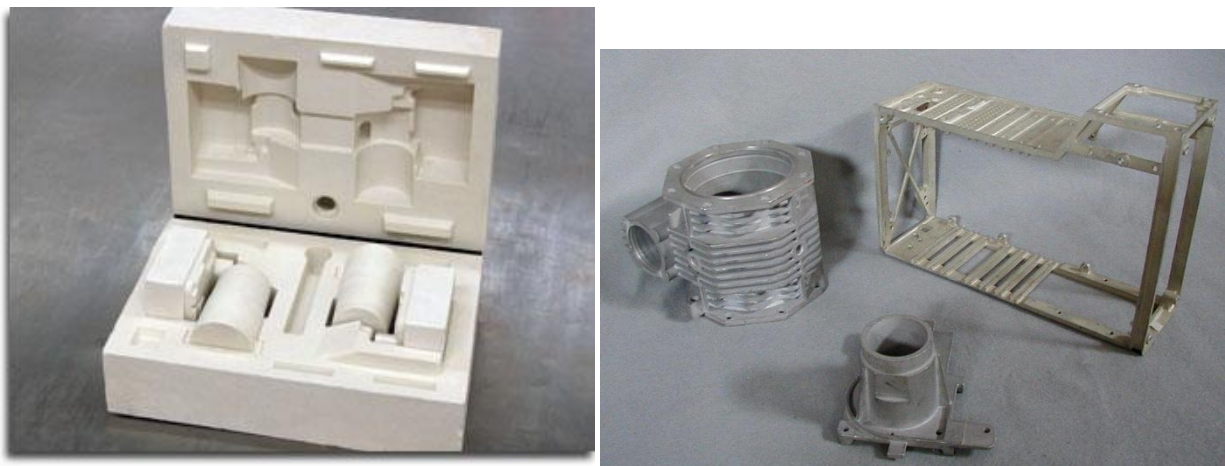


FIGURA 2.9 Molde en yeso ya terminado y ejemplo de piezas en aluminio producidas por este método

La **colada en matriz o fundición en coquilla** (figura 2.10), se caracteriza por el empleo de moldes metálicos (matrices) producidos en hierro gris o acero. Este tipo de proceso se emplea para lotes grandes de producción de piezas medianas cuya geometría permite su llenado por acción exclusiva de las fuerzas de gravedad (por ejemplo pistones automotrices).

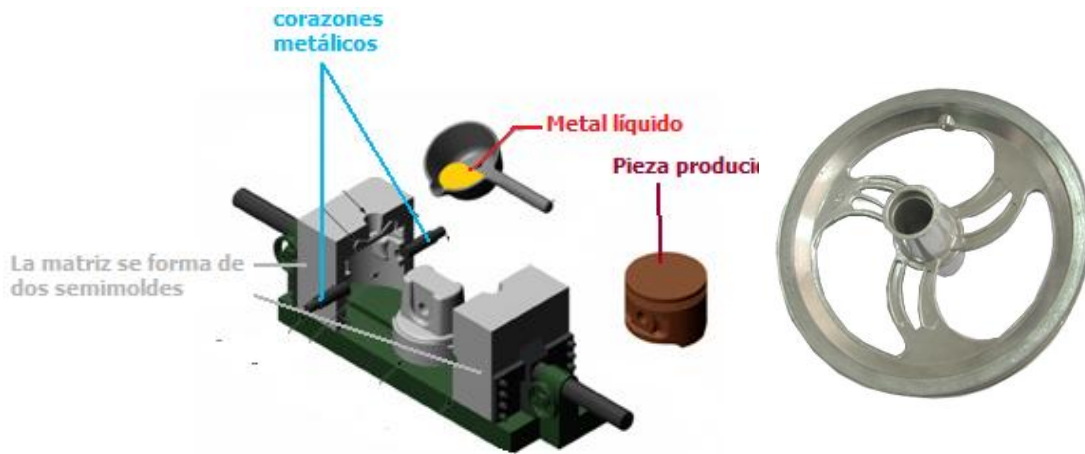


FIGURA 2.10 Colada en matriz

La **fundición a presión o inyección de metales** (figura 2.11) se emplea para piezas medianas y pequeñas (desde unos gramos hasta unos 50 kg) en metales y aleaciones de bajo punto de fusión (generalmente menor a 650 °C; aleaciones de aluminio y de zinc), de geometrías complejas y espesores pequeños (del orden de unos cuantos mm), en lotes de producción muy grandes (mínimo del orden de unas 10,000 piezas). Se caracteriza por su reducido costo de operación, aunado a excelentes acabados y tolerancias cerradas.



FIGURA 2.11(a) Máquina para inyección de metales, (b) Descripción esquemática del proceso

La técnica de **fundición prensada (squeeze casting)** fue desarrollada ya en la segunda mitad del siglo XX (hacia 1960) e involucra la solidificación del metal bajo alta presión; con esto se pretende combinar la forja con la colada, afinar la microestructura y obtener mejores propiedades mecánicas.

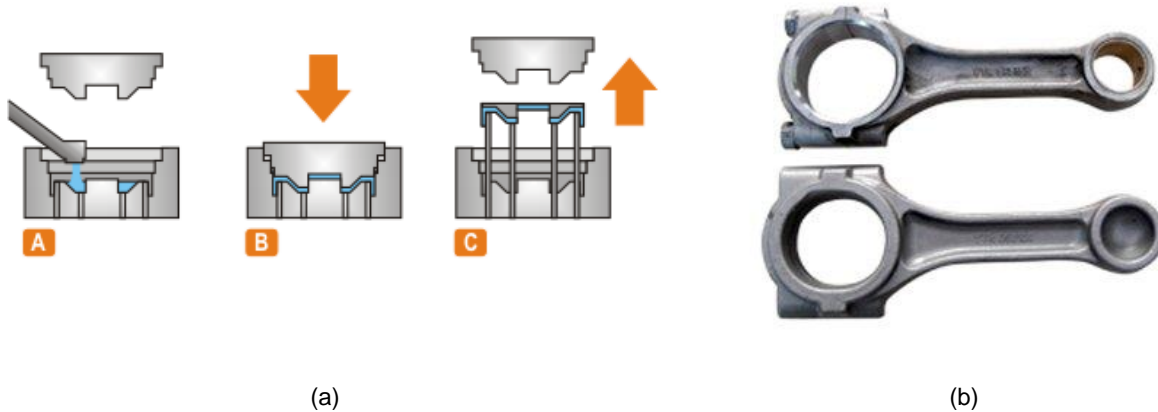


FIGURA 2.12 (a) Descripción esquemática del proceso de fundición prensada
(b) Ejemplo de piezas producidas por squeeze casting

Fundición a baja presión (low pressure casting). En este caso se emplean moldes de grafito o también matrices metálicas. El proceso se caracteriza en que el llenado es en flujo laminar por la parte inferior del molde (figura 2.13), la presión necesaria para que el metal ascienda y llene el molde se aplica a través de un gas inerte. El molde, colocado encima del recipiente con el metal líquido, cuenta con un sistema de enfriamiento que garantiza la transferencia de calor que permita la solidificación secuencial, iniciando en la parte superior y dirigida hacia abajo de tal forma que una vez totalmente solidificada la pieza, se elimina la presión descendiendo el metal líquido de nueva cuenta al crisol. Con esto se garantiza la eliminación de defectos producto de la solidificación, a la vez de eliminar los costos asociados a la presencia de coladas y mazarotas. La microestructura obtenida garantiza excelentes propiedades mecánicas. Este proceso se puede emplear tanto para los blocks de motor como para las ruedas.

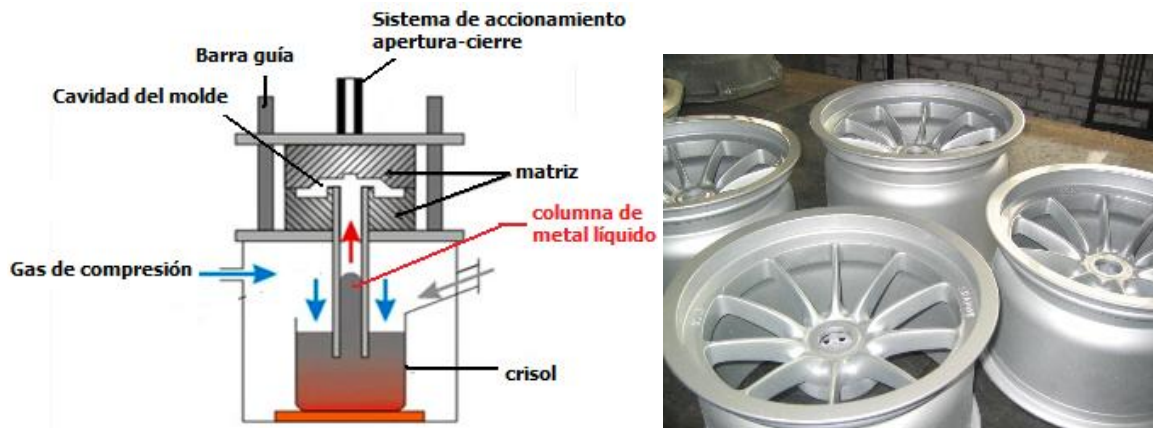


FIGURA 2.13 Fundición a baja presión (low pressure casting) y ejemplo de aplicación del proceso (ruedas de aleación de aluminio)

Las operaciones de **centrifugado y semicentrifugado** (figura 2.14) se caracterizan por llevar a efecto el llenado del molde por la acción de las fuerzas generadas por la rotación de éste. Estos métodos permiten la obtención de piezas sanas (eliminación de defectos) y la disminución o, en su caso, la eliminación de conductos de llenado y mazarotas.

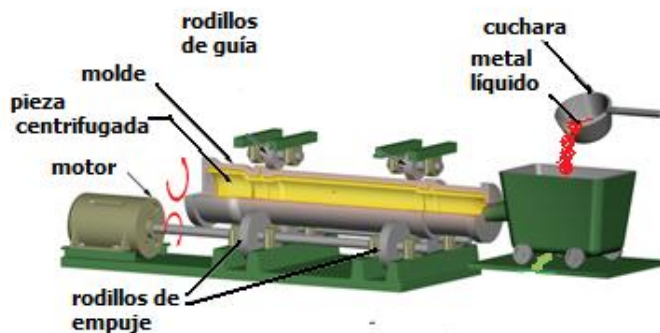


FIGURA 2.14 Centrifugado. (a) Descripción esquemática para centrifugado en eje horizontal
(b) Máquina para centrifugado vertical

Como ya ha sido mencionado, en el proceso de fundición se calienta primero el metal a una temperatura lo suficientemente alta para transformarlo completamente al estado líquido, después se vierte directamente en la cavidad del molde. En un molde abierto, el metal líquido se vacía simplemente hasta llenar la cavidad (producción de contrapesos). En un molde cerrado, una vía de paso llamada sistema de vaciado o colada permite el flujo del material fundido desde fuera del molde hasta la cavidad. Es por demás evidente que molde cerrado es la forma más importante de producción en operaciones de fundición.

Tan pronto como el material fundido en el molde empieza a enfriarse, y conforme desciende la temperatura lo suficiente, empieza la solidificación que involucra un cambio de fase del metal. Se requiere tiempo para completar este cambio de fase, porque es necesario disipar una considerable cantidad de calor. Durante este proceso, el metal adopta la forma de la cavidad del molde y se establecen muchas de las propiedades y características de la fundición.

2.2 MOLDEO EN ARENA

La fundición en arena es, con mucho, el proceso de moldeo más importante. Para describir las características básicas del molde se usará un molde de fundición en arena. Muchas de estas características y términos se aplican también a los modelos de otros procesos de fundición. El molde consiste en dos mitades: la tapa o semicaja o semimolde superior y la semicaja o semimolde inferior. Ambas están contenidas en la caja de moldeo, que también se divide en dos partes: una para cada parte del molde; las dos mitades del molde están separadas por el plano de separación (figuras 2.7, 2.15)

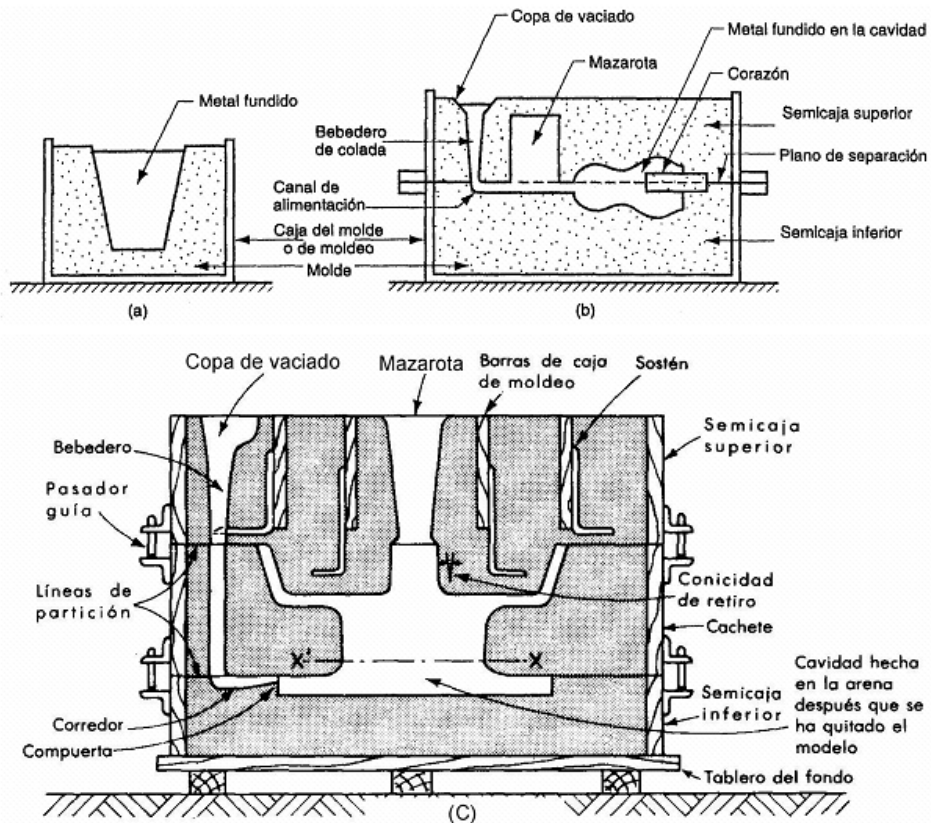


FIGURA 2.15 Molde de fundición en arena. En la imagen (a) se representa un molde abierto, en la (b) se presenta un molde con un macho o corazón y una mazarota ciega. Por su parte, en (c) se muestra la sección transversal del molde listo para el vaciado, en el que se tiene una mazarota abierta sobre la pieza

En la fundición en molde de arena (y otros procesos de molde desechable) la cavidad del molde se forma mediante un modelo de madera, metal, plástico u otro material (figura 2.4), que tiene la forma de la pieza que será fundida. La cavidad se forma al recubrir el modelo de ambas cajas con arena en partes iguales, de manera que al remover el modelo quede una cavidad que tenga la forma deseada de la pieza. El modelo se sobredimensiona para compensar la contracción del metal cuando éste se solidifica y enfría. La arena húmeda del molde contiene un aglomerante para mantener su forma.

La cavidad del molde proporciona las superficies externas de la fundición, pero además puede tener superficies internas, que se definen por medio de un corazón, el cual es una forma colocada en el interior de la cavidad del molde para formar la geometría interior de la pieza. En la fundición en arena, los corazones se hacen generalmente de arena, aunque pueden usarse otros materiales como metales y cerámicos.

El sistema de vaciado (figura 2.16) en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior del molde. El sistema de vaciado consiste típicamente de un bebedero de colada (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación 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.

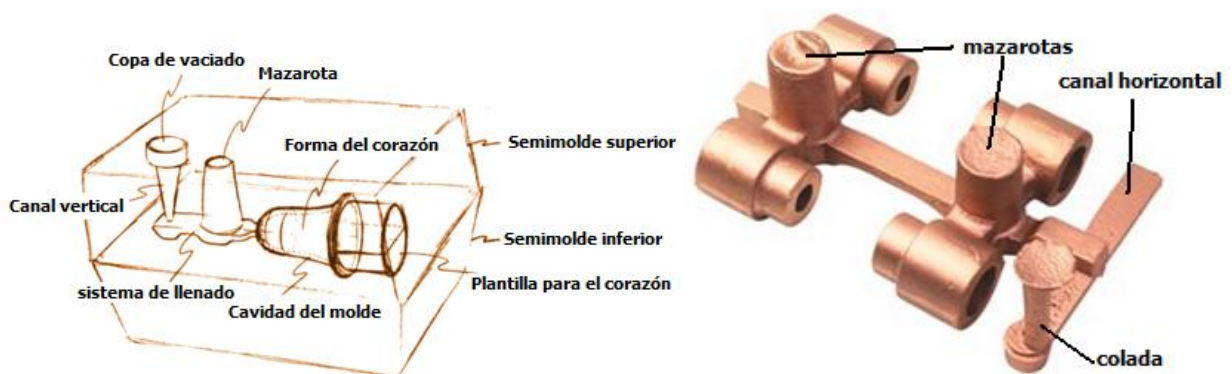


FIGURA 2.16 Sistema de llenado colada y alimentadores y mazarotas

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.

A medida que el metal fluye dentro del molde, tanto el aire que ocupaba previamente la cavidad, como los gases calientes formados por la reacción del metal fundido deben evacuarse para que el metal llene completamente el espacio vacío. En la fundición en arena, la porosidad natural del molde permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. En los moldes permanentes se taladran pequeños agujeros de ventilación dentro del molde o se maquinan en el plano de separación para permitir la salida del aire y los gases.

Moldeo con arena en verde

En la figura 2.17 se muestra el procedimiento manual de moldeo en verde, el cual emplea una mezcla de moldeo cuyos constituyentes principales son: arena, bentonita y humedad. Este proceso se caracteriza por ser el más económico, aunque su precisión y acabado superficial no son tan perfectos.

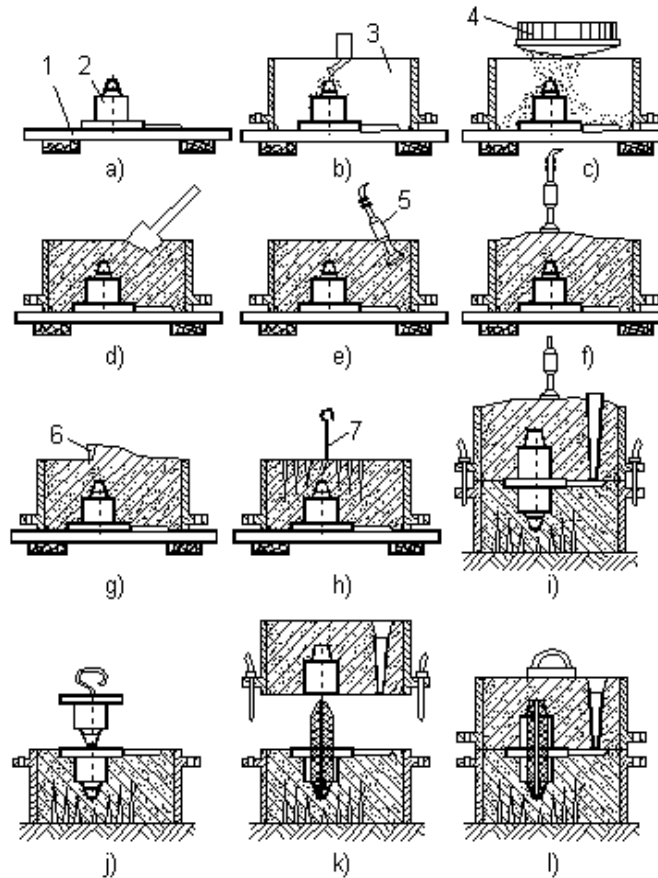


FIGURA 2.17 Etapas del moldeo en arena en verde mediante un procedimiento manual

El proceso consiste en compactar la arena alrededor del modelo, el cual, a su vez, se coloca sobre una tarima o tablero de apisonar, se rodea por la semicaja inferior. Compactada esta mitad se le da vuelta y se enfoca la mitad restante del modelo, a la vez se ensambla la semicaja superior; asimismo, se ponen en posición la clavija de colada y demás elementos que forman el sistema de alimentación. Antes de colocar la arena en el molde, se recubren las superficies con arena seca, para evitar así que se adhieran durante el compactado; es necesario que el modelo se recubra o revista con separador, se coloca entonces la arena y se procede al compactado. Debe tenerse cuidado de no golpear el modelo. Es necesario que la dureza del molde sea uniforme y suficiente para evitar que se desgrane o rompa antes o durante el vaciado, ya que puede haber penetraciones del metal, lo que provocará el rechazo de la pieza.

Una vez compactado el molde se procede a retirar las clavijas de la colada y las mazarotas, se separan los semimoldes y así, se retira el modelo. Se abren las coladas y se colocan los corazones en posición, en caso de que la pieza los requiera. Se procede entonces a cerrar el molde y se colocan los seguros para evitar que el metal líquido separe los semimoldes, con el mismo fin se llegan a colocar contrapesos sobre la superficie del molde, y se procede al vaciado. Una vez que la pieza se ha enfriado lo suficiente, se destruye el molde reiniciado el ciclo.



FIGURA 2.18 Moldeo en verde con moldeadoras neumáticas

El moldeo en verde se efectúa normalmente con máquina. El compactado de la arena se efectúa por percusión-prensado. En la figura 2.18 se pueden observar una máquina moldeadora típica. En

éstas solo se pueden emplear modelos placa; es común que una moldeadora produzca el semimolde superior y otra el inferior, haciendo el ensamble de los semimoldes ya en el carrusel.

Cuando las piezas son muy grandes, el moldeo se efectúa en foso y es evidente que el compactado no se puede hacer en una moldeadora, para esto se emplean las lanzadoras de arena (figura 2.19), que consisten en una turbina que proyecta la arena sobre el molde. Varios de estos equipos llevan a efecto una acción de mezclado previa, pudiendo así ser empleados para otros procesos de moldeo como el de caja fría. Es usual el uso de pisonadores neumáticos para terminar el compactado del molde.



FIGURA 2.19 Moldeo con arena en verde de piezas de grandes dimensiones

Mezcla de moldeo. Para efectuar la operación de moldeo se necesita una mezcla con la cual se recubre el modelo, y se pueda producir así una cavidad con la geometría y dimensiones de la pieza que se va a producir. El material de moldeo debe resistir el contacto con el metal líquido sin fundirse y sin modificar sus dimensiones apreciablemente; asimismo, es necesario que permita la salida del aire que ocupa la cavidad del molde, así como la de los gases producidos durante el vaciado. Una vez solidificada la pieza, se requiere que la mezcla se desprenda con facilidad de ésta, así como de las cajas de moldeo. Por ello, una mezcla de moldeo debe presentar: *plasticidad* (facilidad para reproducir la geometría del modelo), *resistencia mecánica*

(capacidad de la arena para conservar la forma de la cavidad y producir una pieza con la geometría requerida), *poder refractario* (capacidad para soportar el contacto con el metal fundido sin ser sinterizado por éste), *permeabilidad* (capacidad para permitir la salida del aire y los gases producidos durante el llenado de la pieza), *estabilidad química y física* (la mezcla no deberá sufrir transformaciones que afecten las dimensiones de la pieza)

En general, para las operaciones de moldeo la arena sílica (SiO_2) es la más común, sin embargo, se pueden llegar a utilizar arenas de zirconio (ZrSiO_4), olivinita (Mg_2SiO_4) y cromita ($\text{FeO} - \text{Cr}_2\text{O}_3$). La *arena sílica* es la de empleo general por su costo. Las arenas de zirconio presentan mayor conductividad térmica y no se adhieren a la superficie de la pieza, lo que da como resultado su aplicación como pinturas y revestimientos en moldes grandes. La olivinita y magnesita se emplean en el vaciado de piezas de acero al manganeso, y se obtiene un buen acabado superficial.

TABLA 2.1 Composición típica de una arena para fundición

Composición	Arena sintética %	Arena natural %
SiO_2	97.91	78.2
Al_2O_3	1.13	
Fe_2O_3	0.5	10.12
TiO_2	0.04	
CaO	0.11	2.4
MgO	0.02	1.8
K_2O	0.65	2.1
Na_2O	0.07	0.2
Pérdidas por combustión	0.21	4.1

Para el moldeo en verde se emplean como aglomerantes las arcillas, éstas se caracterizan por ser regenerables ya que su fuerza de adhesión se obtiene mediante la adición de agua a diferencia de otros aglomerantes, en los que la cohesión se obtiene por reacción química y, por lo tanto, su acción es irreversible. De acuerdo con su composición, las arcillas se pueden

clasificar como caoliníticas ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$), montmorilloníticas ($\text{Al}_2\text{O}_3 - 4\text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O} - n\text{H}_2\text{O}$), hidromicáceas y poliminerales. Por sus características, las más utilizadas son las montmorilloníticas, también conocidas como bentonitas. Estas arcillas se utilizan tanto para el moldeo en verde como en seco. En virtud de que algunos de los iones Al^{3+} son sustituidos por Mg^{2+} , esto permite que la molienda absorba cationes de intercambio Na^+ y Ca^{2+} , a lo que las propiedades de la arcilla son particularmente sensibles. La máxima capacidad de hinchado de la bentonita sódica la hacen idónea para moldeo en seco, mientras que la cálcica promueve máxima resistencia en verde.

Al calentarse la arcilla pierde humedad y se produce un encogimiento de la molécula, con lo que se mantiene y aún incrementa la resistencia de la unión; sin embargo, la permanencia a altas temperaturas elimina el agua combinada químicamente y causa la pérdida permanente de la capacidad de adhesión, esto se presenta entre los 400 y 700 °C. A mayores temperaturas se producen cambios cristalinos drásticos. Por tanto, es necesario que después de cada operación de vaciado se adicione de 1 a 4% de bentonita para reponer la que ha sufrido transformaciones irreversibles, así como la humedad necesaria.

En la figura 2.20 se muestra el efecto de la humedad y el contenido de arcilla en la resistencia de las mezclas de moldeo.

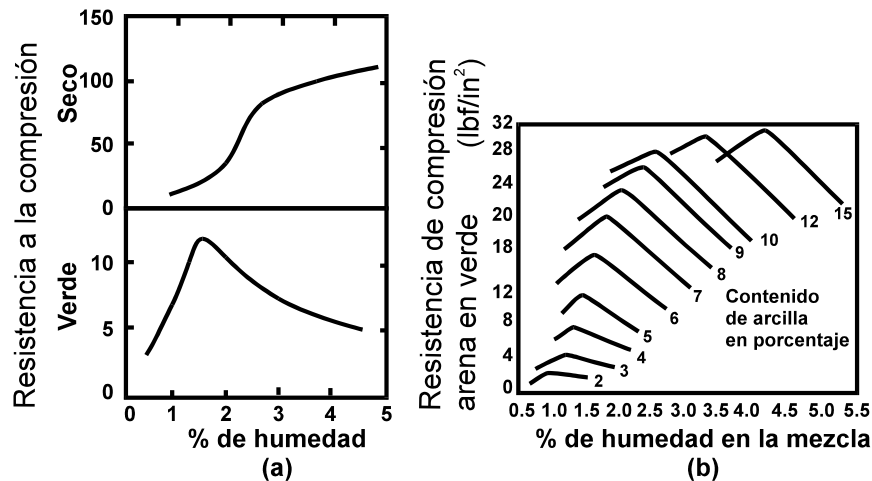
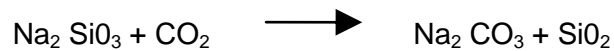


FIGURA 2.20 a) Efecto de la humedad en la resistencia en verde y en seco, b) Influencia de la humedad y del contenido de arcillas en la resistencia en verde

Moldeo en arena empleando aglutinante inorgánico (Proceso CO₂). En este proceso, el compactado del molde se realiza en forma similar a lo descrito para moldeo en verde, con la excepción de que se requiere hacer pasar una corriente de gas carbónico CO₂ a través de la arena, lo que permite entonces su endurecimiento. De las resinas de origen inorgánico, la más usual es el silicato de sodio (Na₂SiO₃.nH₂O). La viscosidad de la mezcla está en función de la relación de Na₂O a SiO₂, donde son usuales las relaciones de 1.5 a 3.1. El endurecimiento se logra por el paso de CO₂ a través de la mezcla o por calor, lo cual provoca una serie de reacciones químicas complejas que dan lugar a la formación de un gel sílice que actúa como puente entre los granos de arena. La reacción general se representa por:



La resistencia de la mezcla depende del flujo de gas y tiempo de envejecimiento, es del orden de 2.45 a 2.94 MPa contra 5.8 a 7.92 MPa del proceso en cáscara, y 1.7 a 2 para resinas autofraguantes.

En el caso de moldeo se puede tan solo utilizar una capa que recubra al modelo y el resto se rellena con arena en verde, con lo que se logra una sensible economía al no requerir tanta arena con silicato de sodio que es de un mayor costo.

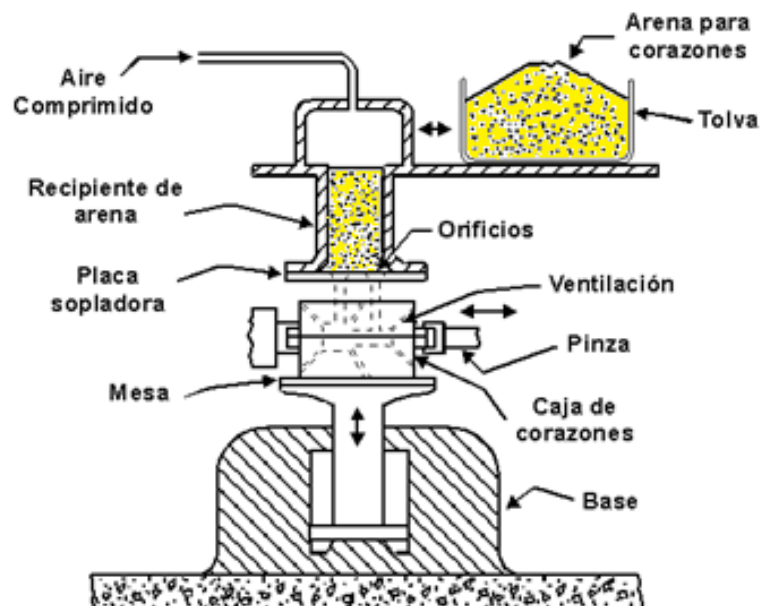


FIGURA 2.21 Máquina sopladora de corazones

El proceso CO₂ más que para moldeo se emplea en la producción de corazones, para lo que se emplean las máquinas sopladoras. En las figuras 2.21 y 2.22 se muestra el funcionamiento de uno de estos equipos.

La ventaja que ofrece este método sobre el moldeo en verde es su mayor precisión dimensional, así como su mejor acabado; además de que se obtiene geometría o detalles más complejos. Su principal desventaja radica en el costo de las resinas y en el reciclaje de la arena.



FIGURA 2.22 Máquina sopladora de corazones de caja caliente

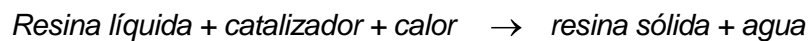


FIGURA 2.23 Corazones producidos por diferentes técnicas durante su ensamble

Proceso de caja caliente. Los aglutinantes resinosos fueron introducidos en la industria de la fundición en 1929 por Hooker Chemical Corporation. Esta tecnología desde entonces ha permitido operaciones más simples y rápidas, y piezas más precisas. En el caso particular del método de caja caliente, se trata de un proceso húmedo a diferencia del moldeo en cáscara, en el que se

utiliza una mezcla seca. Se emplea en la producción de corazones y su principal ventaja sobre el de cáscara reside en la mayor velocidad de producción. En éste se aplican resinas líquidas sintéticas, que al reaccionar con un catalizador a la temperatura adecuada, produce una cáscara de resistencia suficiente para que resista el peso del corazón, permitiendo así su maniobra sin que se rompa. El macho continúa su curado después de haber sido extraído de la caja de corazones, quedando completamente endurecido antes de llegar a temperatura ambiente. En la figura 2.22 se muestra el equipo y en la figura 2.23 un ejemplo de aplicación.

La reacción que se produce para lograr el endurecimiento es



La resina puede ser de tipo fenólico o furánico con modificaciones de urea para lograr un curado rápido. Se pueden clasificar entonces como producto de reacción fenol-urea-formaldehído (aglutinantes fenólicos).

Alcohol furfural-urea-formaldheído (resinas furánicas).

En ambos casos, el aglutinante produce un porcentaje de carbono proporcional al fenol o alcohol furfural presente, el cual activa como agente ligante a los granos de arena, manteniendo ese carácter hasta que exista oxígeno libre disponible, quemándose y desprendiendo CO y CO₂.

En general, también se pueden clasificar como AF/UF/FF, AF/UF, AF/FF, FF/UF (libre de alcohol furfural) en las que se va variando el nivel de nitrógeno libre, por esta razón la resina estará en función del producto a vaciar.

Los catalizadores están constituidos principalmente por agua y sales inorgánicas, las que se descomponen por el calor y permiten al ácido ejercer su acción catalítica.

Para asegurar buenos resultados se requiere emplear arena limpia y seca, ya que a temperatura ambiente se mezcla con la resina y el catalizador. También ha de tenerse cuidado con el tiempo de vida de la mezcla de moldeo.

TABLA 2.2 Constituyentes de las resinas para proceso en caja caliente

Constituyente	Composición Química
Fenol	$C_6 H_5 OH$
Formaldehído	$CH_2 = O$
Urea	$O = C (NH)_2$
Alcohol furfural	

AF - alcohol furfural, FF - fenol formaldehído, UF - urea - formaldehído

2.3 PARÁMETROS IMPORTANTES EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN

Calentamiento del metal

En función del material que se va a fundir, de su calidad y del volumen por producir se pueden utilizar diversos tipos de unidades de fusión (hornos), para calentar el metal a la temperatura necesaria. La energía calorífica requerida es la suma de: 1) el calor para elevar la temperatura hasta el *punto de fusión*, 2) *calor de fusión* para convertir el metal sólido a líquido y 3) el calor necesario elevar al metal fundido a la *temperatura de vaciado*. Esto se puede expresar como:

$$H = \rho V [C_s (T_m - T_0) + H_f + C_l (T_p - T_m)] \quad (2.1)$$

donde:

H = Calor requerido para elevar la temperatura del metal a la temperatura de fusión [J]

ρ = Densidad [kg/m^3]

C_s = Calor específico del metal sólido [J/kg °C]

T_m = Temperatura de fusión del metal [°C]

T_0 = Temperatura inicial, generalmente la ambiente [°C]

H_f = Calor de Fusión [J/kg]

C_l = Calor específico del metal líquido [J/kg °C]

T_p = Temperatura de vaciado [°C]

V = Volumen del metal que se calienta [m^3]

Las unidades de fusión (hornos) se pueden clasificar de acuerdo con su medio de calentamiento, y en el caso de que la fuente de calor sea la combustión se considerará el contacto entre los gases de combustión y el material a fundir.

Considerando el medio de calentamiento se tiene:

- Hornos eléctricos: de arco, arco indirecto, inducción y resistencia.
- Hornos de combustión: por el tipo de combustible, sólido (coque), líquido (diesel o petróleo), gas (natural o LP). Si se considera el grado de contacto de los productos de combustión con el metal a fundir se pueden considerar aquellos sistemas de fusión en que el combustible (coque) está en contacto con el mineral (alto horno) o con el metal como en el de cubilote. Por otra parte, en ocasiones los gases de combustión transfieren el calor directamente al metal a fundir, como en el de horno reverbero y el de hogar abierto. En otras unidades de fusión el calentamiento es indirecto, como en todos los hornos de crisol.
- El horno de cubilote (cupola furnace) ha sido empleado desde hace varios siglos en la producción de hierro gris, las restricciones en cuanto al control de la composición han dado como consecuencia que éste se emplee en combinación con hornos de inducción, los que actúan como unidades de mantenimiento de temperatura y ajuste de composición. El horno de cubilote (figuras 2.24a y b) es una unidad de proceso semicontinuo diseñada para trabajar en campañas con duración de 6 h a varios días, en algunos casos. Éstos se cargan por la parte superior y su longitud vertical está limitada para garantizar el calentamiento y fusión del material, almacenándose éste en su parte baja denominada crisol.

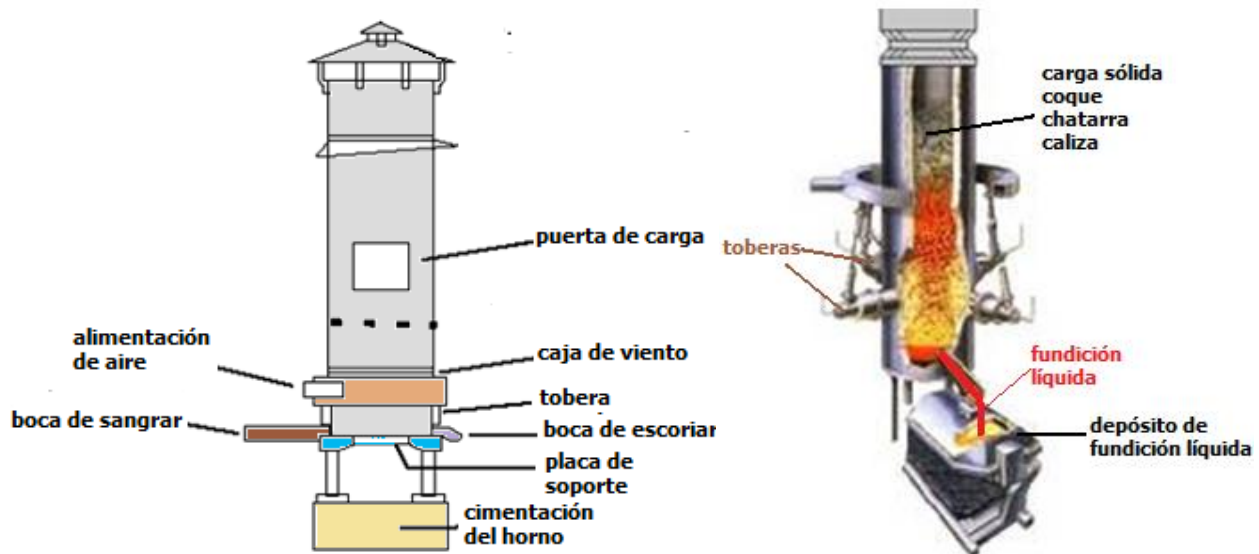


FIGURA 2.24a Diversos aspectos de un horno de cubilote



FIGURA 2.24b Diversos aspectos de un horno de cubilote

- Horno de crisol. Estas unidades de fusión (figura 2.25) se utilizan sobre todo para metales no ferrosos cuyo punto de fusión es menor a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, y cuando la producción requerida es limitada. Son hornos de ciclo discreto cuya capacidad está limitada por el tamaño del crisol, en general, usan gas como combustible (solamente en limitadas ocasiones emplean diesel o petróleo) y, en general, no se emplean para grandes volúmenes de producción.



FIGURA 2.25 Horno de crisol

El horno de arco (figura 2.26) es la unidad de fusión más utilizada para la producción de aceros, el calor se genera al formar un arco eléctrico con un electrodo de grafito; el horno es trifásico con tres electrodos, cada uno conectado a una fase del circuito eléctrico, normalmente

se trabaja con voltajes del orden de 500 V y densidades de corriente de 100 o más amperes por cm^2 de sección transversal del electrodo (lo cual representa entonces miles de amperes). Su capacidad va de unas 4 toneladas hasta 60 toneladas con tiempos de proceso de entre 2 y 3 horas.

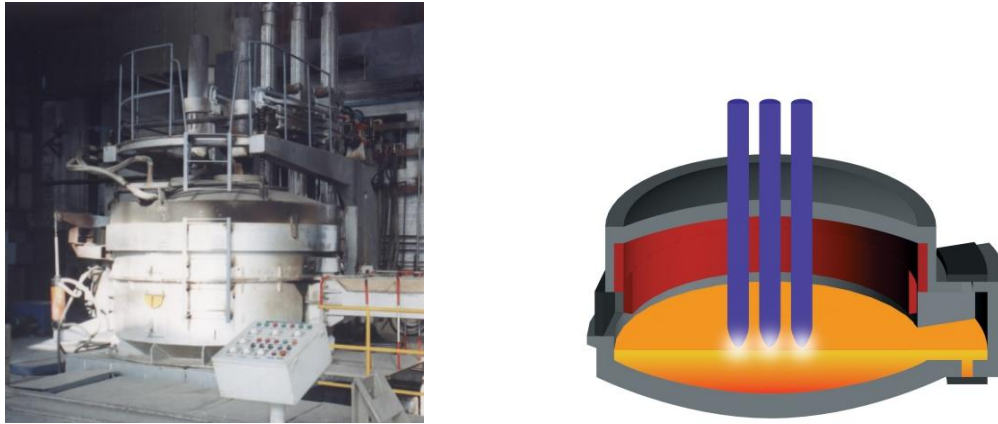


FIGURA 2.26 Horno de arco eléctrico

Los hornos de inducción (figura 2.27), tienen la ventaja de que el calor se genera al circular una corriente eléctrica a través del propio material a fundir, razón por la que no existe contaminación de ningún tipo. Existen dos configuraciones básicas que son por inducción directa o indirecta, este último se emplea en materiales con muy alta conductividad eléctrica, como el cobre o el aluminio, los cuales debido a su conductividad son muy difíciles de calentar por el principio de inducción, utilizando para esto un crisol de grafito como elemento calefactor. Existen hornos de inducción con capacidad de unos cuantos gramos y frecuencias de miles de hertz, hasta de varias toneladas, los cuales trabajan a frecuencia de red (la capacidad mínima de uno de frecuencia de red es de 1.5 ton, hasta unidades de 60 ton); éstos se emplean comúnmente en la industria automotriz para la producción de piezas de fundición de hierro (es común que la fusión del hierro gris se realice en un cubilote, mientras que el ajuste de temperatura y composición se realiza en un horno de inducción). En el horno de inducción rodeando al crisol se dispone de una bobina que hace las veces del primario del transformador mientras que el secundario es la carga a fundir. Como la penetración de la corriente está dada por la frecuencia es entonces que éste es función inversa a la capacidad del horno. En general, la fusión en este tipo de unidades es costosa por lo que, en ocasiones, se emplean en

combinación con otro tipo de hornos, donde la unidad de fusión permite el ajuste de composición y temperatura, garantizando así menor costo y alta calidad del producto.

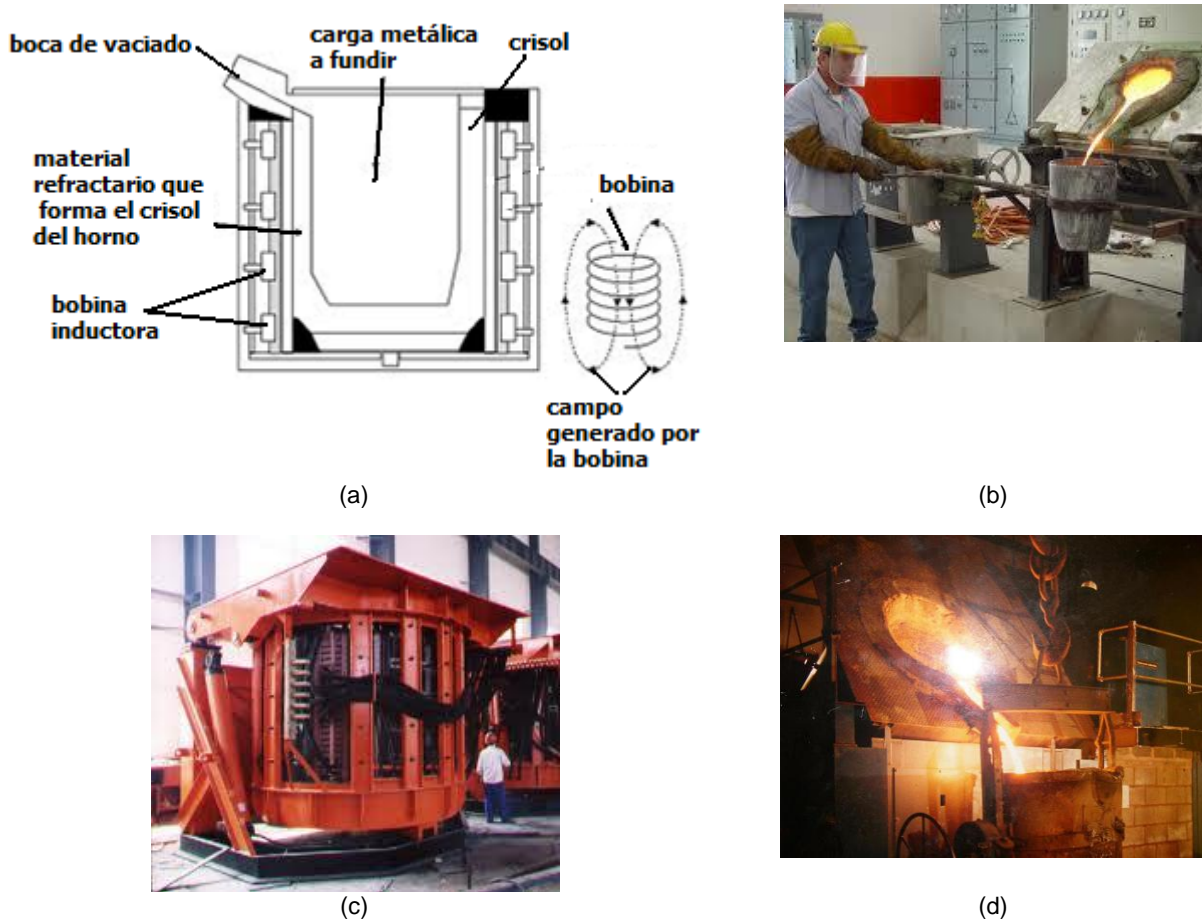


FIGURA 2.28 Imágenes diversas de hornos de inducción. (a) Principio de operación, (b) Vaciado de un horno de inducción de alta frecuencia, (c) Horno de 5 ton/h, (d) Horno de media frecuencia, de hasta 1000 kW

Los hornos de resistencia eléctrica (figura 2.29) tienen aplicación para producciones reducidas, normalmente de menos de 20 kg por carga, en metales no ferrosos con temperaturas de fusión por debajo de los 1000 °C (aleaciones de aluminio y cobre). Si bien la calidad del metal fundido es elevada, el costo de la energía eléctrica y la duración de las resistencias, cuya vida es muy susceptible a la temperatura de trabajo, vuelven incosteable el empleo de este tipo de hornos en grandes volúmenes de producción. Por todo lo expuesto, este tipo de unidades tienen mayor aplicación en operaciones de tratamiento térmico que para fusión.

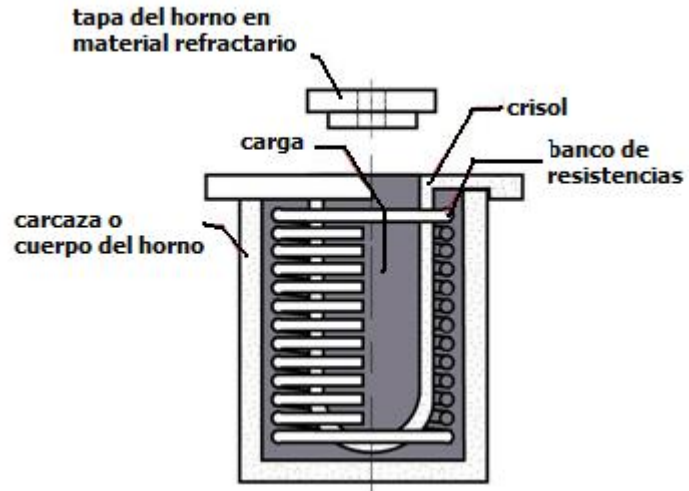


FIGURA 2.29 Horno de resistencia eléctrica

Vaciado del metal fundido

Después del calentamiento, y una vez alcanzada la temperatura adecuada (mínima a la que se puede producir una pieza sana), el material está listo para verterse en el molde, lo cual se refiere como vaciado (figura 2.30). 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. Los factores que afectan la operación de vaciado son la temperatura de vaciado, la velocidad de vaciado y la turbulencia generada durante el llenado del molde.



FIGURA 2.30 Vaciado del metal en el molde

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 liquidus para una aleación). A esta diferencia de temperaturas se le llama algunas veces *sobrealeamiento*. Éste deberá ser el mínimo posible que garantice el correcto llenado del molde, lo anterior en virtud de que tanto la cinética de oxidación como la solubilidad de gas en el metal líquido dependen de la temperatura.

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 (se favorece la erosión de la arena del molde, así como que el metal atrape gases y escoria).

La turbulencia del flujo se produce al contacto del metal líquido con las paredes del molde, su presencia dependerá de la velocidad y de la viscosidad del metal líquido, así como de la geometría del sistema de llenado. El flujo turbulento debe evitarse ya que provoca una mayor interacción entre el metal y el aire, lo que favorece la formación de óxidos metálicos que pueden quedar atrapados durante la solidificación y degradando de esta forma la calidad de la fundición; también provoca una erosión excesiva del molde por efecto del impacto del flujo de metal fundido. Por último, el flujo turbulento promueve que el metal líquido atrape gas y escorias afectando con esto, en forma negativa, la calidad de las piezas producidas.

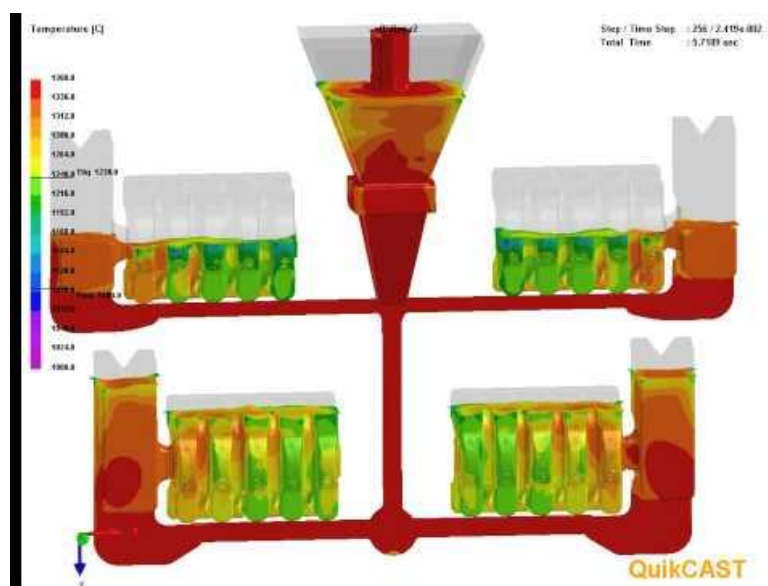


FIGURA 2.31 Simulación del llenado [Quik cast es una paquetería desarrollada por Atgroup software]

Análisis del vaciado

Varias relaciones gobiernan el flujo del metal líquido a través del sistema de vaciado y dentro del molde. Si se considera que el flujo es conservativo (lo cual no es verdad) se puede realizar un primer análisis empleando para tal fin la ecuación de *Bernoulli* (ecuación de conservación de energía que parte de considerar que el flujo es laminar), la cual establece que la suma de las energías (altura, presión dinámica y energía cinética) en dos puntos cualquiera de un líquido que fluye es igual. Esto se puede escribir como:

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + F_1 = h_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + F_2 \quad (2.2)$$

donde:

h = Altura [m]

P = Presión en el líquido [N/m²]

ρ = Densidad [kg/m³]

v = Velocidad de flujo [m/s]

g = aceleración gravitatoria [m/s²]

F = Pérdidas de carga debidas a la fricción [m]

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

La ecuación de Bernoulli se puede simplificar de varias maneras. Si no se consideran las pérdidas por fricción y se asume que la descarga es 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 emplearse para determinar la velocidad del metal fundido en la base del bebedero de colada (ecuación de Torricelli):

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

donde:

v = Velocidad del metal líquido en la base del bebedero [m/s]

g = aceleración gravitatoria [m/s²]

h = Altura del bebedero [m]

Otra relación de importancia durante el vaciado es la ecuación de conservación de masa y dado que la densidad se considera constante entonces:

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

donde:

Q = Velocidad de flujo volumétrico [m^3/s]

v = Velocidad [m/s]

A = Área de la sección transversal del líquido [m^2]

** Un incremento en el área produce una disminución en la velocidad y viceversa

Con la finalidad de que el metal no atrape gas durante el vaciado, entonces el conducto vertical del sistema de colada deberá ser cónico y, en general, las secciones transversales deberán reducirse, esto es, 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.

Considerando 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 v_A en la base. Por consiguiente, se puede estimar el tiempo requerido para llenar una cavidad de volumen V , como sigue:

$$t = \frac{V}{Q} \quad (2.6)$$

donde:

t = Tiempo de llenado del molde [s]

V = Volumen de la cavidad del molde [m^3]

Q = Flujo volumétrico [m^3/s]

** Un incremento en el área produce una disminución en la velocidad y viceversa

El tiempo de llenado del molde t , 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.

Solidificación y enfriamiento

Después de vaciar el metal fundido en el molde, éste se enfría y solidifica. En esta sección se analizarán los mecanismos físicos de solidificación que ocurren durante la fundición. Los aspectos asociados con la solidificación incluyen el tiempo de enfriamiento del metal, la contracción, la solidificación direccional y el diseño de las mazarotas.

Tiempo de solidificación. Sea que se trate de un metal puro o aleación, de todos modos, su solidificación toma tiempo. El tiempo total de solidificación es el tiempo necesario para que la fundición solidifique después del vaciado. Este tiempo depende del tamaño y de la forma de la fundición expresada por una relación empírica conocida como *regla de Chvorinov* que establece

$$t_s = C_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \quad (2.7)$$

donde:

t_s = Tiempo de solidificación total [min]

V = Volumen de fundición [m³]

A = Área superficial de la fundición [m²]

n = Exponente que toma usualmente el valor de 2

C_m = Constante del molde

Dado que $n = 2$, las unidades de C_m son min/m², su valor depende de las condiciones particulares de la operación de fundición, entre las cuales se incluyen el material del molde (calor específico y conductividad térmica), propiedades térmicas del metal de fundición (calor de fusión, calor específico y conductividad térmica), y la temperatura relativa de vaciado con respecto al punto de fusión del metal. El valor de C_m para una operación dada se puede basar en datos experimentales de operaciones previas con el mismo material de molde, metal y temperatura de vaciado, incluso cuando la forma de la parte haya sido bastante diferente.

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el diseño de la mazarota del molde (sistema de alimentación). Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, la t_{SM} para la mazarota debe exceder la t_s de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la

fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales. Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, se puede estar seguro de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción. Antes de considerar el diseño de la mazarota mediante la regla de Chvorinov es necesario tomar en consideración la contracción, razón por la cual se necesitan las mazarotas.

Contracción

En el análisis simplificado de la solidificación se ha omitido el impacto de la contracción que ocurre durante el enfriamiento y la solidificación. La contracción ocurre en tres pasos: 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación; 2) contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada contracción de solidificación, y 3) contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Los tres pasos pueden explicarse con referencia a una fundición cilíndrica hipotética hecha en un molde abierto, como se muestra en la figura 2.32.

El metal fundido inmediatamente después de vaciado se muestra en la figura 2.32. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación, causa que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial, como se muestra en la figura 2.32 (b). La magnitud de ésta dependerá del metal y sobrecalentamiento, sin embargo, en general es del orden del 0.5%. La contracción de solidificación que se observa en la figura 2.32 (c) tiene dos efectos; en principio la contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición, para que después la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se reduzca. Ésta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la pieza. Esta cavidad producto del encogimiento es denominada como *rechupe* y se caracteriza por una geometría y superficies irregulares. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría como en la figura 2.32 (d). Esta contracción se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

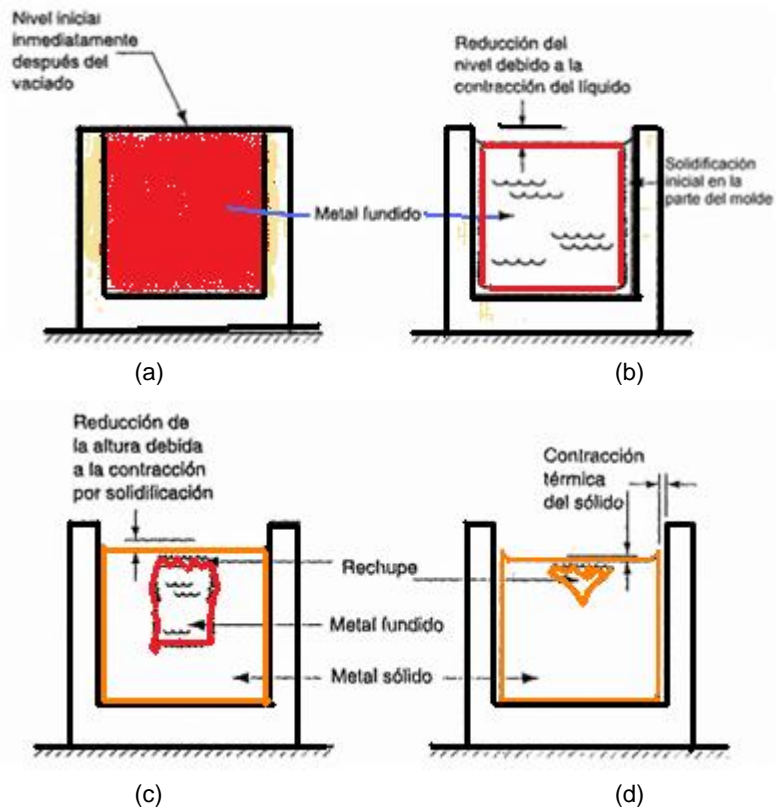


FIGURA 2.32 Descripción esquemática del proceso de contracción considerando una condición axisimétrica y un molde abierto

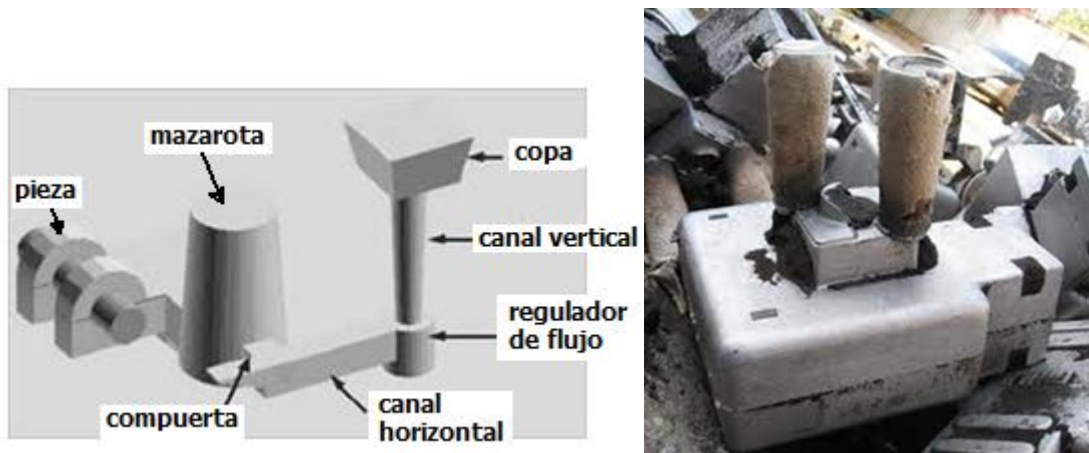


FIGURA 2.33 Sistema de llenado (colada) y alimentación (mazarotas)

Diseño de la mazarota

Tal como se describió antes, una mazarota se usa en un molde de fundición para alimentar metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer líquido hasta después de que la fundición solidifique. Para satisfacer este requerimiento, se puede calcular el tamaño de la mazarota usando la regla de Chvorinov.

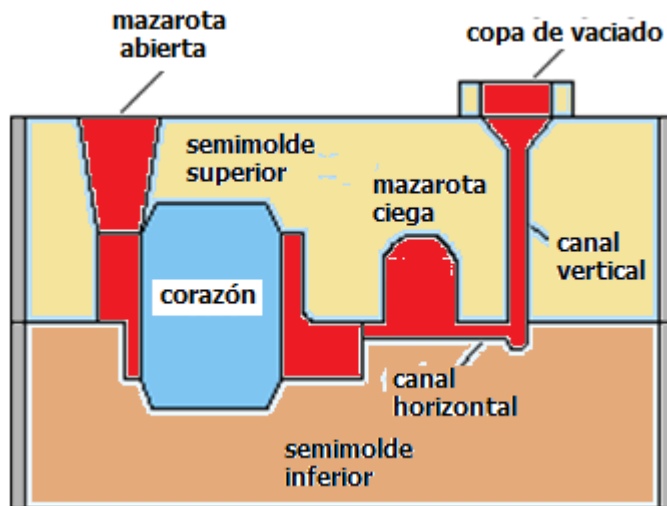


FIGURA 2.34 Sistema con mazarota ciega

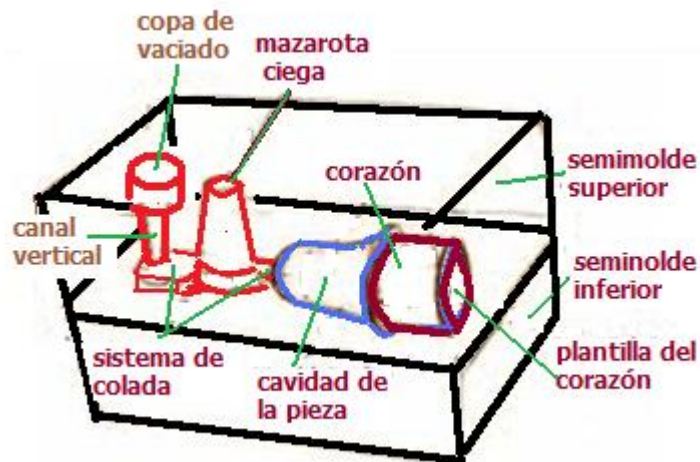


FIGURA 2.35 Colada y mazarota en serie

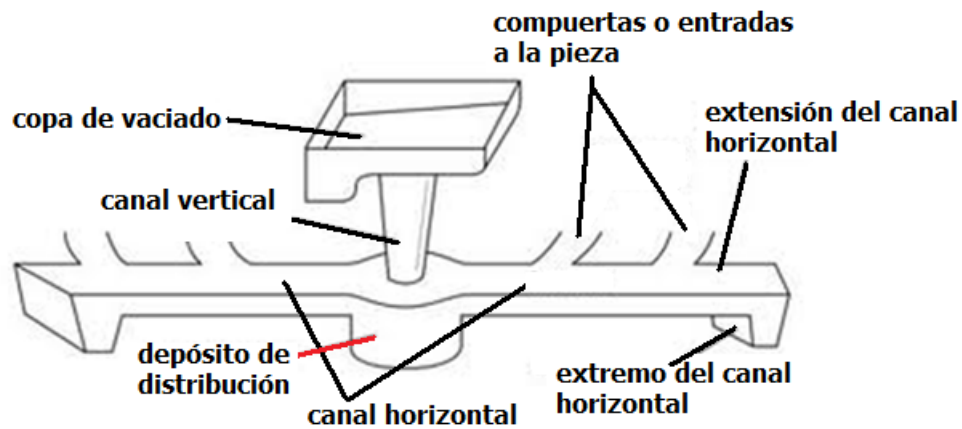


FIGURA 2.36 Elementos del sistema de llenado

Para el diseño de las mazarotas, a partir de la ecuación de Chvorinov, se tiene que:

$$C_m \frac{V_M}{A_M} \geq C_m \frac{V_p}{A_p}$$

Por lo que se consideran factores de aumento de 1.1 a 1.25

$$\Rightarrow 1.1 \frac{V_p}{A_p} \text{ a } 1.25 \frac{V_p}{A_p}$$

donde:

C_m = constante del molde

V_M = volumen de la mazarota [m^3]

A_M = superficie de la mazarota [m^2]

V_p = volumen de la pieza [m^3]

A_p = área de la pieza [m^2]

Al tomar en cuenta una geometría cilíndrica para la mazarota, se tiene entonces que el área de transferencia de calor de la mazarota está dada por:

$$V_M = \frac{\pi}{4} \phi^2 h$$

$$A_M = \pi \phi h + 2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 \right)$$

donde:

ϕ = diámetro de la mazarota [m]

h = altura de la mazarota [m]

Y se considera la relación entre el volumen/área de la mazarota

$$\Rightarrow \frac{V_M}{A_M} = \frac{\frac{\pi}{4} \phi^2 h}{\pi \phi h + 2 \left(\frac{\pi}{4} \phi^2 \right)} = \frac{\phi h}{4h + 2\phi}$$

$$\therefore \frac{V_M}{A_M} \propto \frac{\phi h}{h + \phi}$$

Por lo que se puede fijar la magnitud de uno de los parámetros (altura h , diámetro ϕ) y en consecuencia verificar los valores respectivos del otro (diámetro ϕ , altura h). Como lo que se conoce es la altura de la caja de moldeo, es de especial interés, por lo general, la dimensión de semicaja superior, la cual es siendo la condición de frontera al momento de diseñar la mazarota.

Diseño de coladas

Para el diseño de las coladas, a partir de la ecuación de Toricelli se puede conocer la velocidad del metal líquido al colar por gravedad

$$v = \sqrt{2gH}$$

donde:

v = velocidad del metal líquido [m/s]

g = aceleración gravitatoria [m/s²]

H = altura del bebedero promedio en función de las condiciones de alimentación [m]

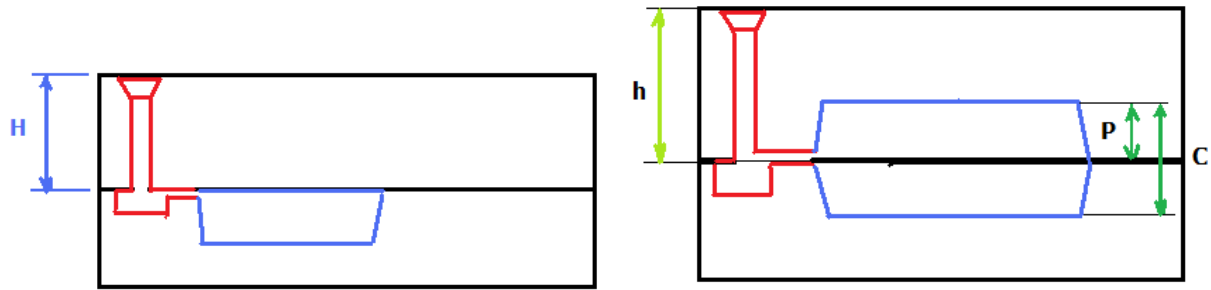


FIGURA 2.37 Posición de la alimentación con relación a la pieza

La altura H se toma como una altura promedio debido a las contrapresiones que puede generar el metal líquido al momento de realizar la colada, si la cavidad del molde tiene elementos por arriba del nivel del canal de alimentación.

$$H = \frac{2hC - P^2}{2C} = h - \frac{P^2}{2C}$$

donde:

h = altura del bebedero o colada [cm]

C = altura total de la cavidad a reproducir [cm]

P = distancia (altura) de la cavidad respecto del canal de alimentación [cm]

Se puede calcular un tiempo de duración de la colada considerando la masa total que será depositada al interior de la cavidad del molde y de los espesores de la pieza a reproducir

$$t = s\sqrt{M}$$

donde:

t = duración de la colada [s]

s = coeficiente que considera el espesor de las paredes de la pieza

M = masa de la pieza y la mazarota [kg]

El coeficiente s oscila entre diferentes valores dependiendo de los espesores de las paredes de la pieza de la siguiente forma:

Espesor de las paredes de la pieza [mm]	s
2.5-3.5	1.68
3.5-8	1.85
8-15	2.2

La ecuación anterior es válida para piezas con una masa hasta de 450 kg (y paredes de 2.5 a 15 mm).

Para piezas medianas y grandes con una masa hasta de 1000 kg y para fundiciones donde el material es acero (debido a la alta viscosidad que presenta éste) la ecuación experimental utilizada es la siguiente:

$$t = s\sqrt[3]{\delta M}$$

donde:

δ = espesor de la pieza [mm]

Para el coeficiente s

δ [mm]	s
Hasta 10	1
20	1.35
40	1.5
80 y mayores	1.7

Considerando la ecuación con la que se describe el flujo

$$\dot{Q} = vA$$

donde:

\dot{Q} = flujo volumétrico [m^3/s]

v = velocidad del metal líquido [m/s]

A = área de la sección transversal de la colada [m^2]

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{V}{t} = \frac{M}{\rho t}$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{M}{\rho t} = vA$$

donde:

ρ = densidad del metal [kg/m^3]

Como la velocidad real del metal líquido es menor debido a las pérdidas por la fricción con la pared del molde, entonces se tiene que:

$$v_r = \mu v$$

donde μ es un factor debido a las pérdidas antes mencionadas, determinado basándose en datos empíricos. Toma valores que por lo general oscilan entre 0.75 y 0.85 (en promedio 0.8). Para piezas con espesores hasta los 10[mm] este factor tiene una magnitud de 0.34.

$$\therefore A = \frac{M}{0.8 \cdot 2gH^{1/2} \cdot \rho t}$$

Por la magnitud de la sección transversal de la colada, se puede relacionar en forma proporcional la superficie del colector de escoria así como de las compuertas de alimentación de las piezas, esto con el fin de garantizar un flujo volumétrico del material constante.

a) Pieza con espesores delgados

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.06	1.11

b) Pieza con espesores medianos y pequeños

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.1	1.15

c) Pieza con espesores medianos y grandes

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.5	1.2

d) Pieza con espesores grandes

A_{colada}	$A_{escoria}$	$A_{compuertas}$
1	1.2	1.4

donde:

A_{colada} = área de la sección transversal de la colada [m²]

$A_{escoria}$ = área de la superficie del canal del colector de escoria [m²]

$A_{compuertas}$ = área de la sección transversal de las compuertas de alimentación [m²]

Finalmente, cabe destacar que los valores antes obtenidos (s, μ) han sido obtenidos considerando experiencias con fundiciones en hierro gris.