

CAPÍTULO 2: CONFORMADO POR MOLDEO

ÍNDICE DEL CAPÍTULO

1. Sistemas y procesos de conformado por moldeo

- 1.1. Fundamentos
- 1.2. Sistemas de moldeo
- 1.3. Práctica de la fundición
- 1.4. Hornos para fundición

1. SISTEMAS Y PROCESOS DE CONFORMADO POR MOLDEO

1.1 Fundamentos

El moldeado o fundición es un procedimiento basado en la fusión de los metales y sus aleaciones. Consiste en la preparación de un molde (hueco), con arena, metal u otros materiales, que reproduce la forma de la pieza a fundir, y en el cual se vierte (se cuela) el metal o aleación metálica fundida, dejándolo enfriar hasta su completa solidificación.

1.1.1 Solidificación de aleaciones metálicas

El enfriamiento de un metal puro desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente presenta temperaturas de comienzo y final de fusión claramente definidos: durante el proceso de solidificación parte del material se mantiene aún líquido, pero la temperatura se mantiene constante hasta que toda la masa se ha solidificado.

En la práctica, pocos metales puros presentan interés para aplicaciones industriales, dadas sus limitadas propiedades físicas. Con la aleación de metales estas propiedades se mejoran y se adecuan a las necesidades concretas de cada aplicación.

Las aleaciones son *soluciones sólidas*, formadas por, al menos, dos fases. Una de las fases, llamada "solvente" contiene a la otra, "soluto", presente en menor proporción. A diferencia de lo que pasa con los metales puros, en las aleaciones no existe un *único* punto de fusión, sino que depende de las proporciones de cada uno de los componentes.

La solubilidad varía con la temperatura por lo que, además, durante la solidificación las proporciones de cada uno de los metales en estado sólido van cambiando. Esto tiene importantes consecuencias en las propiedades con que resultan las piezas fundidas, en particular en aquellas aleaciones en las cuales sus propiedades varían significativamente tanto con el proceso de enfriamiento como con la composición.

1.1.1.1 Estructura de las fundiciones

Una vez que un metal puro en estado líquido es vertido dentro del molde, comienza el proceso de solidificación comenzando por las paredes (la superficie del molde) y avanzando hacia el centro en forma de “granos”. Los granos que crecen en dirección favorable (opuesta al flujo de calor) adquieren una forma de “columnas”. Estas estructuras longitudinales, a su vez, favorecen la transmisión de calor y se forman largos y resistentes granos.

Otros granos crecen desde las paredes del molde en dirección desfavorables, y se encuentran con los otros, y quedan “atrapados” entre éstos y las paredes, con lo cual su desarrollo queda limitado a esta zona.

Con las aleaciones el proceso es similar, aunque presenta algunas complicaciones: como una de las fases solidifica antes, entre las columnas sólidas van quedando “atrapadas” unas zonas más o menos definidas de la otra fase.

Esto da lugar al desarrollo de una estructura de solidificación esponjosa de forma arborescente, llamadas *dendritas*, que se van propagando desde la superficie del molde hacia el centro. Para aleaciones con un diagrama de solubilidad aproximadamente simétrico, el frente de solidificación avanza bastante plano. En general, cuando la fracción del soluto es menor al 20 %, en cambio, la estructura resulta “fibrosa”. Aunque este aspecto es muy variable con el tipo de aleación, es muy importante en los aceros.

1.1.1.2 Condiciones del proceso

Según sean las condiciones del enfriamiento, el desarrollo de las dendritas presentará características diferentes.

Velocidad de enfriamiento

Tendrá un efecto decisivo en las propiedades del producto que se obtenga. Bajas velocidades de enfriamiento traerán como consecuencia estructuras dendríticas gruesas, con grandes espacios entre ramas, que darán lugar a granos grandes. Esto, en principio, trae como consecuencia un debilitamiento del material.

Altas velocidades de enfriamiento, o tiempos cortos, traen como consecuencia el desarrollo de granos más finos y pequeños, más uniformes y resistentes. Esto mejora las propiedades de la fundición:

- a. Mejora la ductilidad y resistencia.

- b. Disminuye la microporosidad.
- c. La uniformidad del grano en tamaño y distribución mejora la isotropía.

Por el contrario, también aumenta la tendencia del material a agrietarse al enfriarse

En términos generales, la cinética de la solidificación puede representarse mediante la relación G/R , donde G es el *gradiente térmico* y R la *velocidad de avance* del frente de solidificación. Valores típicos son: $G = 10^2 - 10^3 [K/m]$; $R = 10^{-3} - 10^{-4} [m/s]$. De distintas relaciones G/R resultan fundiciones de diferente estructuras.

- (a) $G/R = 10^5 \Rightarrow$ Dendrítica orientada
- (b) $G/R = 10^7 \Rightarrow$ Dendrítica no orientada
- (c) $G/R = 10^{10} - 10^{12} \Rightarrow$ Frente plano no-dendrítico

Segregación

* *Microsegregación*

La velocidad de enfriamiento también tiene una decisiva importancia sobre otro aspecto, que influye en las propiedades de las fundiciones. Enfriamientos muy lentos (realizados en laboratorio) dan lugar a dendritas de composición muy *uniforme*, de acuerdo a los diagramas de fase de cada aleación.

En la práctica las velocidades de enfriamiento son más elevadas, y no dan tiempo suficiente a los fenómenos de difusión sólida, por lo que tienden a formarse *gradientes* de concentraciones (de soluto); la *superficie* de las dendritas suelen tener *mayor* proporción de los elementos de aleación que el centro, debido a que durante la solidificación se produce una *migración* desde el centro hacia la superficie de los elementos de aleación, llamada *microsegregación*.

* *Macrosegregación*

La *macrosegregación* en cambio ocurren en el volumen de la fundición, dejando como consecuencia una distribución desigual de composición. Se dan dos posibles situaciones: en fundiciones en las cuales el frente de solidificación avanza plano desde el molde, los componentes de menor punto de fusión van acumulándose hacia el centro de la masa. Esto favorece la migración de elementos de aleación, resultando estos materiales con mayor concentración de soluto en el centro (migración *normal*).

En estructuras dendríticas, en cambio, el metal líquido, que tiene una mayor concentración de elementos de aleación, penetra entre las ramas de las dendritas ya solidificadas, llenándolas con material más rico en soluto, por lo cual la superficie del material resulta con mayor proporción (migración *inversa*).

* *Segregación gravitacional*

Debido a la fuerza de la gravedad, los elementos de aleación más pesados se “sumergen” en el volumen, y los más livianos (por ejemplo, antimonio en una aleación plomo-antimonio) “flotan” en la parte superior.

Medios que favorecen el afinamiento del grano

Los gradientes térmicos en el material fundido dan lugar a la aparición de efectos convectivos, que son más notables en la superficie del molde. La mejor refrigeración de esta zona externa, favorece el afinamiento del grano y promueve la formación de granos más finos y uniformes.

Si se incrementa la convección en el metal líquido (por ejemplo, por medios mecánicos o electromagnéticos), se favorece la aparición de dendritas en direcciones aleatorias, con lo cual se mejora la formación de granos uniformes. Por el contrario, disminuir la convección favorece la formación de granos más grandes y largos.

Como las ramas de las dendritas no son muy resistentes, mediante agitación o vibración mecánica pueden fracturarse, lo cual da lugar a la aparición de múltiples núcleos de solidificación, obteniéndose granos muy finos y regulares en toda la masa de la pieza. Un resultado similar se obtiene mediante la inoculación de agentes “nucleantes” en la fundición.

1.1.2 Parámetros que influyen en el proceso

1.1.2.1 Colabilidad

En la figura 1.1 se ve un esquema del moldeo de una pieza fundida. Se aprecian los distintos componentes del sistema:

- Pieza
- Caja
- Bebederos
- Rebosaderos
- Canales de colada

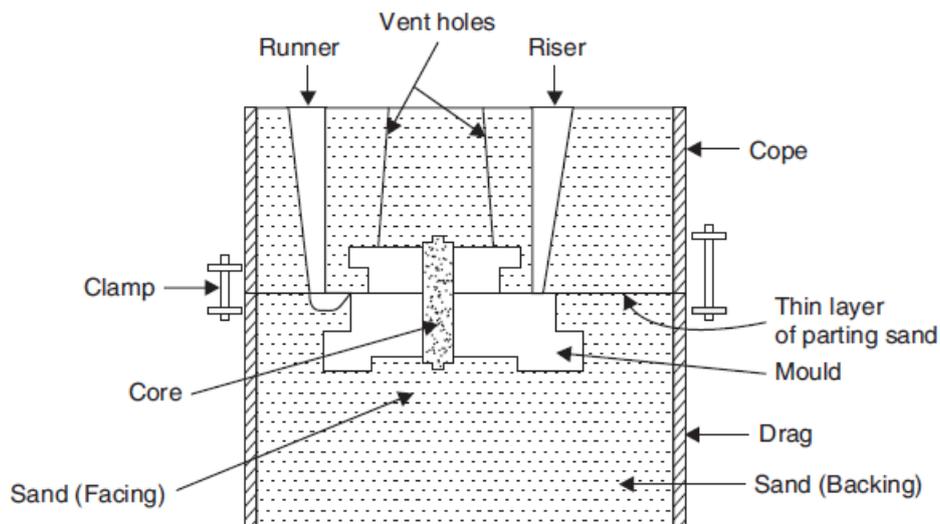


Figura 1.1.. Esquema del molde para fabricar una pieza por fundición. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009.

Es fácil advertir de la importancia de la fluidez con que el metal fundido entra en el molde, que se debe mantener hasta llenarlo en su totalidad. La fluidez de una aleación se conoce como *colabilidad*. Las variables de que dependen la fluidez del metal son:

- Función del metal
 - a) *Viscosidad*. Depende de la temperatura.
 - b) *Tensión superficial*. Una elevada tensión superficial disminuye la fluidez. La formación de óxidos en la superficie libre del líquido dificulta la fluidez.

- c) *Inclusiones*. La presencia de partículas no solubles produce un efecto similar al aumento de la viscosidad.
- d) *Patrón de solidificación* de la aleación. Cuanto mayor sea el rango de solidificación, menor será la fluidez.
- Función del molde y del sistema de moldeo
 - a) *Diseño del molde*. El diseño del molde (bebederos, canales, rebosaderos) tendrá una gran influencia en la fluidez.
 - b) *Material y superficie del molde*. Cuanto mayor sea la conductividad del molde y mas rugosa sea su superficie, menor será la fluidez del metal.
 - c) *Calentamiento del molde*. Mejora la fluidez, pero retrasa la solidificación. Desde este punto de vista, empeora la características mecánicas de la pieza al favorecer el crecimiento del grano.
 - d) *Grado de sobre calentamiento*. Sobrecalentar una aleación por encima de su temperatura de fusión mejora la fluidez, pero tiene un efecto similar al indicado en el apartado c) en las propiedades del material.
 - e) *Velocidad de vertido*. Cuanto más lentamente se vierta el líquido menor será la fluidez debido al enfriamiento más veloz de la aleación.
 - f) *Transmisión de calor*. Por las razones expuestas, afectará a la fluidez.

Para mejorar la colabilidad de ciertas aleaciones se utilizan elementos de aleación que la favorecen, como el Si en las aleaciones de Al.

1.1.2.2 Fusibilidad

Esta característica denota la aptitud de un metal o aleación para ser fundido. Está relacionada con la temperatura de fusión, aunque también está relacionada con la conductibilidad del material.

En general las aleaciones tienen mejor fusibilidad que los metales puros. En el caso del hierro, las aleaciones con mayor contenido de carbono, las *fundiciones* funden mejor que los aceros (a 1150 °C frente a 1450° C de los aceros), y mucho mejor aún que el hierro puro (1538°C).

1.1.2.3 Soldabilidad y maquinabilidad

Los procedimientos de moldeo permiten obtener piezas de forma complejas. En general estas suelen necesitar de otros procesos posteriores para su acabado. Los procesos más habituales son los de *arranque de virutas* (mecanizado). Los

materiales fundidos suelen tener una buena *maquinabilidad* (aptitud para ser mecanizados).

La capacidad de los materiales para ser soldados se conoce como *soldabilidad*. En cambio, los materiales fundidos suelen adolecer de dificultades para ser soldados. En general el material de aporte debe ser similar al del la pieza, aunque con las aleaciones que poseen mala soldabilidad puede utilizarse un material que mejore estas propiedades. Por ejemplo en el aluminio se utiliza Al con Mg o Si al 5%. Si el procedimiento no está correctamente realizado, es fácil la aparición de agrietamientos o roturas.

En el caso de las fundiciones de hierro las piezas fundidas suelen necesitar un calentamiento, y la operación de soldadura debe realizarse con sumo cuidado. Las aleaciones de aluminio se sueldan bastante mejor, pero la dificultad consiste en utilizar el material de aporte adecuado en cada caso. Los aluminios más adecuados son los débilmente aleados o aleados con Si, Zn, Mg o Mg.

1.1.2.4 Velocidad de solidificación

Como se ha expuesto, el tiempo de solidificación tiene una influencia decisiva en la propiedades de la pieza que se obtendrá. Este tiempo t será proporcional al volumen V y al área superficial A de la pieza, por lo cual se puede estimar en base a la expresión:

$$t = k \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

La constante k dependerá del material del molde, de las propiedades de la aleación y de la temperatura. Aunque su determinación entraña dificultades, esta expresión permite evaluaciones comparativas entre modelos.

1.1.2.5 Contracción térmica

Debido a la contracción térmica las dimensiones de la pieza cambian durante el enfriamiento. Esto puede dar lugar a agrietamientos e incluso a roturas de la pieza. El proceso de contracción tiene lugar en tres etapas:

1. La contracción del metal fundido antes de la solidificación.
2. Durante el cambio de fase.
3. Durante el enfriamiento en fase sólida.

La mayor contracción ocurre durante el enfriamiento en fase sólida. En la tabla siguiente se ven los coeficiente de contracción de algunas aleaciones típicas; se distingue que la fundición gris en lugar de la esperable contracción, se dilata. Esto es debido a que al precipitar el grafito en forma laminar aumenta el volumen específico (mayor que el del carburo) y la fundición se expande.

Metal o aleación	Contracción volumétrica (%)	Metal o aleación	Contracción volumétrica (%)
Aluminio	6,6	Al - 4,5% Cu	6,3
Acero al carbono	2,5 - 3	Acero 1 % C	4
Cobre	4,9	Fundición gris	- 2,5

1.1.3 Defectos en las fundiciones

Los distintos procedimientos de fundición pueden producir diferentes tipos de defectos, que pueden clasificarse de la siguiente manera:

- a) Proyecciones metálicas. Son rebabas o rugosidades en la superficie metálica.
- b) Cavidades. Pueden ser deberse a poros, sopladuras o agujeros.
- c) Discontinuidades. Agrietamientos por enfriamiento. Aunque son muchos los factores que favorecen el agrietamiento, deben destacarse como causas principales las tensiones internas por enfriamiento excesivamente rápido y la presencia de segregaciones de bajo punto de fusión. Otro tipo de discontinuidades son los pliegues producidos por el encuentro de dos corrientes de metal provenientes de diferentes conductos.
- d) Defectos superficiales. Pliegues, arañazos escoria o arena adherida.
- e) Llenado incompleto. Debido a solidificación prematura, insuficiente metal colado, rechupes interiores o exteriores o pérdidas a través del molde.
- f) Formas o dimensiones incorrectas. Por insuficiente volumen de los bebederos para contracción. También puede estar causados por deficiencias del propio modelo o defectos de montaje.
- g) Inclusiones. Generalmente no metálicas, aparecen tanto durante la fusión como la solidificación y el moldeo. Son nocivas para las propiedades mecánicas de la pieza, ya que actúan como puntos de concentración de

tensiones. Pueden provenir de la oxidación de la aleación en estado líquido, de material del crisol (arenilla), o de reacciones entre el metal y el material del molde.

1.1.3.1 Porosidad

Las causas de porosidad en las fundiciones son básicamente dos: la contracción superficial durante la solidificación y la evacuación de gases. La porosidad tiene un efecto nocivo en las propiedades mecánicas del material, afectando particularmente a su *ductilidad*.

Contracción. Existen dos posibles tipos de defectos. Por una parte la solidificación de una sección delgada de la pieza puede impedir el correcto llenado de volúmenes mayores (sopladuras). En la fundición en arena, esto se puede controlar mediante la utilización de *enfriadores* que incrementan el ritmo de enfriamiento del volumen mayor. Pueden hacerse del mismo material de la pieza o de otro diferente (como p.ej. grafito o cobre).

El otro problema es la *microporosidad* que se produce por efecto de la contracción entre dendritas y entre sus brazos. La porosidad puede reducirse en estos casos mediante presión isostática o usando moldes de alta conductibilidad térmica.

Evacuación de gases. Los metales líquidos presentan una solubilidad de gases mucho mayor que los sólidos. Por ello, al solidificarse, expulsan los gases disueltos que se depositan en la superficie entre la pieza y el molde. Este efecto es particularmente notable en fundiciones de hierro, cobre o aluminio.

También pueden provenir de reacciones entre el metal fundido y el material del molde.

1.1.4 Materiales para moldeo

En general los materiales para fundiciones se distinguen según sean *ferrosos* (aleaciones de hierro) o *no ferrosos* (todas las demás).

1.1.4.1 Aleaciones ferrosas

Las aleaciones de hierro que se obtienen por fusión son las llamadas *fundiciones* (aunque también se fabrican piezas de acero fundido). Estas son aleaciones Fe-C, con contenidos de C que varían entre 2,11 y 6,7 % (hasta 4,5 % para aplicaciones industriales), y Si aproximadamente 3,5 %.

El contenido en C de estas aleaciones y el procedimiento de fabricación influyen de manera decisiva en las propiedades del material que se obtiene, ya que condiciona la forma en que cristaliza el C. Las fundiciones se clasifican en:

Fundición gris. Este material presenta C laminar precipitado, en forma de cuñas o láminas, que actúan como puntos de concentración de tensiones. Las fundiciones grises *ferríticas*, en las cuales la aleación Fe-C está en forma de ferrita, son materiales frágiles (tensión de rotura a la tracción mínima 140 MPa), aunque por su gran capacidad de disipación de energía vibratoria, se utilizan para fabricar bases de maquinaria, bloques de motores, etc. Se obtienen piezas de buena calidad superficial, poco porosas y sin grietas.

Mediante tratamientos térmicos pueden obtenerse fundiciones grises con mejores propiedades: a. *perlíticas*, cuya matriz es de perlita (ferrita más cementita). Aunque también es frágil, posee mejor resistencia mecánica que la ferrítica y b. *martensíticas*. Estas se obtienen austenitizando una fundición perlítica mediante un rápido enfriamiento. Dan como resultado materiales muy duros.

Fundición nodular. Para mejorar las propiedades mecánicas de las fundiciones grises, conservando sus virtudes, se agregan en el crisol pequeñas cantidades de aditivos (Mg o Ce) que favorecen la transformación de las láminas de grafito en esferas o nódulos, de donde reciben su nombre.

Son más resistentes que las grises (rotura a la tracción 550 Mpa y límite elástico 380 Mpa). También pueden obtenerse por tratamiento térmico estructuras perlíticas o martensíticas. Se utilizan en la fabricación de partes de máquinas, ejes, cigüeñales, etc.

Fundición blanca. Se obtienen mediante el enfriamiento muy rápido de fundiciones grises (o controlando el contenido de C y de Si muy bajo), para evitar la formación de las láminas de grafito, y que todo el carbono se mantenga en forma de carburo de hierro.

Son materiales muy duros, de rotura frágil y elevada resistencia al desgaste, por lo que se usan sitios sujetos a abrasión, como en zapatas de freno de trenes, guías de deslizamiento o rodillos de laminación.

Fundición maleable. Se obtiene mediante recocido de función blanca en una atmósfera de CO₂, entre 800 y 900 °C durante varias horas, para disociar la cementita en Fe y grafito que adquiere una forma similar a la fundición nodular, en una matriz de ferrita o perlita. Son dúctiles (de ahí su nombre), resistentes (límite elástico 240 MPa) y resistentes a la fatiga. Su aplicación típica es el material ferroviario.

Aceros. La fabricación de piezas fundidas de acero es más compleja que con fundición, por dos motivos básicos: su elevado punto de fusión y su tendencia a formar grietas y a oxidarse. Sin embargo permite la obtención de piezas con propiedades físicas más isotrópicas, mejor comportamiento mecánico y buena soldabilidad.

1.1.4.2 Aleaciones no ferrosas

Aluminio. Las aleaciones de aluminio tienen una amplia gama de aplicaciones, gracias a que la variedad de elementos de aleación y de tratamientos térmicos que admiten permiten obtener diferentes propiedades mecánicas y eléctricas.

Las aleaciones de Al tienen buena colabilidad, soldabilidad, maquinabilidad, resistencia a la corrosión y son ligeras. Sin embargo su resistencia mecánica es moderada y su resistencia al desgaste es baja. Son usos típicos de aleaciones de Al fundidas los bloques de motor y aplicaciones aeroespaciales.

Magnesio. Presentan buena resistencia a la corrosión, moderada resistencia y bajo peso. sus características mecánicas dependen del tratamiento térmico que reciban y de los recubrimientos de protección.

Cobre. Las aleaciones de base Cu se caracterizan por una buena resistencia a la corrosión, conductibilidad térmica y eléctrica y resistencia a la abrasión. Sus propiedades mecánicas cambian según los elementos de aleación, los cuales le pueden conferir buena maquinabilidad.

Aleado con estaño (Sn) da origen a los *bronces* y con zinc (Zn) a los *latones*. Otros Elementos de aleación habituales son Al (*bronce al aluminio*), níquel (Ni), plomo (Pb) y fósforo (P).

Zinc y níquel. Estos elementos forman parte de una gran variedad de aleaciones (muchas de ellas patentadas), con especiales características estructurales y físicas. Suelen ser fabricadas por moldeo a presión.

1.2 Sistemas de moldeo

1.2.1 Clasificación

La clasificación de los procesos de fabricación por moldeo se puede hacer atendiendo a varios criterios:

- Material del molde
- Sistema de moldeo
- Sistema de colado

En cuanto al sistema de llenado, una primera clasificación sería:

- Moldeo continuo
- Moldeo por piezas o lotes.
 - ♦ Molde perdido (molde en arena y especiales)
 - ♦ Molde permanente (moldes metálicos)

El sistema de llenado también admite otra clasificación:

- Colado por gravedad
- Colado a presión

Analizaremos los moldes según sean permanentes o no.

1.2.2 Molde perdido

Considerando la naturaleza del molde, los sistemas de moldeo de piezas se pueden clasificar en:

- *Moldeado en arena*. Puede ser manual o mecánico.
- *Moldeados especiales*. Utilizando moldes de resina (moldeado en cáscara) y a la cera perdida.

1.2.2.1 Fundición en arena

La construcción del *molde* requiere la preparación previa de una reproducción casi idéntica a la pieza que se desea fabricar llamada *modelo*.

El modelo se coloca en la caja de moldeo y el espacio circundante se rellena de arena especial bien apisonada. Se deja un conducto de entrada para el metal fundido, denominado bebedero y otro para la salida del sobrante, llamado rebosadero.

Una vez el metal fundido ha llenado el hueco dejado por el modelo, se verifica su solidificación. Al finalizar ésta, se abre la caja de moldeo y se deshace el molde; se separan el bebedero y la mazarota que han quedado formando parte de la pieza,

una vez limpia y sin rebabas finaliza el proceso de moldeo quedando lista para su mecanización posterior.

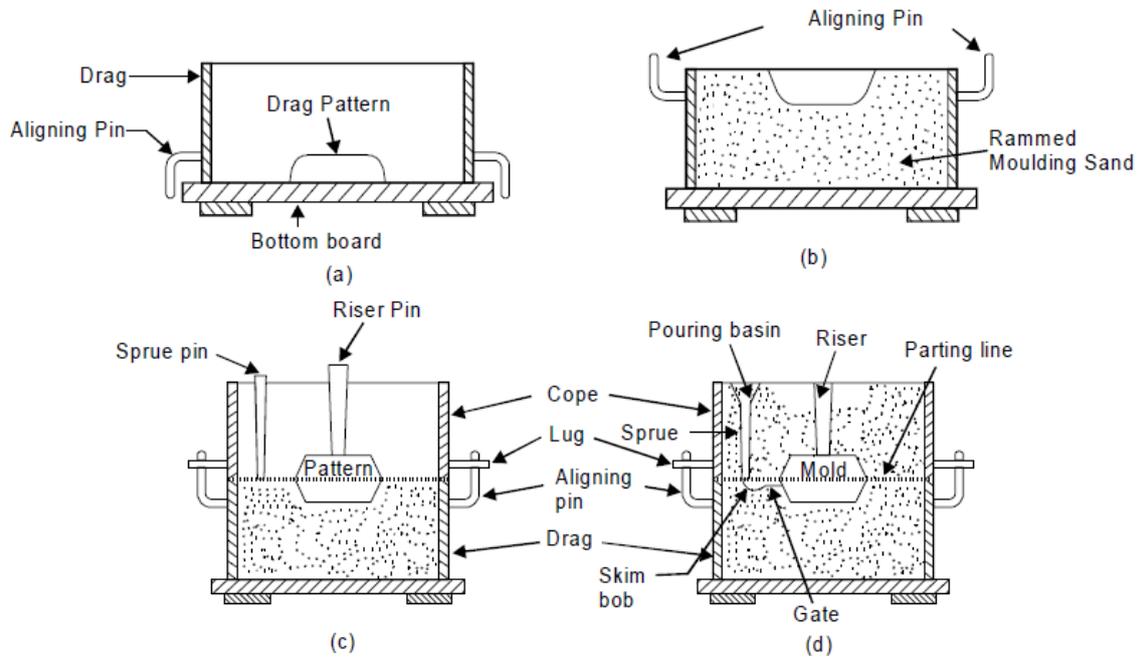


Fig. 1.2. Fases del moldeo en arena. R. Singh, Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, 2006.

Cuando la pieza no es maciza hay que colocar en el interior del molde un *macho*, llamado también *noyo*, con la forma del hueco a reproducir. Por consiguiente, la masa fundida ocupará todo el molde menos el espacio correspondiente al macho.

a) Moldeo a mano

Comprende la preparación de las cajas de moldeo, la colada, el desmoldado, la extracción de la pieza y el desbarbado o limpieza.

1. *Preparación de las cajas.* En primer lugar se seleccionan las cajas de moldeo en razón del tamaño del modelo a emplear. Se fabrican de fundición de hierro, aluminio, acero y madera.

2. *Construcción del molde.* Se introduce el modelo en las cajas y se rellenan los huecos de arena apisonada y se extrae el modelo utilizado. Finalmente, se preparan los conductos de colada.

1. *Colada.* Hay tres procedimientos básicos de colada; a saber:

- ♦ Colada directa
- ♦ Colada inferior o de sifón
- ♦ Colada lateral

4. *Moldeado con machos.* La preparación de machos o noyos exige el empleo de arenas de composición especial, así como el uso de aglutinantes. Además, es preciso construir una caja de machos para su moldeado.

Esta caja es un molde, fabricado del mismo material que los modelos, que tiene la forma que se desea dar al macho. Si éste es de forma sencilla y regular (cilíndrica, prismática, etc.), la caja es de una pieza. El macho se moldea rellinando la caja de arena bien comprimida y se empuja después por un extremo para extraerlo.

Los machos de forma más complicada requieren caja partida y, en consecuencia, moldeado por separado de cada parte. Posteriormente, se unen ambas, acoplándolas con ayuda de clavijas.

5. *Desmoldado.* Una vez que la pieza fundida se ha enfriado, se abren las cajas de moldeado y se destruye el molde. La pieza, con las columnas de colada y mazarotas incorporadas está lista para pasar a la sección de limpieza y desbarbado.

b) Moldeado mecánico

En la moderna producción en serie se sustituyen los métodos manuales por el moldeado mecánico realizado con maquinaria especializada.

La placa modelo es un elemento fundamental del moldeado a máquina. Consiste en una placa de fundición, aluminio u otros materiales resistentes, donde se atornillan los modelos a emplear. A veces los modelos y la placa son de una sola pieza. Las placas modelo llevan los dispositivos de alineación y transporte necesarios para su empleo.

Existen tres clases de placa modelo: placa modelo simple (si el modelo debe ser partido será preciso construir dos placas, una para cada parte); placa modelo de doble cara y placa modelo reversible. Con frecuencia se montan varios modelos en la misma placa.

* *Máquinas para el moldeo mecánico*

Hay que distinguir dos operaciones bien diferenciadas: el moldeo, que consiste en rellenar la caja de arena y prensarla y el desmoldado o separación de la caja y la placa modelo. Las máquinas que realizan ambas operaciones son máquinas de moldear, propiamente dichas; mientras que las que sólo ejecutan el desmoldado mecánico son máquinas *desmoldadoras*.

Se pueden dividir en: máquinas de moldeo por presión, por proyección de arena, por sacudidas y de procedimiento mixto. También existen máquinas para el moldeo mecánico de machos.

a. Máquinas de moldeo por presión

Constan esencialmente de un cabezal y una mesa de trabajo. El prensado de la arena puede hacerse por la acción del cabezal, llamado prensado superior; o por la acción de la mesa, llamado prensado inferior.

El sistema de prensado puede ser manual, electromagnético, hidráulico y neumático.

b. Máquinas de moldeo por proyección de arena

Estas máquinas proyectan la arena con fuerza sobre las cajas de moldeo, por medio de unas aspas movidas por un motor, siendo innecesario el prensado de la misma.

Esta máquina puede llenar rápidamente cajas de grandes dimensiones; funciona sin ruido ni vibraciones y su manejo es sencillo. Se emplea con preferencia para moldear en serie grandes piezas.

c. Máquinas de moldear por sacudidas

Las máquinas de este tipo apisonan la arena para el moldeo en las cajas por medio de sacudidas de la mesa. El sistema motriz suele ser neumático. El aire

comprimido penetra en el cilindro cuyo émbolo es solidario a la mesa, lo que produce su elevación hasta el nivel de la válvula de escape, cerrando en este instante la válvula de entrada; entonces, el émbolo desciende bruscamente y la mesa experimenta una sacudida, reiniciándose inmediatamente el ciclo. Son muy adecuadas para moldear piezas complicadas.

d. Máquinas de moldear mixtas

A fin de combinar los efectos del moldeo por presión y por sacudidas existen máquinas de acción mixta. La primera fase del trabajo es por sacudidas, con lo cual se logra un buen apisonado de las capas de arena junto al molde. La segunda fase permite el correcto apisonado de las capas superiores de arena por el procedimiento de presión.

e. Máquinas para el moldeo mecánico de machos

Las más empleadas son las de *extrusión* y las de *soplado neumático*. En las primeras, la arena procedente de una tolva se introduce en la caja de machos por medio de un tornillo sin fin.

Las máquinas de soplado tienen la caja de machos acoplada a una tobera, por donde se inyecta arena impulsada por aire comprimido. Algunas de estas máquinas actúan por disparo de aire; es decir, el aire a presión contenido en un depósito se expande instantáneamente al abrir una válvula de disparo, lo que provoca un arrastre súbito de arena que se comprime en la caja de machos. Por medio de anhídrido carbónico se endurece el macho moldeado.

* Arenas de moldeo

Las arenas de moldeo están constituidas por una mezcla de materiales, con una base de arena (SiO_2). Esta arena es preparada con el agregado de aglutinantes y molida, para obtener una granulometría adecuada, suficientemente fina como para que el aspecto superficial de las piezas a obtener sea bueno, pero no demasiado, porque disminuye la permeabilidad y con ello la evacuación de gases a través del molde y los noyos.

Otra propiedad que tienen las arenas de moldeo, es que contraen y dilatan, absorbiendo la contracción del metal al solidificar.

De acuerdo al aglutinante empleado, las arenas de moldeo se clasifican en:

- Normal o natural. El aglutinante es *arcilla húmeda*.

- Sintéticas. Se utilizan productos orgánicos e inorgánicos. Se obtienen moldes y noyos más resistentes con mayor precisión dimensional.

Por otra parte, los moldes de arena pueden caracterizarse según su preparación:

- En verde. Es el método más económico de moldeo. Se utiliza como aglutinante arcilla húmeda. Al fluir la fundición dentro del molde, es necesario evacuar el vapor de agua que se genera.
- Secados. Se cuecen los moldes en hornos o al aire, previamente al vertido del metal fundido. Son más resistentes y proporcionan mejor acabado que los moldes en verde, pero son menos elásticos a las contracciones y las piezas suelen resultar con mayor distorsión. El ritmo de producción es también inferior por la necesidad de secado de los moldes.
- Aglutinantes en frío. Se utilizan aglutinantes químicos orgánicos e inorgánicos o resinas sintéticas que no requieren secado en hornos. Resultan moldes más resistentes, con mayor precisión dimensional y calidad superficial, pero más caros.
- Moldeado al CO₂. Es un tratamiento aplicable a los moldes y machos de arena, para suprimir su calentamiento o cocido.

1.2.2.2 Procedimientos especiales de moldear

Bajo este título se van a estudiar unos cuantos procedimientos de moldear que, debido al equipo empleado, al proceso seguido, o a la precisión alcanzada, pueden clasificarse como especiales, lo cual no significa necesariamente que sean de empleo limitado. Estos procedimientos son:

- a) Moldeado en cáscara (Shell molding).
- b) Moldeado a la cera perdida (microfusión).
- c) Moldeado Mercast.

- *Moldeado en cáscara (Shell molding)*

En esencia, el procedimiento consiste en la obtención de un molde o *coquilla* de arena y resina a partir del modelo de la pieza donde se efectuará la colada.

Para la formación del molde o coquilla se aprovecha la propiedad que tienen ciertas resinas fenólicas de endurecerse bajo la acción del calor. Estas resinas actúan como aglomerantes de la arena de sílice, exenta de arcilla y de grano fino.

El modelo de la pieza se construye ordinariamente en dos mitades y se fija cada una de ellas a una placa metálica, con los canales de colada, mazarotas y marcas de macho, si hacen falta.

La placa modelo se calienta a unos 200 °C y se le aplica una capa antiadherente a base de parafina o silicona. A continuación entra en contacto con la mezcla de moldeo, formando en pocos segundos un caparazón sólido o cáscara de 5 a 7 mm de espesor.

La placa, con la cáscara adherida, es sometida finalmente a un calentamiento a 350 °C en un horno apropiado durante unos tres a cinco minutos. Terminada la cocción, se separa la cáscara del molde y se unen los semimoldes obtenidos con cola, pinzas, tornillos o por otros medios. El molde así formado se introduce en una caja de moldear, rellenando el espacio circundante con tierra vieja y se procede a colar el metal.

Las ventajas principales que se obtienen por este procedimiento son la precisión geométrica y dimensional (las tolerancias son del orden del 0,5%).

- Moldeo a la cera perdida (microfusión)

Es uno de los procedimientos más antiguos de fundición y que, debidamente perfeccionado, sirve para producir gran variedad de piezas de elevada precisión (del 0,2% a 0,5% de tolerancia), pequeño tamaño y formas muy complicadas, imposibles de obtener por otros sistemas de moldear. Es un procedimiento adecuado para colar tanto aleaciones de aluminio como aleaciones duras, acero al Cr-Ni, Cr-Ni-Mo y al Co.

El proceso a seguir es, a grandes rasgos, el siguiente:

1. Se construye un modelo de la pieza en latón o bronce con el máximo esmero y contando con las contracciones y dilataciones que se han de producir.
2. Empleando el modelo construido, se funde un molde con una aleación de bajo punto de fusión al Bi-Sn. El molde también puede ser de acero; en este caso no se precisa modelo original.
3. En una prensa de inyección especial se obtienen modelos de cera o poliestireno con ayuda del molde metálico preparado.
4. Los modelos son montados en conjuntos de colada llamados racimos a menos que, por su tamaño, justifiquen un tratamiento individualizado.

5. Los racimos de modelos se introducen en un baño cerámico seguido de un arenado cuidadoso; todo ello a temperatura controlada.
6. Se introducen los racimos, ya revestidos, en unas cajas de acero que se rellenan de arena; se comprime por vibración y se extraen el aire y la humedad excesiva en una cámara de vacío.
7. En una estufa a 100°C se funde la cera o se consume el poliestireno (modelos perdidos) y seguidamente se cuecen los moldes en unos hornos a 1000 ° C, con lo que desaparecen los últimos residuos de materia de los modelos perdidos, al mismo tiempo que la cáscara cerámica adquiere la solidez y resistencia necesarias.
8. Se cuela el metal en el molde bajo ligera presión y se aspira el aire contenido para facilitar el llenado.
9. Una vez solidificado, se rompen los moldes y las piezas pasan a las secciones de limpieza y desbarbado.

Se puede deducir fácilmente que, por la complejidad del proceso, su aplicación sólo será conveniente en la fabricación de pequeñas piezas de precisión, de forma complicada, de conformación difícil o imposible por otros procedimientos.

- Moldeado Mercast

Puede considerarse como una variante del método a la cera perdida. La cera o poliestireno son sustituidos por mercurio. La precisión alcanzada en los detalles es superior a la de microfusión.

- Moldeo al yeso

Es un método para fabricar piezas de aleaciones de Al, Mg, Zn y latones, con muy buen grado de calidad superficial, aunque tienen limitaciones de temperatura, hasta 1200 °C. Los moldes se fabrican con yeso mezclado con talco o sílice muy finamente molida para mejorar su resistencia mecánica, y humedecido con agua. El molde se seca en hornos a unos 200 °C.

Los modelos se realizan en aleaciones ligeras, debido a que deben resistir la humedad. como los moldes no tiene casi permeabilidad, se suele fundir bajo presión o en ambiente de vacío.

- Moldeo en cerámica

Es otro método que permite altas precisiones dimensionales, finos detalles, formas intrincadas y, adicionalmente, soportan altas temperaturas del metal fundido. Por

ello se utilizan para fabricar piezas de acero altamente aleado y otras aleaciones refractarias.

Los moldes se realizan con circonio ($ZrSiO_4$), alúmina (Al_2O_3) o sílice (SiO_2). su coste es elevado y sólo se utilizan en piezas complejas y de alto precio.

1.2.3 Moldes permanentes

1.2.3.1 Fabricación de lingotes

La fabricación de lingotes es normalmente el primer proceso tecnológico de transformación que sufren los metales y sus aleaciones para adaptarlos a las necesidades de los procesos de transformación posteriores.

De acuerdo a los materiales y el volumen de la producción, los lingotes se fabrican por procesos continuos o discontinuos.

Los lingotes de materiales siderúrgicos suelen fundirse por *colada continua*, que permite altas producciones y que se adapta a las necesidades de los trenes de laminación (de palanquilla, chapas o barras).

Después de un tiempo de homogeneización en un depósito se vierte a través de un molde de material refractario (que retiene las escorias) dentro de una cámara de cobre refrigerada por agua. Para favorecer la formación del lingote, antes de comenzar a colar se inserta dentro del molde una barra sobre la que se vierte la aleación fundida que comienza a solidificar arriba de ella.

La velocidad de colado debe ser la suficiente como para dar tiempo a que el lingote solidifique y se "auto sostenga". Velocidades típicas de colado son unos 25 mm/s. El molde suele ser vibrado y lubricado con grafito para disminuir la fricción y mejorar la adhesión del metal caliente sobre las paredes.

A continuación, un mecanismo de enderezado y luego otro de corte permiten cortar los tochos a la medida adecuada para su posterior envío a los rodillos de laminado.

La fabricación de lingotes por colada discontinua es un procedimiento similar al que se describirá para el moldeo en cajas, con las salvedades de los materiales que se emplean y los volúmenes de las piezas.

1.2.3.2 Moldeado en moldes metálicos

Los moldes metálicos o *coquillas* sustituyen con ventaja a los de arena en el moldeado por gravedad cuando hay que fabricar grandes series de piezas. Otro sistema es la colada a presión en unos moldes fabricados a tal efecto.

- Fundición en coquilla

Este procedimiento consiste en sustituir los moldes de arena en la fundición ordinaria por gravedad, por moldes metálicos.

Las coquillas se componen de dos partes principales:

- El cuerpo del molde que da forma exterior a la pieza; en todos los casos siempre es metálico.
- Los machos o núcleos que determinan las cavidades o entrantes de las piezas; éstos pueden ser metálicos o de arena.

1. *Cuerpo exterior del molde.* El cuerpo del molde está formado por dos o más partes, según la complejidad de las piezas a obtener.

Las partes del cuerpo separadas entre sí por una junta vertical, se denominan placas. La parte horizontal recibe el nombre de plantilla o pedestal.

Las plantillas, además de cerrar el molde por la parte inferior, sirven de apoyo y guía de las placas. En los moldes sin pedestal se centran las placas por medio de clavijas o pasadores.

2. *Núcleos de las coquillas.* Los núcleos o machos pueden ser metálicos o de arena; los metálicos deben ser de forma ligeramente cónica para facilitar la extracción. A veces los núcleos se construyen en varias piezas.

Fundición a presión

La fundición a presión se diferencia de los procedimientos ordinarios en que la colada no se realiza por gravedad, sino que se inyecta a presión en el molde y el metal previamente fundido.

Este procedimiento permite fundir piezas de forma complicada con aristas pronunciadas y espesores mínimos. La superficie de las piezas resulta limpia y sin defecto. Y como el material, debido a la presión, resulta más compacto, sus propiedades mecánicas mejoran hasta un 20% con respecto a los metales colados por gravedad.

Matrices para fundición a presión

Reciben el nombre de matrices los moldes metálicos utilizados para la fundición a presión (fig. 1.3). La elevada presión y temperatura que deben resistir exige el empleo de materiales y detalles en su construcción totalmente distintos a los empleados en el moldeo a coquilla.

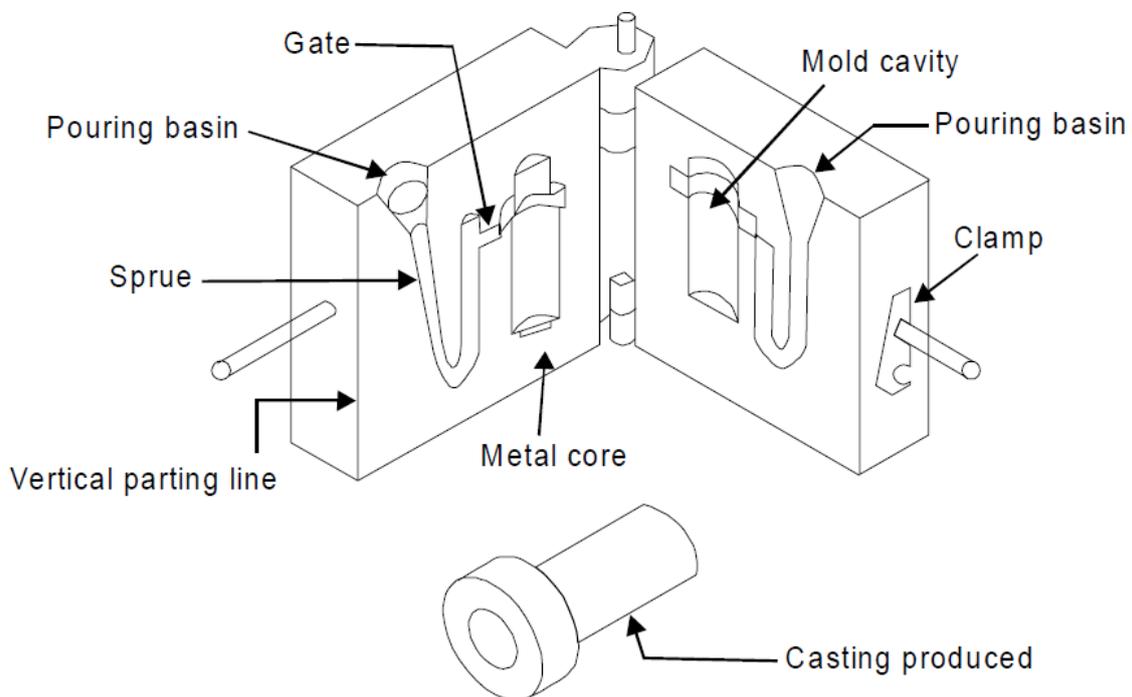


Fig. 1.3.. Componentes de una matriz para fundir a presión. R. Singh, Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, 2006.

Constan normalmente de cuatro elementos principales:

1. Matriz fija de cubierta. Se fija a la mesa de la prensa. Lleva moldeada una o varias caras exteriores de la pieza a fabricar, pero nunca debe llevar machos o salientes, que deben ir siempre en la matriz móvil, para que la pieza fundida quede agarrada a esta matriz.
2. Matriz móvil de eyección. Debe ir sujeta a la parte móvil o carro de la máquina. Lleva el saliente principal de la pieza, en el que queda prendida, y del que es extraída por las barras de eyección o expulsión. Lleva también los conductos de colada, las guías de acoplamiento a la matriz de cubierta y los conductos de refrigeración.
3. Placa de eyección. Contiene los dispositivos de extracción de la pieza. Consta de unos punzones fijos a esta placa que atraviesan la matriz de eyección y empujan la pieza fundida, obligándola a desprenderse del molde.
4. Macho. El macho debe separarse una vez que ha cumplido su misión.

La matriz fija lleva una barra inclinada, que penetra en un orificio de la misma inclinación del macho lateral. Al iniciarse la separación entre matriz fija y la móvil, la barra inclinada levanta el macho lateral, quedando la pieza libre para ser extraída por las barras de eyección.

Al terminar la extracción y juntarse las matrices, el macho vuelve a su posición inicial.

Máquinas para la fundición a presión de cámara fría

La fundición a presión se efectúa siempre por medio de máquinas con circuitos hidráulicos o neumáticos que realizan automáticamente las siguientes fases:

Fase 1. Cierran el molde, colocan los machos en posición y la máquina se prepara para inyectar.

Fase 2. Inyectan el metal con la presión necesaria.

Fase 3. Abren las placas y extraen la pieza una vez fundida.

Máquinas de cámara caliente

En este sistema la cámara de presión se encuentra dentro del recipiente de metal fundido. Esto solamente es posible cuando el metal en estado líquido y a elevada temperatura no ataca a los materiales de la cámara de presión. Hasta ahora

únicamente se han podido colar, por la razón expuesta, aleaciones de estaño, plomo y zinc.

El equipo de colada consiste en un horno de mantenimiento, con un crisol en cuyo interior está la cámara de presión dotada de un cilindro oleohidráulico, cuya misión es inyectar metal fundido y aspirar la cantidad necesaria para el ciclo siguiente, en la carrera de retorno. La penetración del metal en el molde tiene lugar a través de la boquilla.

1.3 Práctica de la fundición

1.3.1 Operaciones de acabado de las piezas fundidas

Las piezas fundidas, después de la colada, deben pasar por unas operaciones de acabado para eliminar los restos de arena, rebabas, bebederos y mazarotas adosados. Dichas operaciones son de dos clases: limpieza y desbarbado.

1.3.1.1 Limpieza de piezas fundidas

Tiene por objeto eliminar los restos de arena adheridos a las piezas. Se realiza por:

- Proyección de arena o granalla, presión en cámaras apropiadas, manual o mecánicamente.
- Rotación, en un tambor adecuado. La limpieza se verifica por choque mutuo, aunque a veces se añaden pequeñas piezas de fundición que multiplican los efectos de la operación.
- Chorro de agua a presión (hasta 160 at) en unas instalaciones de ciclo continuo. El operario dirige la boquilla de proyección desde el exterior de la cabina, sobre la pieza situada encima de la plataforma giratoria. El agua arrastra la arena y las partículas metálicas al depósito de decantación para su recuperación posterior.

1.3.1.2 Desbarbado de piezas fundidas

La eliminación de las grandes rebabas, bebederos y mazarotas se efectúa con ayuda de aparatos diversos, una vez limpias las piezas.

Para las rebabas se emplean cinceles neumáticos o muelas de disco. Los bebederos y mazarotas se cortan con sierra de disco abrasivo y los restos se eliminan por amolado.

1.3.2 Recomendaciones generales sobre el moldeado

Los modelos deben fabricarse con formas acomodadas al proceso de fundición, al moldeo, y al desmoldado del modelo (en la fundición en molde de arena) o bien de la pieza fundida (fundición en coquilla y en fundición inyectada), al proceso de fluencia y al enfriamiento y contracción desiguales de la colada.

1.3.2.1 Elección del proceso de fundición

Para hierro y acero fundidos, prescindiendo de la fundición dura en coquillas, destinada a fines especiales, y de la fundición fina con modelos perdidos o fusibles de termoplástico, sólo se ha de considerar la fundición en molde de arena.

Para metales ligeros y aleaciones de Zn y Cu, también la fundición en coquilla y la fundición inyectada.

La fundición en molde de arena resulta la más barata para pequeño número de ejemplares y es adecuada también para piezas fundidas muy grandes. El mínimo espesor de pared ha de ser de 3 mm para la fundición gris, y de 5 mm para el acero colado (aumentando con la longitud del camino que se ha de recorrer y el caudal de paso del metal líquido); la exactitud alcanzable en estas medidas es del orden de "1 mm; la superficie externa es rugosa.

La fundición en coquilla es apropiada para grandes series, y puede ser tomada en consideración para piezas sencillas ya a partir de los 200 ejemplares. Peso de la pieza, hasta unos 50 Kg; espesor de la pared, $\geq 3\text{mm}$; tolerancia de 0,2 a 0,3mm.

Proporciona superficies externas lisas, estructura más fina y densa, y resistencia más elevada que la fundición en molde de arena. Admite incluir en la fundición casquillos pequeños de acero, pernos de acero, etc., que han de asegurarse contra desplazamientos, mediante estrías o resaltes.

La fundición inyectada es propia de la fabricación de precisión en gran serie de piezas pequeñas, de paredes finas (puede ser tomada en consideración a partir de 500 ejemplares) y proporciona una textura fina y densa. Peso por pieza: hasta 10 Kg para metal ligero, hasta 20 Kg para aleación de Zn, y hasta 25 Kg para aleación de Cu. Mínimo espesor de pared, de 0,5 a 3mm; tolerancia, de 0,03 a 0,3mm.

1.3.3 Diseño de los modelos

1.3.3.1 Sobremedidas y ángulo de salida

Sobremedidas para mecanizado

Por lo normal los modelos para piezas fundidas deben contar con sobremedidas (o creces) para mecanizado. Las creces dependen del material y del tipo de moldeo. Cuanto mejores precisiones puedan obtenerse, menores creces serán necesarias.

Como orientación pueden utilizarse los valores siguientes:

- Fundición: 2,5 mm
- Aceros: 3,5 mm
 - No ferrosas: 1,5 mm

Ángulo de salida

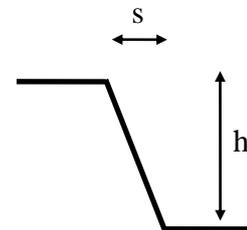
El ángulo de salida es necesario para ayudar al desmoldado. Sobre todo tiene importancia con moldes de arena, aunque también en los metálicos.

Los ángulos deben aumentar para **h** decrecientes. Para moldes de arena se pueden tomar los siguientes valores como orientación:

Modelos: • Pequeños ($h < 200$ mm). $s = 0,5 + h/100$

• Medianos ($200 < h < 500$). $s = 0,5 + h/100$

• Grandes ($h > 500$). $s = 1 + h/200$



1.3.3.2 Reglas de diseño

Debido las diferencias de volumen, las partes solidificadas más tarde (las más gruesa o más internas) sufren una dilatación desigual frente a las que habían solidificadas con anterioridad.

Se originan, consecuentemente, "rechupes", o acortamientos de las partes solidificadas más tarde y, por tanto, tensiones o grietas cuando se impide la contracción. Las ultimas son características de los lugares de transición de secciones gruesas a delgadas y de las esquinas.

Es preciso, pues, evitar un enfriamiento desigual, o, de lo contrario, hacer posible la compensación de las tensiones, recurriendo a una configuración adecuada. En la figs. 1.38. se muestra una bancada de una máquina, con nervios de refuerzo en toda su extensión; con ello se evitan acumulaciones de material y, por lo dicho, formación de rechupes al mantener separados los lugares de unión (puntos 1 y 2).

Valor medio de contracción en %

fundición gris	1	silumina	1,15
fundición dura	1,5	aleación de Mg	1,2 a 1,9
fundición maleable	1,6	aleación de Zn	1,8

acero colado	2	bronce ordinario	1,5
aleación de Al	1 a 1,7	latón fundido	1,8

Cuanto mayor sea la contracción del material, tanto mayor importancia revisten esas medidas (por ejemplo en el acero colado).

1.3.3.3 Orientaciones para el diseño

1. Coste reducido de los modelos.

Se consigue mediante: líneas de contorno sencillas (rectas y circulares), superficies de construcción sencillas (planas y de revolución), modelos de una sola pieza, sin núcleos especiales, noyos sencillos apoyados de un modo seguro, en caso de que no puedan evitarse por completo.

Toda partición del modelo y todo noyo aumentan los costes por modelos, por moldes y por desbarbado, e incrementan, además, el número de piezas defectuosas por desplazamientos entre el modelo y el noyo.¹

2. Costes más reducidos en el moldeo.

Se consiguen si se redondean bien las zonas de transición. En cada caso, la figura de la izquierda representa una mala solución y la de la derecha una buena.

- a) Evitar resaltes contrapuestos (flechas 1,2) y prever inclinaciones que favorezcan el desmoldeo (flechas 3 a 7).
- b) Secciones de paso suficientemente grandes.
- c) Transiciones de una sección a otra redondeadas (si lo están en demasía, se producen rechupes; pero si lo están muy poco, originan tensiones). Considerar los círculos de Heuversche: $D/d < 1,6$.
- d) Espesor de pared lo más uniforme posible.
- e) Las superficies inclinadas favorecen más la salida de los gases y la repartición de tensiones.
- f) Los noyos con múltiples apoyos originan menos piezas fallidas.

¹ Medidas de referencia para dimensiones del noyo: diámetro/longitud \$ 1/10; espesor de pared/longitud \$ 1/60.

3. Defectos en las piezas

Menos piezas defectuosas serán obtenidas si la fluencia, la gasificación y la contracción de la colada se tienen también en cuenta constructivamente: secciones de paso suficientemente grandes (el espesor de pared en concordancia con el trayecto que ha de recorrer la masa fluida y su caudal); poca acumulación de material (menos rechupes y segregaciones); transiciones bien redondeadas (menos grietas y tensiones); nervios de refuerzo más delgados que las paredes (lo cual disminuye las grietas y las tensiones); y superficies inclinadas en vez de horizontales (menos superficies con burbujas).

4. Exigencias particulares

En determinadas partes de la pieza fundida, como superficies densas, libres de poros o lisas, o una resistencia especial, etc., han de señalarse especialmente en el plano, a fin de que el modelista y el fundidor puedan tomar sus medidas oportunas. Se recomienda principalmente estudiar y discutir los diseños de piezas de fundición con un técnico fundidor.

5. Fundición maleable

A causa del recocido que ha de extenderse a toda la masa, hay que procurar que el espesor de la pared sea uniforme, de unos 3 a 8 mm. La fundición maleable (con la zona de la periferia ferrítica y núcleo perlítico) es fácilmente mecanizable y resulta apropiada para la fabricación de piezas de pequeña masa como cadenas transportadoras, ruedas, llaves y herrajes, que deben tener más tenacidad que la fundición gris.

6. Metal ligero

Las aleaciones ligeras, por ejemplo, las de silumina, incluso las de la configuración complicada, son de fundición mucho más segura, comparativamente, que la fundición gris, y, sobre todo, susceptibles de serlo con menor espesor de paredes, al colarse frecuentemente en coquilla, debido a su gran fluidez y a su elevada tenacidad en caliente.

Por lo demás, si se trata de piezas fundidas de metal ligero, se tiende a conseguir espesores de pared uniformes, grandes radios de redondeo y secciones de gran momento de inercia, unidas a paredes delgadas y provistas de suficientes nervios.

1.3.4 Desgaseado

La presencia de gases en primer lugar afecta al aspecto superficial de las piezas, sobre todo en aquellas que van a ser pulidas o anodizadas (aluminio). La presencia de gases se manifiesta por medio de pequeñas piqueras superficiales y en la mayoría de los casos hay que rechazar las piezas.

Los orígenes de gases en las fundiciones puede ser:

- Humedad ambiente
- Materias primas metálicas. Óxidos metálicos, restos de humedad en los lingotes, restos de hidrocarburos.
- Materias primas no metálicas.
- Crisoles y material refractario de los hornos.
- Gases de combustión.
- Herramientas de trabajo.
- Pinturas de crisoles y moldes metálicos.
- Arenas y machos.

Los gases provocan una disminución de las características mecánicas por falta de cohesión interna en el metal y por disminución de la sección eficaz. La porosidad puede casar el inicio de fisuras y puede conducir a la rotura de la pieza por fatiga.

En algunas aleaciones que tienen tendencia a agrietarse, cierto contenido en gas puede, en algunos casos, disminuir esta tendencia. En las aleaciones de Al el desgaseado cobra particular importancia.

1.3.4.1 Aleaciones de aluminio

Todos los gases (vapor de agua, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, óxidos de carbono) se disuelven en mayor o menor grado en el metal en estado líquido. En el caso de las aleaciones de Al, el único gas que se disuelve en cantidades importantes es el hidrogeno. Su origen principal es la humedad del molde (moldes de arena verde) y del aire.

La solubilidad del hidrogeno en el aluminio fundido a la temperatura de 700 °C, es aproximadamente de 0,9 ml de gas por 100 gr de metal. Esta pequeña cantidad, menos de 1 ppm, no causaría muchos problemas si no fuera por su comportamiento durante la solidificación del aluminio, al disminuir bruscamente su solubilidad.

La disminución brusca de solubilidad hace que el gas precipite en forma de burbujas de pequeñas dimensiones repartidas por toda la masa del metal. Como el metal está casi solidificado, algunas burbujas no pueden escaparse y quedan aprisionadas en la masa del metal formando una porosidad muy característica y que es diferente de la porosidad que se presenta cuando se producen microrrechupes. Cuando la velocidad de solidificación es elevada (fundición en moldes metálicos), no da tiempo a la evacuación del H₂ el cual queda retenido.

1.3.4.2 Tratamiento de las aleaciones de aluminio

En cada caso deberá determinarse el tratamiento adecuado a seguir, que será función de las naturales del gas y de su contenido. En el caso del desgaseado de las aleaciones de aluminio el tratamiento normal es el borboteo de un gas insoluble (normalmente nitrógeno o argón) en el seno del metal líquido, mediante una caña de grafito.

El gas debe dividirse en burbujas lo más pequeñas posible (para mejorar el contacto con el metal), tratando de que el tiempo de residencia sea máximo. El suministro se hace a unos 0,5 k/cm² con caudales de 5 a 8 l/min.

1.3.5 Tratamientos térmicos

Las piezas fundidas resultan con una determinada estructura cristalina que otorga ciertas características físico-mecánicas al material, que no siempre se adecuan a las necesidades de la aplicación. Las propiedades de las piezas pueden ser “mejoradas” mediante tratamientos térmicos, que permiten modificar, según las necesidades, la composición y la estructura cristalina.

Éstos tratamientos se pueden agrupar en tres grandes familias, en función de los fines que persiguen: uniformizar la estructura cristalina, aliviar tensiones o recrystalizar.

Recocido

El *recocido* puede realizarse a temperaturas *subcríticas* (por debajo de la temperatura de recrystalización) o *supercríticas* (por arriba de ella), seguido de un enfriamiento lento, para que se formen granos más pequeños y resistentes.

De la temperatura del tratamiento depende que la transformación estructural sea completa o parcial. Con esto el material pierde dureza, resultando más dúctil y menos frágil.

Recristalización

Son tratamientos que se realizan calentando a temperaturas superiores a la de recristalización seguido de un enfriamiento lento, para permitir que recupere sus propiedades normales. Por ello se conocen también como *normalizado*.

En algunos casos se realizan tratamientos *isotérmicos*. Esto significa que después del calentamiento no se enfría inmediatamente, sino que se da tiempo suficiente para que se produzca un cambio de estructura.

En otros casos, después del calentamiento se enfría rápidamente para retener la estructura cristalina a temperaturas ambiente (austenitización).

1.4 Hornos para fundición

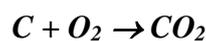
En función del tipo de aleación y de la producción que se necesita, se utilizan varios tipos de hornos.

1.4.1 Cubilotes

Son los hornos utilizados para obtener fundición gris, utilizando como materia prima el *arrabio* que se proviene de los altos hornos. La composición típica de la carga es:

- arrabio (\cong 60 %)
- coque (13 % de la carga metálica)
- caliza (4 % de la carga metálica)
- chatarra de fundición y de acero (40 %)

Se cargan alternativamente capas de 50 - 60 cm de carga metálica y de coque con caliza. A través del plano de toberas se inyecta aire con el cual se quema el C del coque:



Parte de este CO_2 se disocia en $C + CO$, y este monóxido se quema gracias al exceso de aire, dando de nuevo CO_2 que sale por la chimenea. El hierro fundido gotea a través del carbón incandescente, y se carbura hasta el 3,5 % típico de la fundiciones grises.

El resto de los componentes (Si, Mn, P) se oxidan, y luego se combinan con la cal (CaO) que se habrá formado al descomponerse la caliza (CO_3Ca), dando lugar a

compuestos estables (silicatos y carbonatos) que formarán parte de la escoria (5 - 6 % de la carga).

1.4.2 Hornos de reberbero

En éstos hornos, de poca altura comparada con la longitud, se funden tanto metales féreos como no féreos. Su capacidad varía entre unos 50 kg de carga metálica (no férrea) hasta 100 Tm de fundiciones de hierro.

El combustible se inyecta por un extremos del horno y los gases salen por la chimenea situada en el extremo opuesto, atravesando la bóveda. El metal se distribuye por la superficie del horno, y es calentado por los gases y por la radiación de la solera.

Las fundiciones que se obtienen en estos hornos resultan con menor contenido de C, y una composición más controlada.

También se construyen hornos de reverbero eléctricos, con resistencias metálicas (< 1000 °C) o de grafito (< 1359 °C).

1.4.3 Hornos rotativos

Son una versión mejorada de los hornos de reverbero, ya que al girar (u oscilar) mejora el rendimiento térmico y se disminuyen los tiempos de ciclo. Valen tanto para fundiciones y aceros como para no ferrosos, y su capacidad es similar a los de reverbero.

1.4.4 Hornos de crisol

Se emplean para pequeñas producciones, sobre todo con no féreos. Al ser cerrados, los gases de combustión no contaminan la carga. El crisol puede ser fijo, basculante o de foso. La vida útil del crisol suele ser de unas 25 cargas.

1.4.5 Hornos eléctricos

Estos hornos permiten obtener las mayores temperaturas de fusión (hasta 3500 °C) con un fino control de la regulación y de la atmósfera (pueden trabajar con vacío). Tampoco afectan a las propiedades de los materiales de la carga, y puede controlarse la dosificación de elementos de aleación con mucha precisión.

Los hay de tres tipos: de arco, de inducción (de alta y baja frecuencia) y de resistencia.

1.4.6 Hornos convertidores

No se utilizan para fundir metal con el objetivo de fabricar piezas, sino para el afinamiento del arrabio para obtener acero. Se utiliza como carga arrabio fundido que proviene directamente del A-H. Los hornos tienen forma de una pera, y están revestidos por material refractario de carácter ácido (Bessemer) o básico (Thomas).

Se insufla aire (u oxígeno) por de una caja de tobera situada en la parte inferior del horno, que borbotea a través del metal fundido provocando reacciones exotérmicas por la oxidación del Mn, Si, P, S y parte del C, lo cual eleva la temperatura del baño. El resultado de la reducción del C es que el arrabio se convierte en acero, por lo cual el calor generado por la oxidación de esos elementos, es necesario para mantener el metal fundido.

También se construyen convertidores eléctricos, en los cuales el oxígeno se insufla por la boca a través de una caña de grafito.