

Procesos de Fabricación

Lectura 2 Fundición

Profesor:

Ricardo Caballero, M.Sc.

✉ ricardo.caballero@utp.ac.pa



Fundición

El proceso de **fundición** consiste básicamente en:

Vaciar el metal fundido en un molde

Solidificación

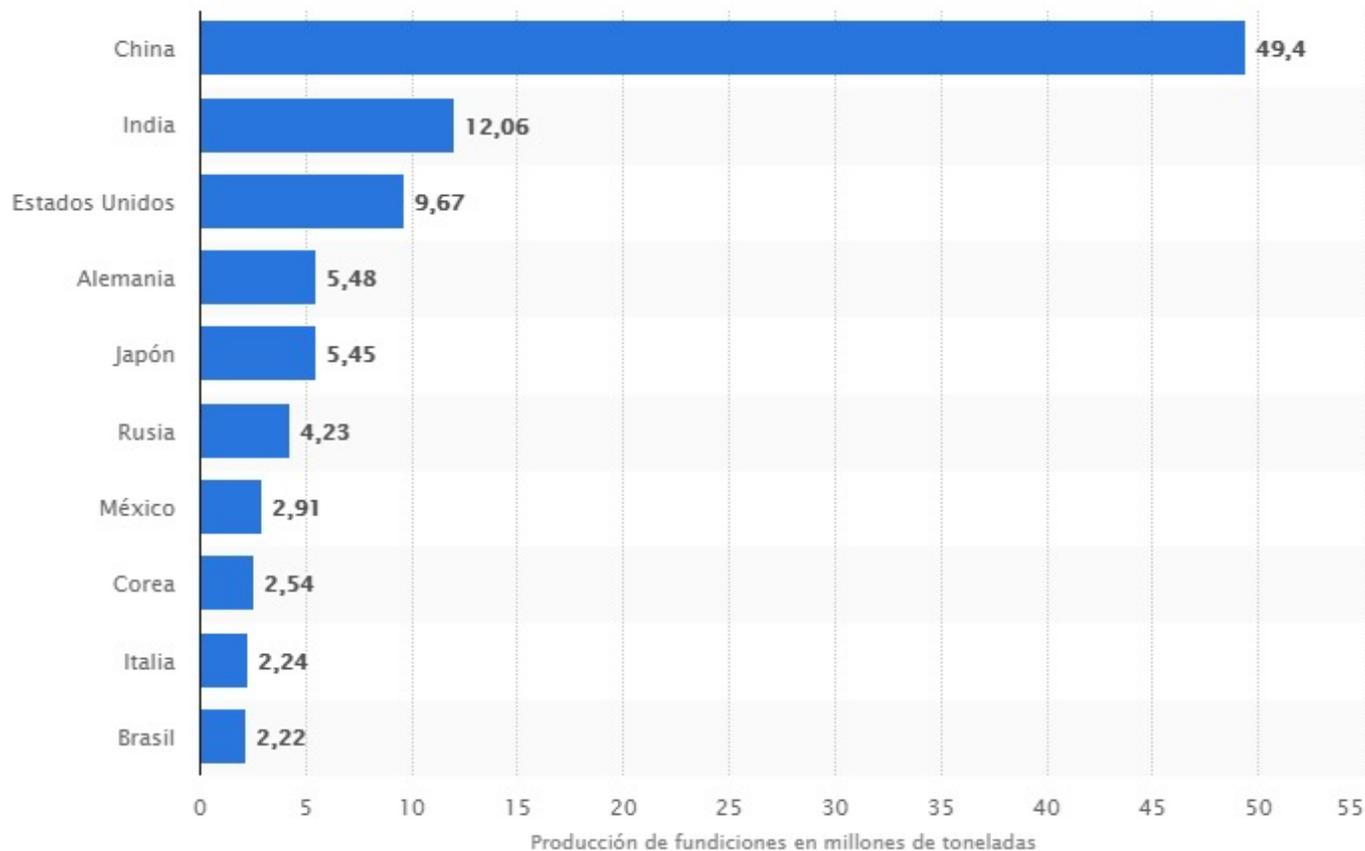
Retirar pieza del molde

Productos típicos fabricados:

- Impulsor de bomba
- Culetas
- Válvulas
- Bloques de motor
- Carcasas de bombas
- Base de máquinas herramientas
- ...



Producción mundial del sector de la fundición en 2017, por país



El mercado global se valoró en **USD 123.8 millones** en el **2018**

Se espera que se **expanda** a una **tasa** anual de **5.3%** entre los años **2019 a 2025**

El **aumento** de la **demanda** en el **sector automotriz** impulsará el **crecimiento** del **mercado de fundición**

Ventajas y desventajas

Ventajas

- Puede producir formas complejas y puede incorporar cavidades internas o secciones huecas.
- Es posible producir partes muy grandes en una sola pieza
- Puede utilizar materiales que son difíciles de procesar
- Alta utilización del material

Desventajas

- Alto número de variantes de proceso con limitaciones y potenciales específicos.
- El proceso de fundición debe seleccionarse y diseñarse según los requisitos de las piezas
- Peligros para la seguridad de los seres humanos
- Problemas ambientales

Clasificación de los procesos de fundición

Clasificación de los procesos de fundición

Fundición de molde desechable y modelo permanente

Fundición en arena

Molde en cáscara

Fundición en molde de yeso

Fundición en molde cerámico

Fundición de molde y modelo desechable

Fundición de modelo evaporable

Fundición por revestimiento

Fundición de molde permanente

Fundición de molde permanente

Fundición al vacío

Fundición hueca por escurrimiento

Fundición a presión

Fundición en dado

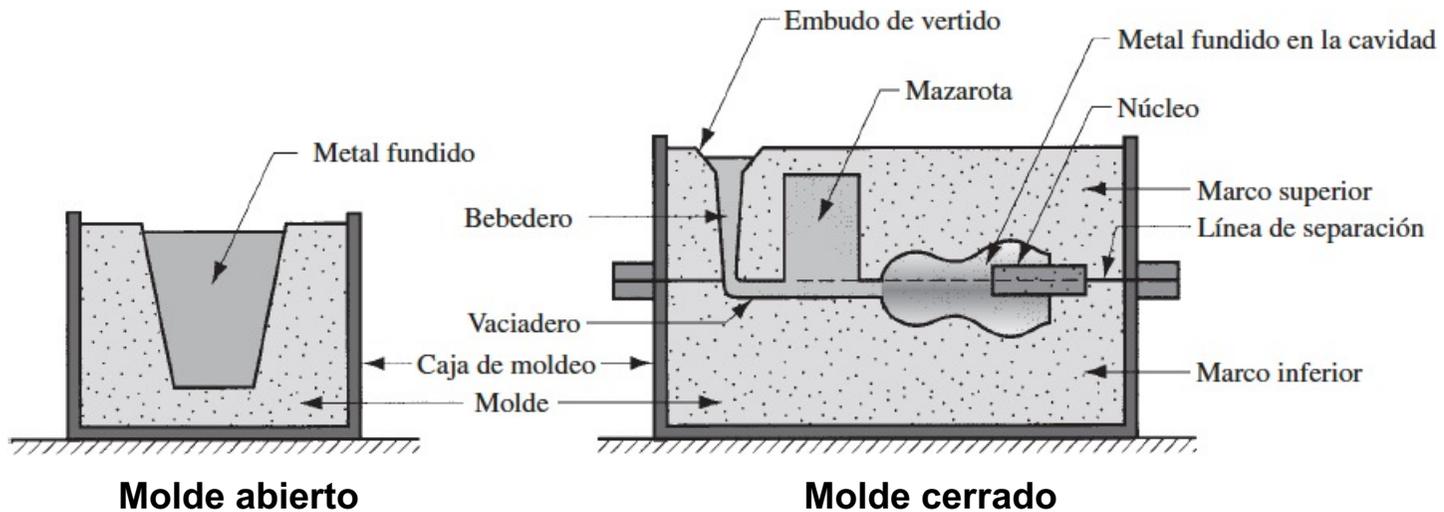
Fundición centrífuga

Fundición por dado impresor y formado de metal semisólido

Operaciones de fundición con molde compuesto

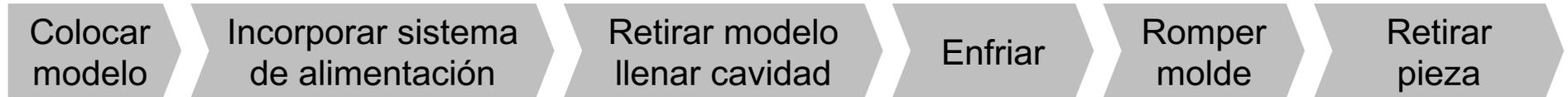
Moldes de fundición

- El **molde** contiene una cavidad cuya configuración geométrica determina la forma de la pieza fundida.
- Las especificaciones dependen del metal a utilizar en la fundición.
- Hechos de arena, yeso cerámica, metal.



Fundición en arena

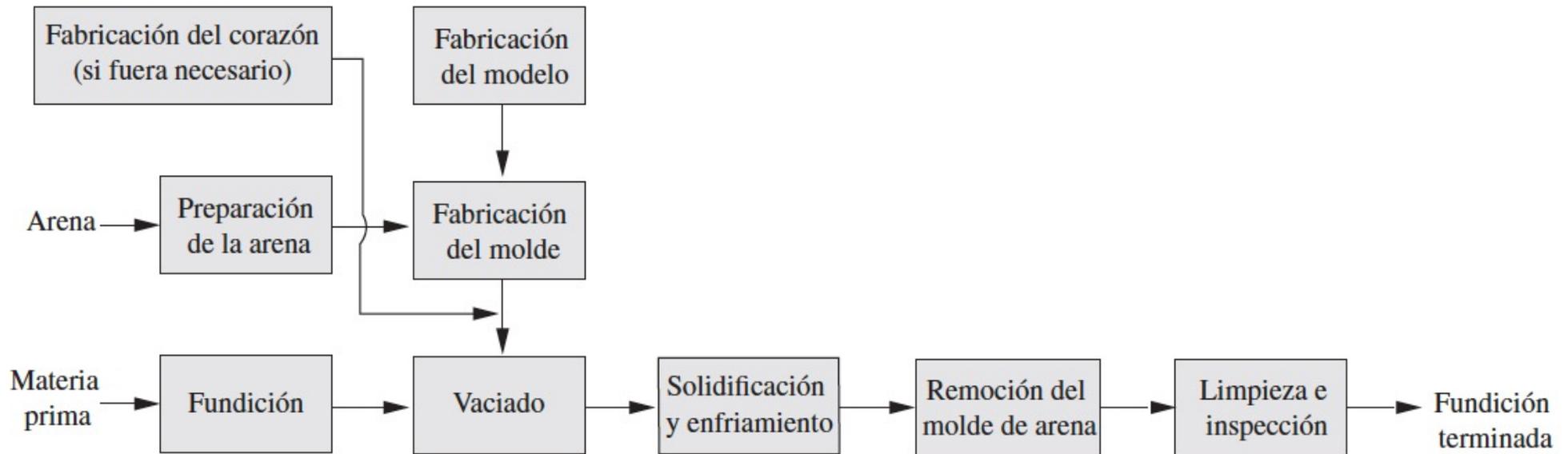
La fundición en arena consiste en:



Existen tres tipos básicos de moldes de arena:

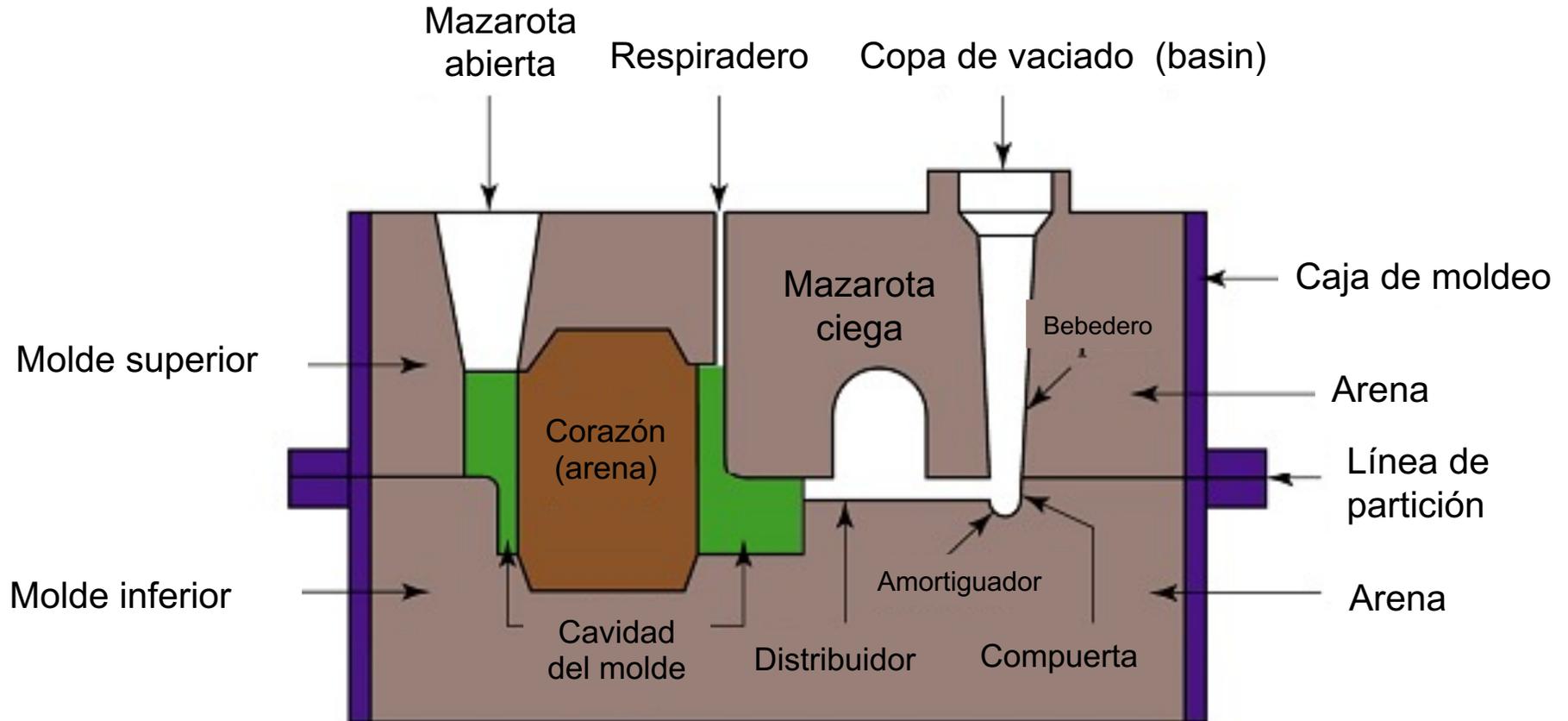
Arena verde	Caja fría	No cocido
<ul style="list-style-type: none">▪ Tipo más común▪ Mezcla de arena, arcilla y agua▪ Método más barato▪ Se puede reutilizar	<ul style="list-style-type: none">▪ Son caros▪ Moldes de mayor precisión▪ Mezcla de aglutinantes orgánicos e inorgánicos	<ul style="list-style-type: none">▪ Se mezcla una resina sintética líquida con la arena y la mezcla se endurece a temperatura

Secuencia de las etapas de la producción en la fundición con arena.

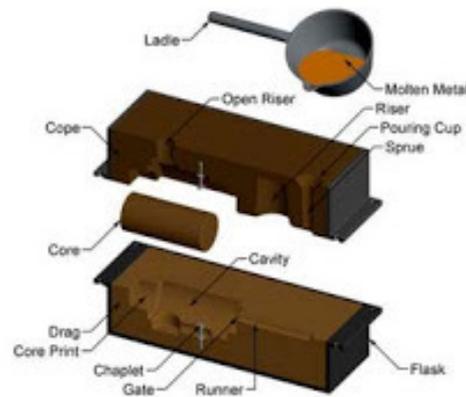
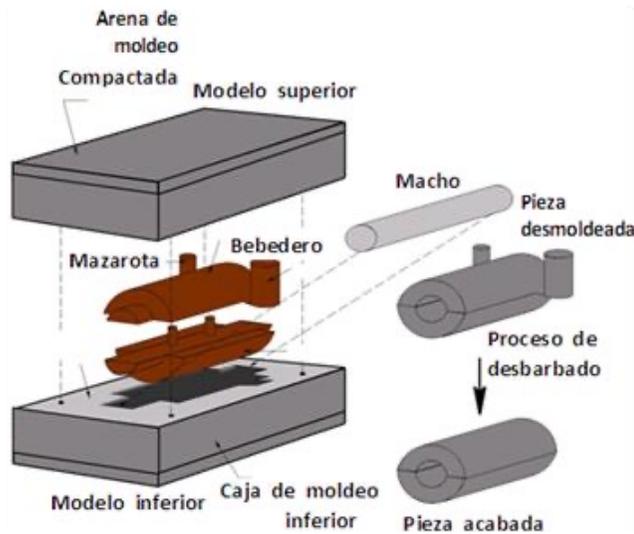


- La fundición en arena, consiste en el vaciado del metal fundido en un molde de arena, y dejar que dicho metal solidifique, para posteriormente romper el molde y retirar el producto fundido.
- La fundición debe limpiarse e inspeccionarse, y en ocasiones se requiere de un tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas.

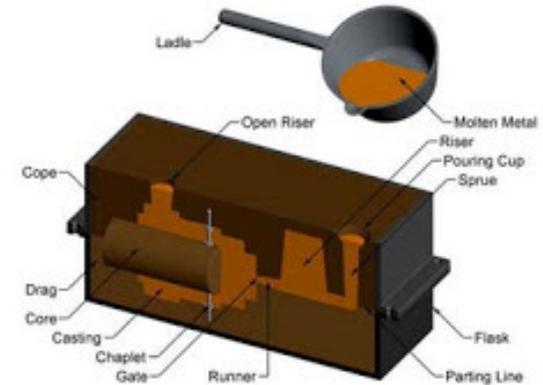
Fundición en arena: Características de los moldes de fundición



Fundición en arena: Características de los moldes de fundición



Sand Mold - Opened



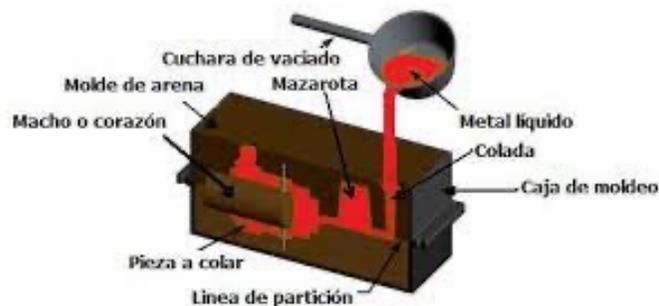
Sand Mold - Closed

Algunos videos explicativos del proceso

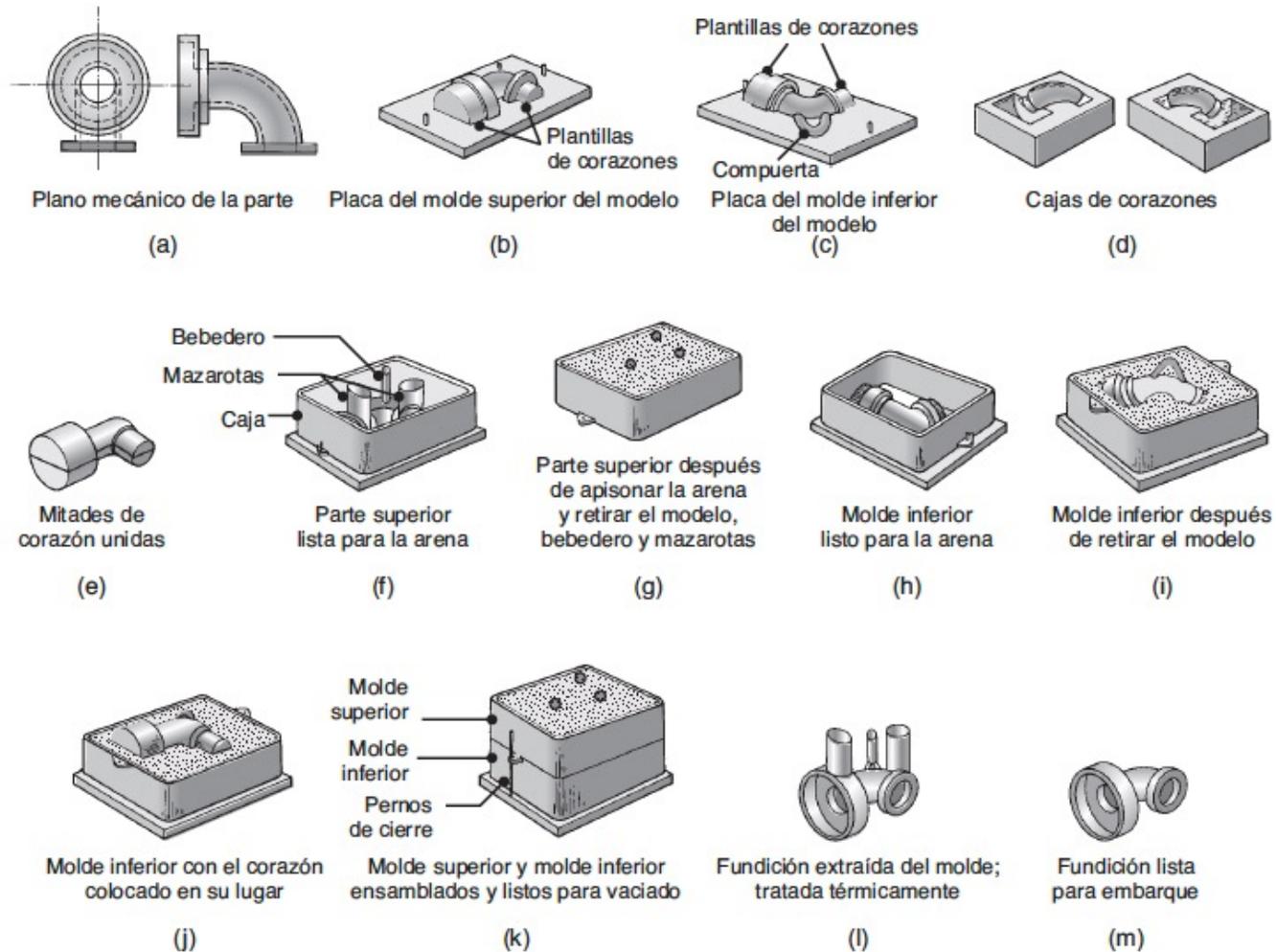
<https://www.youtube.com/watch?v=LmjAQGvSrF0>

<https://www.youtube.com/watch?v=fCyaJ8Q76U8>

<https://www.youtube.com/watch?v=EIBDp6U8bHo>



Esquema de la secuencia de operaciones para la fundición en arena

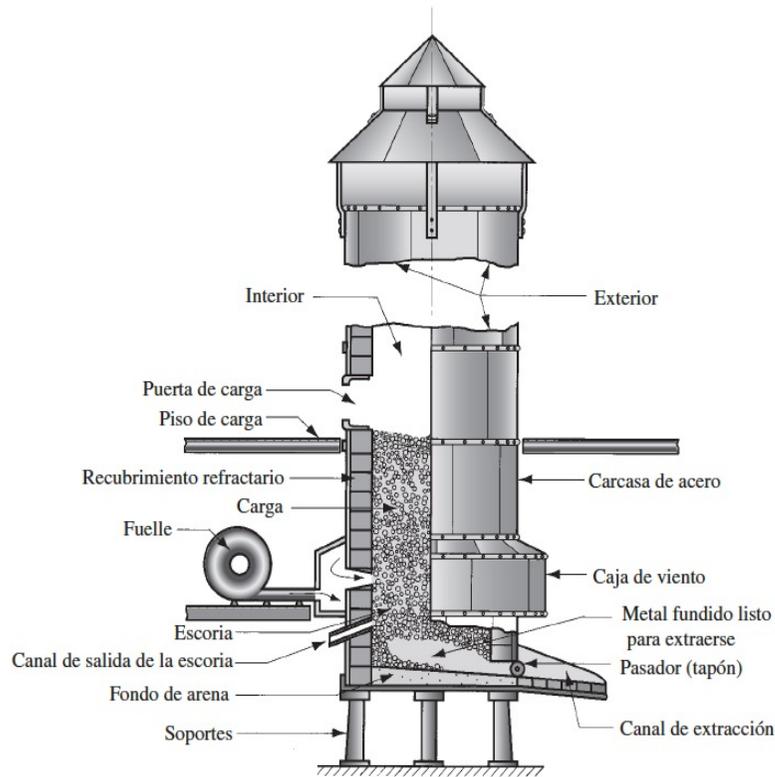


Calentamiento y vertido

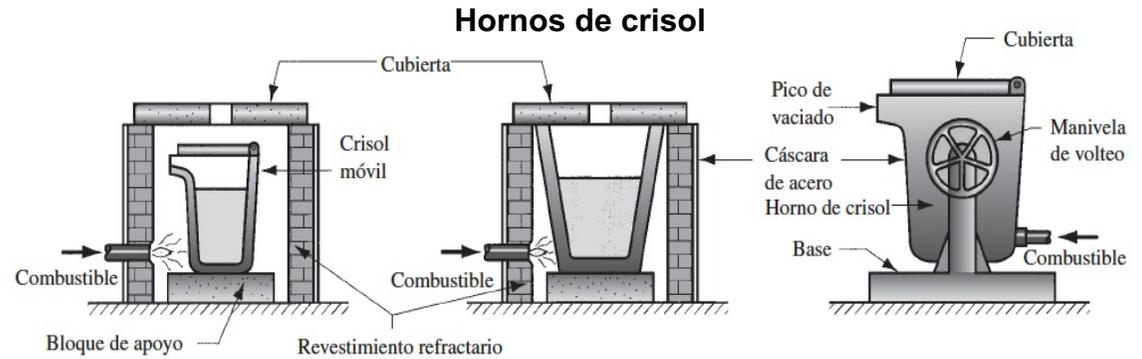
- El metal debe calentarse a una temperatura más elevada que su punto de fusión y luego verterse a la cavidad del molde para que se solidifique.
- Entre los hornos utilizados para calentar el material están:
 - Cubilotes
 - Hornos de combustión directa
 - Hornos de crisol
 - Hornos de arco eléctrico
 - Hornos de inducción



Calentamiento y vertido: Tipos de hornos



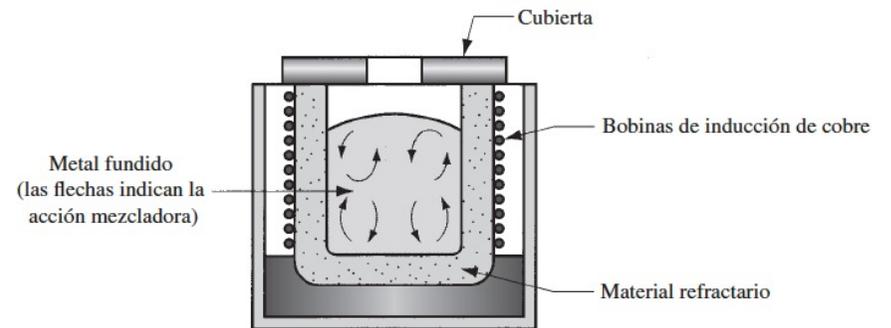
Horno de cubilote



Móvil

Estacionario

Basculante



Horno de inducción

La selección del tipo de horno depende de factores cómo: aleación por fundir, temperaturas de fusión y vaciado, requerimientos de capacidad del horno, costos y consideraciones ambientales

Calentamiento y vertido: Factores que afectan la operación

Factor

Descripción

Temperatura de vertido

Es aquella que tiene el metal derretido cuando se introduce al molde.

Velocidad de vertido

Se refiere a la tasa volumétrica a la que se vierte el metal fundido al molde.

- Tasa baja → metal se enfría y solidifica antes de llenar la cavidad.
- Tasa alta →, la turbulencia se vuelve un problema

Turbulencia

Se caracteriza por variaciones en la magnitud y dirección de la velocidad en el fluido.

Calentamiento y vertido: análisis de ingeniería del vertido

Teorema de Bernoulli: establece que la suma de las energías (piezométrica, presión, cinética y fricción) en dos puntos cualesquiera de un líquido que fluye, son iguales.

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

Para calcular la velocidad de flujo, se reduce la ecuación de Bernoulli a:

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

Ley de continuidad: establece que la tasa de flujo volumétrico permanece constante a través del líquido. El gasto volumétrico es igual a la velocidad multiplicada por el área de la sección transversal del líquido que fluye.

$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2$$

Tiempo de llenado del molde

Donde:

Q = gasto volumétrico cm^3/s

h = altura piezométrica (cm)

p = presión de líquido $\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$

ρ = densidad $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

g = gravedad $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

F = pérdida piezométrica debido a la fricción (cm)

v = velocidad de flujo cm/s

T_{MF} = tiempo de llenado del molde (s)

V = volumen de la cavidad del molde cm^3

$$T_{MF} = \frac{V}{Q}$$

Ejemplo 1: Calentamiento y vertido

El bebedero de un molde mide 20 cm de largo, y el área de la sección transversal en su base es de 2.5 cm^2 . El bebedero alimenta un vaciadero horizontal que conduce a la cavidad de un molde cuyo volumen es de $1\,560 \text{ cm}^3$.

Determine: a) la velocidad del metal derretido en la base del bebedero, b) la tasa de flujo volumétrico y c) el tiempo que toma llenar el molde.

Ejemplo 1: Calentamiento y vertido

a) La velocidad del flujo de metal en la base de la entrada está dada por:

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

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

b) El gasto volumétrico es:

$$Q = vA$$

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

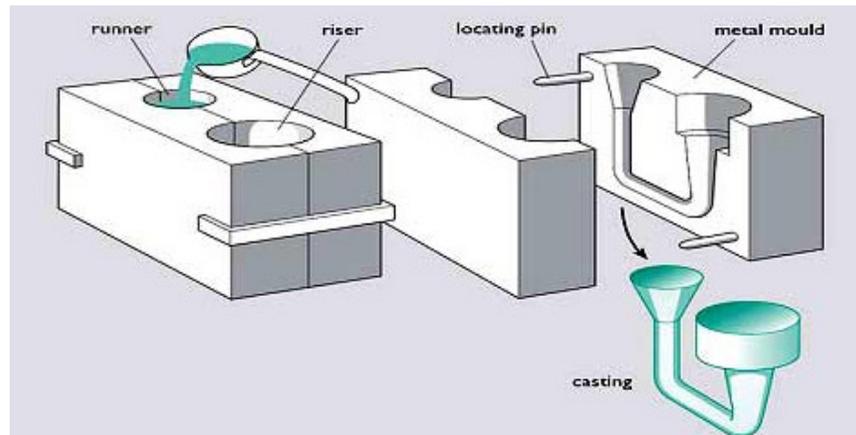
c) El tiempo que se requiere para llenar la cavidad de un molde es:

$$T_{MF} = \frac{V}{Q}$$

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

Solidificación

- Después de que el metal fundido se vierte en un molde, se da lugar a una secuencia de eventos durante la solidificación y el enfriamiento del metal a temperatura ambiente.
- Estos eventos influyen en gran medida sobre el tamaño, la forma, la uniformidad y la composición química de los granos formados en toda la pieza fundida, los cuales a su vez influyen en las propiedades generales de la fundición.
- Los factores importantes que afectan a estos eventos son el tipo de metal fundido, las propiedades térmicas del metal y del molde, la relación geométrica entre el volumen y el área superficial de la pieza fundida, además de la forma del molde.

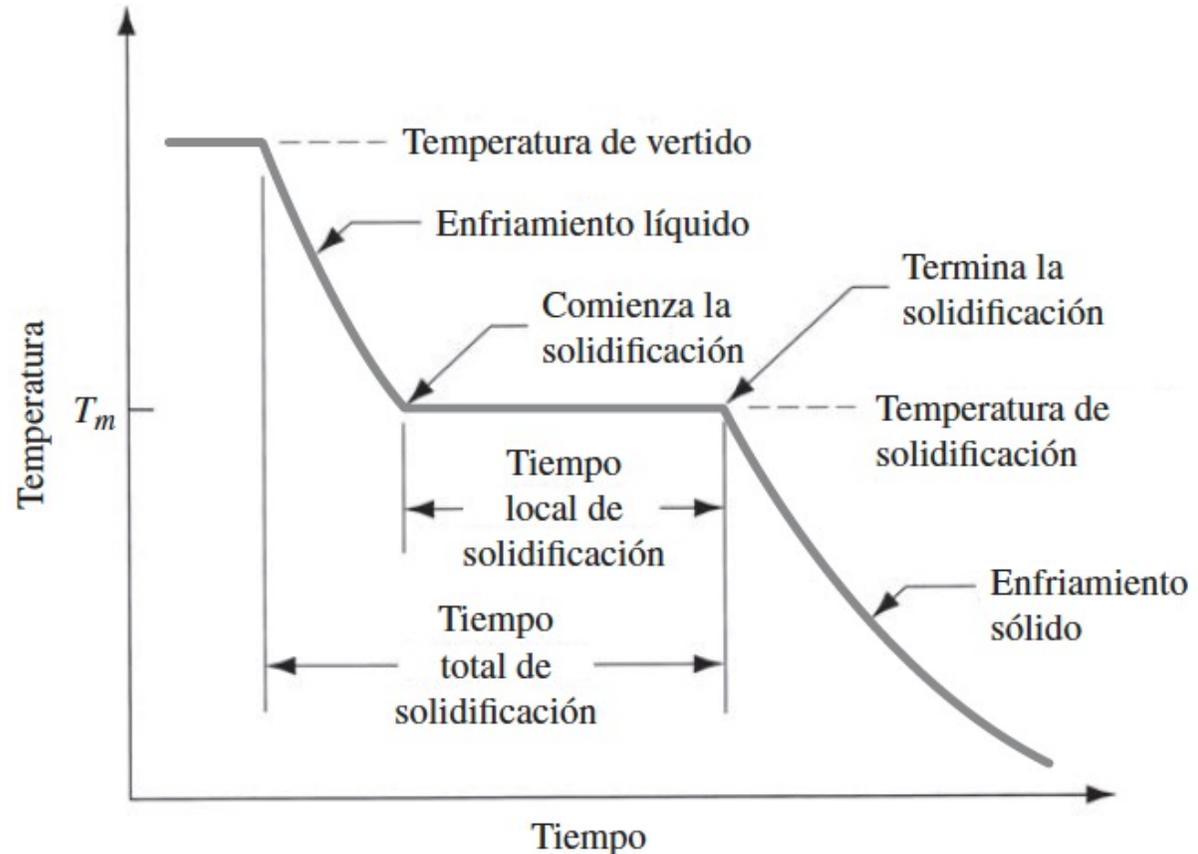


Solidificación: Curva de enfriamiento para un metal puro

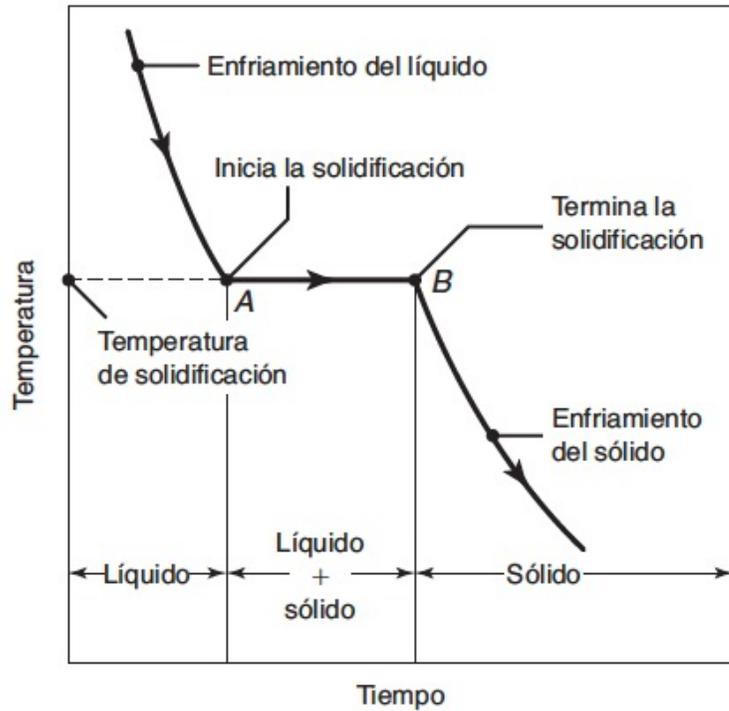
Un **metal puro** se solidifica a una temperatura constante igual a su punto de adhesión, el cual es el mismo punto de fusión.

Tiempo local de solidificación: tiempo durante el cual el calor de fusión latente del metal se libera hacia el molde que lo rodea

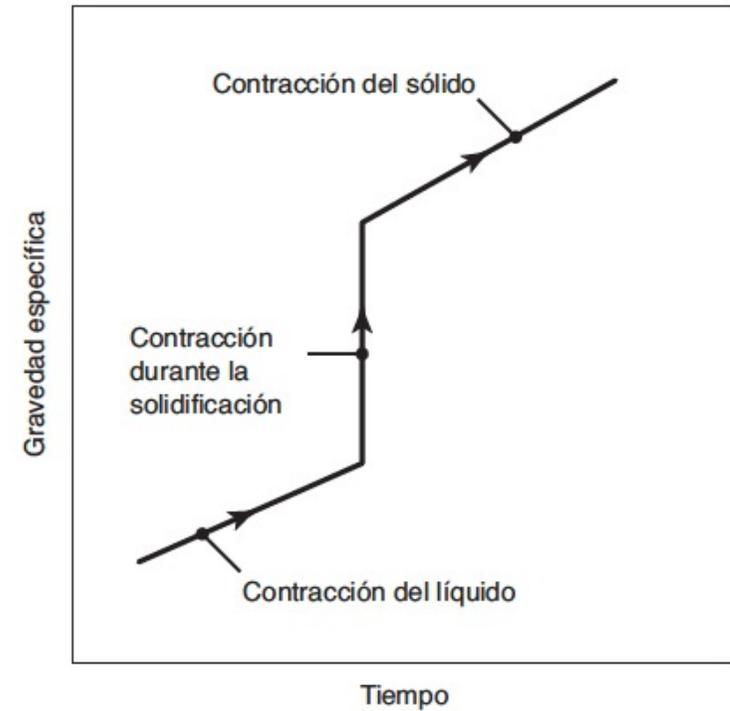
Tiempo total de solidificación: tiempo que transcurre entre el vertido y la solidificación completa



Solidificación: Relación Temperatura vs Tiempo y Densidad vs Tiempo



Temperatura como una función del tiempo para la solidificación de metales puros; la solidificación ocurre a una temperatura constante



Densidad como una función del tiempo

Solidificación: Tiempo de solidificación

El tiempo total de solidificación depende del tamaño y forma del fundido, se calcula mediante una relación empírica conocida como regla de Chvorinov:

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

Donde:

T_{TS} = tiempo total de solidificación (min)

C_m = constante del molde F = pérdida piezométrica debido a la fricción (cm)

V = volumen del fundido cm^3

A = área de la superficie del fundido cm^2

n = exponente que por lo general se acepta que tiene un valor de 2

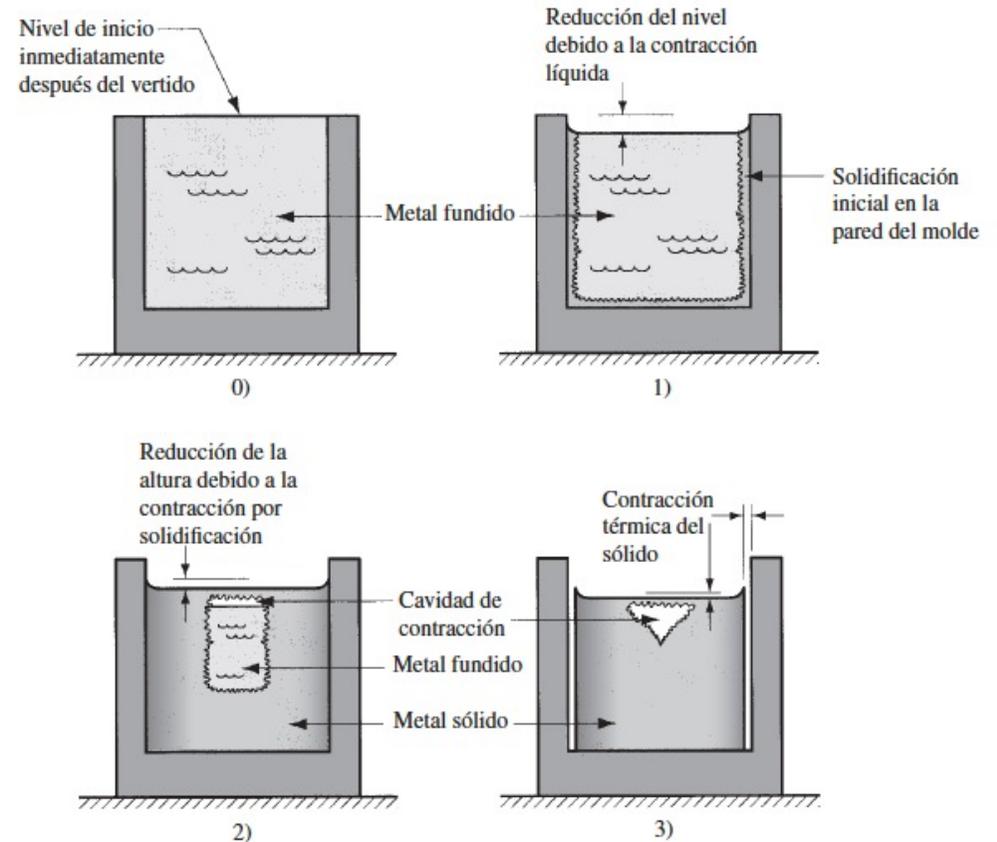
Un fundido con una razón grande de volumen a superficie se enfriará y solidificará con más lentitud que otra con una razón menor.

Solidificación: Contracción

El efecto de la contracción tiene lugar durante el enfriamiento y solidificación

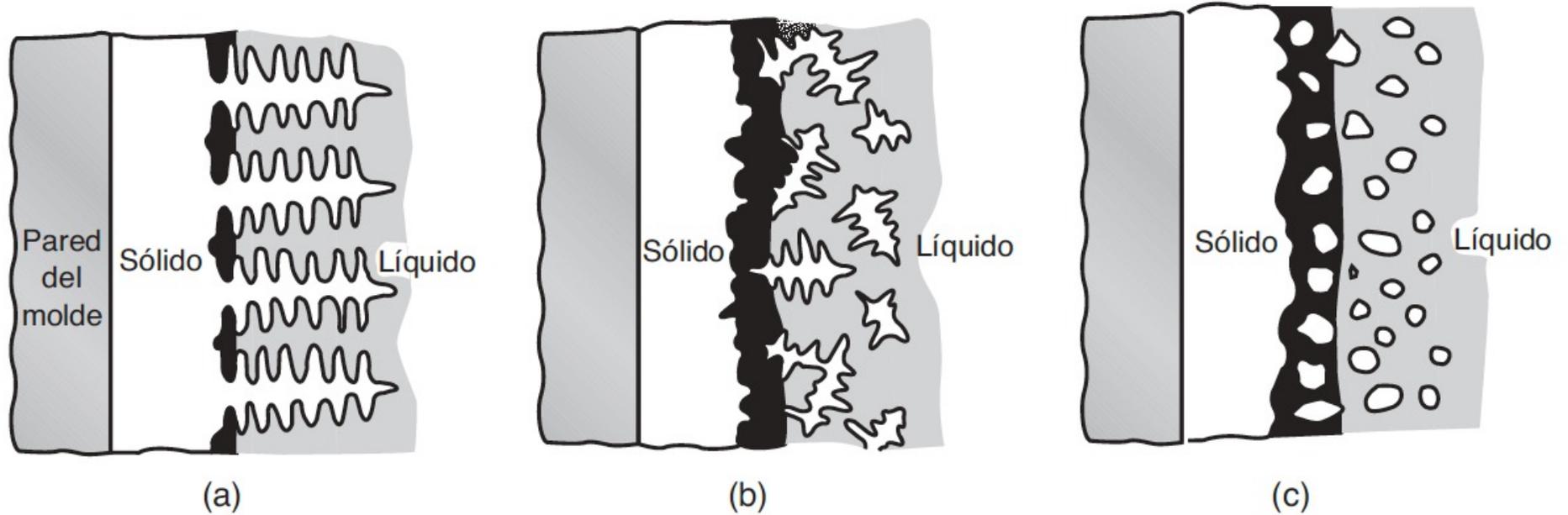
La contracción ocurre en tres etapas:

1. Contracción líquida durante el enfriamiento antes de la solidificación
2. Contracción durante el cambio de fase de líquida a sólida (contracción por solidificación)
3. Contracción térmica del fundido solidificado durante el enfriamiento a temperatura ambiente



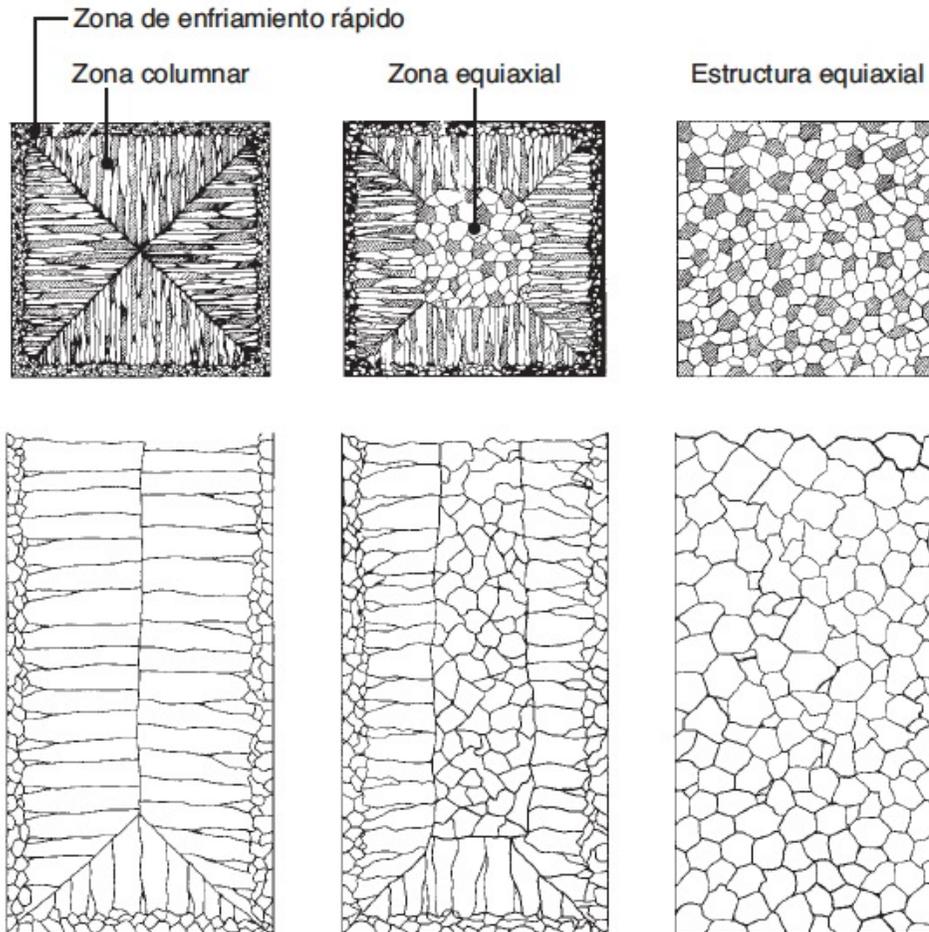
Relaciones estructura-propiedad

El cristal metálico producido por solidificación, que se caracteriza por una estructura análoga a la de un árbol con múltiples ramas, se denomina **dendritas**



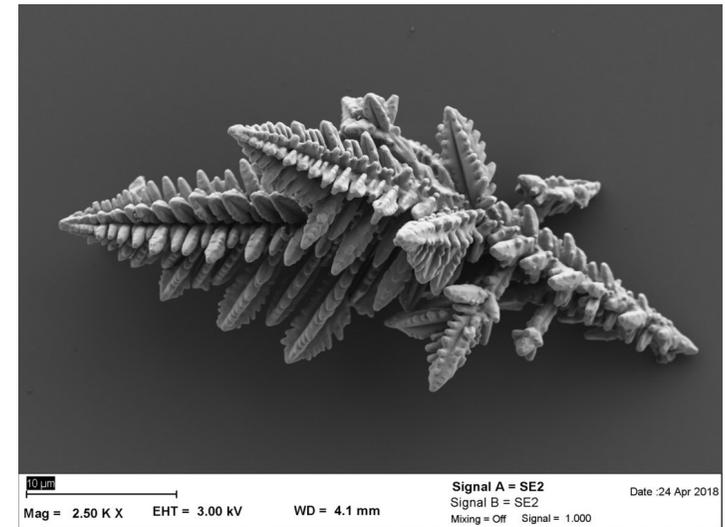
- a. Dendrítica columnares
- b. Dendríticas equiaxiales
- c. No dendríticas

Estructuras fundidas de metales solidificados en un molde cuadrado



- Metales puros
- Aleaciones con solución sólida
- Estructura obtenida usando agentes de nucleación

Dendrita: estructura con ramificaciones repetitivas



Ejemplo 2: Diseño de la mazarota

Debe diseñarse la mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. El fundido en sí es una placa rectangular de acero con dimensiones de 7.5 cm x 12.5 cm x 2 cm. Observaciones anteriores indican que el tiempo total de solidificación para este fundido es de 1.6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación diámetro a altura de 1.

Determine las dimensiones del vertedor de modo que el tiempo total de solidificación sea 2 min

Ejemplo 2: Diseño de la mazarota

Primero se determina la relación V/A para la placa

$$\frac{V}{A} = \frac{7.5 \times 12.5 \times 2}{2(7.5 \times 12.5 + 7.5 \times 2 + 12.5 \times 2)} = 0.7 \text{ cm}$$

Dado que $T_{TS} = 1.6 \text{ min}$, se determina la constante del molde C_m

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

$$C_m = \frac{T_{TS}}{\left(\frac{V}{A}\right)^n} = \frac{1.6}{(0.7)^2} = 3.26 \text{ min/cm}^2$$

La mazarota debe diseñarse de modo que su tiempo total de solidificación sea 2 min. El volumen y el área de la mazarota está dado por

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

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

Ejemplo 2: Diseño de la mazarota

Tomando en cuenta la razón $D/H = 1$, entonces $D = H$

$$V = \frac{\pi D^3}{4}$$

$$A = \pi D^2 + \frac{2\pi D^2}{4} = 1.5\pi D^2$$

La razón $V/A = D/6$, entonces reemplazando en la ecuación Chvorinov:

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

$$2 = 3.26 \left(\frac{D}{6}\right)^2$$

$$T_{TS} = 2 \text{ min}$$

$$D^2 = \frac{2}{0.09056}$$

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

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

- Es deseable que el volumen de metal en la mazarota sea mínimo
- La forma de la mazarota normalmente se selecciona para maximizar la razón V/A , y tiende a reducir el volumen de aquél tanto como sea posible.

Fundición en arena: Modelos

- Se utilizan para moldear la mezcla de arena con la forma de la pieza fundida.
- Pueden estar hechos de madera, plástico o metal.
- La selección de un material para el modelo depende del tamaño y la forma de la pieza fundida, de la precisión dimensional y de la cantidad de piezas de fundición requeridas, así como del proceso de moldeo.

Modelos de una pieza

- Bajo costo
- Para formas simples y baja cantidad de producción
- Hechos de madera

Modelos divididos

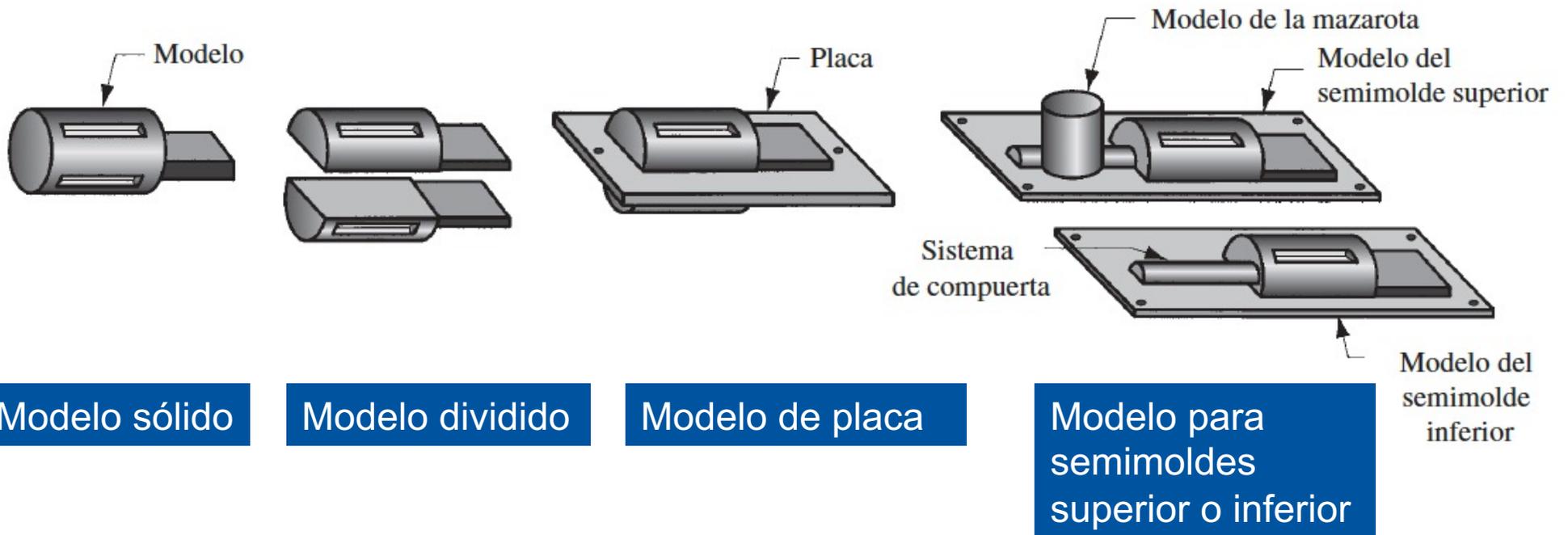
- Dos piezas
- Para formas complicadas

Modelos de placa bipartida

- Tipo común de modelo montado en el que se construyen modelos de dos piezas asegurando cada mitad de uno o más modelos divididos a los lados opuestos de una sola placa.

Fundición en arena: Modelos

Los modelos definen la forma externa de la pieza por fundir:



Modelo sólido

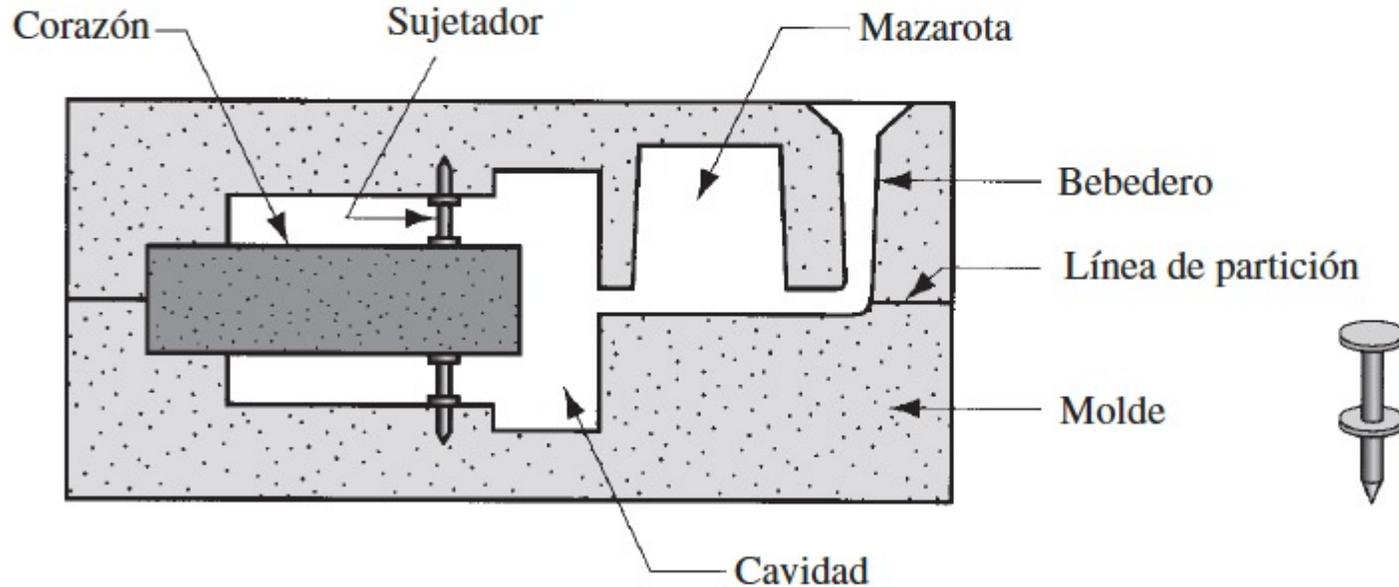
Modelo dividido

Modelo de placa

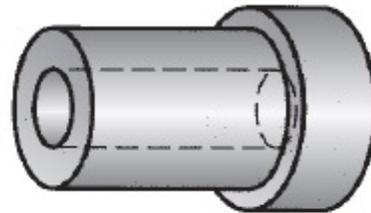
Modelo para semimoldes superior o inferior

Fundición en arena: Modelos

Corazón dentro de la cavidad del molde



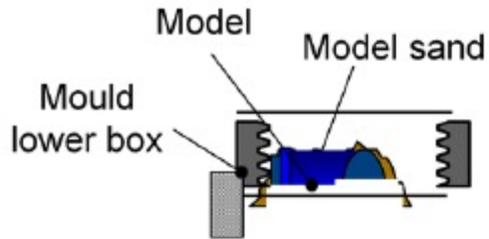
Sujetador



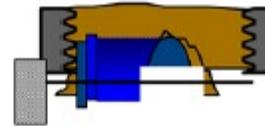
Fundición con cavidad interna

Fundición en arena: Proceso de moldeo

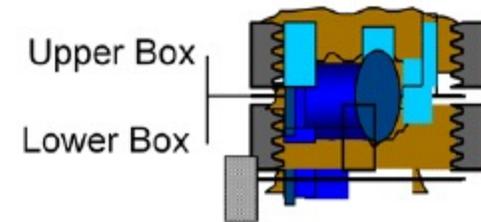
1. Moulding lower-part model



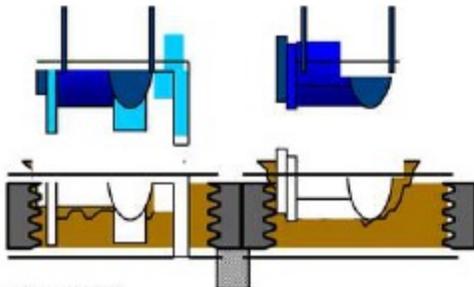
2. Back-filling and densification



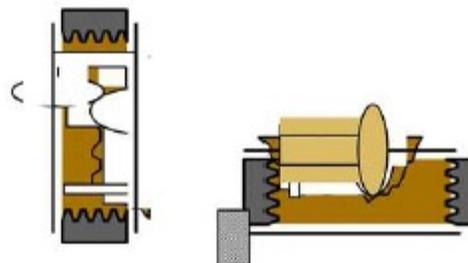
3. Turning of the box and moulding upper-part



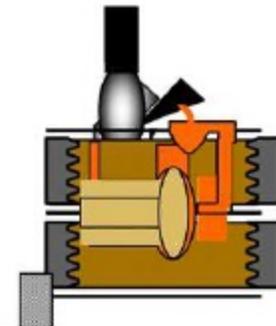
4. Opening of boxes and model removal



5. Assemble cores and close boxes

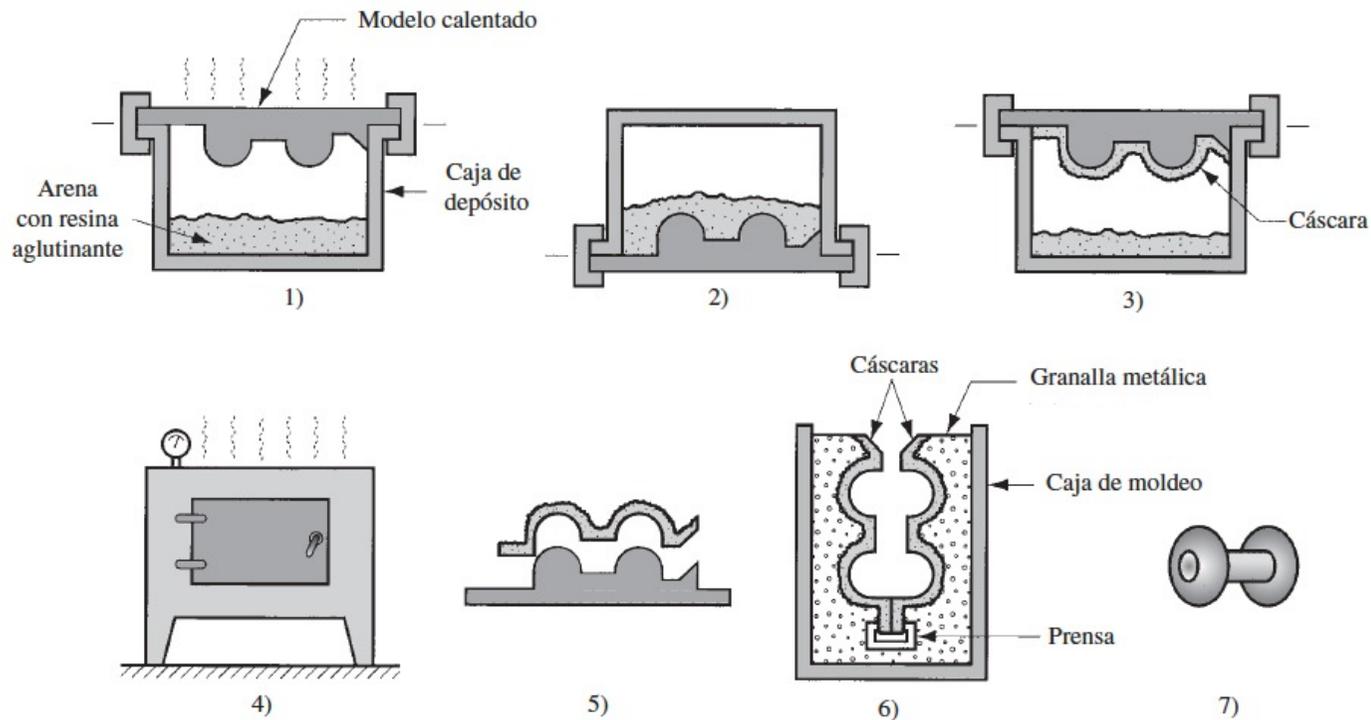


Casting



Moldeo en cáscara

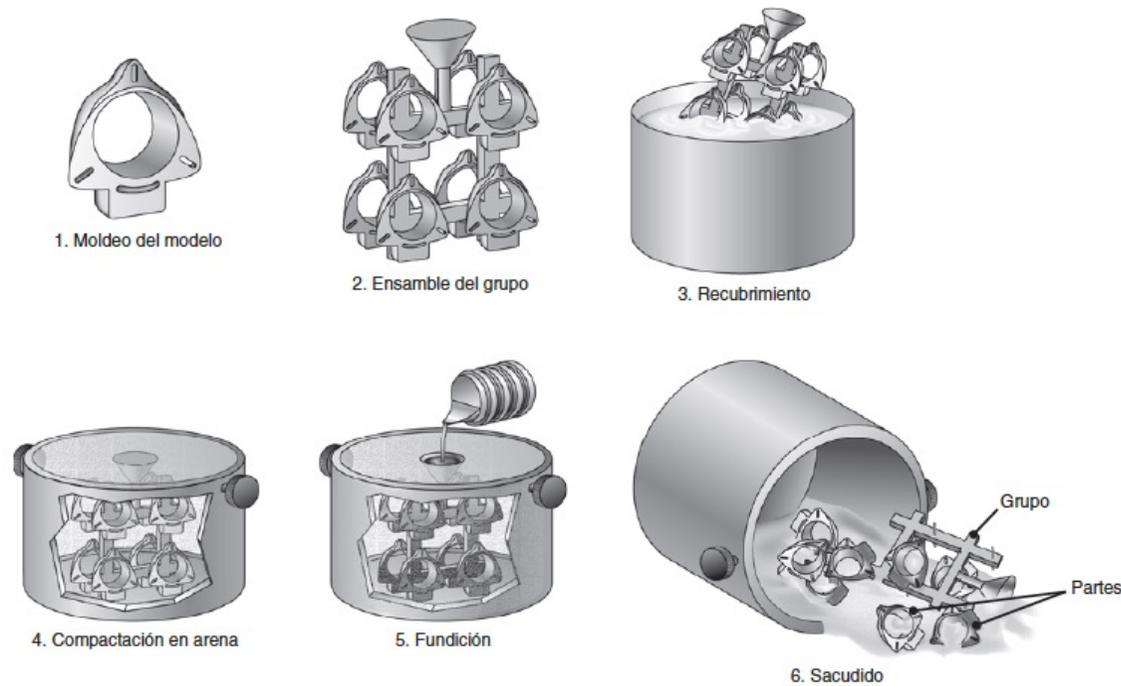
El moldeo en cáscara o concha es un proceso de fundición en el que el molde es una cascara delgada hecha de arena y que se mantiene en cohesión por medio de un aglutinante de resina termofija



Procesos de fundición con moldes desechables:

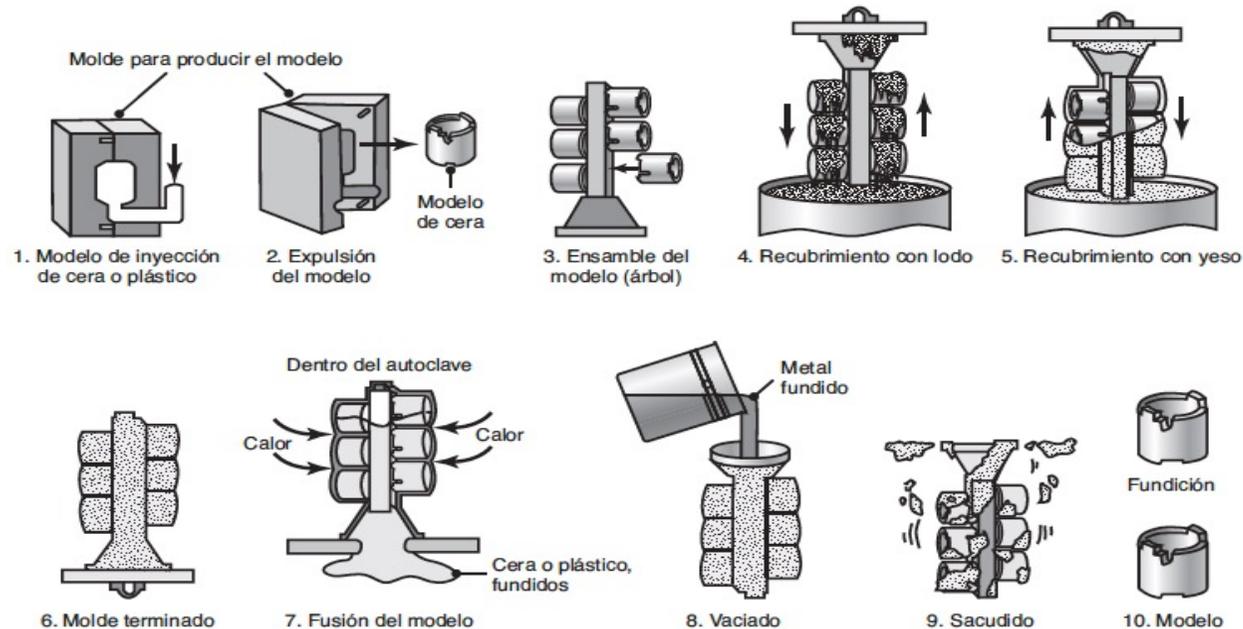
Modelo evaporable - Proceso de espuma perdida o poliestireno expandido

El proceso de fundición de modelo evaporable utiliza un modelo de poliestireno que se evapora al contacto con el metal fundido para formar una cavidad para la fundición; este proceso también se conoce como proceso de espuma perdida o fundición de molde lleno. Este proceso de fundición se ha convertido en uno de los más importantes para metales ferrosos y no ferrosos, sobre todo en la industria automotriz



Fundición por revestimiento

- Se elabora un modelo de cera y se recubre con un material refractario* para formar el molde, después de lo cual se derrite la cera antes de vaciar el metal fundido.
- El término revestimiento se refiere a “cubrir por completo”, el material alrededor del modelo de cera.
- Es un proceso de fundición de precisión → genera fundiciones de gran precisión

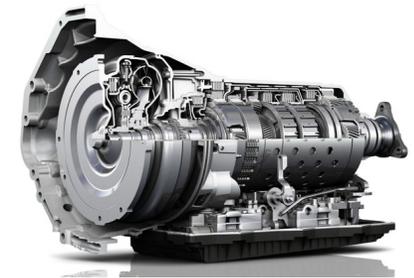
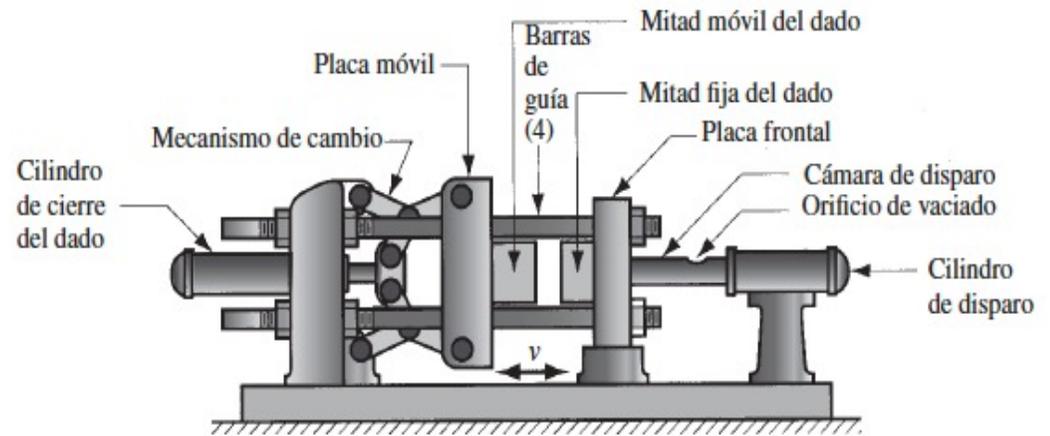


*Que resiste la acción del fuego sin cambiar de estado ni destruirse.

Fundición de molde permanente: Fundición en dado

Conocido también como inyección de metales. Proceso de fundición de metales que se caracteriza por forzar el metal fundido a alta presión dentro de una cavidad de molde.

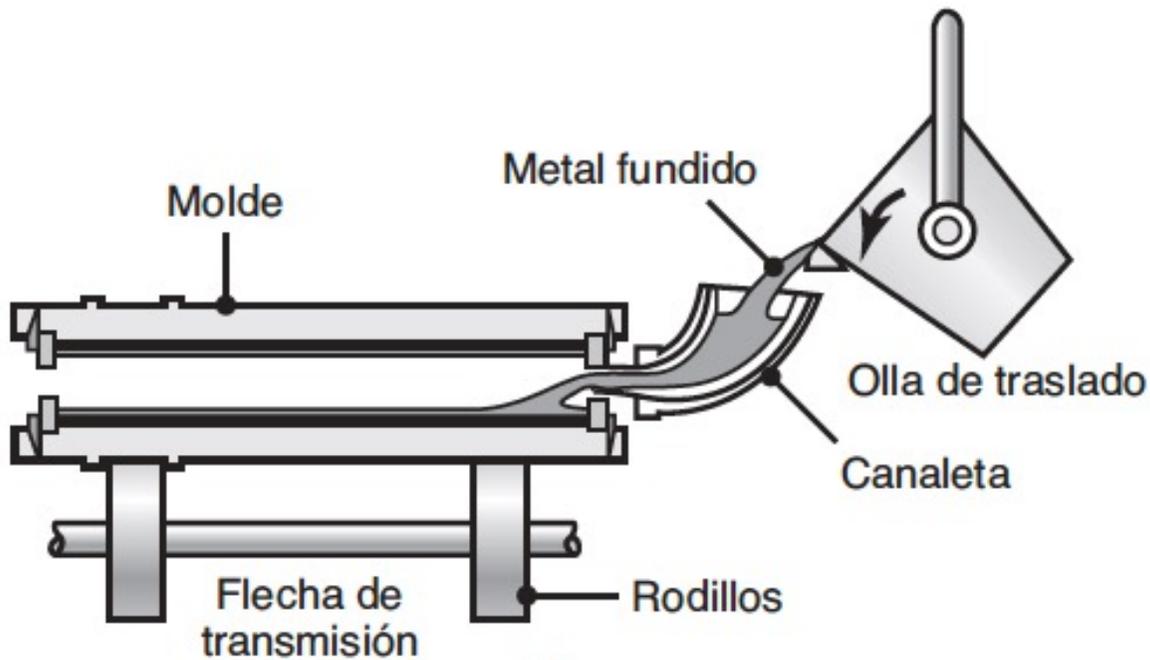
- Piezas fabricadas: carcasas para componentes de transmisión, máquinas y aparatos para oficina, componentes de herramientas manuales.
- Peso de las piezas: desde menos de 90 g hasta alrededor de 25 kg
- Costo de los equipos es alto
- Costo bajo de mano de obra
- Tipos: cámara caliente y cámara fría



https://www.youtube.com/watch?v=1543l_5XMJo

Fundición centrífuga

- Se utiliza para producir componentes con un eje de rotación como tubos, casquillos o anillos.



La orientación del eje de rotación del molde es horizontal o vertical y el más común es el horizontal

Metales para fundición

Aleaciones ferrosas de fundición

Hierro fundido

Acero

Aleaciones no ferrosas de fundición

Aleaciones de aluminio

Propiedades: bajo peso, amplia resistencia, facilidad de maquinado.

Aleaciones de magnesio

Más ligeras de todos los metales para fundición.
Resistencia a la corrosión, al peso y rigidez a peso

Aleaciones de cobre

Resistentes a la corrosión, apariencia atractiva
Costo elevado

Aleaciones de estaño

Fáciles de fundir
Buena resistencia a la corrosión, mala resistencia mecánica

Aleaciones de zinc

Se emplean en la fundición en dado.
Punto de fusión bajo y buena fluidez, baja resistencia a la termofluencia

Aleaciones de níquel

Buena resistencia al calor y a la corrosión
Buenas para aplicaciones de temperaturas altas. No son fáciles de fundir

Consideraciones sobre el diseño del producto

Simplicidad geométrica

Evitar complejidades innecesarias simplifica la fabricación del molde, reduce la necesidad de corazones y mejora la resistencia de la fundición

Esquinas

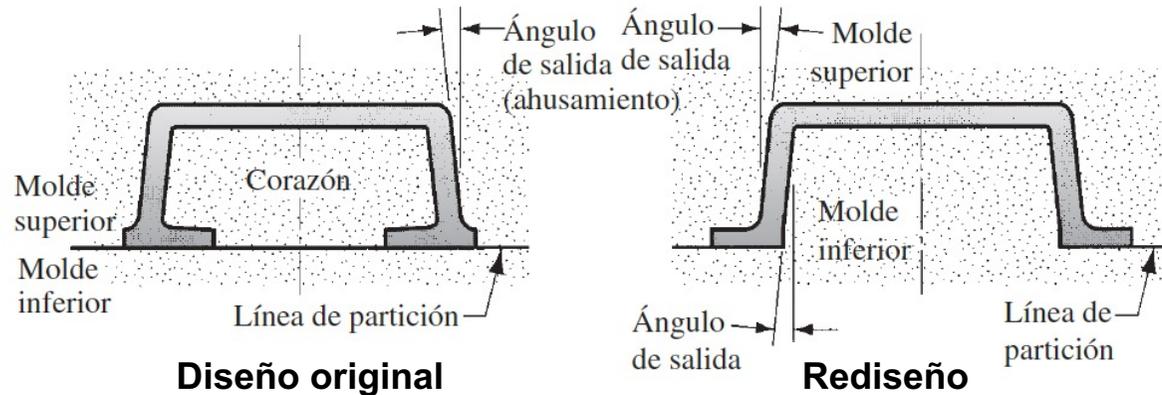
Evitar esquinas y ángulos agudos. Deben diseñarse biseles o el aumento de radios de curvatura en esquinas internas. Suavizar bordes agudos.

Espesores de sección

Deben ser uniformes para evitar cavidades. Las secciones gruesas crean puntos calientes en la fundición. Éstas son ubicaciones probables de las cavidades.

Ángulos de salida (ahusamiento)

Las secciones de la pieza que se proyectan al interior del molde deben tener un ángulo de salida. El propósito es ayudar a extraer el modelo del molde.



Consideraciones sobre el diseño del producto

Uso de corazones

Cambios pequeños en el diseño de la pieza reducen la necesidad de utilizar corazones

Tolerancias dimensionales

Hay diferencias significativas en la precisión dimensional que puede alcanzarse en las fundiciones dependiendo del proceso utilizado. Para ello se deben tomar en cuenta tolerancias comunes para piezas para diferentes procesos y metales

Acabado superficial

La rugosidad que se logre en la fundición depende del proceso aplicado. En procesos de moldeo en cáscara se obtiene malos acabados mientras que con moldes de yeso, fundición por revestimiento y molde permanente se obtienen mejores acabados.

Tolerancias de maquinado

Cuando no se alcanzan las tolerancias con el proceso de fundición, deben maquinarse las piezas del material fundido para darles las dimensiones requeridas.

Resumen de los procesos de fundición

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

Libros de referencia

- Kalpakjian, S. & Schmid, S. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson
- Groover, M. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. McGraw-Hill.
- Black, B. (2015) *Workshop Processes, Practices and Materials*. Taylor & Francis Group
- Youssef, H. & El-Hoy, H. (2008). *Machining Technology – Machine Tools and Operations*. Taylor and Francis Group
- Noriega, S. et al. (2017). *Ingeniería de Manufactura en el Siglo XXI*. Academia de Ingeniería de México



Ricardo Caballero, M.Sc.

Docente Tiempo Completo
Facultad de Ingeniería Industrial
Centro Regional de Chiriquí
Universidad Tecnológica de Panamá

E-mail: ricardo.caballero@utp.ac.pa

<https://www.academia.utp.ac.pa/ricardo-caballero>