

PROCESOS DE FABRICACION DE METALES FERROSOS

GUIA DE ESTUDIO DE LA UNIDAD V

COLADA DEL ACERO

5.1. Colada continua.

La colada continua se trata de un proceso metalúrgico que permite el control continuo de la transformación del metal líquido a alta temperatura a sólido para la obtención de productos semi-terminados como: hilos, cilindros, tubos, perfiles rectangulares y/o secciones especiales. Es un proceso de solidificación en el que el acero líquido se vierte directamente en un molde sin fondo con la forma de la sección transversal del semiproducto que se desea fabricar.

Se llama continua porque el acero líquido llega sin interrupción al molde, obteniéndose un desbaste tras otro sin detenerse la línea. A diferencia de la colada convencional, de este procedimiento se obtienen directamente los desbastes, sin necesidad de pasar de nuevo por un horno de fosa y un tren desbastador. El rendimiento de los procesos de colada continua está en torno al 95%, mucho mayor que el de la colada convencional o en lingotera, ya que en este caso no hay mazarotas que se deben cortar.



El proceso de colada continua del acero, tecnología empleada en la industria siderúrgica, ha sido uno de los mayores avances en la producción del mismo durante el último siglo. Su aplicación comienza a extenderse en los años 60, pero es a partir de la década del 70 cuando su expansión es más considerable, remplazando paulatinamente al método convencional de colada de lingotes.

La colada continua presenta ventajas si se compara con los métodos convencionales, pudiéndose destacar un mayor rendimiento, trabajo en secuencia, mejor calidad del producto colado, y ahorro de energía, supresión del rehecho que solamente se producirá en el extremo final de la barra. Esto ha originado que actualmente el 90 % de la producción mundial de acero sea realizada utilizando el proceso de colada continua, mientras que en la década 70 solo el 15 % correspondía a este proceso (figura 1). En este proceso, la transferencia de calor en el molde tiene una profunda influencia sobre la operación de la máquina y la calidad del producto final. Los problemas de calidad del producto, breakouts y de deformación del molde detectados, mantienen una estrecha relación con el uso correcto de la tecnología de vaciado continuo para cada marca de acero.

- **Ciclo de Trabajo**

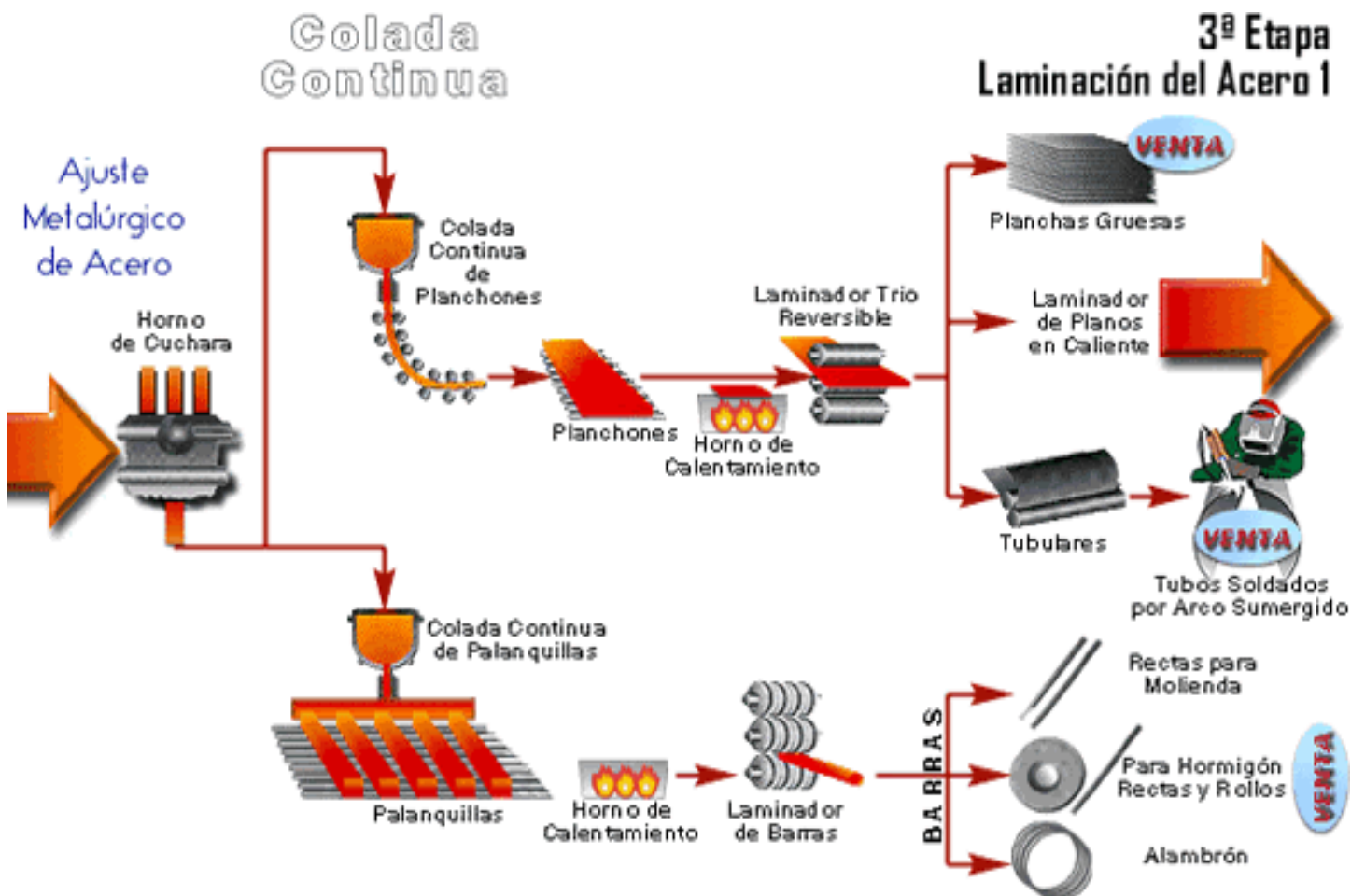
El acero líquido es suministrado a la máquina de colada continua desde la acería secundaria. La cuchara es entregada mediante una grúa y posicionada en una torreta de cuchara, la que posteriormente gira la cuchara hacia la posición de la colada. Se abre una válvula deslizante en el fondo de la cuchara para permitir que el acero líquido fluya a través de una camisa protectora hacia el distribuidor.

A medida que se llena la artesa, las barras tapón se levantan para permitir la colada de acero hacia el cristalizador. La solidificación comienza sobre las paredes del molde y el acero es extraído del molde mediante una barra falsa. Cuando deja el molde, la barra del acero requiere una cáscara sólida suficientemente gruesa para soportar el peso del acero líquido que contiene, es decir, la presión ferrostática.

Durante todo el proceso de colada, el molde oscila verticalmente a fin de separar el acero solidificado del molde de cobre. Esta separación incrementa aún más al introducir un polvo colador en el molde. La barra es extraída del molde mediante un conjunto de rodillos que guían al acero a lo largo de un arco hasta que la barra se ubique en posición horizontal.

Los rodillos deben ser posicionados a poca distancia entre sí para evitar el abarrilamiento o rotura de la cáscara fina. Cuando el acero deja el molde, solo tiene una capa solidificada fina que necesita un mayor enfriamiento para completar el proceso de solidificación.

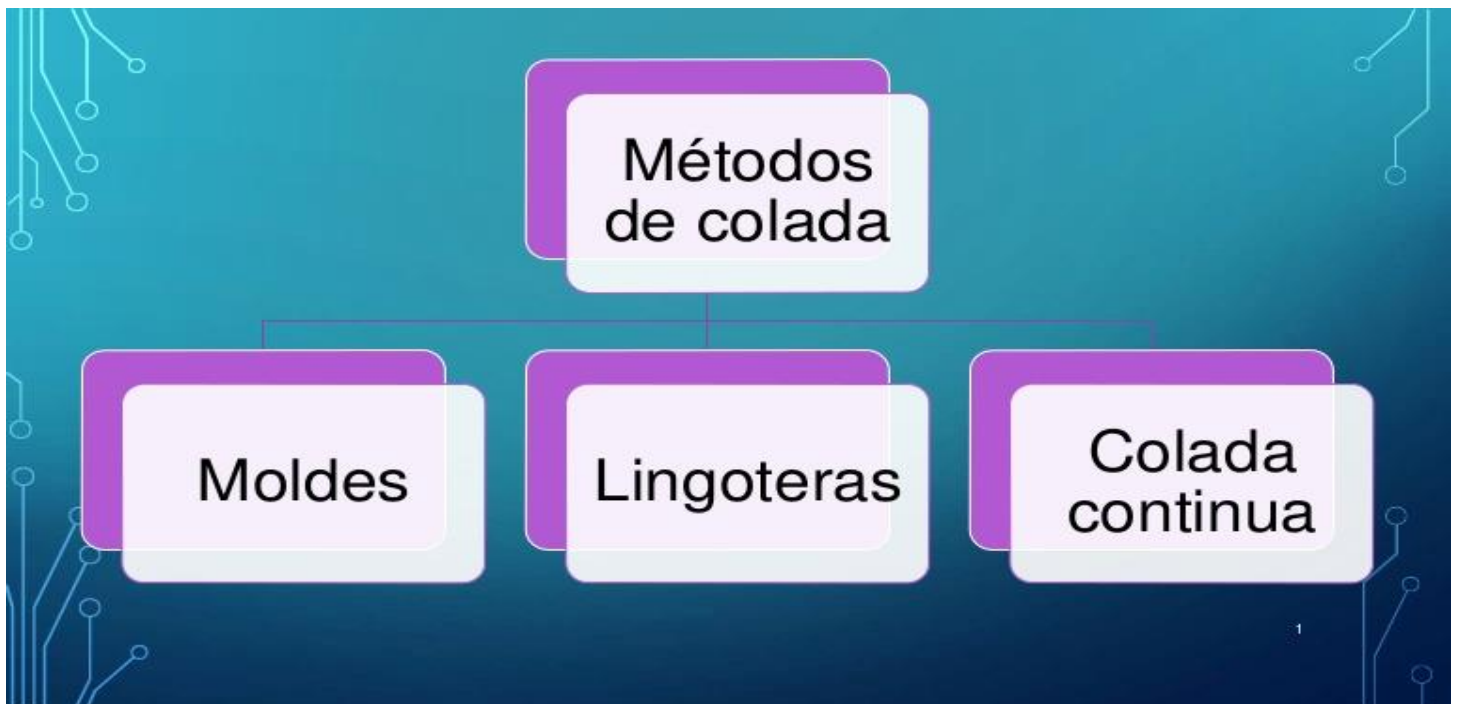
Esto se logra en la zona de enfriamiento secundario, donde un sistema de pulverizadores de agua ubicados entre los rodillos es utilizado para rociar una fina niebla de agua sobre el acero. Luego que la barra es enderezada y solidificada por completo, se corta con el soplete en longitudes de producto predeterminadas. Estas pueden ser enviadas a un área de almacenamiento o a un laminador en caliente.



Entre las principales ventajas del empleo de este proceso con respecto a su predecesor (fundición de terrones aglomerados finos o lingotes de acero) destacan la mayor productividad y los menores costos, ya que se evita la laminación de los lingotes en planchones o tochos. Además el proceso permite una mayor reducción de los costos mediante la colada de las secciones transversales más cerca del producto acabado (típicamente tochos perfilados para vigas o planchones finos, e incluso bandas de laminación para productos planos).

El acero fundido puede seguir dos caminos: la colada continua o la colada clásica. En la colada continua el acero fundido es colado en grandes bloques de acero conocidos como tochos. Durante el proceso de colada continua puede mejorarse la calidad del acero mediante adiciones como, por ejemplo, aluminio, para que las impurezas “floten” y salgan al final de la colada pudiéndose cortar el final del último lingote que contiene las impurezas.

La colada clásica pasa por una fase intermedia que vierte el acero líquido en lingoteras cuadradas o rectangulares (petacas) según sea el acero se destine a producir perfiles o chapas. Estos lingotes deben ser recalentados en hornos antes de ser laminados en trenes desbastadores para obtener bloques cuadrados (bloms) para laminar perfiles o planos rectangulares (slabs) para laminar chapas planas o en bobinas pesadas.

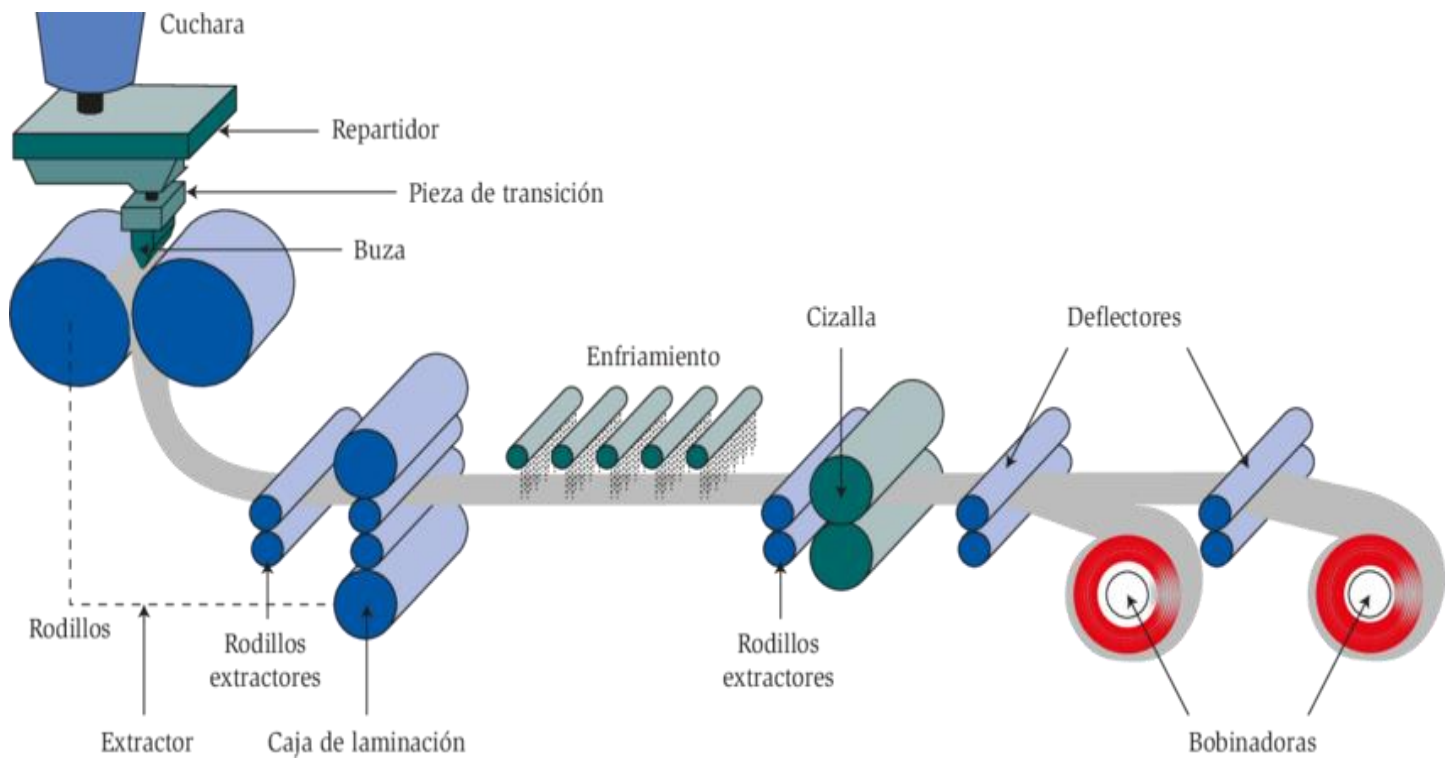


Debido al coste de la energía y a los esfuerzos estructurales asociados con el calentamiento y coladas de un alto horno, estas instalaciones primarias deben operar en campañas de producción continua de varios años de duración. Incluso durante periodos de caída de la demanda de acero no es posible dejar que un alto horno se enfríe, aun cuando son posibles ciertos ajustes de la producción.

Las plantas siderúrgicas integrales son rentables con una capacidad de producción superior a los 2.000.000 de toneladas anuales y sus productos finales son, generalmente, grandes secciones estructurales, chapa pesada, redondos pesados, rieles de ferrocarril y, en algunos casos, palanquillas y tubería pesada.

Un grave inconveniente ambiental asociado a las plantas siderúrgicas integrales es la contaminación producida por sus hornos de coque, producto esencial para la reducción del mineral de hierro en el alto horno. Por otra parte, con el fin de reducir costes de producción las plantas integrales pueden tener instalaciones complementarias características de las acerías especializadas: hornos eléctricos, coladas continuas, trenes de laminación comerciales o laminación en frío.

La capacidad mundial de producción de acero en plantas integrales está cerca de la demanda global, así la competencia entre productores hace que sólo sean viables los más eficaces. Sin embargo, debido al alto nivel de empleo de estas instalaciones, los gobiernos a menudo las ayudan económicamente antes de correr el riesgo de enfrentarse a una situación de desempleo masivo. Estas medidas llevan, a escala internacional, a acusaciones de prácticas comerciales incorrectas (dumping) y a conflictos entre países.



- La colada continua presenta **ventajas** si se compara con los métodos convencionales, pudiéndose destacar:
 - Mayor rendimiento.
 - Trabajo en secuencia.
 - Mejor calidad del producto colado.
 - Ahorro de energía.
 - Supresión del rechupe que solamente se producirá en el extremo final de la barra.
- Esto ha originado que actualmente el 90 % de la producción mundial de acero sea realizada utilizando el proceso de colada continua, mientras que en la década 70 solo el 15 % correspondía a este proceso.

¿QUÉ PRODUCTOS SE OBTIENEN?

- En la actualidad existen máquinas de colada continua para producir tres tipos de semiproductos, estos son:

- Palanquillas o bloom
- Tocho
- Planchón o slab



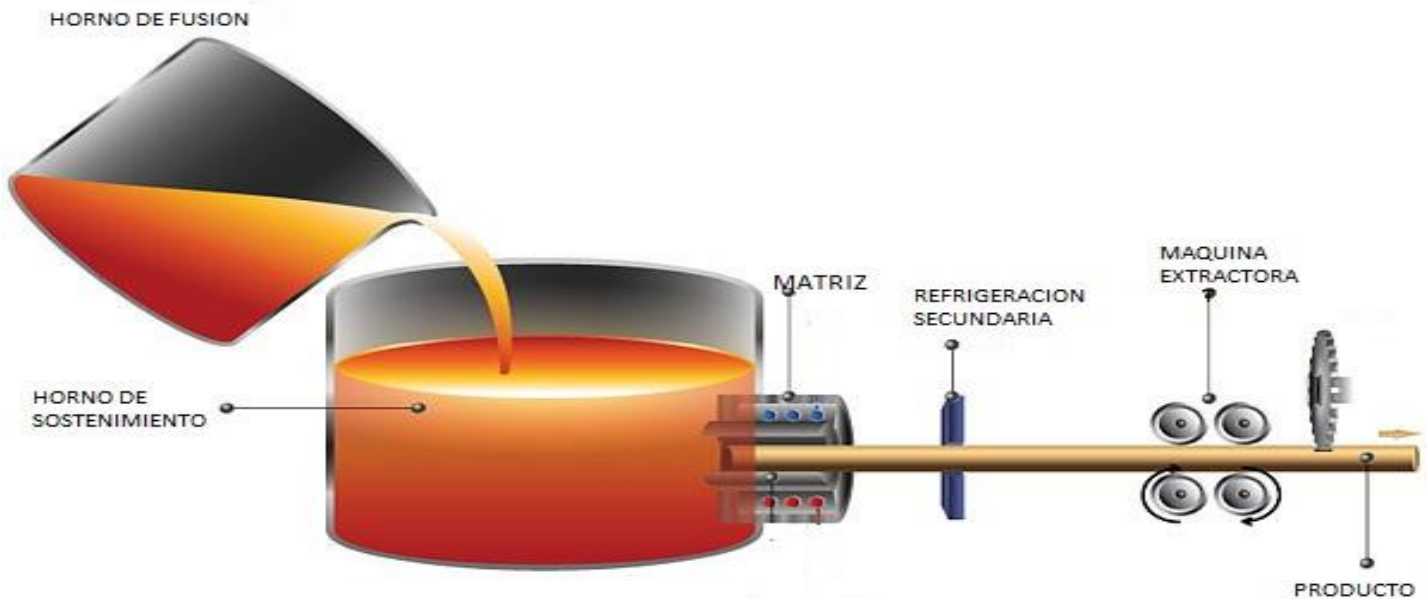
6

- Las palanquillas son pasadas a los **trenes de fermachines** en donde se laminan en forma circular y tras operaciones de estirado y calibrado, se transforman en alambres, barras calibradas, etc.

- También pueden ser pasadas a los **trenes de perfiles estructurales** en donde se transforman en perfiles. Los perfiles comerciales habituales son: angular, doble T, zeta, tubo, te y cuadrado hueco y en lo que se refiere a las barras: pletinas, media caña, triangular, cuadrada, redonda y hexágono.



8

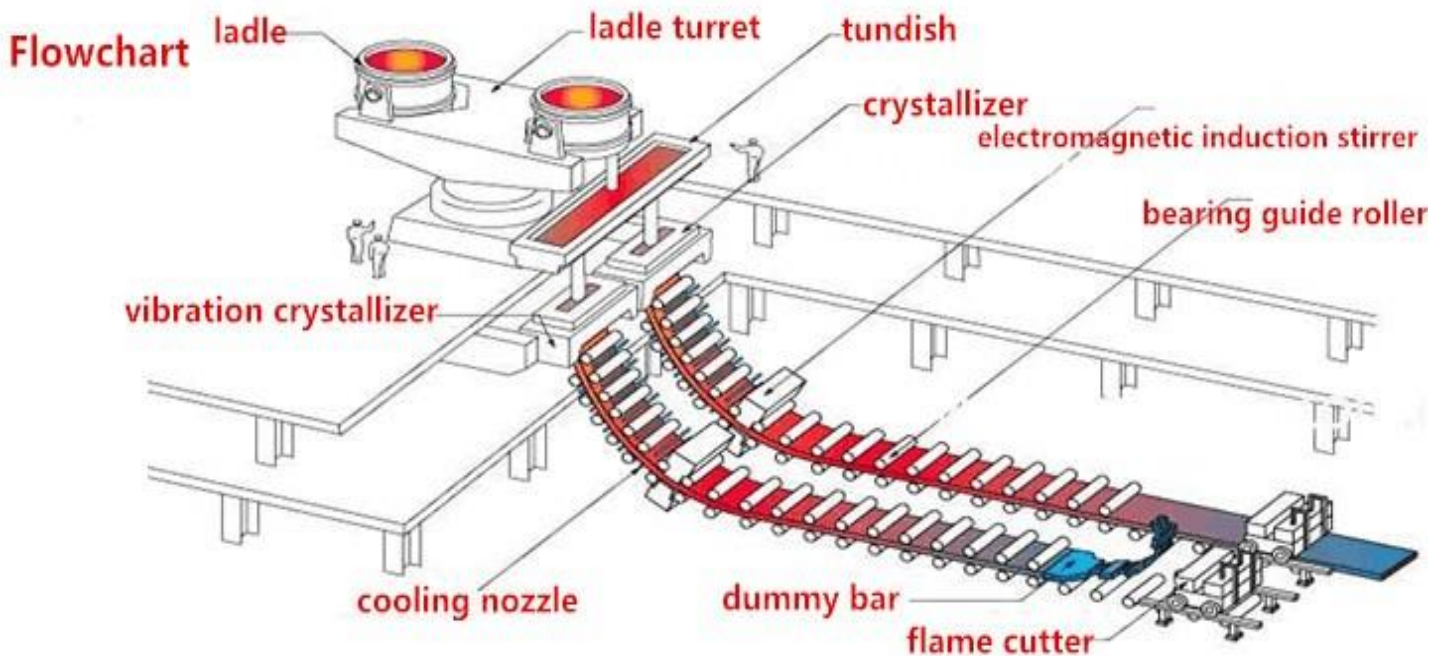


5.1.1. Fundamentos generales y componentes principales del proceso de colada continua.

- **Proceso e instalaciones**

En una lingotera abierta por ambos extremos y enérgicamente refrigerada, se forma una capa sólida en la vena de la colada que se cuele por su interior. Se hace descender la capa sólida llena de metal líquido que se desprende de la lingotera por contracción al enfriarse, para hacer progresar en el aire la solidificación a la totalidad de la barra. Elementos principales de una instalación de colada continua de acero:

- ✓ **Torre giratoria**
- ✓ **Cuchara de colada.** (De vaciado por arriba o por el fondo) que contiene el acero y que se encuentra posicionada en un asentamiento adecuado, que es móvil cuando se trabaja en secuencia.
- ✓ **Tundish o artesa.** (Asegura la perfecta separación de la escoria) distribuidora, recipiente intermedio que recibe el chorro de acero de la cuchara, lo mantiene durante cierto tiempo y lo distribuye entre las distintas líneas, regulando su caudal.
- ✓ **Molde o lingotera.** (Abierta por los dos extremos, sometida a movimiento alternativo) generalmente de cobre, con circulación interna de agua de refrigeración, que sirve para crear la primera capa solidificada y a partir de ahí dar forma externa al producto final. Es la refrigeración primaria.
- ✓ **Sección de refrigeración.** (Corriente de agua o agua pulverizada) constituido por enérgicas duchas de agua que al impactar contra la superficie exterior del acero la enfrían y continúan evacuando el calor necesario para la solidificación total del semiproducto.
- ✓ **Mecanismo enderezador.** (Rodillos que obligan a pasar la barra entre ellos) que conducen y guían el semiproducto. Están accionados automáticamente. Además, estos rodillos efectúan el curvado y posterior enderezado de la barra solidificada.
- ✓ **Mecanismo de corte.** (Oxicorte, con varios sopletes para seccionar la barra) Mecanismos de corte (sopletes o cizallas) que trocean el producto a las longitudes deseadas.
- ✓ **Sistema de extracción.** (Avance continuo, almacenamiento de barras). que durante el proceso de colada obliga a la lingotera a moverse alternativamente hacia arriba y hacia abajo, según un ciclo determinado, con el fin de que se desprege de la pared la costra cristalizada que se ha formado como consecuencia de la refrigeración primaria.





✓ Oxicorte

Se trata de un sistema de corte del lingote a la salida de la colada continua, para darle la longitud deseada para su posterior laminación, mecanización o toma de muestras. Dicha instalación consiste en un bastidor portador de dos sopletes, que por lo general están accionados con propano y oxígeno. Para cortar, la máquina se apoya sobre el desgaste y la acompaña por su recorrido, de manera que las velocidades del lingote y sopletes son las mismas. Después de cortados, los lingotes son marcados y trasladados a la zona de grúas, donde se cargan en vagones de ferrocarril, que los llevarán a los trenes de laminación en caliente.



- **Laminadoras**

Las laminadoras son las máquinas encargadas de laminar, es decir, de aplanar el acero surgido del proceso de metalurgia y fundición para crear materia prima de acero en forma de planchas o láminas, que pueden ser estampadas, troqueladas y/o enchapadas para obtener productos secundarios del acero como automóviles o autopartes, herrajes y otros.

Estas sólo comprenden las siguientes clases de máquinas para el proceso: trenes de laminación, tren de alambros, de perfiles comerciales o chapa fría. Para satisfacer las necesidades del proceso, esta clase de acero usado en este proceso contiene un bajo porcentaje de carbono, para darle mayor maleabilidad.



- **Evolución de las máquinas de colada continua**

Dejando aparte las máquinas compuestas por dos bandas metálicas en movimiento, de inclinación variable, con fuerte inyección de agua sobre el metal líquido en fase de solidificación, de las que hoy día no existen sino unas pocas instalaciones piloto y que no parecen ofrecer más que un mediano interés en el futuro, sólo se tratará de aquéllas en que la conformación del acero tiene lugar en una lingotera.

Y aun dentro del tipo últimamente citado sólo se hará mención de las máquinas de lingotera vertical, puesto que el estado de desarrollo de las de lingotera horizontal no ha salido aún de su fase experimental. Como ventajas de este tipo de máquina, se citan:

- a) Reducción de los gastos de instalación y explotación, así como de ingeniería civil.
- b) Duración breve de la fase preparatoria previa a la operación y fácil entretenimiento, lo que conduce a un alto grado de aprovechamiento de la máquina, así como rápidos cambios de sección.
- c) Menores peligros de reoxidación del metal por estar la lingotera unida a la artesa.
- d) Al no existir ni curvado ni enderezado de la barra se amplía la gama de aceros a colar.
- e) No existen limitaciones en la longitud del producto debidas a la altura de la instalación lo que ocurre en las máquinas enteramente verticales.

En algunos casos, las máquinas de lingotera vertical parecen indicadas para la obtención de electrodos de aleaciones destinados a su refusión en hornos bajo escoria electroconductora o de arco en vacío. Entre las máquinas de lingotera vertical y siguiendo un orden cronológico se pueden diferenciar los siguientes tipos:

- 1) Máquinas enteramente verticales, con lingotera recta y salida de la barra en posición vertical tras completar su solidificación y ser cortada a la dimensión oportuna. Corresponde a las primeras realizaciones y en ellas se colocaban productos de pequeña o mediana sección en aceros al carbono o inoxidables.

El principal problema planteado por estas máquinas radica en la excesiva altura de la instalación, entre 25 y 30 m., impuesta por la necesidad de instalar el mecanismo extractor y a continuación el de corte, una vez que el corazón de la barra hubiese solidificado.

Ello obliga a edificar para su alojamiento naves de una elevación prohibitiva o, si se quiere huir de ello, enterrar el conjunto en un foso de profundidad no despreciable con los inconvenientes que se siguen de implementos ubicados bajo la cota del taller. En ellas, o bien se cuelan importantes desbastes planos de aceros inoxidables o cuadrados de mediana sección en acero para rodamientos, acero alto en azufre, etc.

- 2) Máquinas con lingotera recta y curvado de la barra a la salida del mecanismo extractor, que ofrece sobre la anterior las ventajas que siguen :

- ✚ Menor altura total de la máquina (entre un 15 y un 20 %). Elementos de corte más sencillos por llevarse a cabo la operación en un plano horizontal.
- ✚ Más cómoda entrega de la barra cortada a los caminos de evacuación por tener lugar, asimismo, en un
- ✚ plano horizontal.

- 3) Máquinas con lingotera y refrigeración secundaria curvas, desarrolladas en la tendencia de reducir la altura total de la instalación. Respecto a las anteriores, esta dimensión queda reducida a menos de la mitad con lo que los problemas referentes a su implantación en naves preexistentes prácticamente no existen y la erección de nuevas edificaciones se simplifica y abarata.

En un principio se especuló con la posibilidad de que la solidificación curva limitaría el ámbito de aplicación de esta máquina a los productos cuadrados de pequeña sección, pero pronto se constató que era asimismo apta para elaborar desbastes planos de importancia y no sólo en el campo de los aceros al C, sino en el de los inoxidables y otros aleados.

- 4) Máquinas con lingotera recta y curvado de la barra de refrigeración secundaria. En ellas se conserva recta la lingotera y se inicia el curvado de la barra a su salida para lo que la refrigeración secundaria adopta la forma pertinente.

Se aduce en su favor que la evacuación del calor del metal líquido tiene lugar en mejores condiciones en una lingotera recta que en una curva pero esta ventaja, de ser real, puede quedar anulada por las tensiones mecánicas nacidas al comenzar el curvado cuando una buena parte del interior de la barra permanece aún en estado líquido.

Las primeras máquinas de la clase que se trata datan de 1964. Las tendencias actuales apuntan hacia las máquinas totalmente curvas que, en casos muy particulares, son reemplazadas por las de lingotera recta con curvado de la barra tras su solidificación.

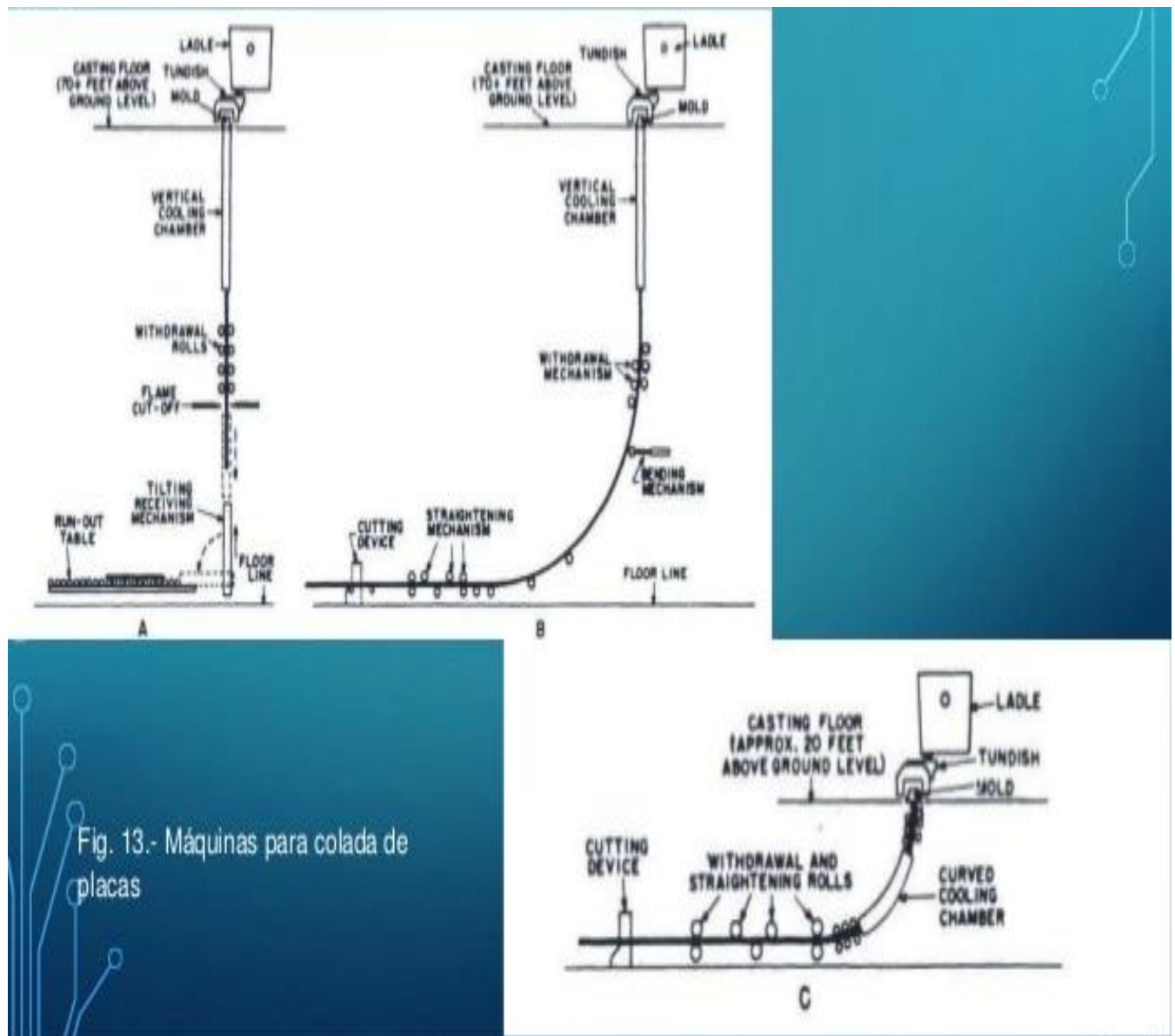


Fig. 13.- Máquinas para colada de placas

TIPOS DE MÁQUINAS DE COLADA CONTINUA

- **Máquina totalmente vertical:**

Especialmente para aleaciones no férreas. En ella, al final del recorrido vertical, se cortan las palanquillas, todavía muy calientes, por medio de un soplete y luego se voltean, son puestas en posición horizontal y arrastradas con un juego de rodillos hasta la zona de almacenaje. Tiene la desventaja que exige naves de gran altura, aproximadamente de 30

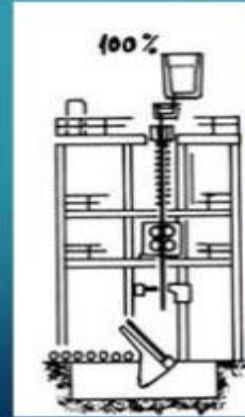


Fig. 9.- máquina totalmente vertical

- **Colada vertical, con curvado y enderezamiento posterior:** Con el objetivo de evitar la altura que debían tener los edificios para alojar a las primeras máquinas de colada continua, se desarrolló este sistema en el que doblando las palanquillas cuando ya está bien solidificado el acero, se obtienen buenos resultados y se consigue reducir la altura total de la instalación.

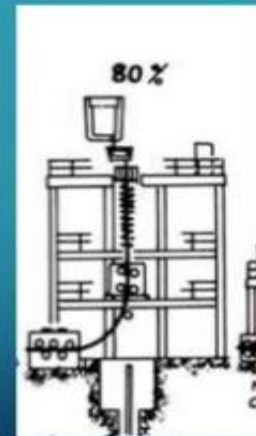


Fig. 10.- Máquina vertical con 17 doblado hasta horizontal

- **Máquina curva con el molde curvo y enderezado posterior:** Esta instalación es la de menor altura de las convencionales desarrolladas recientemente. En este tipo de MCC, el molde metálico es curvo y el enfriamiento secundario se realiza sobre la palanquilla curva y posteriormente, por medio de los rodillos enderezadores, se transforma en barra recta.

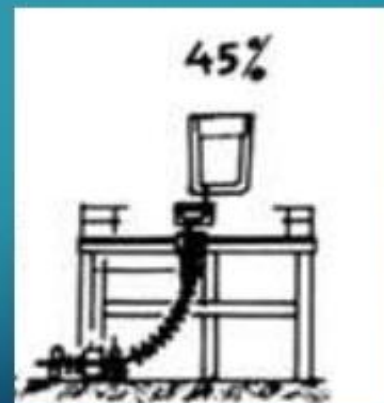
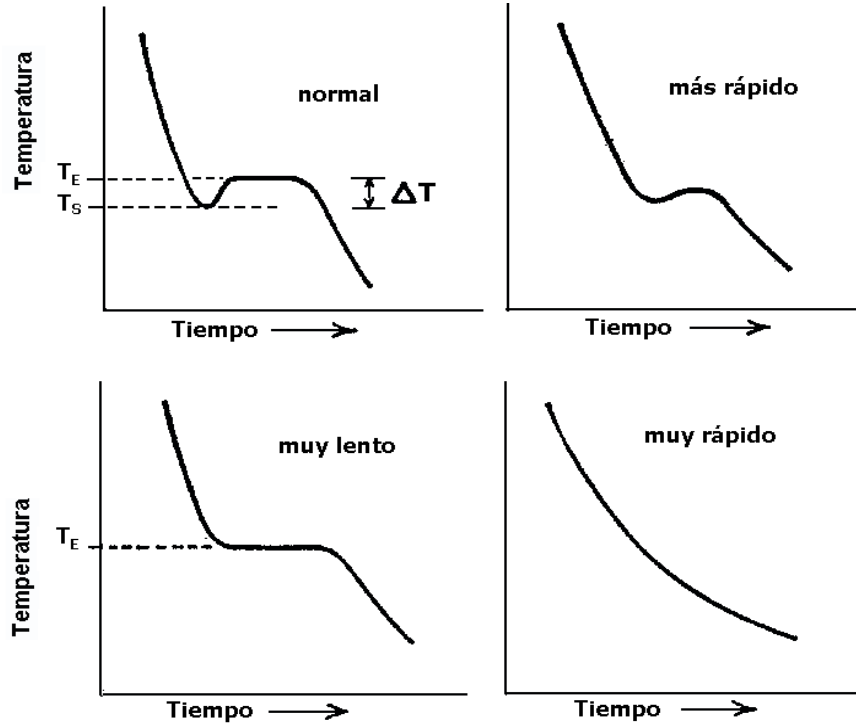


Fig. 12.- Máquina curva con molde curvo.

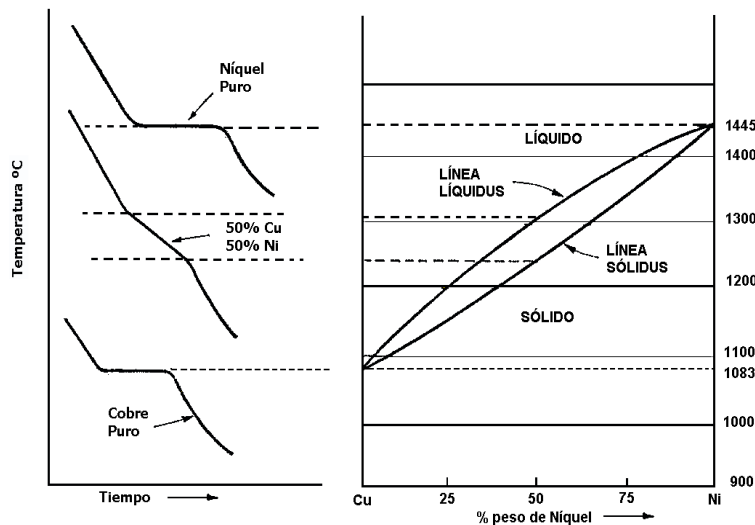
5.1.2. Comportamiento y solidificación del acero en el molde.

Cuando un metal puro y líquido se enfría éste solidifica formando un sólido cristalino y lo hace a una temperatura, más o menos fija, llamada punto de solidificación. Durante este proceso los átomos se van acomodando según su estructura cristalina mientras se desprende el calor latente de solidificación lo que no permite que disminuya la temperatura como se muestra en la siguiente figura:



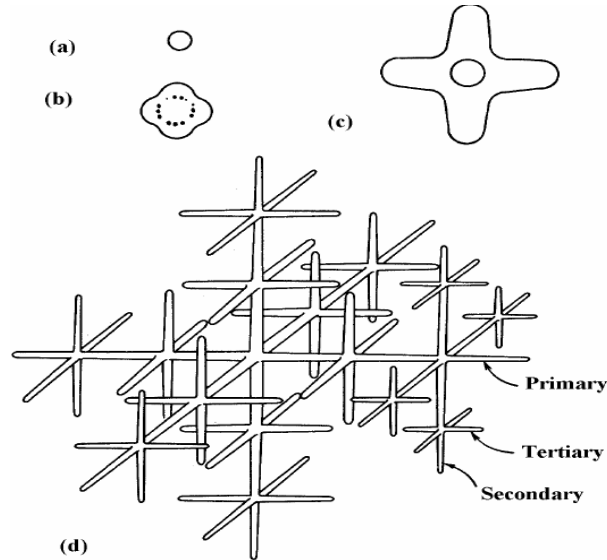
Curvas de enfriamiento típicas de un metal puro

En el caso de aleaciones (acero, bronce, etc.) o metales impuros la solidificación se produce en un rango de temperatura y, por consiguiente, no es posible hablar de un punto fijo de fusión o solidificación. Las curvas de enfriamiento para metales puros y aleaciones se presenta en la Figura 4a y en la Figura 4b el diagrama de fases correspondiente Figura



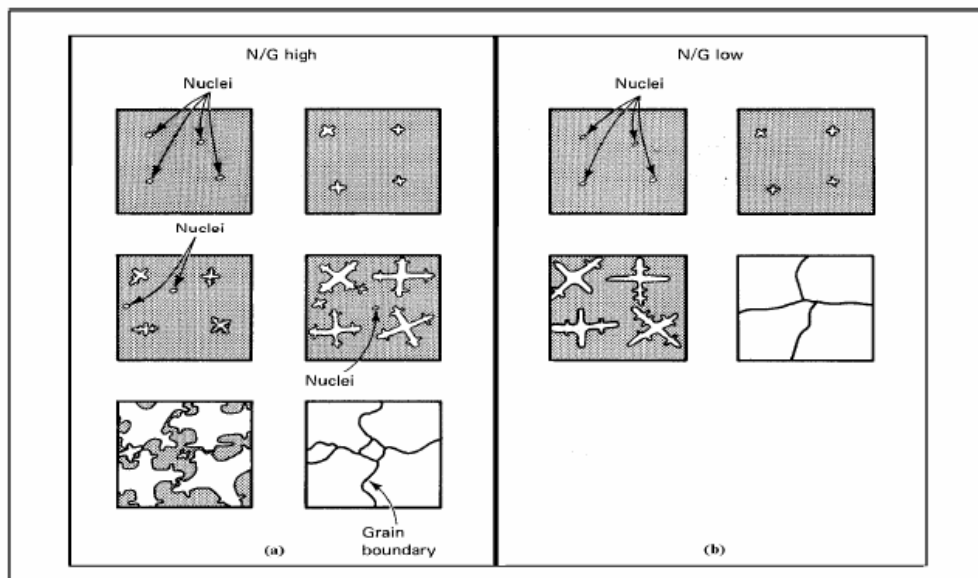
Curvas de enfriamiento y diagrama de fases

Al extraer el calor de una porción de metal líquido empieza la solidificación en aquellas regiones que se enfrían más rápido y que faciliten el acomodamiento de átomos, así se forman minúsculos cristales que comienzan a formarse independientemente en "centros de cristalización", o núcleos. El núcleo es una pequeñísima unidad de la estructura cristalina del sólido del metal respectivo de la cual crece el cristal por acomodamiento de más átomos. El cristal se desarrolla por adición de átomos, siguiendo la estructura, que rápidamente comienza a tomar un tamaño visible en lo que se llama una "dendrita", semejantes a los cristalitos de hielo.



Esquema de una dendrita

Las ramas dendríticas continúan creciendo y ensanchándose al mismo tiempo, hasta que finalmente el espacio entre ellas se llena con sólido. Mientras tanto, las ramas exteriores comienzan a hacer contacto con dendritas contiguas, que se han desarrollado en forma completamente independiente, al mismo tiempo. Todos estos cristales vecinos estarán orientados en forma diferente debido a que proceden de distintos núcleos. Luego el número de núcleos va a ser igual al número de dendritas o granos.



Nucleación y crecimiento a) enfriamiento rápido y b) enfriamiento lento

Si el metal considerado es puro no es posible detectar el crecimiento dendrítico una vez que la solidificación se ha completado, puesto que todos los átomos son idénticos. Pero en las aleaciones, el soluto tiende a concentrarse en la porción fundida del metal, de manera que está presente en aquella parte del metal que solidifica el último, en los espacios intermedios entre las dendritas es posible detectarlo por examen metalográfico en el microscopio. En esa región también quedan espacios vacíos debido a la disminución de volumen al solidificar y no poder llenar los espacios con líquido debido a la viscosidad del metal fundido. Entonces la porosidad interdendrítica también puede revelar la presencia original de dendritas.

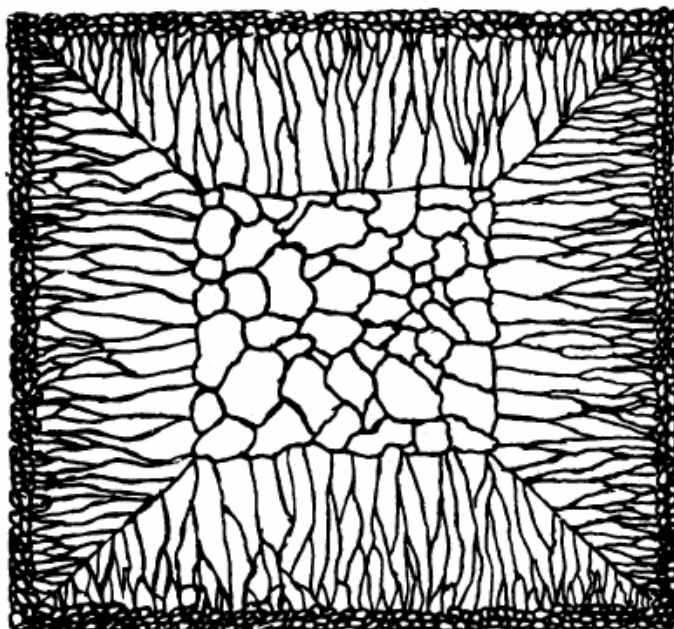
La rapidez de enfriamiento del líquido cuando llega a su punto de solidificación afecta al número de centros de nucleación. Enfriamiento lento permite que un número pequeño de núcleos crezcan rápidamente y se termine con pocos granos y grandes. El enfriamiento rápido permite obtener un grano más fino (Figura 6a). La nucleación también puede afectarse artificialmente introduciendo agentes nucleantes al baño, Al_2O_3 en el acero, lluvia artificial vapor \rightarrow líquido.

Si todo el líquido hubiera solidificado a partir de un solo núcleo todos los átomos estarían ordenados según una celda cristalina a través de todo el material, esto recibe el nombre de MONOCRISTAL. Es evidente entonces que los materiales producidos industrialmente siempre son POLICRISTALINOS.

- **Estructura de lingotes**

En un lingote industrial el tamaño del cristal o grano puede variar considerablemente de la superficie al centro. Esto se debe a la variación en el gradiente de temperatura al solidificarse el lingote y transferir el calor del metal al molde. Cuando el metal entra primeramente en contacto con el molde este último está frío lo que tiene un efecto de enfriamiento rápido, que resulta en la formación de granos pequeños en la superficie del lingote.

Al calentarse el molde su efecto enfriador se reduce de manera que la formación del núcleo se retarda al proceder la solidificación. Así pues los granos serán mayores hacia el centro. En la región intermedia la velocidad de enfriamiento es favorable para el crecimiento de granos columnares (alargados) de orientación cristalina preferencial.



Estructura de una sección de un lingote

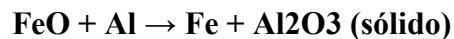
- **Solidificación en lingote de acero tipo efervescente**

Un gran tonelaje de acero es dedicado a la fabricación de hojalata y alambre que se caracteriza por su bajo contenido de carbono (menos 0.1 % C). Para lograr este porcentaje tan bajo de carbono se trabaja con un baño de acero algo oxidado. Cuando el acero comienza a solidificar en la lingotera se forma primeramente una capa de metal bastante puro contiguo a la pared del molde. Esto causa que la concentración de oxígeno en el líquido restante aumente de manera que la reacción:



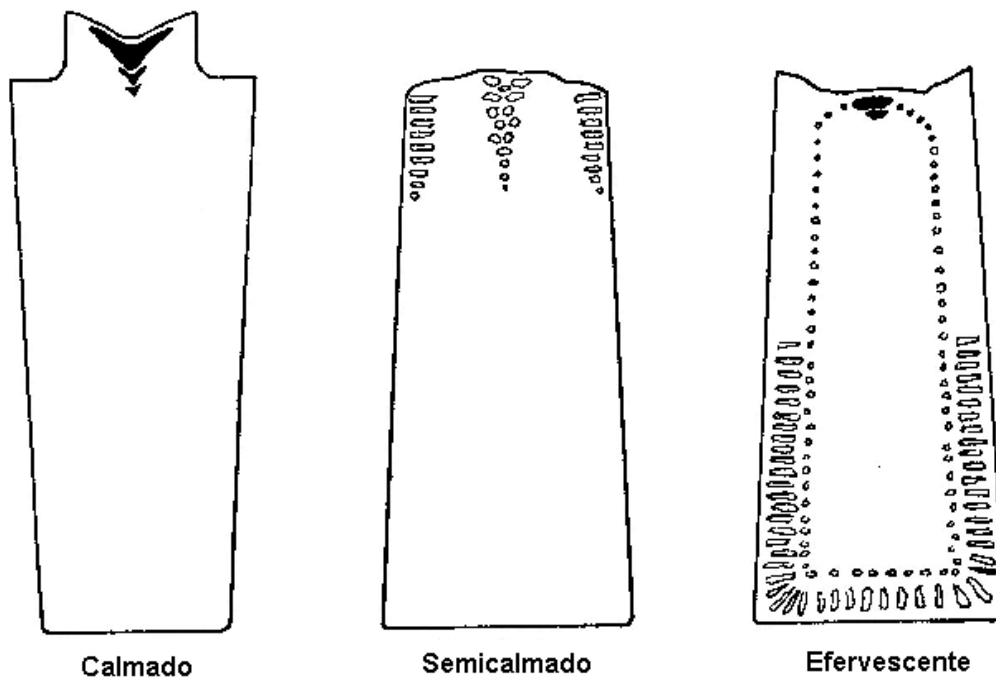
tiene mayor violencia con la evolución del gas CO que tiende a barrer con las impurezas acumuladas en la interfase sólido líquido de los cristales en formación. Así, se produce una "piel" de acero muy "limpia" y su espesor dependerá en gran parte del grado de desoxidación inicial. Cuando el acero se ha enfriado al punto en que la solidificación comienza en todo el cuerpo del líquido restante, mucho del gas producido queda atrapado (Figura 10), teniendo como resultado la porosidad en el interior del lingote, que además tiene la virtud de contrarrestar la formación del rechupe.

Para controlar esta reacción se puede calmar el acero con aluminio:



Luego se cubre el lingote con una chapa de acero, la cual se enfría con un chorro de agua para que solidifique la parte superior del lingote. Así el gas CO queda totalmente atrapado en el lingote. Las burbujas tienen la virtud de contrarrestar la formación del rechupe.

La característica principal del acero efervescente es una superficie exterior relativamente "limpia", lo que da una buena superficie al producto terminado ya que incluso el alambre sigue con la "piel" en el exterior y la segregación confinada al núcleo.



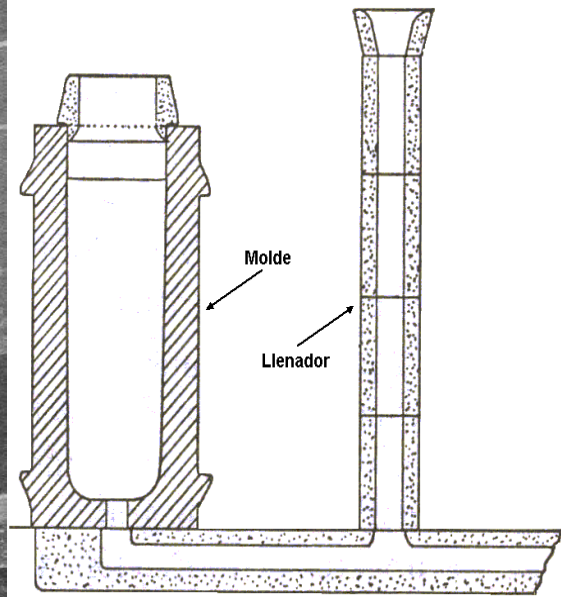
Tipos de lingotes de acero

- Otros procesos industriales de colada o vaciado

La Figura muestra un dispositivo para vaciar lingotes de acero por el fondo que evita la salpicadura de las lingoterías durante el vaciado obteniéndose un lingote sin gotas frías en la superficie.



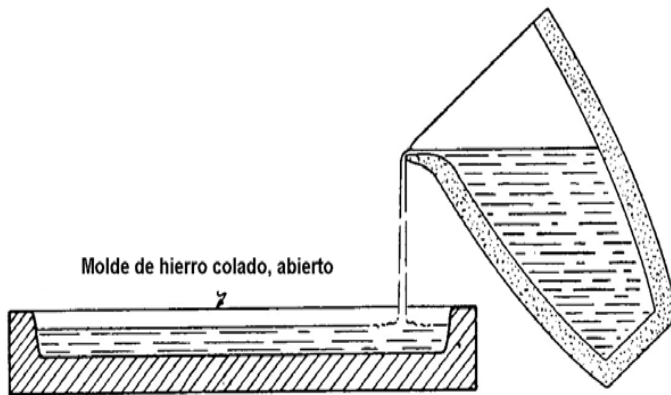
(a)



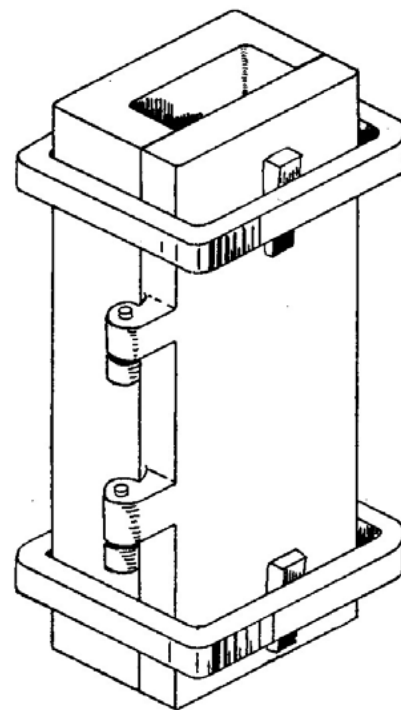
(b)

(a) Vaciado de acero de una cuchara grande a moldes de lingotes
(b) dispositivo para vaciar lingotes de acero por el fondo.

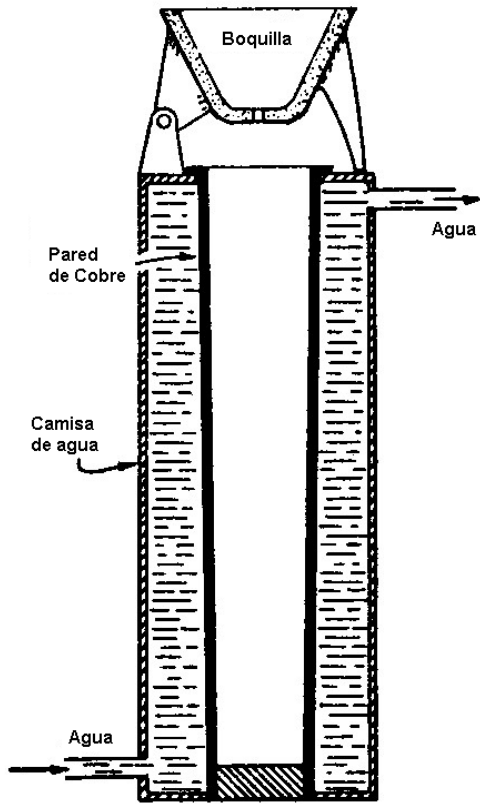
En la figura siguiente se presentan algunos dispositivos para el vaciado de metales no ferrosos.



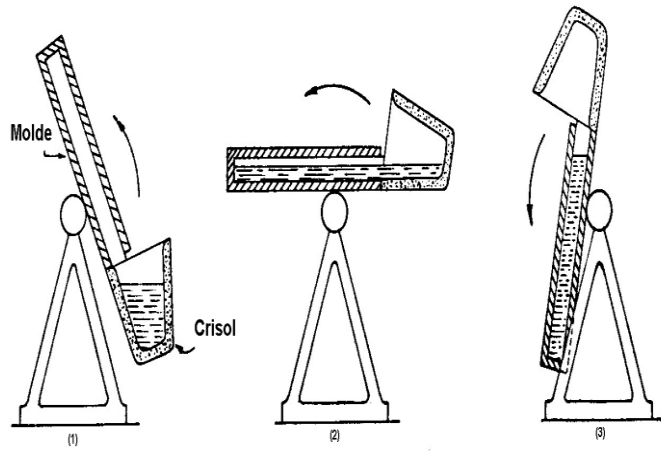
(a) Vaciado en plancha, en un molde abierto



(b) Lingotera en forma de libro



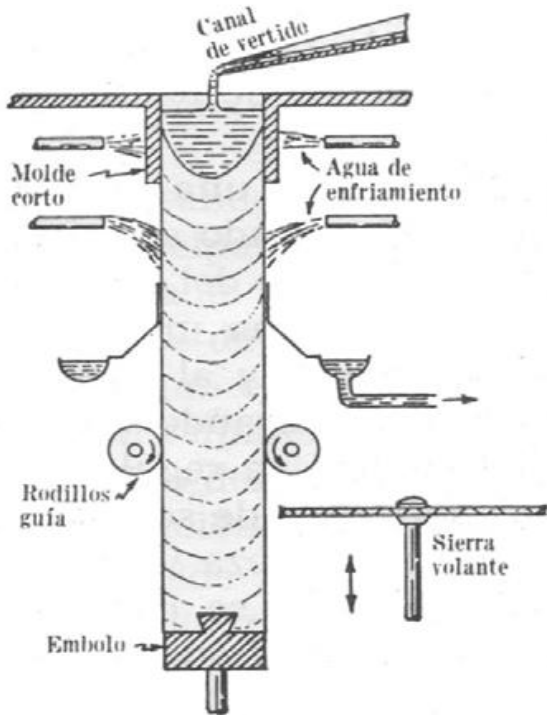
(c) Lingotera enfriada por agua



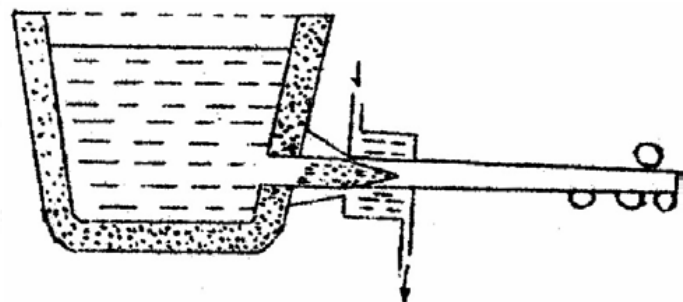
(d) Principio del proceso de Durville

Dispositivos para el vaciado de metales no ferrosos

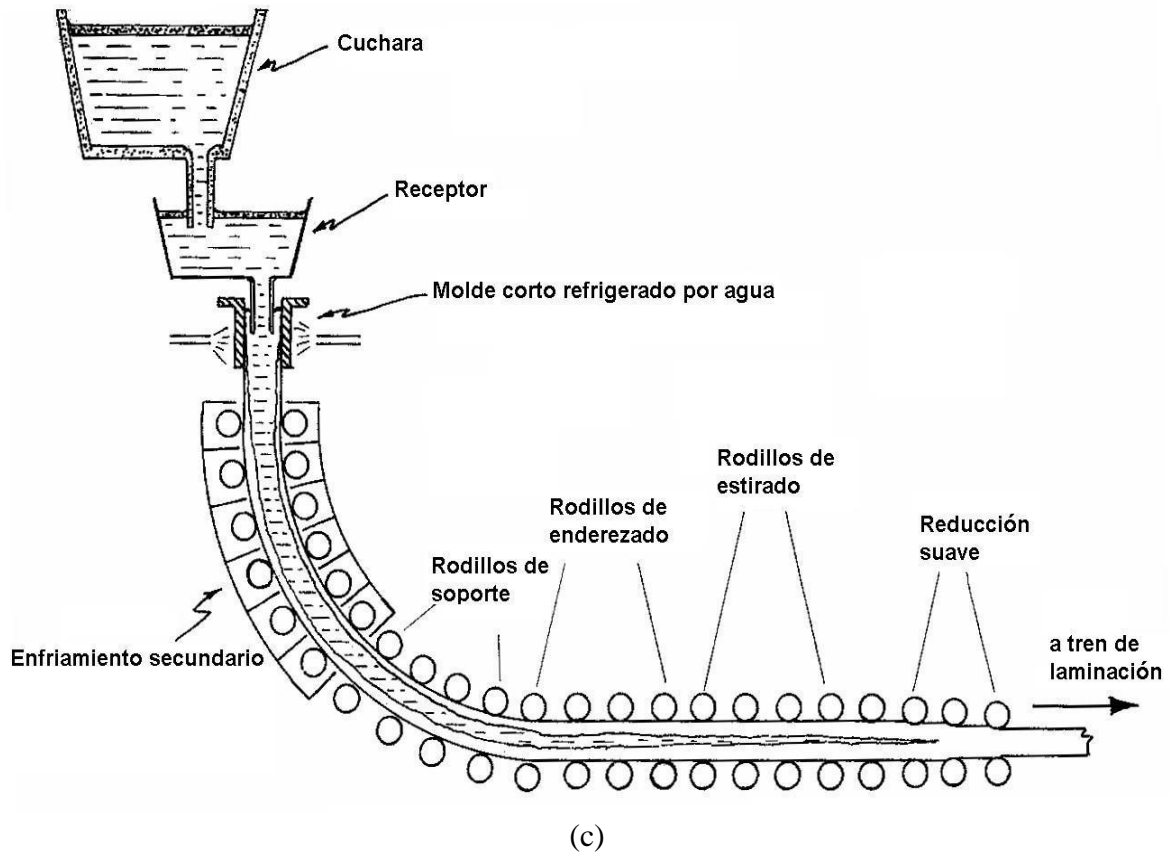
La siguiente figura presenta algunas unidades de colada continua.



(a)



(b)



Dispositivos de colada continua, (a) colada vertical semicontinua, (b) colada continua horizontal y (c) colada continua vertical.

La colada continua, es un proceso diseñado para obtener acero en bruto de forma regular e ininterrumpida a partir de acero fundido. Para ello, el acero líquido proveniente de la estación de ajuste metalúrgico, es vertido desde la cuchara de acero hacia una artesa, la que consiste en una batea revestida con material refractario y que tiene como función distribuir el acero de forma homogénea a los moldes instalados en cada una de las líneas de colada en operación.



Vaciado de acero líquido al proceso de colada continúa

La solidificación de acero durante el proceso de colada continua tiene lugar en tres zonas características de la máquina de colada continua:

- 1. Sistema de enfriamiento Primario.** Es el mecanismo inicial en el proceso de solidificación de colada continua, donde el acero líquido es vaciado en moldes de cobre, adoptando así la forma de estos al mismo tiempo que se solidifica.

El objetivo de este sistema es generar una piel solidificada, libre de defectos y de un espesor lo suficientemente resistente para soportar la presión ferrostática ejercida por el acero líquido al momento de salir del molde.

La extracción de calor se genera a través de los moldes, cuya cara externa se encuentra cubierta por una chaqueta de agua que trabaja con grandes caudales, generando una variación entre la temperatura del agua que entra y sale del sistema de enfriamiento primario, conocido como ΔT_{molde} , su cuantificación permite evaluar la extracción de calor durante la solidificación primaria.

En la solidificación primaria, la extracción de calor se lleva a cabo a través de tres mecanismos:

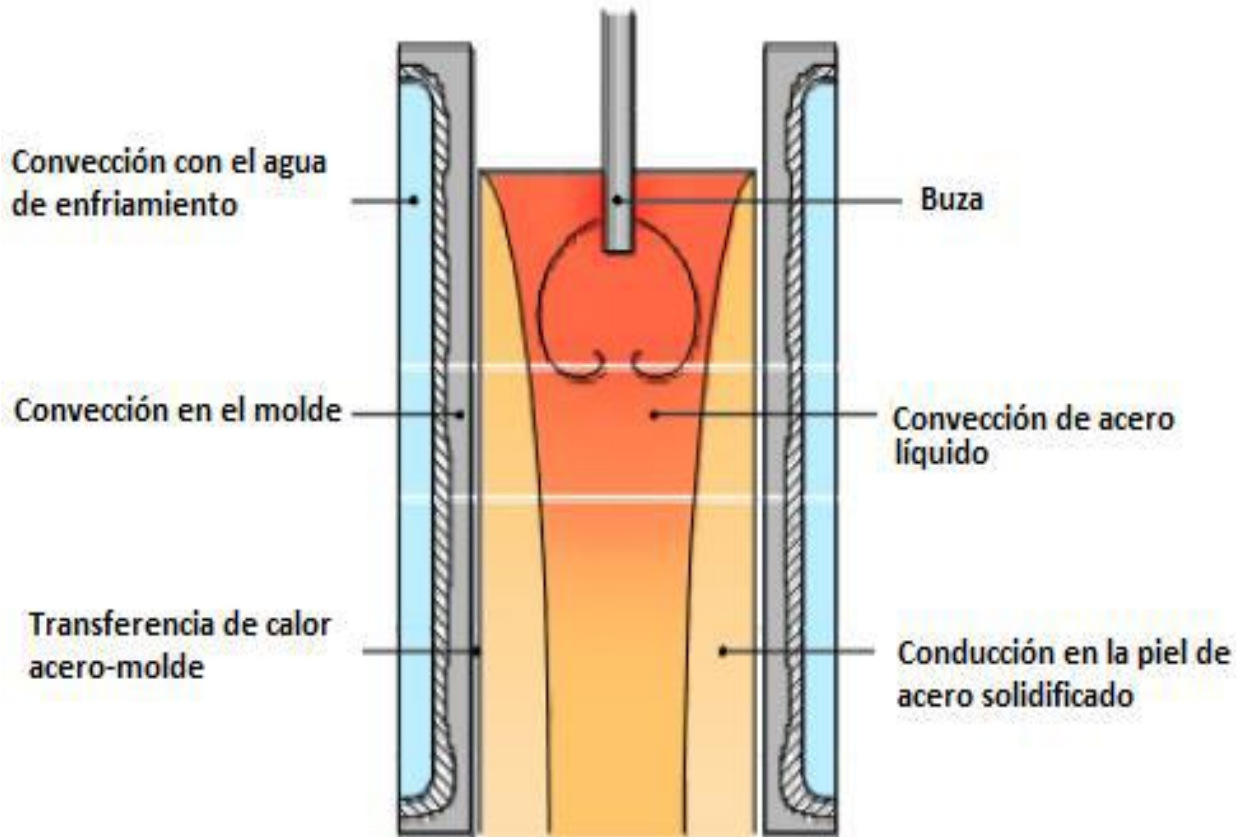
- a) Conducción horizontal desde la palanquilla hacia el agua de enfriamiento del molde, a través de este mismo molde.
- b) Conducción vertical hacia la parte inferior de la palanquilla.
- c) Radiación desde el menisco de acero hacia el exterior.

El primer mecanismo es el principal, mientras que los dos restantes son poco significativos, sobre todo cuando se utiliza polvo de colada como lubricante, puesto que la radiación vertical es neutralizada por este polvo aislante.

A medida que el acero solidifica desde el menisco hacia la salida del molde, se genera una contracción del mismo, causando intersticios de aire entre el acero y el molde, conocido como GAP. Para contrarrestar este fenómeno, se utilizan moldes de cobre con forma cónica, su diámetro disminuye a medida que avance el acero por el molde, de tal forma que se compensa la formación de espacio entre acero y molde durante la solidificación.

El complejo fenómeno de extracción de calor en el molde puede dividirse en cinco mecanismos, cuyo detalle se muestra esquemáticamente en la siguiente figura.

- ⌘ Convección del acero líquido
- ⌘ Conducción en la piel solidificada
- ⌘ Transferencia de calor acero-molde
- ⌘ Conducción a través del molde
- ⌘ Convección con el agua de enfriamiento



Esquema de transferencia de calor en el molde

Existen variables que influirán en la extracción de calor durante la solidificación del acero en el molde, las que se describen a continuación:

- **Sobrecalentamiento del acero:** El sobrecalentamiento del acero se define como la diferencia entre la temperatura a la cual es colado el acero y la temperatura líquidus teórica que tiene el acero, el cual depende de su composición química. A mayores sobrecalentamientos, se necesitará extraer más calor para poder formar una piel solidificada lo suficientemente resistente para soportar la presión ferrostática del acero aún líquido.
- **Velocidad de colada:** Es uno de los factores más determina antes, al ser el caudal en la chaqueta de agua constante, un aumento de la velocidad de colada implica un menor tiempo de residencia del acero dentro del molde, esto produce la disminución en la disipación de sobrecalentamiento que presentaba el acero al momento de entrar al sistema. El aumento de la velocidad de colada disminuirá entonces el espesor de la piel solidificada.
- **Contenido de carbono:** La velocidad de transmisión térmica para los aceros bajo carbono es menor que para el acero de medio carbono.
- **Lubricación:** Durante la colada continua se utilizan lubricantes para favorecer la transferencia de calor y evitar la adherencia del acero en las paredes del molde. Estos lubricantes pueden ser aceite o polvos sintéticos, el uso de cada uno dependerá del tipo de acero colado.

Una vez que solidifica la piel externa, el acero adopta la forma del molde y evacua de éste llegando a la zona de enfriamiento secundario.

2. **Sistema de enfriamiento secundario.** Este sistema tiene como función solidificar el acero líquido aun remanente dentro de la sección colada, formando una piel estable y evitando la formación de grietas internas u otros defectos.

El sistema está constituido por rociadores de agua agrupados por zonas específicas, la extracción de calor se logra generando una película de vapor de agua estable sobre el producto colado para obtener una extracción de calor uniforme, para esto es necesario mantener un caudal de agua controlado. Se estima que entre un 30% y 40% del calor que entra al sistema de enfriamiento primario es extraído por este sistema.

La transferencia de calor se puede calcular mediante la Ley de enfriamiento de Newton, dada por la expresión:

$$qw = h(Ts - Tw) \quad (1)$$

Donde:

- hw : Coeficiente local de transferencia de calor el que depende principalmente de la cantidad de agua empleada
- Ts : Temperatura superficial de la palanquilla
- Tw : Temperatura del agua empleada

Se conoce como curva de agua a la cantidad y distribución de agua que se proporciona al acero en las diferentes alturas y posiciones de la máquina de colada continua.

La curva de agua está diseñada para cumplir siempre con el caudal específico [**litro agua / K**], de tal modo que la cantidad de agua en cada zona de rociadores se adapta para diferentes velocidades de colada garantizando que se cumpla siempre con el caudal específico de diseño para cada tipo de acero.

El caudal específico de diseño utilizado para cada tipo de acero es sugerido por el proveedor de la máquina de colada continua, estos son diseñados con el objetivo de asegurar una óptima calidad interna y externa del producto colado.

3. **Enfriamiento por radiación.** En esta etapa, la solidificación tiene lugar de forma natural por radiación desde la superficie incandescente del acero hacia el medio ambiente. La transferencia de calor se puede calcular mediante la ecuación de Stefan-Boltzman, dada por la expresión:

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

ϵ : emisividad $0 < \epsilon < 1$

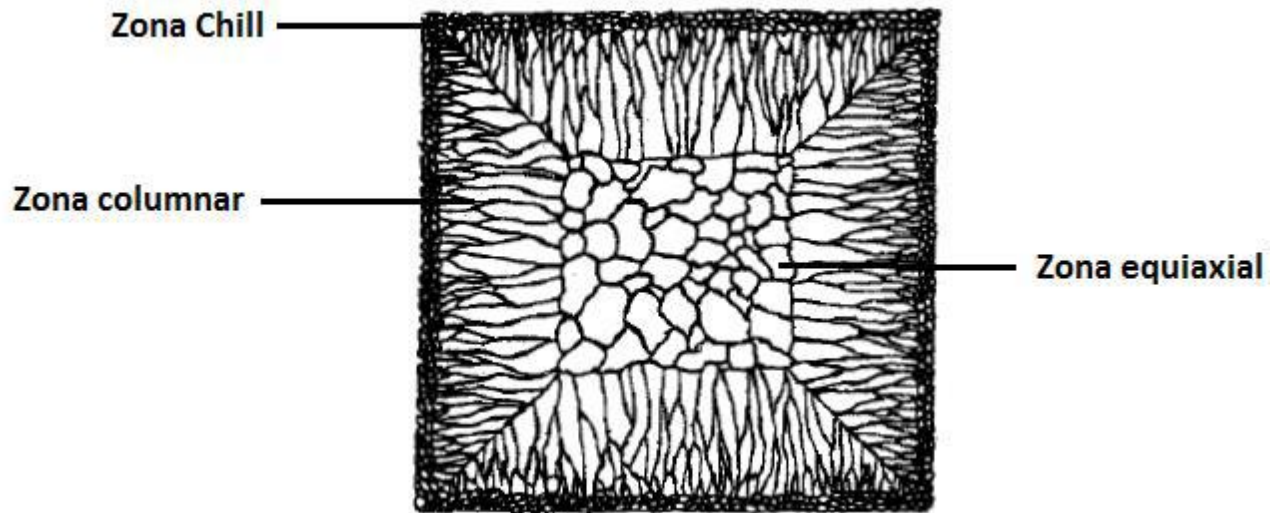
σ : constante de Stefan-Boltzman $5.67 \times 10^{-8} [W / m^2 K^4]$

T : temperatura absoluta de la superficie del cuerpo

El enfriamiento por radiación continúa hasta llegar a la mesa de corte, el que se realiza mediante lanzas oxicorte de modo de cortar la palanquilla en longitudes predefinidas.

✱ Estructuras de solidificación del acero en el proceso de colada continua.

Las piezas de acero en bruto obtenidas mediante colada continua, pueden estar formadas por tres zonas características como se observa en la figura.



Macro estructura en sección de acero colado.

Al comienzo de la solidificación se formará una capa externa llamada **Zona Chill**, la cual está constituida por granos poligonales, normalmente pequeños y sin orientación cristalográfica preferencial. Esta capa se produce por una muy alta extracción de calor debido al contacto con los moldes de cobre en el sistema de solidificación primaria.

Cuando el acero sobrecalentado es vaciado en las paredes del molde, el líquido adyacente es rápidamente enfriado hasta la temperatura en que las impurezas sólidas producen una acción catalizadora efectiva sobre la nucleación. La extensión de la zona Chill depende de la extensión de la zona sub enfriada antes de que ocurra la nucleación. En muchos casos los núcleos se forman solamente en la superficie del molde por lo que la solidificación luego procede en la forma columnar.

La **Zona Columnar** está formada por granos alargados y orientados hacia el centro de la sección colada, estos poseen gran similitud en la orientación cristalográfica, generando textura en la dirección de extracción de calor. Puede ocupar la mayor parte o la totalidad de la pieza colada.

El aumento de esta extensión está asociado a altos niveles de extracción calórica, los granos de esta forma tienen su origen en los granos de la zona chill y crecen por solidificación progresiva hasta ser bloqueados por la presencia de granos equiaxiales. La extensión de esta zona disminuye sí:

- ❖ El sobrecalentamiento disminuye
- ❖ El rango de solidificación aumenta
- ❖ El número de agentes nucleantes aumenta
- ❖ La agitación del líquido aumenta

La parte central de la sección colada generalmente está caracterizada por la **Zona Equiaxial**, conformado por granos orientados al azar que podrían estar formados a partir de brazos dendríticos secundarios rotos, que actúan como semillas para el crecimiento de nuevas dendritas.

✱ Segregación

Todas las aleaciones metálicas contienen elementos o impurezas, las cuales son redistribuidas de forma aleatoria durante la solidificación. Esto genera heterogeneidades en la composición química del producto colado conocido como segregación.

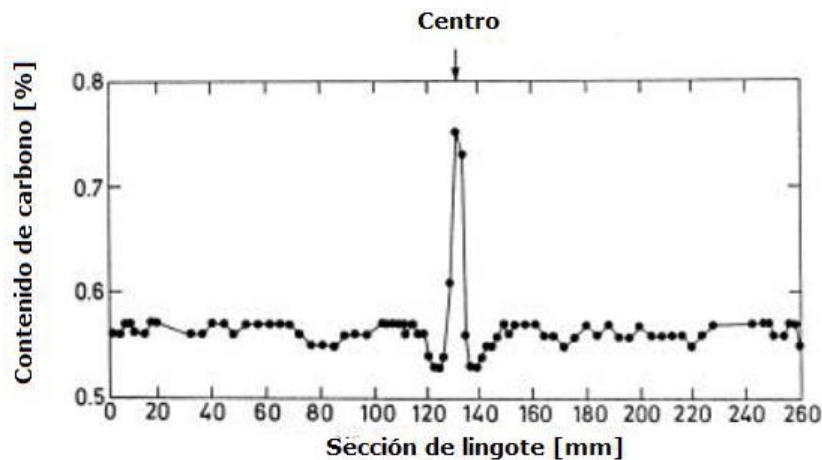
La segregación composicional en productos colados se presenta de dos formas, estas son:

- ❖ **Microsegregación:** Durante la solidificación de una aleación metálica, desde la intercara líquido-sólido, el soluto es rechazado lateralmente de las dendritas secundarias y se redistribuyen por difusión en un contorno local de 10 a 300 μm .
- ❖ **Macrosegregación:** Es la variación de composición a una escala de milímetros e incluso centímetros. Las causas de esta tienen relación con el movimiento de porciones de masa segregadas a través de las dendritas primarias durante el proceso de solidificación, esto debido a que la mayoría de los elementos tienen solubilidad más baja en la fase sólida que en la líquida, por lo tanto, el rechazo de soluto desde la fase sólida, incrementa la composición de la fase líquida.

Las dendritas primarias: Son estructuras con ramificaciones repetitivas, las cuales se forman durante el proceso de solidificación de acero. La ramificación base se conoce como dendrita primaria y de ella nacen ramificaciones más pequeñas conocidas como dendritas secundarias.

Aunque ambos fenómenos ocurren inevitablemente durante la solidificación de aleaciones, Gosh (2001) sugiere que la microsegregación no constituye mayores problemas para la calidad, esto debido a que los efectos de la microsegregación pueden ser removidos durante el subsecuente recocido o trabajado. La macrosegregación por otro lado persiste y produce problemas tales como zonas de menor punto de fusión, las que pueden refundir en tratamientos térmicos posteriores.

En los productos derivados de colada continua, la macrosegregación es conocida como segregación central. Los productos de colada y sus derivados, presentan un enriquecimiento de solutos en la zona central, como se muestra en la figura, en la que se observa que el contenido de carbono desde la superficie del producto colado se mantiene casi invariante hasta llegar al centro donde se tiene un aumento significativo del contenido de carbono.

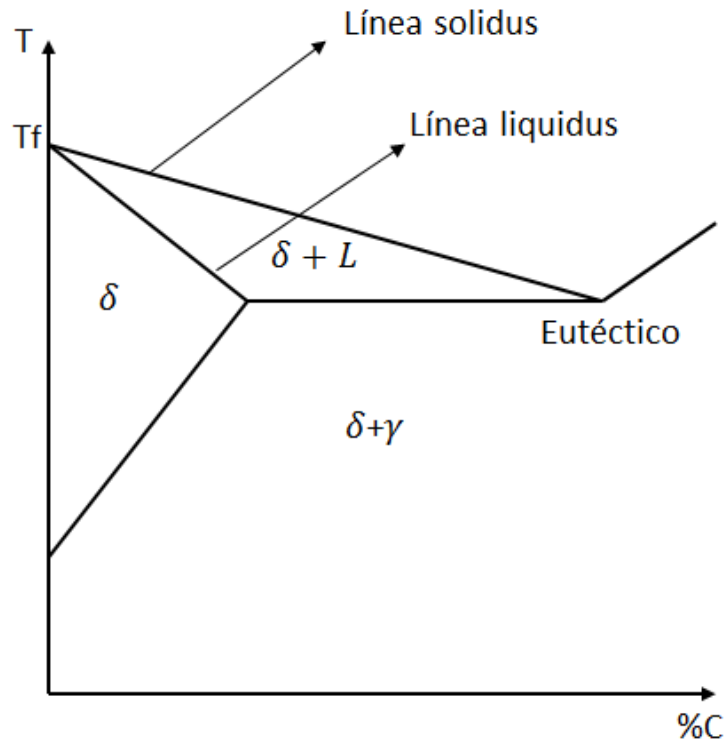


Perfil de concentración típico en colada continua de planchones.

Esta segregación central puede resultar en la formación de segundas fases de no equilibrio, usualmente frágiles, en porosidades y en heterogeneidades en la concentración de las fases involucradas. Estas situaciones producen un material con propiedades físicas y mecánicas no uniformes.

✱ Comportamiento de elementos de aleación en la segregación

En un diagrama de fases binario, como el Fe-C de la figura anterior, se puede apreciar que las líneas sólidas y líquidas son representadas como rectas.



Esquema de líneas sólidas y líquidas en diagrama hierro-carbono

Tanto la línea sólida como la línea líquida pueden ser descritas mediante una ecuación de la recta donde la temperatura es una función del contenido de carbono. Estas líneas se representan mediante la siguiente ecuación:

$$T = mC + Tf$$

Donde:

T : temperatura

m : pendiente de la línea sólida o líquida

C : concentración de carbono en porcentaje en masa, C_s para línea sólida, C_L para línea líquida

T_f : temperatura de fusión de hierro puro

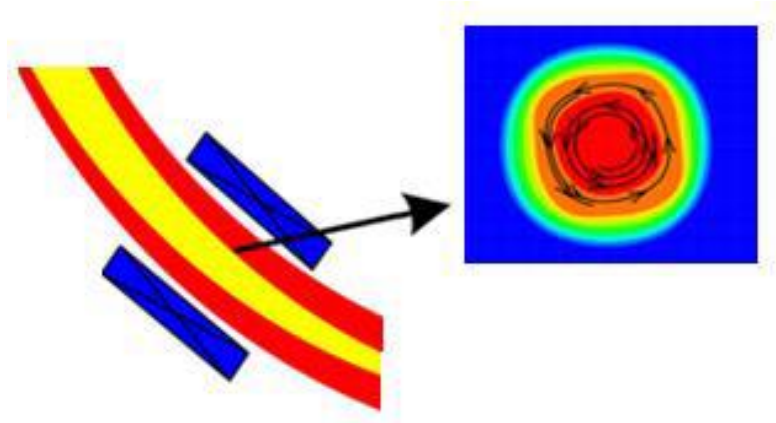
Asumiendo que las líneas líquidas y sólidas son rectas en el diagrama de fases binario, el cociente entre ambas pendientes se denomina como coeficiente de distribución en equilibrio y se designa como k^* , este se representa como:

$$k^* = (m_s/m_l) = (C_s/C_L) = (t_f - t_l)/(t_f - t_s)$$

El valor de k suele ser menor a 1, esto quiere decir que el elemento de estudio tiene preferencias por la fase líquida por sobre la fase sólida. Entre menor el valor de k^* , mayor la tendencia del elemento de estudio a segregarse durante la solidificación.

✿ Agitadores electromagnéticos en el proceso de colada continua

Los agitadores electromagnéticos se utilizan en el proceso de colada continua para mitigar el fenómeno de segregación central. Estos consisten en bobinas que circundan el producto colado, generando un campo magnético rotativo de frecuencia a intensidad ajustable. La interacción del campo magnético con el producto colado produce un movimiento de giro de la fracción de acero que aún se encuentra líquida dentro de la palanquilla, tal como se muestra en la figura.



Esquema de efecto de agitadores electromagnéticos en el flujo del acero líquido.

• Principio de la agitación electromagnética

El funcionamiento de los agitadores es similar al de un motor asíncrono trifásico, donde la bobina inductora funciona como estator y el acero líquido hace de rotor. Un campo magnético variable (B), aplicado sobre un conductor como el acero, ya sea en estado sólido o líquido, inducirá una corriente eléctrica (j) sobre el conductor, también conocida como corriente de Foucault. Estas corrientes circulares de Foucault crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado.

De igual manera, las corrientes de Foucault (j) generadas sobre el acero, están sometidas a la acción del campo magnético variable (B), esto se conoce como Fuerza de Lorentz, y está dado por la siguiente expresión:

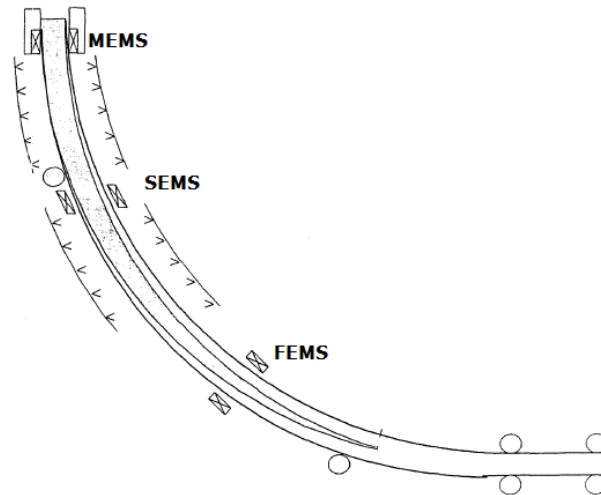
$$F=j \times B$$

Debido a esta Fuerza de Lorentz, se genera un torque en el acero líquido que le proporciona un movimiento rotatorio. El torque generado depende de la intensidad de corriente, número de devanados de la bobina, frecuencia y geometría del sistema.

• Posición agitadores electromagnéticos

Existen tres posiciones posibles para el uso de los agitadores electromagnéticos durante la colada continua, los cuales se representan en la figura, su ubicación dependerá del efecto que se desea lograr sobre los productos colados, los agitadores por su posición se clasifican en:

1. Agitador electromagnético de molde (MEMS): Instalado en la parte exterior del molde o lingotera
2. Agitador electromagnético en sistema de enfriamiento Secundario (SEMS): Instalado en la zona de enfriamiento secundario
3. Agitador de final de pozo (FEMS): Instalado al término del sistema de enfriamiento secundario, también es conocido como agitador de hebra.



Posiciones posibles de los agitadores electromagnéticos en la línea de colada continua

Los agitadores, dependiendo de la posición, tendrán efectos diferentes. A continuación se describen los efectos generados por los agitadores instalados en la máquina de colada continua de palanquillas de CAP acero.

Agitadores de Molde (MEMS):

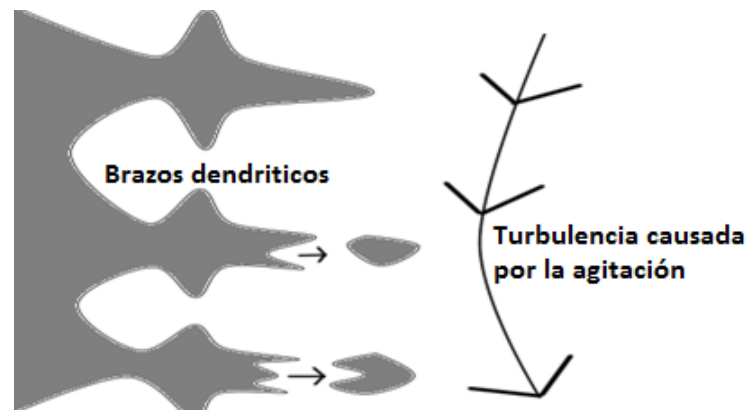
- a) Aumenta la proporción de granos equiaxiales en la zona central del producto colado.
- b) Disminuye los Pinholes, la porosidad y segregación central.

Agitadores de final de pozo (FEMS):

- a) Refinador de granos equiaxiales en la sección central.
- b) Disminuye la porosidad y segregación central.

Dentro de los efectos más importantes que tienen los agitadores electromagnéticos durante el proceso de colada continua, está el aumento de la proporción de granos equiaxiales al centro del producto colado. El aumento de la proporción de granos equiaxiales se explica mediante el mecanismo conocido como desprendimiento dendrítico.

En este mecanismo, los núcleos para la formación de granos equiaxiales resultan de los granos predendríticos formados en la etapa más temprana de solidificación en el molde. Estos granos son arrancados por la agitación y luego redistribuidos hacia el centro de la sección colada, como se representa en la figura. Si estos gérmenes o núcleos sobreviven al sobrecalentamiento, crecen y dan lugar a granos equiaxiales.



Largo metalúrgico

El largo metalúrgico en el proceso de colada continua se define como la posición dentro de la línea de colada donde tiene lugar la última solidificación del producto colado.

El largo metalúrgico es el resultado de diversos factores que interfieren en la velocidad de solidificación dentro de la palanquilla, el fenómeno que gobierna esta solidificación es la transferencia de calor, la cual se ve afectada por condiciones operacionales como:

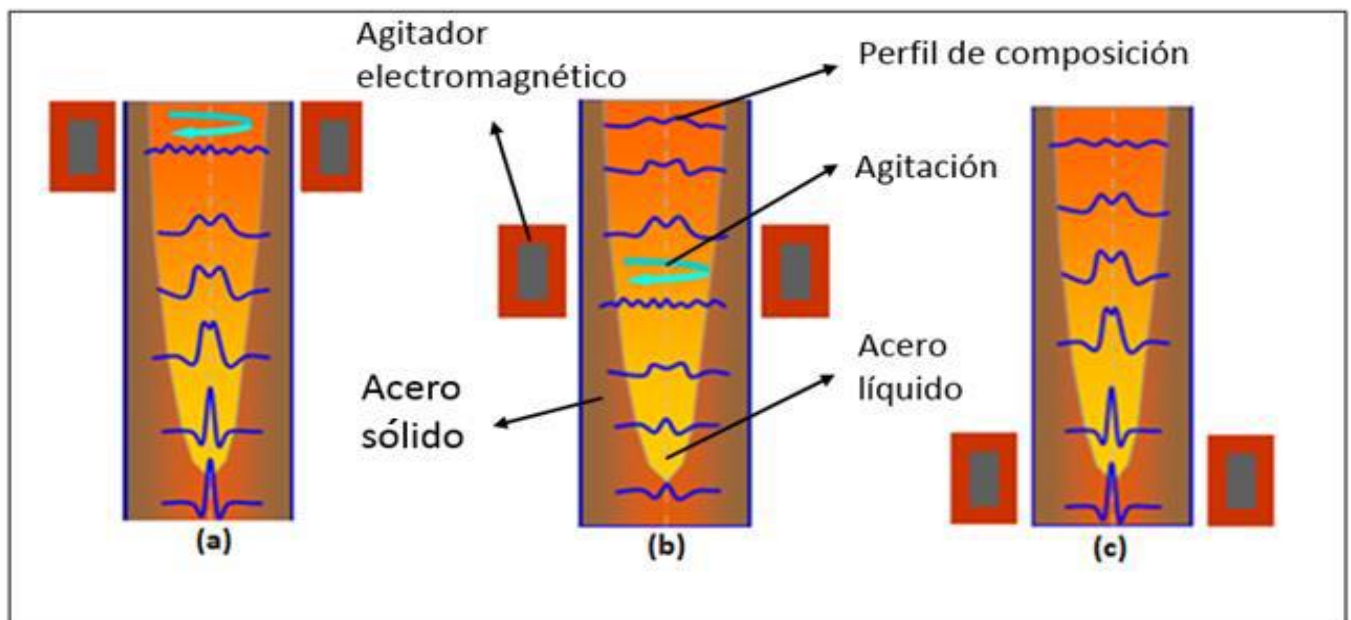
- Temperatura de acero en la artesa
- Composición química del acero
- Velocidad de colada
- Intensidad del enfriamiento secundario

Efecto de la posición de agitadores electromagnéticos de hebra

La posición de los agitadores electromagnéticos de hebra dentro de la máquina de colada continua tiene un efecto considerable en la disminución de la segregación central del producto colado. A continuación se describen los efectos de las distintas posiciones de los agitadores electromagnéticos de hebra:

- Posición alta: La posición del agitador se encuentra en etapas muy tempranas de solidificación, la porción de acero que aún no solidificó es muy grande y la segregación central tendrá lugar aunque se utilice agitación electromagnética.
- Posición óptima: Existe una proporción ideal entre la fracción solidificada y la líquida, el rendimiento del agitador es maximizado con esta proporción.
- Posición muy baja: La solidificación se encuentra muy avanzada, la viscosidad de la zona pastosa es muy alta y no se puede mitigar la segregación central.

Los tres casos distintos son respectivamente representados en la figura



Esquema efectos posición de agitador de hebra

De la figura anterior se pueden apreciar que la segregación central es controlada únicamente cuando se tiene el agitador en una posición óptima. Conocer la cantidad de acero líquido que llega al agitador de hebra, resulta esencial para optimizar el funcionamiento de éste.

Para el caso particular del proceso de colada continua de palanquillas de se recomienda tener una sección no solidificada de 50 mm de espesor al momento de llegar a los agitadores electromagnéticos de hebra



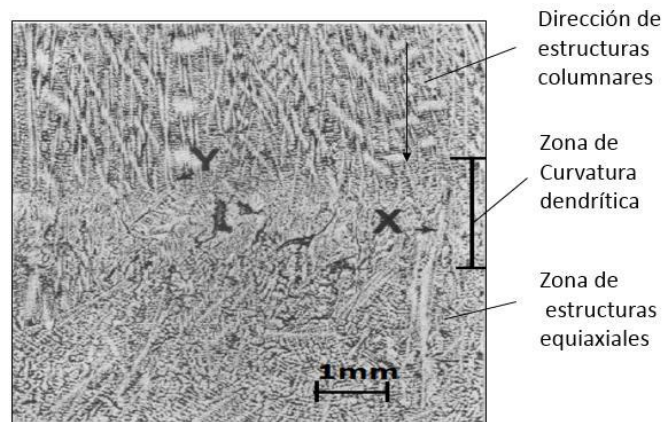
Agitadores de hebra instalados en la máquina de colada continua

- **Agitador Electromagnético**

Efectos estructurales de la agitación electromagnética sobre la solidificación

La agitación electromagnética durante el proceso de colada continua producirá modificaciones en el proceso de solidificación, esto debido a la agitación que provoca en la porción de acero líquido aun remanente dentro del producto colado. Dentro de los efectos de esta agitación se destacan:

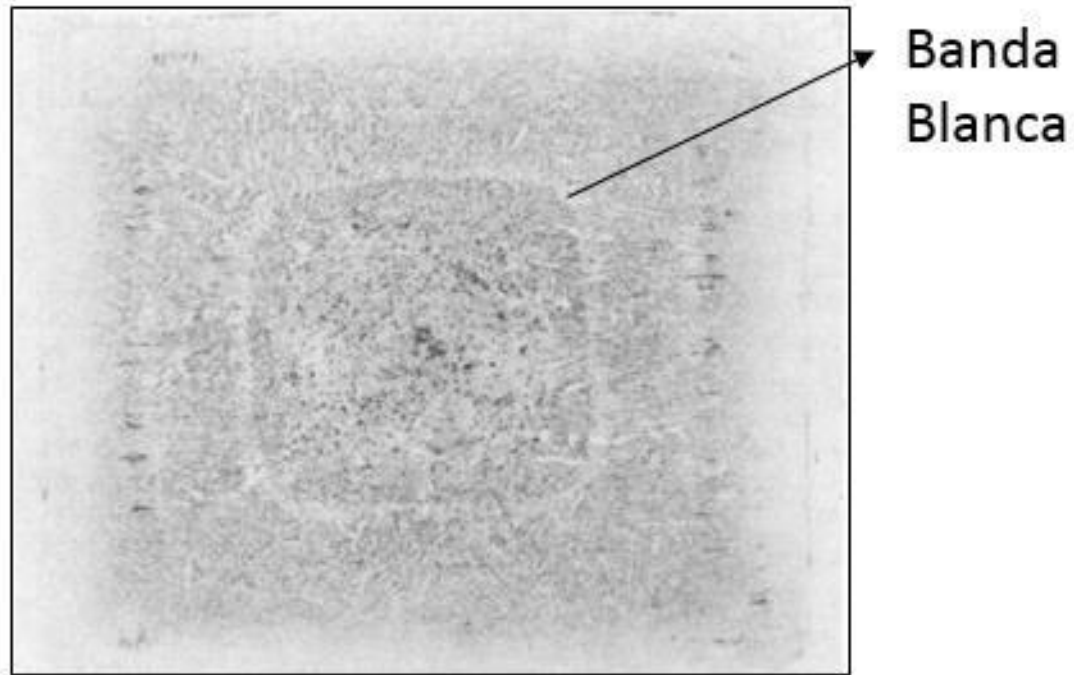
- **Curvatura dendrítica:** Las dendritas existentes en la interfase sólido-líquido de la sección colada, son estructuralmente modificadas por la agitación que se provoca al momento de someterse al efecto del campo electromagnético. Esta agitación provocará una modificación en la dirección de solidificación de las dendritas columnares o resultarán en la transición de granos columnares a granos equiaxiales.



Micrografía revelada mediante tratamiento con prical/nital.

- **Banda de segregación:**

El uso de agitación electromagnética durante el proceso de colada continua produce un defecto visual denominado banda de segregación o también conocida como banda blanca. La banda blanca es apreciable en la sección transversal del producto colado luego de realizarse un macro ataque con reactivos sobre la muestra en estudio.



Banda blanca en sección transversal de palanquilla, revelada con impresión de azufre

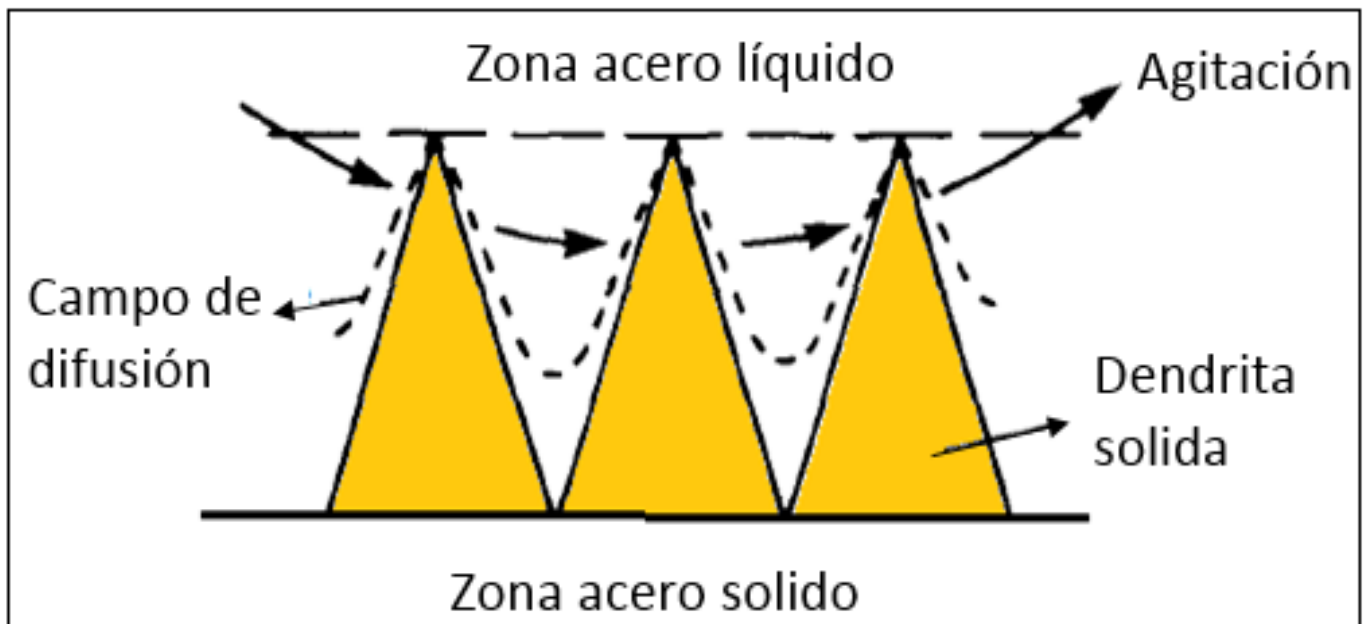
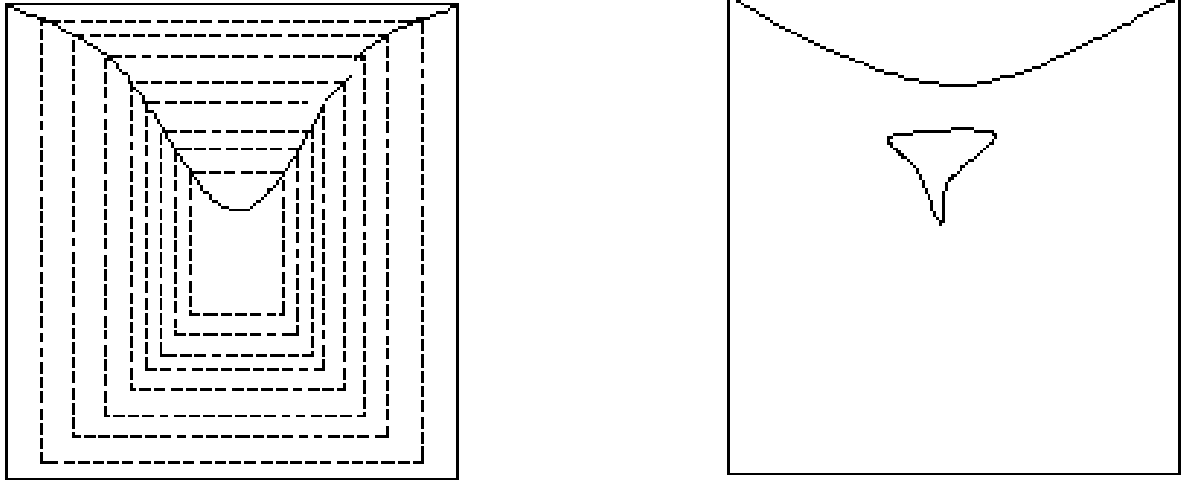


Ilustración esquemática del mecanismo de lavado de soluto

5.1.3. Defectoscopía del acero colado

- Defectos de solidificación

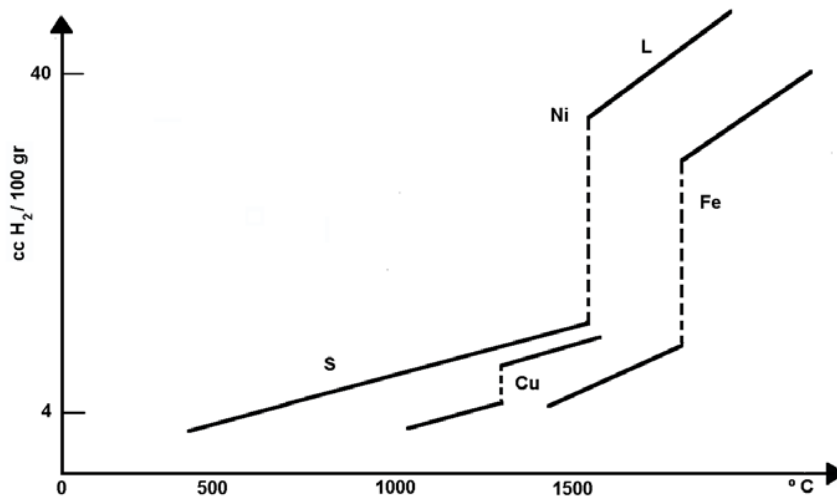
Cuando un metal solidifica, su volumen disminuye y por consiguiente, pueden producirse cavidades en la pieza sólida cuya distribución depende de la forma del lingote y modo de enfriarse. Uno de los defectos más comunes es el RECHUPE. Este rechupe también puede ser interno si la superficie se enfría muy rápido.



Esquema de la formación del rechupe.

El rechupe es un defecto que no permite aprovechar la totalidad del lingote, da lugar a pliegues que no se sueldan durante la laminación, debiendo descartarse aquel pedazo. Hay varios modos de minimizar este defecto con técnicas especiales de lingoteado, tales como aislantes, exotérmicos, montantes, etc.

Otro defecto común son las porosidades o sopladuras producidas por atrapado de gases en el sólido. Este problema se presenta porque el metal líquido disuelve más cantidad de gas que el sólido tal como lo ilustra la figura para el hidrógeno.

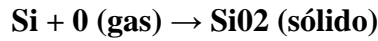


Disolución de hidrógeno en distintos metales.

La porosidad también se puede formar en los aceros que no han sido completamente desoxidados ya que el carbono disuelto reacciona con el óxido desprendiendo gas monóxido de carbono.



Este problema se puede minimizar colando a la menor temperatura posible o haciendo que el gas precipite por combinación con un desoxidante, por ejemplo:

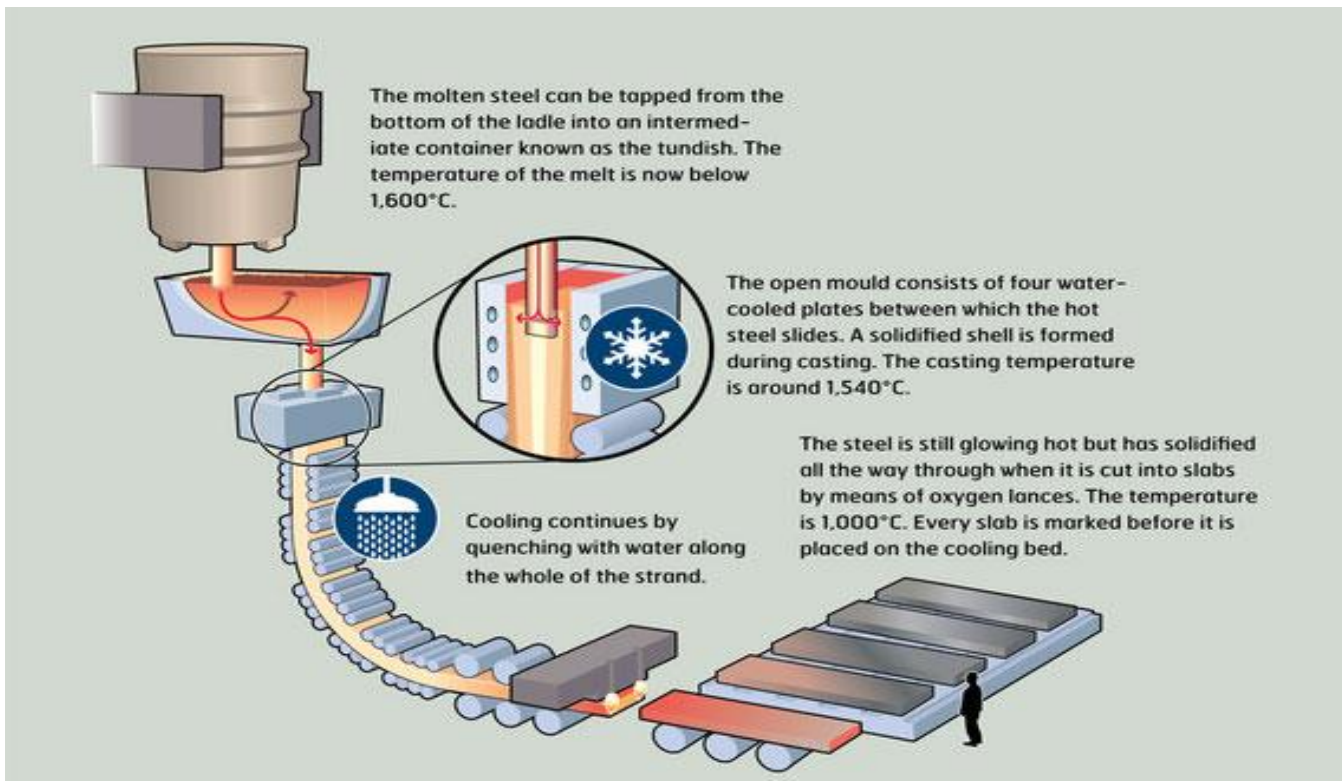


La fusión en vacío también es un método que resulta de utilidad para atacar este problema.

En la solidificación de aleaciones existe la tendencia del sólido a tener una composición distinta a la del líquido que lo rodea, así las impurezas disueltas también tienden a permanecer en aquella porción de metal que solidifica al final. Ello acarrea que la pieza no tiene una distribución homogénea de la composición y por consiguiente sus propiedades mecánicas no son iguales en todos los puntos.

Este fenómeno se denomina **segregación**. Una segregación mayor tiene lugar también debido a la diferencia de densidad del sólido y el líquido. Por ejemplo, el carbono que solidifica primero en una fusión con 4,5 % C es mucho más liviano (densidad = 2.26) que el hierro líquido (densidad = 7.86) con lo que tiende a flotar terminando con una mayor concentración de carbono en la parte superior del lingote. Lo contrario pasaría en una aleación de Pb-Sn rica en plomo (densidad del Pb = 12, densidad del Sn = 7.30).

Un tipo de segregación muy dañina es la del azufre que con el hierro, forma un compuesto, FeS que funde a 900° C, mientras que si el S está combinado con el Manganeseo forma MnS que funde a 1600° C, razón por la cual a todos los aceros comerciales se agrega 0.5% Mn. Pero cuando hay alta segregación de S, el Mn puede no ser suficiente y se forma FeS que vuelve a licuarse cuando se forja el lingote a 1200-1300° C produciendo agrietamiento en caliente.



Procesos d solidificación en la colada continua.

- **Defectos en la solidificación final del Acero**

- Porosidad gaseosa

Contracción (diferencias)

En la solidificación el material llega a contraerse hasta un 7% del volumen del líquido. Si la contracción empieza en la superficie, se pueden formar cavidades en el interior del sólido. Si sus superficies se contraen de distinta forma, se pueden formar pequeños canales.

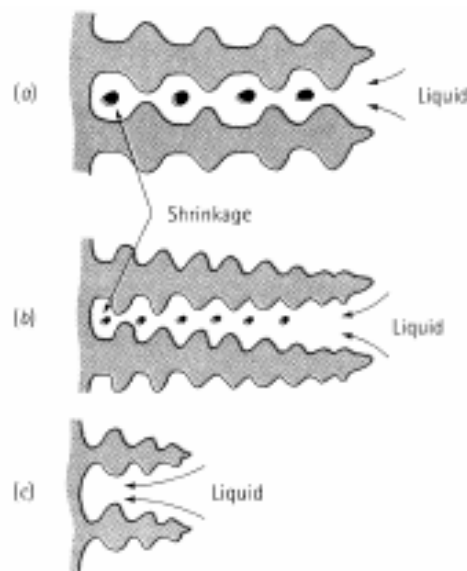
Solución:

Rellenar el sólido durante la solidificación

Contracciones interdendríticas: Se forman pequeños poros entre los brazos de las dendritas. Característico en dendritas largas y con brazos grandes (el líquido no puede entrar en los interespaciados)

Solución:

Ritmos de enfriamiento muy altos para disminuir el tamaño de las dendritas



Contracciones interdendríticas del acero.

Un metal en estado líquido puede contener cierta cantidad de gas disuelto. Al solidificarse, parte del gas queda atrapado en el interior del metal y forma burbujas. Éstas forman cavidades por donde el gas puede entrar o salir del metal (porosidad gaseosa). Ejemplo: H₂ y N₂

Soluciones:

- Mantener baja la temperatura del líquido
- Añadir materiales al líquido que formen compuestos sólidos con el gas
- Disminuir la presión externa (vacío) durante la solidificación para permitir la evaporación del gas

Las impurezas son sustancias extrañas que acompañan a los metales y aleaciones en el proceso de solidificación. Las impurezas se pueden clasificar en tres grupos: Metálicas, No metálicas o inclusiones y Gaseosas.

Las impurezas metálicas son aquellas que se alean con los metales que forman la aleación pasando a formar parte de la misma, y modificando por tanto sus propiedades. Estas impurezas no tienen porque ser en principio perjudiciales. Las inclusiones son impurezas de tipo no metálico que no se disuelven en el metal base quedando incluidas en la masa metálica de la aleación.

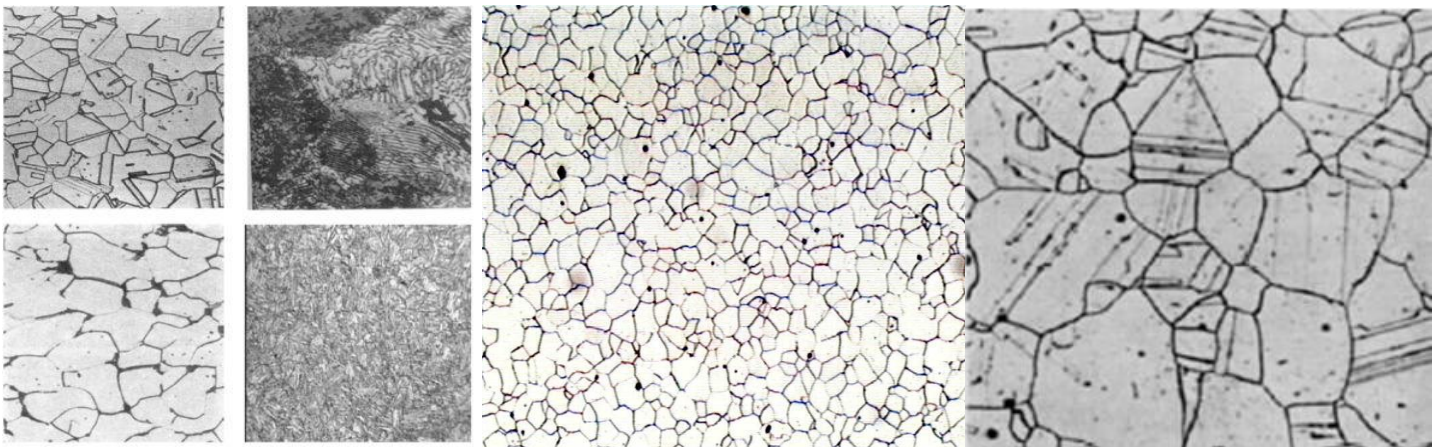
Son partículas extrañas ocluidas en la masa del material, las cuales pueden provenir de los propios moldes, como: trozos de ladrillo refractario del recubrimiento de los hornos, o de los contenedores usados para mantener el fundido, pueden también provenir de las escorias o ser productos de reacción en el proceso de obtención etc. Son inclusiones típicas los óxidos y sulfuros en los aceros, o pequeñas partículas incluidas en los vidrios ordinarios, etc. Estas suelen ser perjudiciales disminuyendo generalmente las propiedades mecánicas. Ejemplos de estas son el S y Mn en los aceros.

Las impurezas gaseosas se forman al quedar atrapadas dentro del metal líquido burbujas de aire o gas. Muchos metales en estado líquido disuelven gran cantidad de gases, sin embargo al solidificar, solo mantienen una pequeña cantidad en disolución, el resto forma burbujas que pueden quedar atrapadas en el metal sólido. También se pueden formar por reaccionar el metal caliente con el molde, por arrastrar aire, en el proceso de vertido, o por reacciones en el metal líquido.

Estos defectos si son muy grandes, en general son perjudiciales, pudiendo dar lugar a grietas internas y disminuyendo bastante las propiedades mecánicas. También en un sólido pueden aparecer los denominados rechupes, siendo estas cavidades producidas al contraerse el material durante la solidificación.

Los aceros tienen gran tendencia a disolver oxígeno en el proceso de fabricación. Durante la solidificación el oxígeno se combina con el carbono presente en la aleación formando CO que puede quedar atrapado produciendo pequeñas burbujas. La adición de Al evita la formación de CO formando Al_2O_3 , dado que el Al tiene mayor afinidad por el oxígeno que el carbono. Cuando se desoxida el acero completamente se le denomina calmado. Cuando no está totalmente desoxidado se dice que el acero es efervescente.

Este último está formado por una gran cantidad de microporos muy pequeños, en estas condiciones los aceros son muy aptos para embutición de chapas. Otros defectos de tipo volumen son las grietas producidas en los procesos de conformado (fundición, forja, laminación, soldadura, etc.). Todos estos defectos son de gran importancia en el comportamiento del material reduciendo en general y a veces drásticamente la resistencia mecánica, eléctrica, etc.



Micrografías diversas de impurezas presentes en los aceros.

- **Ensayos de Defectoscopios y Estructuroscopia**

La investigación de defectoscopia con corriente de Foucault es un método electromagnético usado para todos los materiales metálicos tales, como: aceros de carbón, aceros de baja y alta aleación, materiales para herramientas, hierro fundido, metales de color y sus aleaciones. El método de la corriente de Foucault se usa para todos los materiales que conducen la corriente eléctrica, es decir, metales y, por ejemplo, grafito. Los productos de estos materiales pueden tener el estado de:



Ejemplos de partes de las máquinas que se les realiza defectoscopia

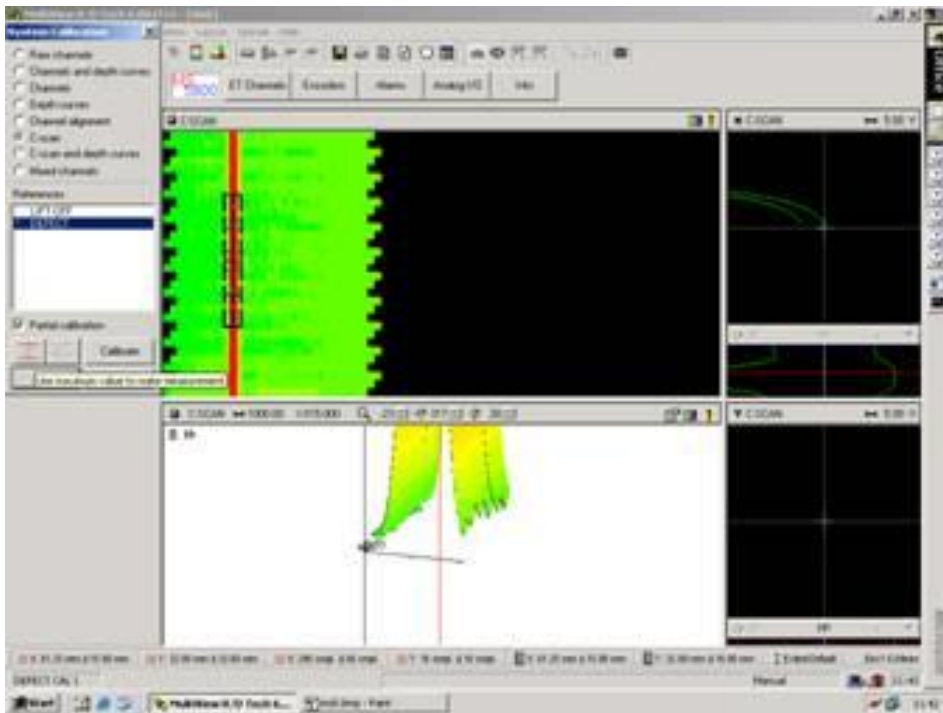
- Partes de las máquinas tratadas de forma mecánica
- Fundiciones
- Piezas forjadas
- Productos tratados de forma plástica
- Productos extruidos
- Soldaduras

El empleo del método de la corriente de Foucault para evaluar el estado técnico de las partes de las máquinas y dispositivos así como de las uniones permite prevenir las averías ocasionadas por la fatiga de materiales a consecuencia de la explotación y permite eliminar los defectos de materiales surgidos en la etapa de producción y/o fundición.

Este método es uno de los ensayos no destructivos de más alta credibilidad. Su muy alta sensibilidad es una enorme ventaja. La detección de roturas por debajo de los 0,1 mm es estándar y no es ningún problema. El análisis de la señal visible en el defectoscopio se realiza al corriente.

Las ventajas básicas del ensayo de Foucault son las siguientes:

- ✓ Muy alta credibilidad de los ensayos
- ✓ Muy alta sensibilidad de los ensayos
- ✓ Alta rapidez de la interpretación de los resultados
- ✓ Posibilidad de investigar todos los metales sin ninguna excepción
- ✓ La investigación puede tener lugar sin eliminar las capas de protección tales, como: pintura, caucho, plástico
- ✓ Posibilidad de investigar a través de las capas metálicas que no sea el material del suelo: zinc, aluminio, titanio, circonio, acero de aleación
- ✓ Falta de limitaciones ocasionados por malas condiciones del tiempo, como, por ejemplo, durante las investigación de penetración o magnéticas
- ✓ Falta de limitaciones a falta de débiles condiciones de iluminación
- ✓ Posibilidad de realizar investigaciones submarinas



Software empleado para la realización de defectoscopías en metales.

Una de las técnicas más modernas de este método son ensayos de Foucault de normalmente mayores superficies a través del empleo de sondas de transductores conocidos como Phased Array. El defectoscopio empleado en tales casos permite guardar, así denominado C-scan, además de la tradicional forma de interpretación, es decir, A-scan. C-scan es la imagen de la superficie escaneada con la marcación de los defectos detectados.

El registro completo de la señal permite realizar la investigación completa y constituyen una importante parte del informe. El ensayo de Foucault no solamente detecta tales defectos como roturas de fatiga sino que también las roturas de corrosión intercrystalina y de tensión o bien los cambios estructurales ocasionados con la actividad de una alta temperatura o bien quemaduras de pulido.

Un área separada del empleo de los métodos de la corriente de Foucault es estructuroscopía dentro de la cual podemos realizar:

- ✓ Medidas del contenido de la etapa de ferrita delta de acero
- ✓ Medida de la dureza de las partes tratadas con calor: rollos, casquillos, engranajes dentados
- ✓ Medida del espesor de la capa carburada
- ✓ Medida del espesor y del grado de difusión de las capas tratadas con deposición catódica con plasma
- ✓ Determinación de la calidad de la superficie renovada por soldadura

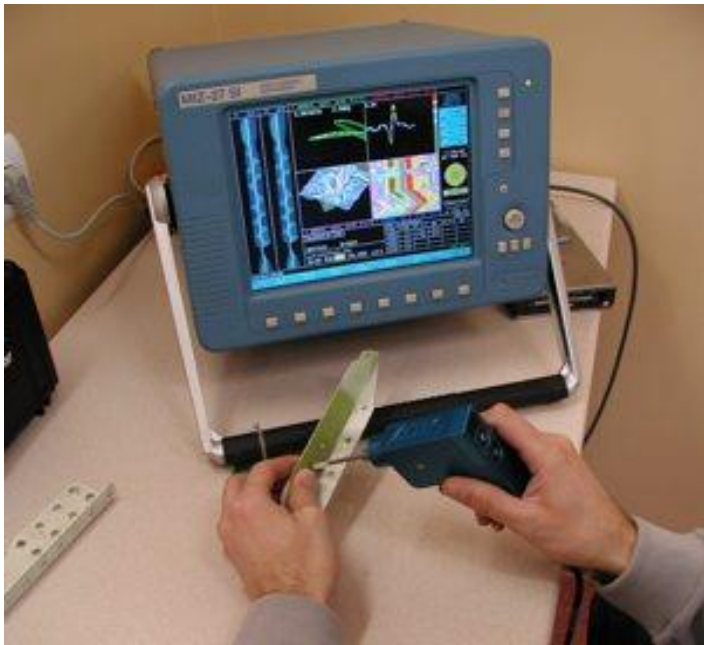
El ensayo ET que tiene como objetivo la detección de las roturas en las soldaduras con éxito sustituye el método magnético y de penetración y adicionalmente no requiere ninguna preparación especial de la superficie. Además, una investigación mucho más rápida con el método de Foucault que Mt ó PT puede realizarse tanto en las soldaduras del acero carbónico ferromagnético así como de los aceros de aleación (inoxidables) o chapados o bien protegidos con la capa de zinc, aluminio o austenita.

Asimismo, no es ningún problema realizar la investigación, donde las superficies están pintadas con pintura, cubiertas de plástico o de caucho, lo cual, en caso del método de penetración o magnética requiere costoso pulido.

Los defectoscopios empleados, como, por ejemplo Zetec MIZ-21B es un dispositivo móvil alimentado con baterías con una completa gama de sondas especializadas para escanear soldaduras y superficies de soldaduras. Unas difíciles condiciones del tiempo, las altas o bajas temperaturas o la humedad muchas veces delimitan las investigaciones MT y PT, en este caso, no es ninguna limitación técnica.

Algunos ejemplos del empleo de la corriente de Foucault para los mencionados arriba sectores:

- ✓ Soldaduras tanto de materiales ferromagnéticos como no ferromagnéticos y chapados
- ✓ Detección de los defectos en rodillos de los generadores y turbinas, bielas, cojinetes, tornillos y cuerpos de fundiciones
- ✓ Investigación de revestimientos de austenita en reactores químicos
- ✓ Las soldaduras de tubos en los fondos de intercambiadores de tamiz
- ✓ Las medidas de las capas metálicas y no metálicas en el suelo de metal
- ✓ Sorteo de metales y de aleaciones
- ✓ Investigación de los agujeros roscados en las partes de las máquinas



Proceso de defectoscopia en distintos aceros.

5.2. Colada en lingotera

El acero en estado líquido es colado en la lingotera e inmediatamente comienza a solidificar, primero lo hace el material periférico en contacto con las paredes frías y luego el fenómeno progresa paralelamente a ellas, hacia el interior.

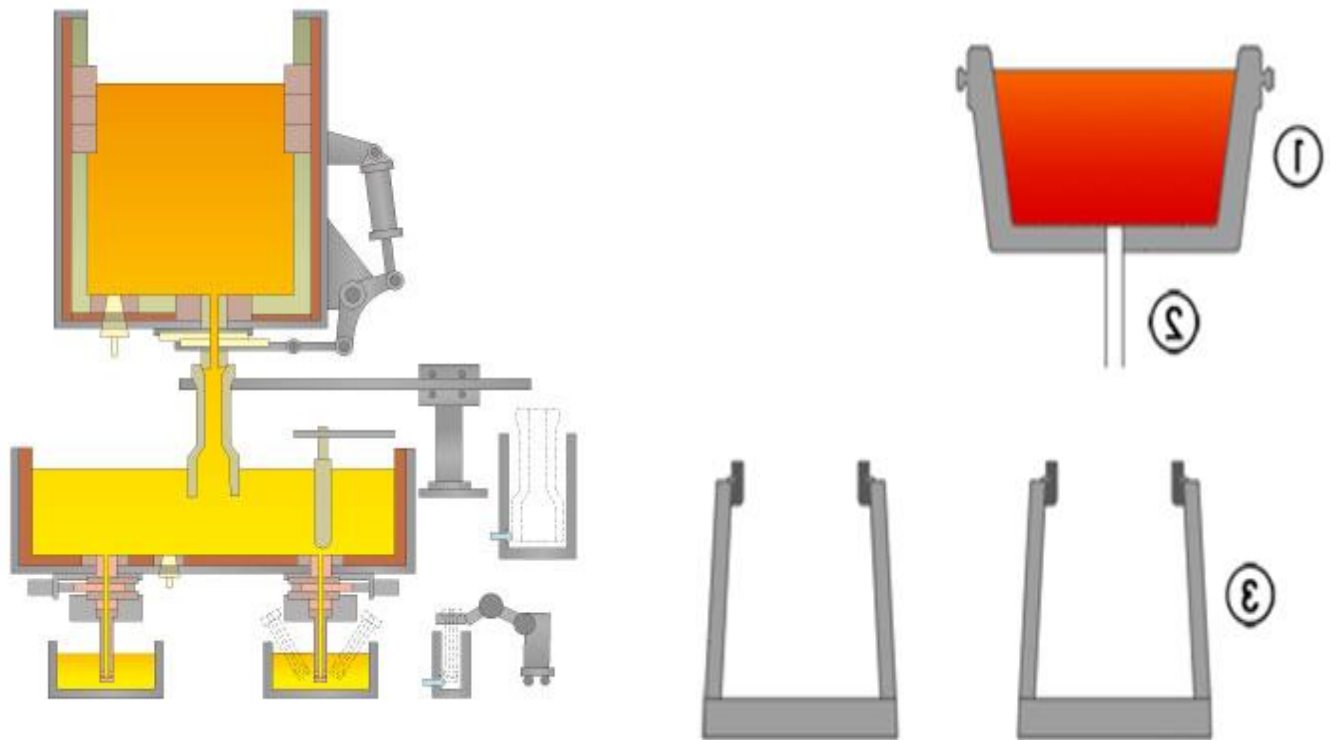
Gradualmente, el líquido se va solidificando hacia la región central y se produce por contracción una cavidad denominada rechupe, en la parte superior del lingote. Finalmente se extrae el lingote de la lingotera.

Características de la lingotera: En general para evitar que el acero solidifique en la parte superior del lingote y genere un volumen vacío en el centro, se agrega en la parte superior de la lingotera una pared de material refractario que impide la solidificación del acero.

Además las paredes de la lingotera se encuentran inclinadas para facilitar la extracción del lingote. Por otro lado, las lingoteras pueden tener diferentes formas de acuerdo al producto final que se quiera obtener: Lingotes de sección rectangular, para planos. Lingotes de sección cuadrada, para no planos. Lingotes de sección poligonal, para la forja.

A la salida del horno tendremos acero líquido que necesita tratamientos posteriores con objeto de conformar los productos. Los procesos a usar son:

- ✓ Colar el acero sobre moldes con la forma de la pieza. (acero moldeado)
- ✓ Colar el acero líquido sobre moldes (lingoteras) para su transformación posterior por deformación en caliente.
- ✓ Colada continua, el acero se cuela en un molde abierto del que se extrae de forma continua el producto solidificado.



Simulación del llenado del metal en lingoteras.

Una vez completado el afino del acero en la estación de Metalurgia Secundaria, el caldo se pasa a la cuchara de colada (si ya no estaba en ella por ser horno-cuchara), de donde puede seguir cuatro caminos alternativos:



Colada en lingotera del acero

Es el sistema que se podría denominar como clásico o antiguo. La cuchara llena una sola lingotera grande o un grupo de lingoteras pequeñas o medianas. Si las lingoteras son alargadas se obtienen lingotes de sección cuadrada, rectangular o poligonal (“palancones”), los cuales pueden seguir dos caminos:

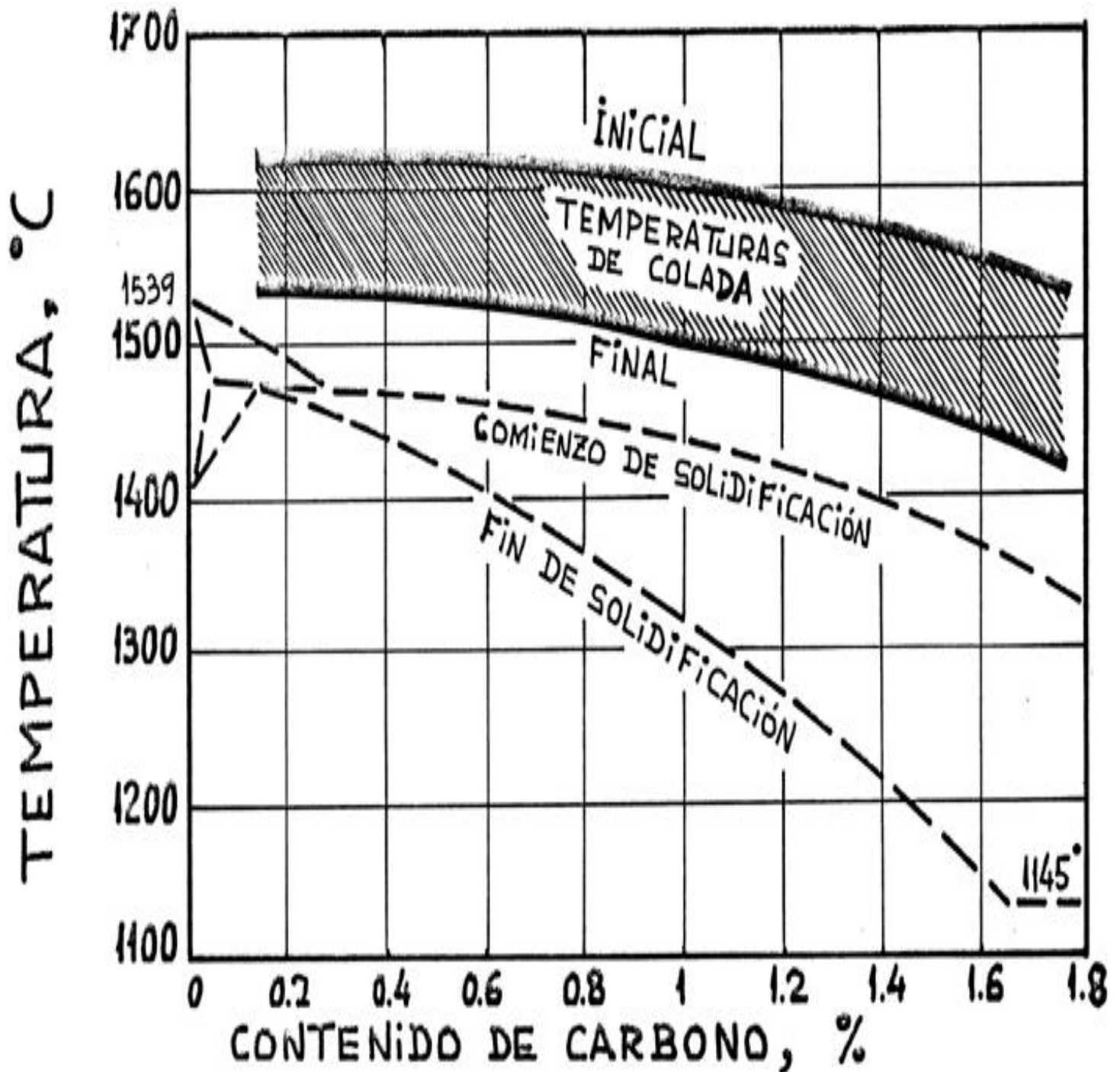
El primero de ellos sería el paso por un tren de desbaste para palancones (tren “blooming”) en el que esos “blooms” son transformados en “palanquillas”. Éstas, previo paso por los hornos de recalentamiento, pasarían a la laminación en caliente y después, si procede, a la laminación en frío para obtener los “productos largos”.

El segundo sería deslingotar y recalentar para tratamiento de forja libre, bien en martillo de percusión o bien en prensas de forja. Es el proceso conocido como “grandes forjas”. Se obtienen así piezas forjadas de gran tamaño como cigüeñales y árboles de levas de motores marinos, grilletos y otras piezas navales, cilindros de laminación de acero y otros materiales, ejes de hélice de buques, ejes de centrales eléctricas, etc.

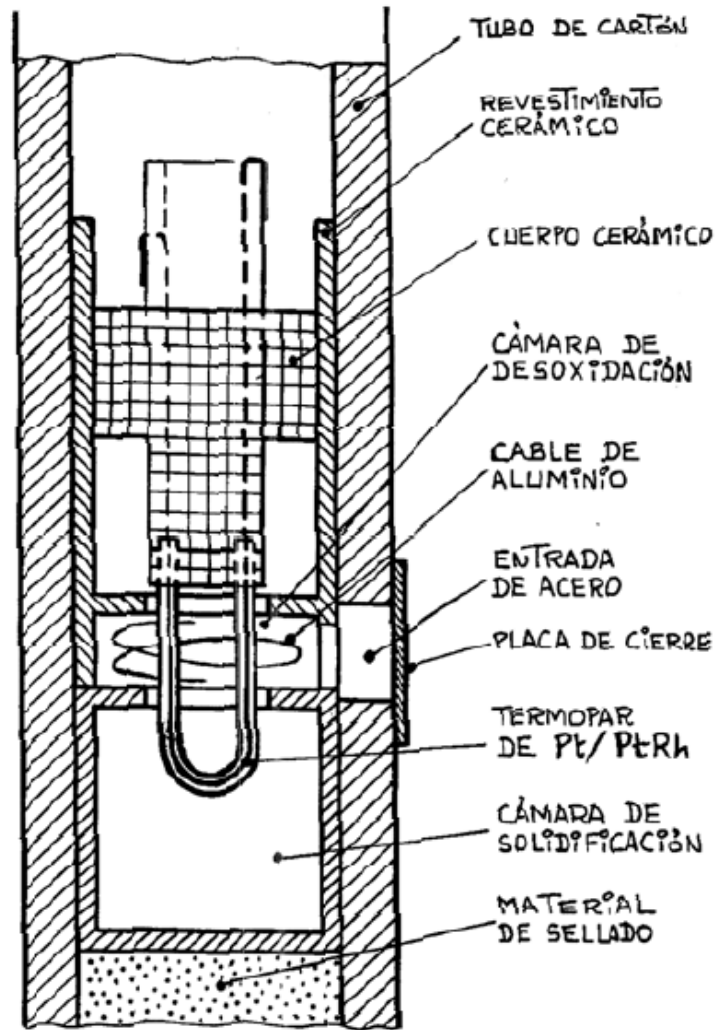
Si las lingoteras son paralelepípedicas se obtienen lingotes (“petacas”) de los que en martillos, prensas de forja o trenes desbastadores “slabbing” se obtienen planchones. Estos planchones se pasan a los hornos de recalentar, y de ellos a la laminación en caliente y posteriormente a laminación en frío. Se obtienen “productos planos”, como se denomina a la “chapa naval” (chapa gruesa) o a la banda en todas sus versiones.

- Temperatura de colada
- ❖ Determinación de la temperatura

Uno de los detalles que deben atenderse con más cuidado y que influyen más sobre la calidad del acero es la temperatura de colada, que a su vez es función del punto de fusión del acero a colar. En los aceros al carbono no aleados el punto de fusión lo fija el sitio en que la vertical correspondiente al contenido de carbono corta a la línea de "líquidus" en el diagrama hierro-carbono. El contenido de carbono en estos aceros no aleados puede medirse en la planchada de trabajo del horno empleando sistemas basados en análisis térmico en solidificación; un sensor consumible para este fin se ve en la figura.



Temperatura de fusión y colada de aceros



Sensor para la determinación del contenido en carbono en el acero mediante análisis térmico

En los aceros aleados la previsión de temperatura se hace mediante una fórmula polinómica en la que el minuendo es 1535 °C (punto de fusión del hierro puro) y los sustraendos son una serie de monomios funciones. Cada función expresa numéricamente la influencia del elemento de aleación respectivo. En el caso de aceros especiales los elementos de aleación hacen descender la temperatura de solidificación y por ello sus temperaturas de colada son inferiores a las de aceros ordinarios con el mismo contenido de carbono

Temperatura excesiva origina consumo de energía en la fusión, desgaste de refractarios y disolución de gases por el acero líquido. Temperatura insuficiente provoca la inutilización de las cucharas por la formación de “lobos”, junto con problemas de falta de fluidez del acero en la artesa (“tundish”) de la máquina de colada continua.

Para obtener buenos resultados es necesario un control muy cuidadoso de la temperatura del baño en los hornos. En realidad, en la práctica normal, las temperaturas del baño metálico en los hornos de acero varían dentro de un margen relativamente pequeño, debiendo ser unos 80 a 150 °C superiores a la temperatura de fusión del acero (unos 1450 – 1525 °C).

En el momento de colar a las lingoteras el caldo debe estar 40 – 75 °C por encima del punto de fusión. Si es en máquina de colada continua, y dado que el tiempo de colada es sustancialmente mayor, el exceso de temperatura que ha de tener el caldo en la cuchara debe ser también mayor.

Al estudiar la temperatura de colada de los aceros se observa que su temperatura de solidificación varía principalmente con el contenido de carbono y que, además, los aceros no tienen un punto de solidificación definido. Hay una etapa en la que se encuentran en estado pastoso y cuya duración varía ampliamente de unos casos a otros.

El período en el que los aceros se encuentran en estado pastoso es muy considerable en el caso de los aceros altos en carbono y prácticamente no existe en los aceros de bajo carbono (aceros efervescentes, por ejemplo) como se evidencia observando el diagrama Fe-C visto en las figuras anteriores. En este último caso, por ser la solidificación mucho más brusca es mayor el peligro de que por falta de atención solidifique el acero en la cuchara. Estas consideraciones son aún más críticas en el caso de colada continua.

Medida de la temperatura

En tiempos antiguos la medida de temperatura del acero líquido se hacía "a ojómetro". Por ejemplo, se vertía algo de caldo en la planchada del horno y se veía la distancia que recorría antes de solidificar. En otros casos se colaba un lingotillo y se introducía una varilla o alambre grueso en él; se contaba el tiempo que ese lingotillo tardaba en solidificar y agarrar la varilla, y este tiempo era función directa de la temperatura.

También observando el color y brillo del acero en el horno o cuchara. En este caso había que tener en cuenta que si la nave estaba oscura o era de noche el acero parecía mucho más caliente que si estaba recibiendo la luz del sol o había mucha claridad.

A mediados de siglo pasado aparecieron los pirómetros de medida de temperatura. Primero fueron los ópticos de radiación, también llamados "de desaparición de imagen". Consisten en un anteojo con el que se observa el caldo.

Dentro del anteojo hay un filamento por el que pasa una corriente, producida por pilas, que se varía mediante un reostato. Cuando el filamento tiene el mismo brillo que el caldo que se encuentra detrás deja de verse. Pues bien, la corriente que pasa por ese filamento estará en relación directa con la luminosidad del caldo y, por lo tanto, con su temperatura

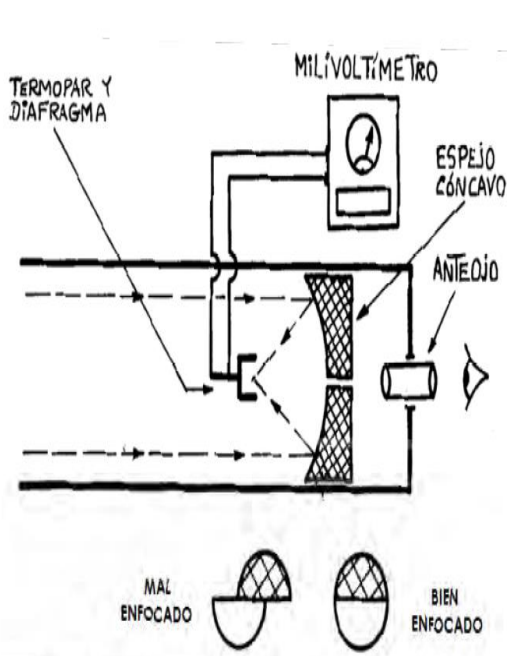


Figura 10 Pirómetro de radiación total

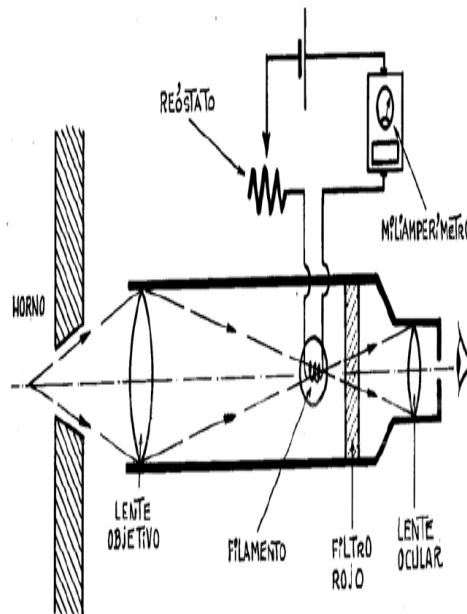


Figura 11 Pirómetro de radiación visible

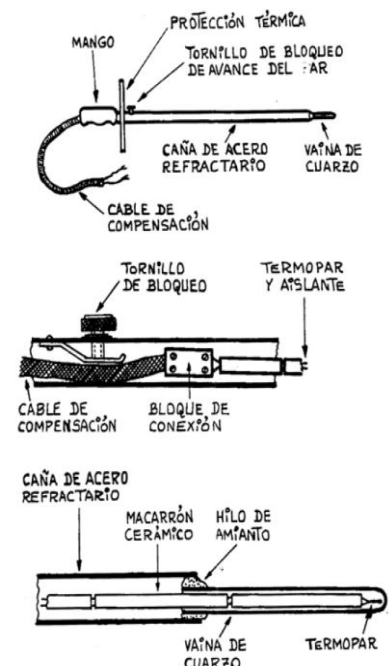


Figura 12 Pirómetro de inmersión no consumible

Tipos de equipos auxiliares para la medición de temperatura.

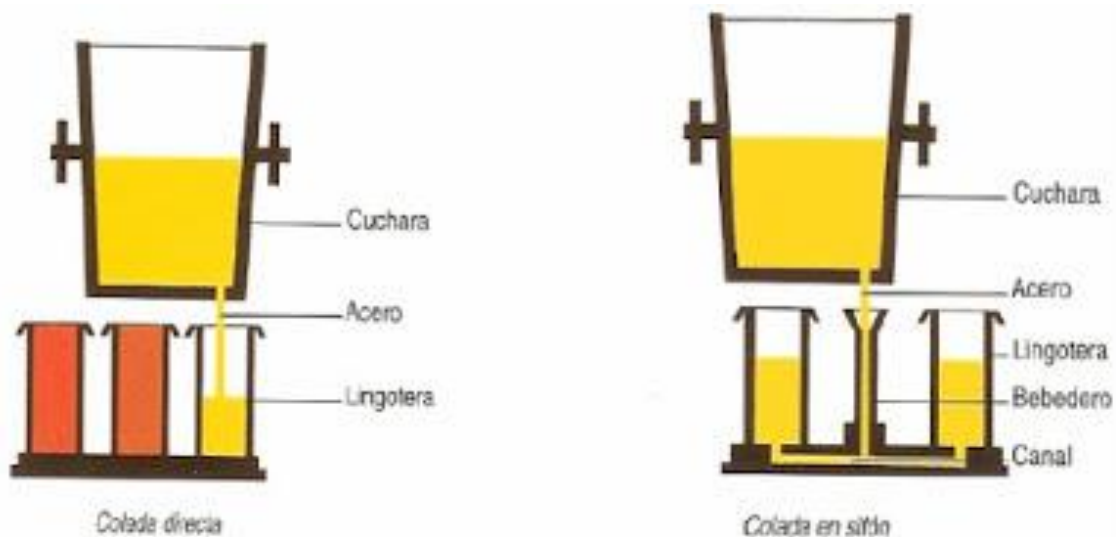
5.2.1. Tipo de lingoterías

Por colada (no continua) en lingotería se obtienen lingotes ('Barre' o 'Gussblock') — que se moldean posteriormente en trenes de laminación o en prensas para formar planchones, pletinas, palanquillas o palancones— o directamente piezas de fundición.

El acero se cuela en lingoterías, de forma troncocónica. Este llenado de lingoterías puede ser:

Colada directa o colada por la parte superior de la lingotería

Colada en sifón, o colada por el fondo. Mayor calidad superficial.



Este tipo de fabricación ha desaparecido prácticamente, sustituido por la colada continua que ha eliminado trabajos penosos y los costosos trenes desbastadores blooming-slabbing. En la actualidad la colada en lingotería se aplica casi exclusivamente a la obtención de lingotes ("grandes forjas") para obtención por forja de piezas de gran tamaño.

- **Métodos de colada en lingotería**

Hay tres formas de llenado de las lingoterías, tal como se ve en la figura 14:

- Colada directa por la parte superior de los lingotes ("colada a fondo").
- Colada con sifón, utilizando un conducto central ("madre"), que sirve para llenar simultáneamente, por la parte inferior, varias lingoterías dispuestas en estrella.
- Colada a un recipiente o artesa intermediario, que sirve para llenar una o varias lingoterías con velocidad controlada de flujo de caldo.

La colada directa se efectúa posicionando la cuchara encima de cada una de las lingoterías y llenándolas cuidadosamente por su parte superior. Cada vez que la cuchara se coloca encima de una lingotería se abre la buza para dar paso al acero y, cuando va quedando llena se baja el vástago de mando y se cierra la alimentación de acero líquido.

Este sistema es menos complicado y más barato. El gradiente térmico es favorable, ya que en la parte superior de la cavidad queda caldo caliente en molde caliente y abajo queda caldo frío en molde frío. Este gradiente térmico favorable presenta menor sensibilidad al rechupe, lo que redunda a su vez en mayor aprovechamiento del lingote.

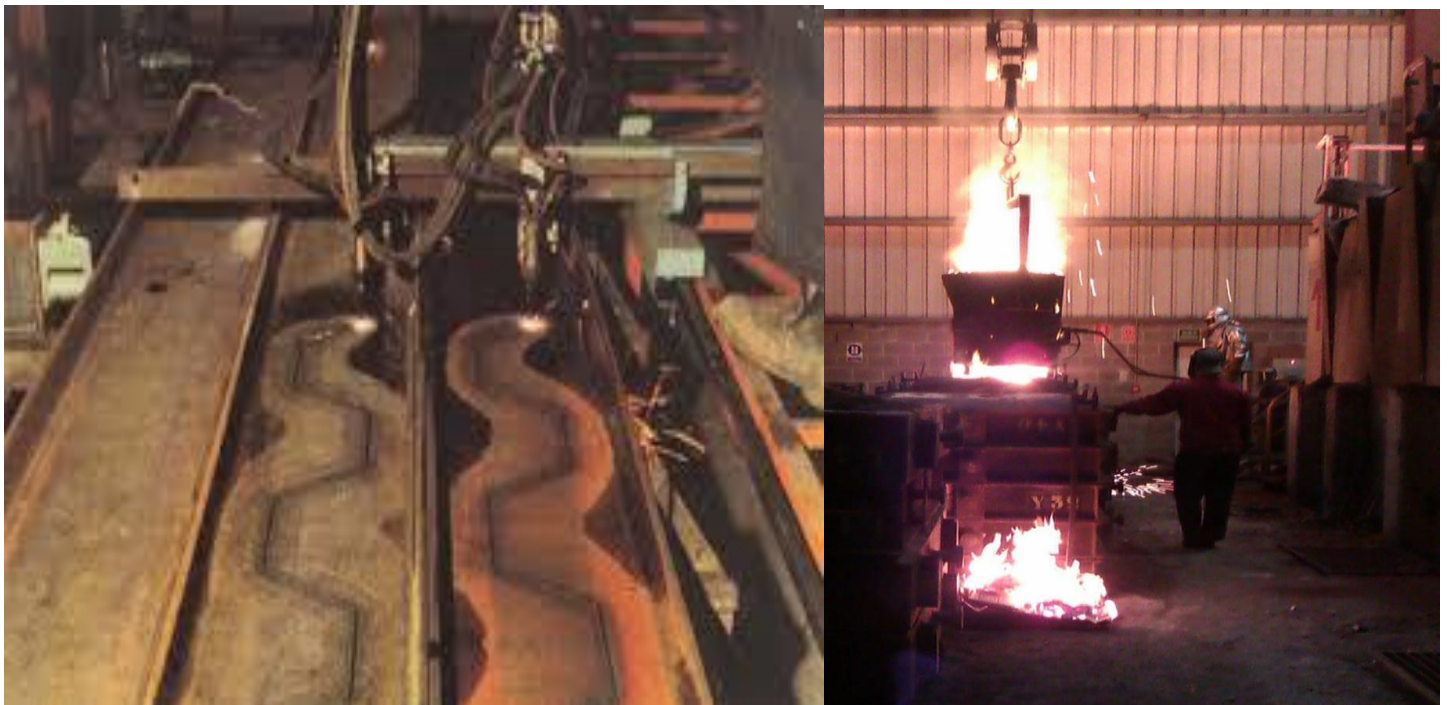
Como desventaja puede citarse el problema superficial derivado de las salpicaduras, con la necesidad consiguiente de escarpado) y el atrape de gases (porosidad) ocasionado por la turbulencia del llenado. El problema de las salpicaduras se mitiga empleando lubricante grafitico (“plombagina”) y polvo de cobertura.

En la colada por sifón se llenan simultáneamente varias lingoteras que se encuentran agrupadas alrededor de un conducto central cilíndrico llamado “bebedero” o “madre”. Por este bebedero se cuele el acero, el cual fluye hasta todas y cada una de las lingoteras por tubos de material refractario cerámico empotrados en unos canales de mampostería practicados en el fondo del foso de colada (“estrella”). Por efecto de vasos comunicantes el acero va subiendo a la vez por todas las lingoteras.

El sistema de sifón presenta la ventaja, en comparación con la colada directa, de ser una colada lenta y tranquila. Con ello se provoca muy poca turbulencia y salpicaduras, lo que mejora la calidad superficial y elimina el atrape de gases y formación de porosidad. Sin embargo, la preparación de los fosos de colada es una operación penosa, cara (mano de obra y tubos refractarios) y poco productiva. Por otro lado, el gradiente térmico es totalmente desfavorable, ya que queda caldo frío y molde frío en la parte superior y caldo caliente y molde caliente en la inferior, con un gradiente térmico justamente contrario al que debía ser.

Gradiente térmico inverso desfavorable que plantea problemas de contracción, mayor necesidad de mazarotaje y menor aprovechamiento del lingote (salvo en el caso de aceros efervescentes). En cuanto a calidad interna, puede haber defectos de inclusiones provocadas por el arrastre de los productos refractarios y cementos empleados en las tuberías cerámicas.

La colada con artesa, que es un método que se emplea en contadas ocasiones, se usa para algunos aceros especiales en los que se quiere regular con gran precisión la velocidad de colada del acero líquido que cae a las lingoteras.



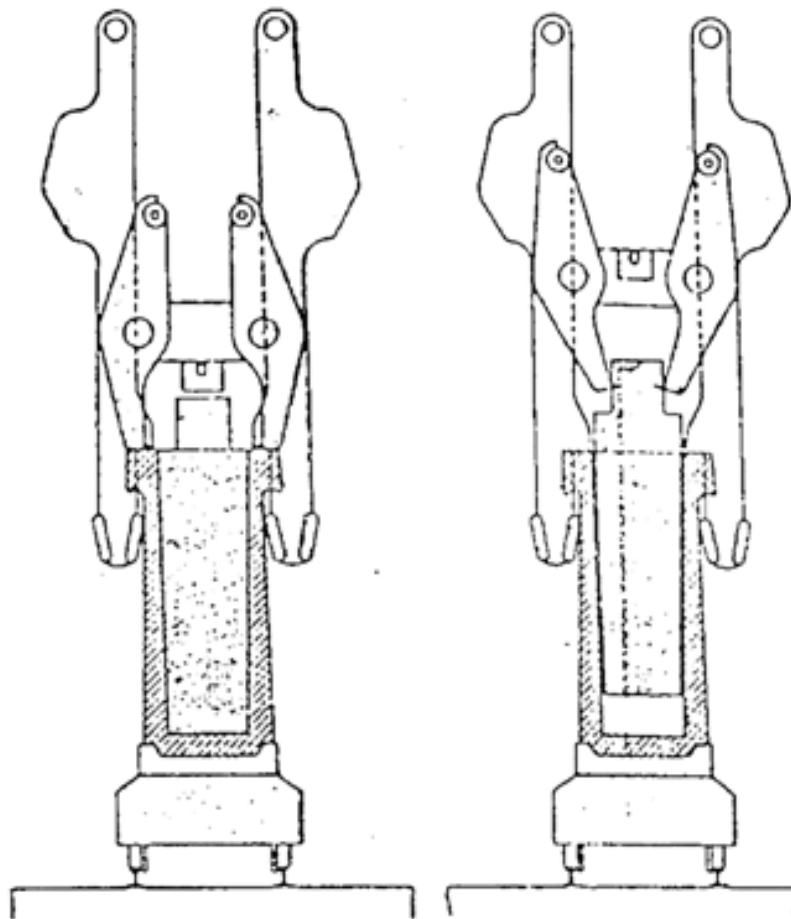
Lingotes de acero

El peso de un lingote oscila entre 25 kg y 300 t, aunque puede haberlos mayores. Su forma y dimensiones varían desde sección cuadrada de 75 mm de lado hasta octogonal de 1000 mm. La sección cuadrada es la más frecuente. Para perfiles planos (chapa) se adopta forma paralelepípedica (“petacas”), es decir, sección rectangular. Las aristas verticales se redondean para evitar la formación de grietas. La forma cilíndrica se emplea poco; generalmente para forja y estampación.

El desmoldeo puede hacerse simplemente colgando la lingotera de la grúa y dejando que resbale el lingote solidificado en su interior. Para facilitar la extracción del lingote solidificado suele añadirse durante la colada un polvo grafitico que actúa como lubricante y evita pegadura a la lingotera.

En algunas fábricas tienen una gran masa de acero contra la que se hacen chocar por balanceo los conjuntos lingote-lingotera hasta que se logra separarlos. Hoy día se emplean dispositivos hidráulicos o mecánicos para el desmoldeo.

En la figura siguiente puede verse el sistema extractor empleado para desmoldear lingotes de acero calmado (por tanto con mazarota) que se han colado en lingoteras con fondo y conicidad directa. En la figura 17 se representa la misma operación realizada con lingotes de acero efervescente (sin mazarota, por tanto) colados en lingotera de conicidad inversa y sin fondo. En la figura puede verse el desmoldeo de lingotes paralelepípedicos (“petacas”) destinados a laminación de productos planos.



Deslingotado de acero calmado, en lingoteras con fondo y conicidad directa

Los lingotes no son perfectamente prismáticos o cilíndricos, sino que se les da una forma ligeramente troncopiramidal o troncocónica, respectivamente, a fin de facilitar su despegue de la lingotera (por contracción del lingote) y posterior resbalamiento y extracción. Idealmente la conicidad debería ser inversa, es decir, con la base mayor arriba, para tener gradiente térmico favorable y evitar en lo posible la formación de rechupes internos que podrían inutilizar el lingote.

Para aprovechar el calor sensible de los lingotes desmoldeados se introducen, recién desmoldeados, en hornos “pits” (hornos de fosa), donde se calientan y se homogeneiza su temperatura (“soaking”, “empapado”). Una vez calientes se envían a los trenes desbastadores blooming-slabbing para reducir fuertemente su sección antes de pasar a los trenes de laminación propiamente dichos.

Los lingotes de aceros especiales han de sufrir un tratamiento de acondicionamiento superficial antes de pasar al desbaste o forja. Para ello se dejan enfriar lo más lentamente posible con el fin de que no adquieran temple y dureza. Después se someten a procesos de limpieza superficial por torneado, cepillado, burilado, escarpado o limpieza a la muela abrasiva.



5.3. Colada en Molde

Los procesos de fundición comienzan con la fusión del metal para verterlo en los moldes. Para fundir el metal se utilizan hornos de manga, eléctricos, de arco, de inducción, de solera (de reverberación) y de crisol. El horno de manga es el tipo de horno más antiguo usando en la industria de la fundición y todavía se usa para producir hierro fundido. Es un horno de cuba cilíndrica fija, en el cual se cargan por la parte superior capas alternadas de chatarra y ferroaleaciones, junto con coque y piedra caliza o dolomita.

El metal es fundido mediante contacto directo con un flujo a contracorriente de gases calientes provenientes de la combustión del coque. El metal fundido se acumula en el pozo donde es descargado mediante recolecciones intermitentes o mediante un flujo continuo. Los hornos de manga convencionales están revestidos con material refractario para proteger a la cáscara de la abrasión, el calor y la oxidación. El espesor del revestimiento va de 4.5 a 12 pulgadas.

El revestimiento usado más comúnmente es arcilla, ladrillos o bloques refractarios. A medida que el calor aumenta, el revestimiento refractario en la zona de fusión se fluidifica por la alta temperatura y la atmósfera oxidante y se convierte en parte de la escoria del horno.



5.3.1. Molde de arena

- **Moldes de Arena en Verde**

El **moldeo en arena verde** consiste en la elaboración de moldes partiendo de la mezcla de arena de sílice y bentonita (un derivado de la arcilla) a un 30 - 35 % con una cantidad moderada de agua.

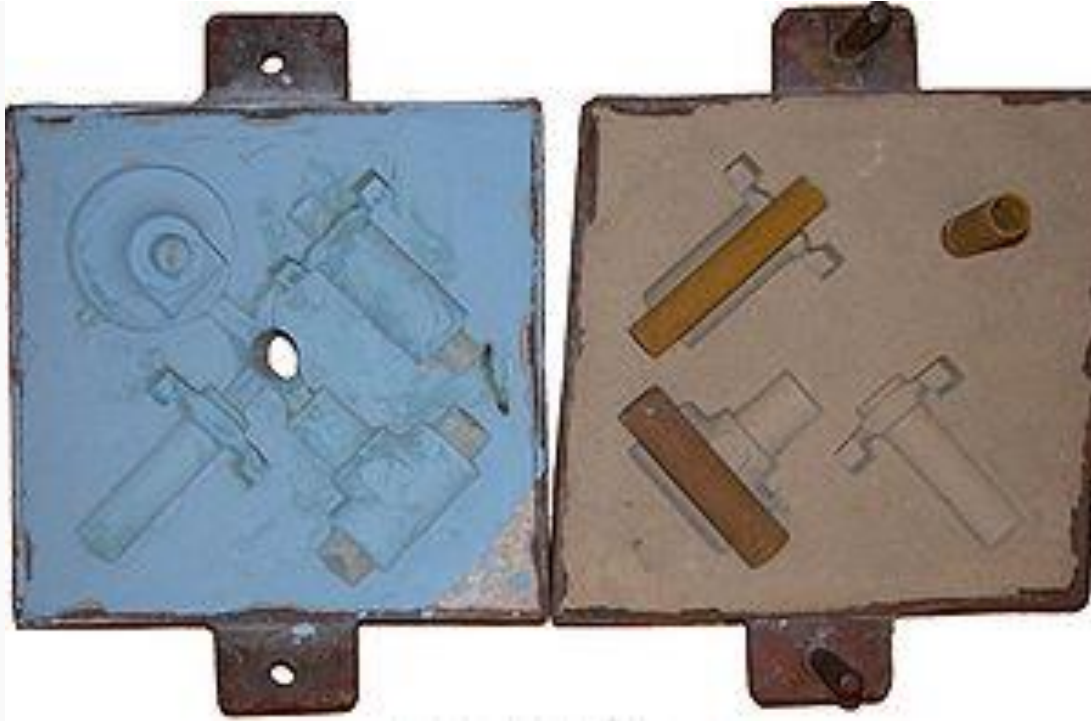


Fig. 1.21. Molde en arena verde: Muestra de un molde en arena verde listo para verter la fundición.

Esta primera elaboración de la mezcla se denomina arena de contacto, tras su primera utilización esta mezcla es reutilizable como arena de relleno, la cual al añadirle agua vuelve a recuperar las condiciones para el moldeo de piezas. De esta manera, se puede crear un circuito cerrado de arenería.

Existe otro tipo de preparado de la arena, es un tipo de preparado ya comercial, consiste en una mezcla de arena de sílice con aceites vegetales y otros aditivos. Este tipo de preparado no es reutilizable, ya que tras su utilización dichos aceites se queman perdiendo así las propiedades para el moldeo.

Por este motivo no es aconsejable su utilización en grandes cantidades y de forma continua en circuitos de arenería cerrados ya que su utilización provocaría el progresivo deterioro de mezcla del preparado del circuito y por lo tanto su capacidad para el moldeo. Este preparado facilita la realización del moldeo manual, ya que alarga el proceso de manipulación para realizar el modelaje.

- **Moldeo en arena en verde.**

Consiste en la elaboración del molde 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.



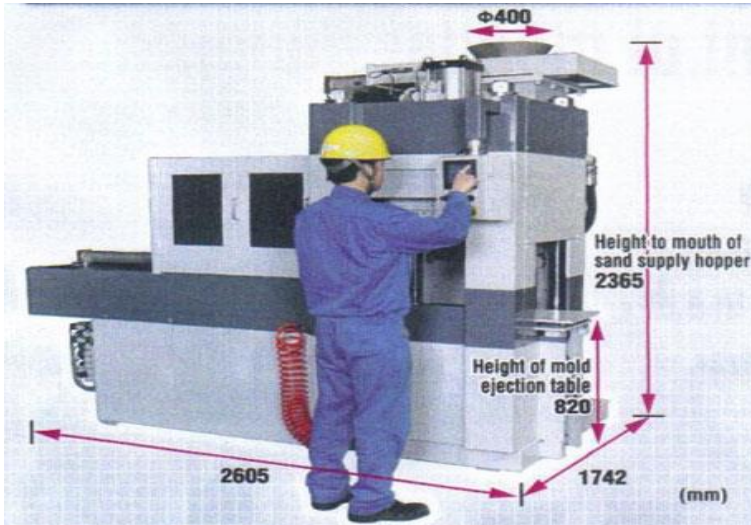
**Izquierda vaciado de moldes de arena en verde.
Derecha, compactado de la arena alrededor del modelo.**



Moldeo manual: Operarios realizando el vertido del metal en el molde

Existen dos tipos de moldeo en verde: el **moldeo manual** y el **moldeo en máquina**.

- ⌘ **Moldeo manual:** Consiste en el moldeo realizado de forma manual, y por lo tanto de una manera artesanal. Este tipo de modelaje se está perdiendo en la actualidad debido a la especialización, a la desaparición progresiva de los operarios de fundición y a la utilización de las máquinas de moldeo.
- ⌘ **Moldeo en máquina:** Consiste en el moldeo realizado por medio de una máquina de moldeo. Existen en la actualidad distintos tipos de máquinas para este fin: las máquinas multifunción, máquinas multipistones y máquinas automáticas. La utilización de este tipos de máquinas ha facilitado la automatización de este proceso, aumentando notablemente las cantidades productivas.

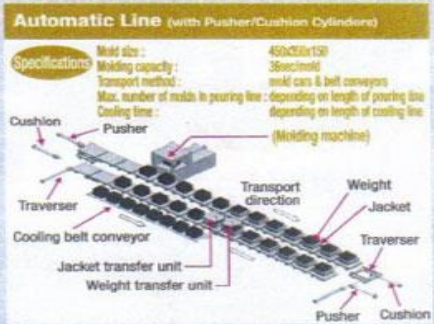
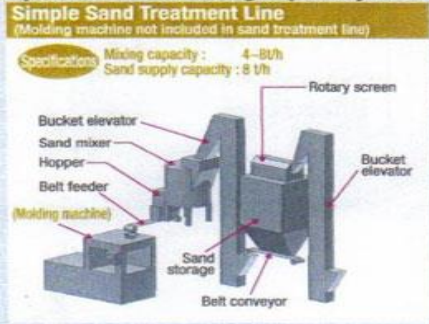


Data sheet

Mold size (mm)	Length(L)xWidth(W)	450x350
	Height(H)	(Cope) 150 / (Drag) 150
Molding method		Aeration & Squeeze
Molding speed (max)		36sec/mold 100molds/hr (without core setting) 1)
Squeeze pressure on mold face		- 0.7 MPa (changeable in 2 steps)
Actuating power source		Pneumatic & Hydro-Pneumatic
Air consumption		1.0m ³ (normal)/mold
Air pressure		0.56±0.04MPa
Power supply		AC100-240V (Control circuit DC24V)
Mold weight (max)		71kg

1) Molding speed may vary depending on ambient temperature, compressed air source pressure and squeeze pressure.

Options for maximizing capability of the FDNX



Ejemplos de moldeo manual y en máquina.

🌱 Proceso de fundición de moldeado en verde

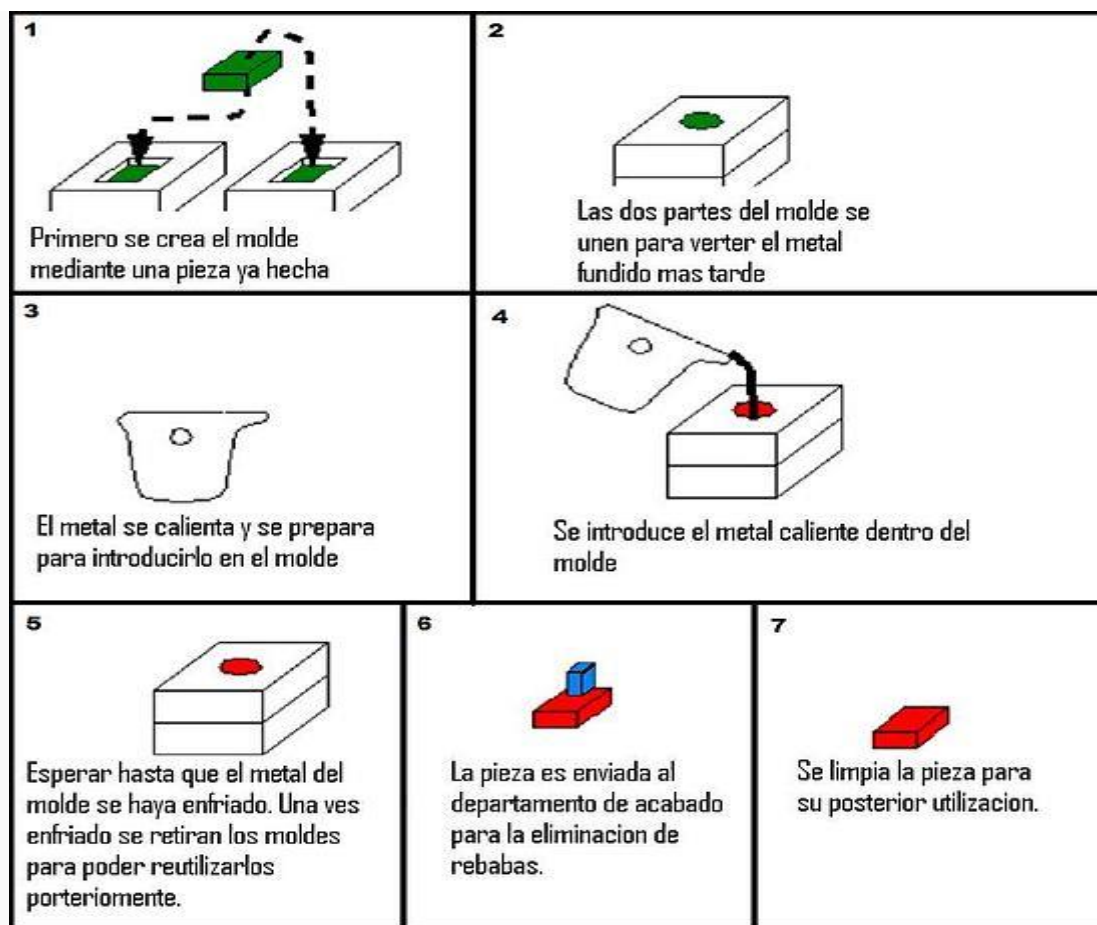
El Término "arena verde" es conocido principalmente por el contenido de humedad dentro de la arena. La arena se somete a un "moldeado / mezclado", proceso en el que varios tipos de arcilla y aditivos químicos que actúan como aglutinantes se mezclan con la arena, el resultado es un compuesto que es conveniente para el proceso de moldeo en arena.

Esta mezcla de preparado de arena se comprime alrededor del patrón (patrón de la pieza deseada) a presiones y temperaturas específicas, para garantizar que mantenga su forma durante el resto del proceso de fundición. La arena mezclada se compacta alrededor del patrón, tomando la forma del molde deseado.

A veces el diseño de la fundición implica conductos internos en la pieza. Esto se hace mediante el uso de machos de arena que están constituidos por una mezcla de arenas similares. Los núcleos están ubicados estratégicamente para formar los conductos necesarios en la fundición. Las dos mitades del molde posteriormente se cierran y el metal se vierte en la cavidad y se deja solidificar.

Después de que la solidificación haya tenido lugar, la arena se hace vibrar hasta que se libera de la fundición. El proceso de acabado puede ser completado por rectificado, mecanizado, la galvanoplastia y la pintura.

En la siguiente figura se puede observar el proceso paso a paso.



Moldeo en arena verde: Proceso para la fabricación de piezas mediante el proceso de moldeado en verde.

✚ Fabricación de moldes

Para la fabricación de moldes para el moldeo en arena verde se suele utilizar una proporción típica de:

- ✓ 90% de Sílice (SiO_2)
- ✓ 7% de arcilla
- ✓ 3% de agua

También se utilizan diversos métodos de compactación, como son:

- ✓ Manual
- ✓ Presión neumática estupendo
- ✓ Sacudimiento
- ✓ Lanzamiento de arena a presión

✚ Ventajas y desventajas del moldeo en arena verde

⌘ Ventajas

- ✓ Económico: es un proceso más barato que el resto.
- ✓ Resistencia a altas temperaturas.
- ✓ Posibilidad de obtención de piezas de hasta menos de 3mm de grosor de acero.
- ✓ Posibilidad de utilización en gran cantidad de metales y aleaciones.
- ✓ Acabado uniforme y liso.
- ✓ No requiere de tolerancias especiales.
- ✓ Aproximadamente un 90% del material del molde es reciclable.
- ✓ Se trata de un proceso flexible con costos de materiales bajos.
- ✓ Piezas sin tensiones residuales.

⌘ Desventajas

- ✓ No se trata de un proceso recomendado para piezas de gran tamaño.
- ✓ Las tolerancias que se obtienen suelen ser bastante grandes.
- ✓ No es el proceso más adecuado para la realización de piezas de geometría compleja.
- ✓ Los acabados superficiales que se obtienen no son los mejores.
- ✓ Piezas con resistencia mecánica reducida.



Medio molde de arena



Macho de arena en medio molde



Ensamblado de mitades del molde



Vaciado del metal fundido

Ejemplos de Moldes en arena en verde.

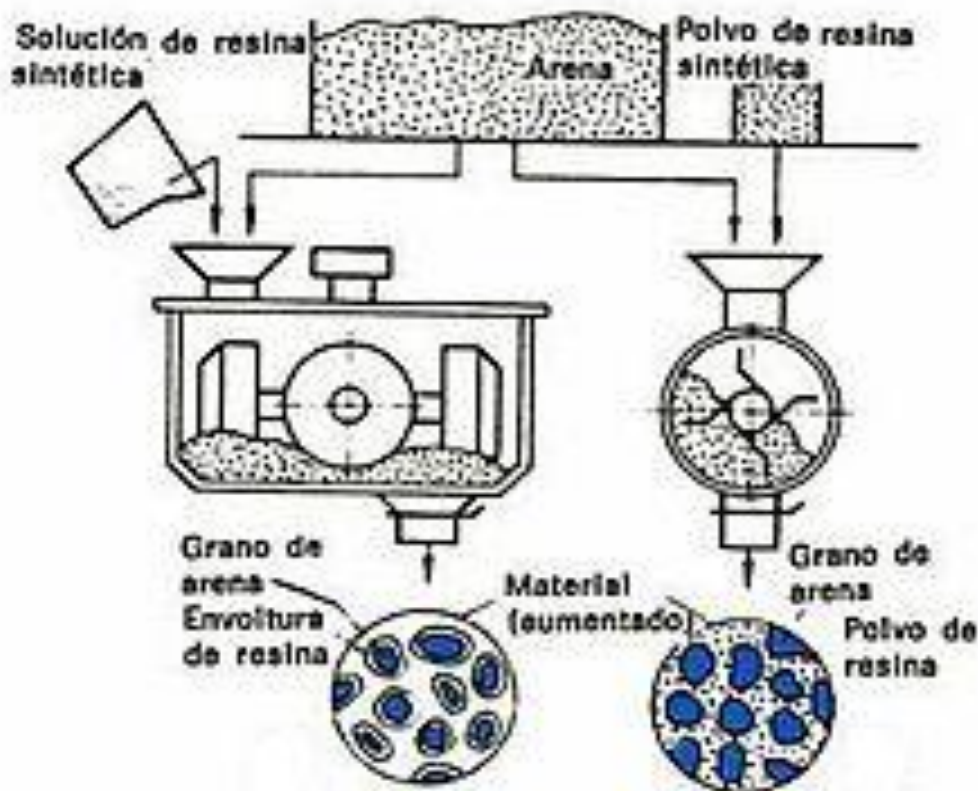
1.2. Molde Shell (Moldeo de Cascara)

Moldeo de la carcasa, también conocido como fundición cáscara-molde, es un proceso de fundición de molde fungible que utiliza una arena cubierta de resina para formar el molde. En comparación con la fundición en arena, este proceso tiene una precisión mejor tridimensional, una tasa de productividad más alta, y los requisitos de mano de obra más bajos.

Se utiliza para pequeñas y medianas piezas que requieren alta precisión. Fundiciones en molde es un proceso de fundición de metal similar a la fundición en arena, en el que el metal fundido se vierte en un molde fungible. Sin embargo, en fundiciones en molde, el molde es una cáscara de pared delgada creada a partir de la aplicación de una mezcla de arena y resina de alrededor de un patrón.

El patrón, una pieza de metal en la forma de la parte deseada, se vuelve a utilizar para formar múltiples moldes de cáscara. Un patrón reutilizable permite velocidades de producción más altas, mientras que los moldes desechables permiten geometrías complejas para ser emitidos. Shell molde de fundición requiere el uso de un patrón de metal, horno, mezcla de arena y resina, caja de descarga, y el metal fundido.

Fundiciones en molde permite el uso de metales féreos y no féreos, con mayor frecuencia el uso de hierro fundido, acero al carbono, acero de aleación, acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de cobre. Las piezas típicas son pequeñas o de tamaño medio y requieren una alta precisión, tales como cajas de engranajes, culatas, bielas, y los brazos de palanca.



Proceso de fabricación del moldeo en cascara.

El proceso de fundición de moldeo en cáscara se compone de los siguientes pasos:

- ⌘ **La creación del patrón** - Un patrón de metal de dos piezas se crea en la forma de la parte deseada, típicamente de hierro o de acero. Otros materiales se utilizan a veces, tal como el aluminio para la producción de volumen bajo o grafito para la fundición de materiales reactivos.
- ⌘ **Creación del molde** - En primer lugar, cada medio patrón se calienta a 175-370C y recubierto con un lubricante para facilitar la eliminación. A continuación, el modelo caliente se sujeta a una caja de descarga, que contiene una mezcla de arena y un aglutinante de resina. La caja de descarga se invierte, lo que permite esta mezcla de arena y resina para recubrir el patrón.

El patrón climatizado cura parcialmente la mezcla, que ahora forma una capa alrededor del patrón. Cada medio patrón y rodea cáscara se cura hasta su finalización en un horno y a continuación, la cáscara se expulsa desde el patrón.
- ⌘ **Conjunto de molde** - Las dos mitades se unen y sujetan firmemente para formar el molde de la cáscara completa. Si se requiere algunos núcleos, que se insertan antes de cerrar el molde. El molde de cáscara se coloca a continuación en un matraz y el apoyo de un material de soporte.
- ⌘ **Verter** - El molde se fija con seguridad junta, mientras que el metal fundido se vierte desde una cuchara en el sistema de llenado y llena la cavidad del molde.
- ⌘ **De refrigeración** - Después de que el molde se ha llenado, el metal fundido se deja enfriar y solidificar en la forma de la pieza colada final.
- ⌘ **Fundición de eliminación** - Después de que el metal fundido se ha enfriado, el molde se puede romper y retirar la colada. Se requieren procesos de corte y de limpieza para eliminar cualquier exceso de metal desde el sistema de alimentación y cualquier arena del molde.

Ejemplos de artículos moldeados de concha incluyen cajas de engranajes, culatas y bielas. También se utiliza para hacer núcleos de moldeo de alta precisión.



Ejemplos del moldeo en cascara (Shell).

☼ Proceso

El proceso de creación de un molde de cáscara consta de seis pasos:

Arena de sílice fina que está cubierto de una resina fenólica termoendurecible delgado y catalizador líquido se vierte, fundido o disparado a un patrón caliente. El patrón se hace generalmente de hierro fundido y se calienta a 230-315 C. La arena se deja reposar sobre el patrón durante unos pocos minutos para permitir que la arena para curar parcialmente.

El patrón y la arena están a continuación, invierten por lo que el exceso de arena cae libre del patrón, dejando sólo el "Shell". Dependiendo del tiempo y la temperatura de la pautas el espesor de la cáscara es de 10 a 20 mm.

El patrón y la cáscara juntos se colocan en un horno para terminar el curado de la arena. La cáscara tiene ahora una resistencia a la tracción de 350 a 450 psi. La cáscara se separa a continuación, endurecido a partir del patrón.

Dos o más conchas se combinan a continuación, a través de sujeción o pegado utilizando un adhesivo termoestable, para formar un molde. Este molde terminado a continuación, se puede utilizar inmediatamente o almacenar casi indefinidamente.

Para lanzar el molde de la cáscara se coloca dentro de un frasco y rodeado de tiro, arena o grava para reforzar la cáscara. La máquina que se utiliza para este proceso se denomina una máquina de moldeo cáscara. Se calienta el patrón, se aplica la mezcla de arena y cuece la cáscara.



Modelos para vaciado en moldes en cascara (Shell).

☀ Detalles

Instalación y producción de los patrones de moldeo en cáscara toma semanas, después de lo cual una potencia de 5 a 50 piezas/hrs-molde es alcanzable. Los materiales comunes incluyen hierro, aluminio y aleaciones de cobre fundido.

Aluminio y magnesio productos de un promedio de 13,5 kg como límite normal, pero es posible lanzar objetos en el rango de 45 a 90 kg. El extremo pequeño del límite es de 30 g. Dependiendo del material, la sección transversal más delgada-moldeable es 1,5 a 6 mm. El calado mínimo es de 0,25 a 0,5 grados.

Tolerancias típicas son 0,005 mm/mm o en/porque en el compuesto de arena está diseñado para reducir el tamaño y apenas se utiliza un patrón de metal. El acabado de la superficie es de 0,3 a 4,0 micrómetros elenco porque se utiliza una arena fina. La resina también ayuda en la formación de una superficie muy lisa. El proceso, en general, produce piezas fundidas muy consistentes de un lanzamiento a otro.



Máquinas para la fabricación de moldes en cascara (Shell).

La mezcla de arena-resina puede ser reciclada por la quema de la resina a temperaturas elevadas.

✚ **Ventajas y desventajas**

Ventajas

- ✓ Una de las mayores ventajas de este proceso es que puede ser completamente automatizado para la producción en masa.
- ✓ La alta productividad, bajos costos de mano de obra, buenos acabados de superficie y precisión del proceso puede más que pagar por sí mismo si reduce los costes de mecanizado.
- ✓ También hay algunos problemas debido a los gases, debido a la ausencia de humedad en la cáscara, y el poco gas que todavía está presente se escapa fácilmente a través de la cáscara delgada.
- ✓ Cuando se vierte el metal algunos del aglutinante de resina se funde en la superficie de la cáscara, lo que hace sacudiendo fácil.
- ✓ Buen acabado superficial, eliminando así, casi por completo, los defectos superficiales.
- ✓ Tolerancias de 0.5% frente al 1.5% en el moldeo ordinario.
- ✓ Moldes estables, adecuados para la fabricación en serie.
- ✓ Se evita la mecanización de piezas, debido a la gran precisión obtenida en los resultados.
- ✓ Se pueden producir formas más complejas con menos mano de obra.
- ✓ Automatización del proceso con relativa facilidad.
- ✓ Menor necesidad de arena para producir los moldes, lo cual reduce costes en producciones de amplios lotes.

Desventajas

- ✓ Una desventaja es que el sistema de llenado debe ser parte del patrón, porque todo el molde se forma a partir del patrón, que puede ser costoso.
- ✓ Otra es la resina de la arena es caro, sin embargo, no se requiere mucho porque se está formando sólo una cáscara.
- ✓ Alto coste de la mala resistencia del material de los equipos, de alta porosidad posible,
- ✓ Mal acabado superficial y la tolerancia, el mecanizado secundaria a menudo se requiere, l
- ✓ La tasa de producción baja, aplicaciones de alto coste laboral culatas, bielas bloques y los colectores del motor, bases de máquinas, engranajes, poleas.
- ✓ Coste elevado en la producción de pequeños lotes de piezas.
- ✓ Las piezas no pueden ser muy voluminosas; las mayores obtenidas son de unos 100 kg.
- ✓ Las placas modelo tienen que ser siempre metálicas y con elevada precisión dimensional; por ello resultan caras.
- ✓ Las arenas y las resinas son mucho más caras que los materiales empleados en el moldeo ordinario.
- ✓ Menor permeabilidad de los moldes.
- ✓ El molde produce gases por la descomposición del aglutinante.

✚ **Productos elaborados con moldeo en cáscara**

- ✓ Piezas para los sectores del ferrocarril, automoción, camión, maquinaria agrícola, etc.
- ✓ Piezas en materiales refractarios para centrales térmicas, plantas siderúrgicas, plantas incineradoras, hornos de tratamiento, etc.
- ✓ Piezas para motores y compresores, de alta calidad superficial y final paredes.
- ✓ Eslabones de cadena y otras piezas sometidas a altas exigencias mecánicas.

5.3.2. Molde permanente.

✚ Moldeado

Los lingotes se forman por moldeado o molde vertiendo el metal líquido en unos moldes hechos de metal o de arena, según los casos. Tanto el metal como la arena tienen la ventaja de su porosidad, lo cual permite la salida de los gases. Moldear es producir un cuerpo rígido a partir de material sin forma. A los métodos de moldeo de materiales metálicos corresponden, entre otros, el moldeo y la pulvimetalurgia.

✚ El colado

La colada o vaciado es el proceso que da forma a un objeto al hacer entrar material líquido en un agujero o cavidad que se llama molde y se deja solidificar el líquido. Cuando el material se solidifica en la cavidad retiene la forma deseada. Después, se retira el molde y queda el objeto sólido conformado. El proceso de colado permite obtener piezas con formas diversas y complejas en todo tipo de materiales.

✚ Sistemas de colada

Los sistemas de coladas son dispositivos necesarios para conducir el metal líquido a la cavidad del molde. Los elementos básicos del sistema de colada, pueden apreciarse en el siguiente esquema donde se destaca:

- ✓ **Colada o Bebedero:** Conductor vertical a través del cual el metal entra en el canal.
- ✓ **Pozo de Colada:** Sección usualmente redondeada al final del bebedero, utilizado para ayudar a controlar el flujo de metal que entra en canal.
- ✓ **Canal:** Sección comúnmente horizontal a través de la cual el metal fluye o es distribuido mediante entradas a la cavidad del molde.
- ✓ **Portadas o Entradas:** Canales secundarios variables en número de acuerdo al diseño de la pieza a través de las cuales el metal deja el canal para penetrar en la cavidad del molde.
- ✓ **Cavidad de Colada:** Sección colocada en muchas ocasiones en la parte superior del bebedero de manera de darle facilidad al operador para mantener el metal dentro y permitir el flujo continuo, así mismo minimiza o evita la turbulencia y promueve la entrada al bebedero solo de metal limpio para ello usualmente emplean filtros.
- ✓ **Filtros:** Pequeños dispositivos empleados en la cavidad de colada en coacciones en el pozo de colada, de manera de separar la escoria del metal y de esta forma permitir un flujo de metal limpio.



Ejemplos de moldes de metal.

☼ Moldeo por colada

Este procedimiento de fabricación se aplica para producir piezas (moldeadas por colada). Para el moldeo por colada se usa un molde que corresponda a la configuración de la pieza deseada. Según el tipo de los materiales utilizados para el moldeo por colada, están los siguientes:

- ✓ Fundición de hierro, moldeo por colada de fundición gris y de fundición maleable.
- ✓ Fundición de acero, moldeo por colada del acero.
- ✓ Fundición de metales, moldeo por colada de metales no férricos.

Los moldes para la colada pueden ser: moldes permanentes y moldes no permanentes. Un molde permanente está elaborado en metal, como el acero, o hierro colado; se emplean sobre todo para la fabricación en serie. Un molde no permanente o transitorio está hecho de materiales moldeables o refractarios como la arena; éstos se usan para una sola colada y se destruyen al extraer la pieza moldeada.

☼ Limpieza de las piezas moldeadas

En este procedimiento se incluye la separación de las mazarotas, bebederos y demás partes del sistema de alimentación, el cual está formado por los cargadores y su utilización tiene como finalidad prevenir no sólo la formación de cavidades o rechupes, debido a la contracción del metal durante la solidificación sino también evitar diseños con exceso de metal y altos costos de limpieza. Así como las rebabas, se eliminan las incrustaciones de arena y la retirada de los machos de moldeo.

Los pequeños bebederos y mazarotas, cuando la pieza moldeada no es muy delicada y poco tenaz, se quitan golpeándolos y para los de mayor tamaño se usan herramientas de corte. Las rebabas se suprimen con corta frío o por amolado. Para la limpieza de la superficie (pieza moldeada) se utiliza el chorreado con arena. Para la limpieza de los machos de moldeo sin producir polvo se utiliza chorro de agua.

FUNDICIÓN EN MOLDE PERMANENTE:

- **Utilización de MOLDES METÁLICOS REUTILIZABLES.**
- **CARACTERÍSTICAS:**
 - **Largas tiradas para amortizar el elevado coste de los útiles (obtenidos por mecanizado).**
 - **Tiempos y costes unitarios (por pieza) bajos.**
 - **Alta precisión: detalles, tolerancias y rugosidad.**
 - **Materiales de BAJO PUNTO DE FUSIÓN: Al, Zn, ...**
- **TIPOS:**
 - **Fundición por gravedad.**
 - **Inyección.**
 - **Inyección a baja presión.**



Colada por gravedad de Aluminio en molde metálico



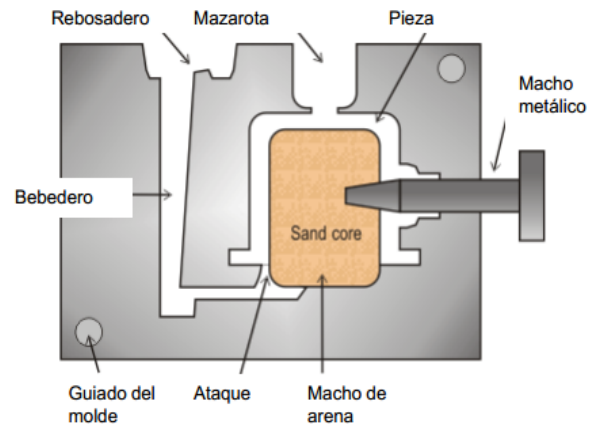
Molde metálico para la inyección de Aluminio

Fundición en molde permanente.

Colada sin presión en molde METÁLICO

- **CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO:**

- Aleaciones de bajo punto de fusión, sobre todo Al.
- Características de las piezas:
 - Tamaño pequeño-medio
 - Precisión y buen acabado superficial.
 - Muy buenas propiedades mecánicas y metalúrgicas (mejores que la fundición en arena).



- **MOLDES:**

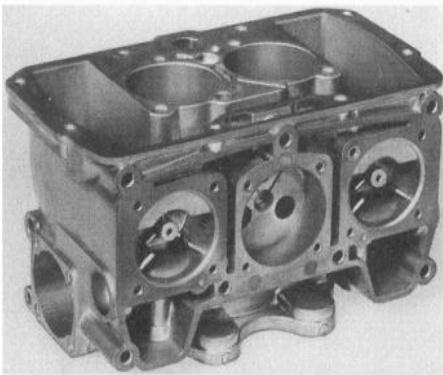
- Acero aleado de alta calidad, mecanizado a la forma final (2 mitades).
- Solidificación promovida mediante sistema de refrigeración mecanizado en el molde.
- Elementos similares a los de un molde de arena:
 - Bebedero y sistema de alimentación.
 - Mazarotas.
 - Machos

3. Fundición por inyección

Inyección del material a alta velocidad en molde METÁLICO y solidificación bajo presión

- **CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO:**

- Gran producción de aleaciones de Al y Zn.
- Características de las piezas:
 - Muy alta precisión y excelente rugosidad.
 - Geometría compleja.
 - Cientos-miles de piezas por hora.
 - Las propiedades mecánicas e integridad superficial de las piezas no están aseguradas.



Carburador de vehículo
pesado inyectado en
aleación de Zn



Ventilador para vehículo
militar inyectado en
aleación de Aluminio

Fundición en molde permanente por gravedad y por inyección.

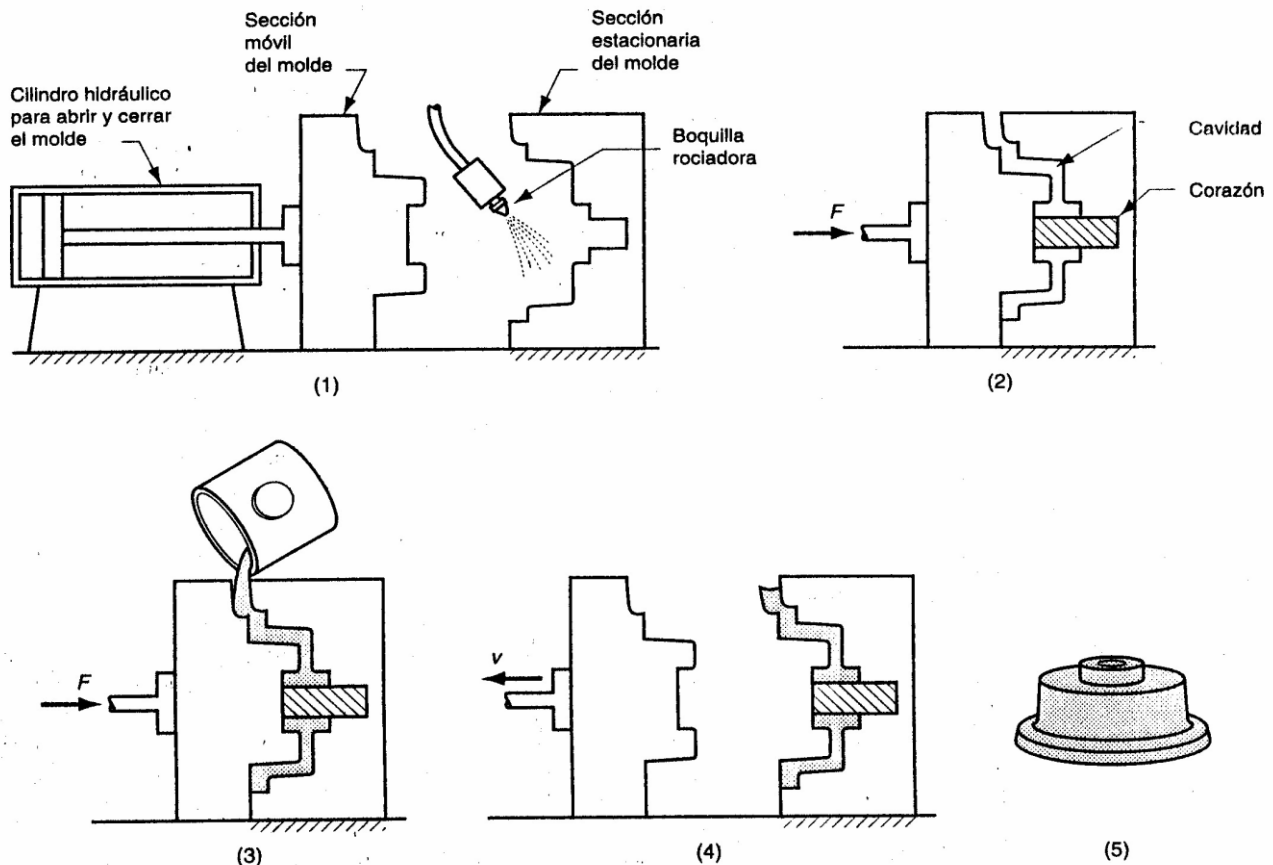
● Fundición en Molde Permanente

La desventaja económica de cualquiera de los procesos con molde desechable es la necesidad de un nuevo molde para cada fundición. En la fundición con molde permanente, el molde se reutiliza muchas veces. En esta sección analizaremos la fundición en molde permanente, tratándola como un proceso básico del grupo de procesos que utilizan moldes reutilizables.

La fundición en molde permanente usa un molde metálico construido en dos secciones que están diseñadas para cerrar y abrir con precisión y facilidad. Los moldes se hacen comúnmente de acero o hierro fundido. La cavidad junto con el sistema de vaciado se forma por maquinado en las dos mitades del molde a fin de lograr una alta precisión dimensional y un buen acabado superficial.

Los metales que se funden comúnmente en molde permanente son: aluminio, magnesio, aleaciones de cobre y hierro fundido. Sin embargo, el hierro fundido requiere una alta temperatura de vaciado, 1250 °C a 1500 °C, lo cual acorta significativamente la vida del molde. Las temperaturas más altas de vaciado para el acero, hacen inapropiado el uso de moldes permanentes para este metal, a menos que se hagan en moldes de material refractario.

En este proceso es posible usar corazones para formar las superficies interiores del producto de fundición. Los corazones pueden ser metálicos, pero su forma debe permitir la remoción de la fundición, o deben ser mecánicamente desmontables para permitir esta operación. Si la remoción del corazón metálico es difícil o imposible se pueden usar corazones de arena, en este caso el proceso de fundición es frecuentemente llamado fundición en molde semipermanente.



Pasos en la fundición en molde permanente: (1) el molde se precalienta y se recubre; (2) se insertan los corazones (en su caso) y se cierra el molde; (3) el metal fundido se vacía en el molde y (4) el molde se abre. La parte terminada se muestra en (5).

Los pasos en el proceso de fundición con molde permanente se describen en la figura 1.28. Los moldes se precalientan primero para prepararlos, y se rocía la cavidad con uno o más recubrimientos. El precalentamiento facilita el flujo del metal a través del sistema de vaciado y de la cavidad. Los recubrimientos ayudan a disipar el calor y a lubricar la superficie del molde para separar fácilmente la fundición.

Tan pronto como solidifica el metal, el molde se abre y se remueve la fundición. A diferencia de, los moldes desechables, los moldes permanentes no se retraen, así que deben abrirse antes de que ocurra la contracción por enfriamiento a fin de prevenir el desarrollo de grietas en la fundición.

Las ventajas de la fundición en molde permanente incluyen buen acabado de la superficie y control dimensional estrecho, como ya se mencionó. Además, la solidificación más rápida causada por el molde metálico genera una estructura de grano más fino, de esta forma pueden producirse fundiciones más resistentes.

El proceso está limitado generalmente a metales de bajo punto de fusión. La manufactura de formas geométricas más simples que las fundidas en molde de arena (debido a la necesidad de abrir el molde) constituye otra limitación, además del costo.

Debido al costo sustancial del molde, el proceso se adapta mejor a producciones de alto volumen que pueden automatizarse. Las partes típicas que se producen con proceso de molde permanente incluyen pistones automotrices, cuerpos de bombas y ciertas fundiciones para aviones y proyectiles.

Fundición hueca

La fundición hueca es un proceso de molde permanente en el cual se forma un hueco al invertir el molde, después que el metal ha solidificado Parcialmente en la superficie del molde, drenando así el metal líquido del centro. La solidificación empieza en las paredes relativamente frías del molde y progresa con el tiempo hacia la parte media de la fundición.

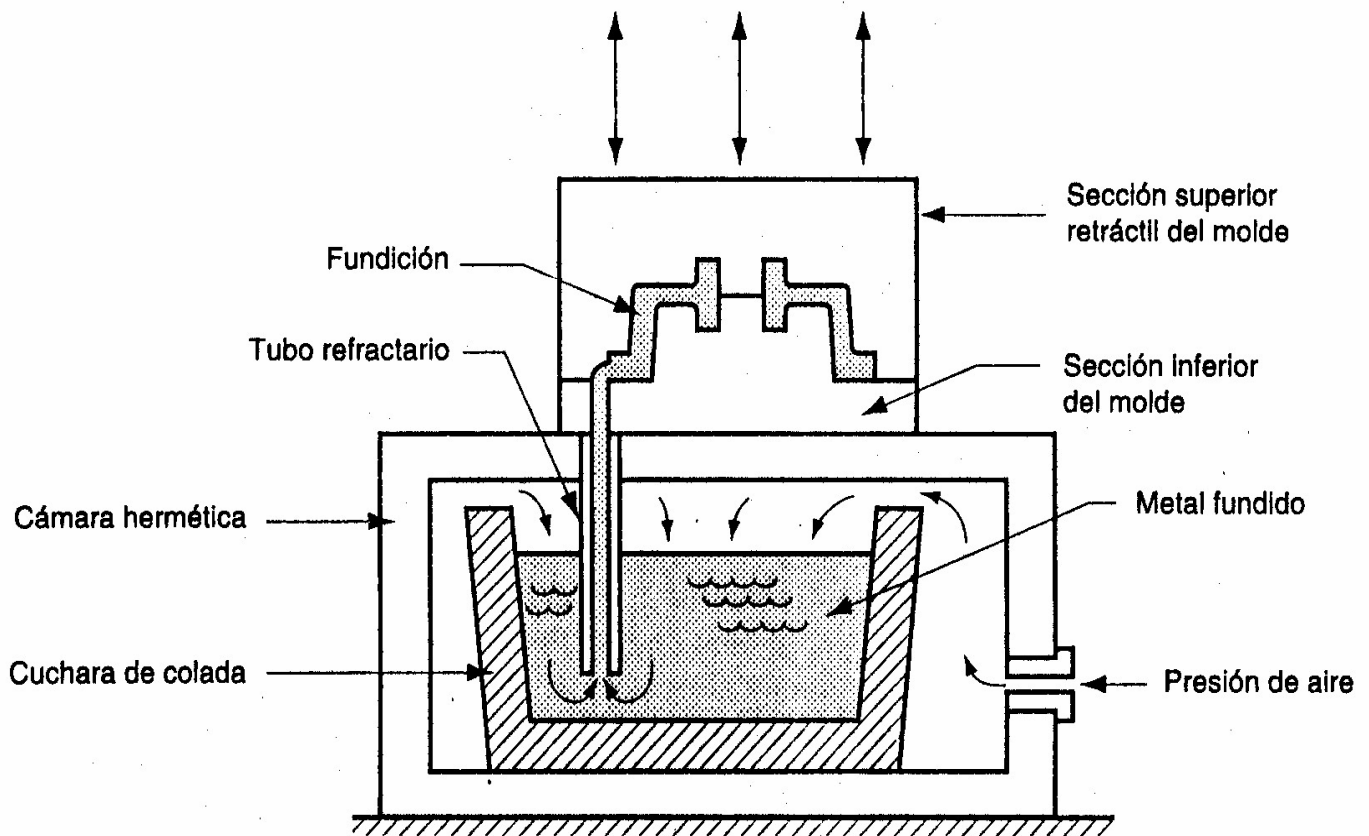
El espesor del casco se controla por el tiempo que transcurre antes de drenar. La fundición hueca se usa para hacer estatuas, pedestales de lámparas y juguetes a partir de metales de bajo punto de fusión como plomo, zinc y estaño. En estos artículos lo importante es la apariencia exterior, pero la resistencia y la geometría interior de la fundición no son relevantes.

La fundición a presión es un proceso que necesariamente utiliza moldes permanentes y se puede clasificar en: fundición a baja presión, fundición con molde permanente al vacío y fundición en dados.

Fundición a baja presión

En el proceso de fundición con molde permanente básico y en la fundición hueca, el flujo de metal en la cavidad del molde es causado por la gravedad. En la fundición a baja presión, el metal líquido se introduce dentro de la cavidad a una presión aproximada de 0.1 MPa, aplicada desde abajo, de manera que el metal fluye hacia arriba como se ilustra en la figura 1.28.

La ventaja de este método sobre el vaciado tradicional es que se introduce en el molde un metal limpio desde el centro del crisol, en lugar de un metal que ha sido expuesto al aire. Lo anterior reduce la porosidad producida por el gas y los defectos generados por la oxidación, y se mejoran las propiedades mecánicas.



Fundición a baja presión. El diagrama muestra cómo se usa la presión del aire para forzar el metal fundido, dentro de la cuchara de colada, hacia la cavidad molde. La presión se mantiene hasta que solidifica la fundición.

Fundición con molde permanente al vacío

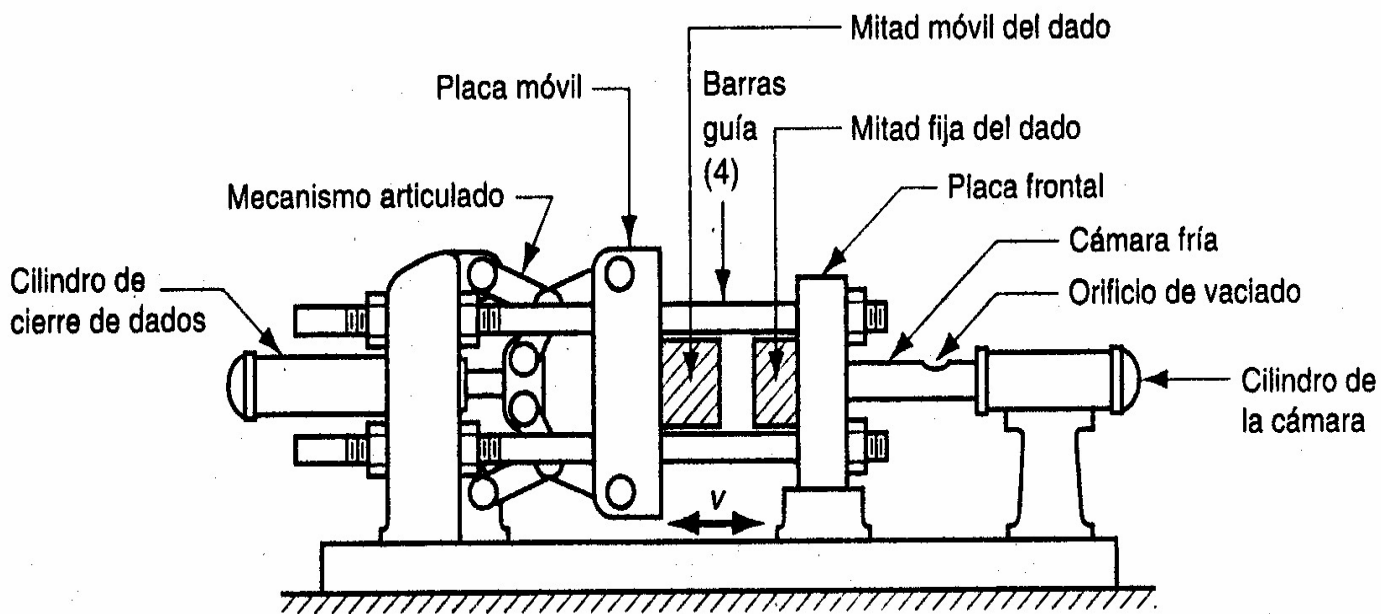
La fundición con molde permanente al vacío es una variante de la fundición a baja presión en la cual se usa vacío para introducir el metal fundido en la cavidad del molde. La configuración general del proceso es similar a la operación de fundición a baja presión.

La diferencia es que se usa la presión reducida del vacío en el molde para atraer el metal líquido a la cavidad, en lugar de forzarlo por una presión positiva de aire desde abajo. Los beneficios de la técnica al vacío, en relación con la fundición a baja presión, son que se reduce la porosidad del aire y los efectos relacionados, obteniendo una mayor resistencia del producto de fundición.

La fundición en dados es un proceso de fundición en molde permanente en el cual se inyecta el metal fundido en la cavidad del molde a alta presión. Las presiones típicas son de 7 a 350 MPa. La presión se mantiene durante la solidificación; posteriormente, el molde se abre para remover la pieza.

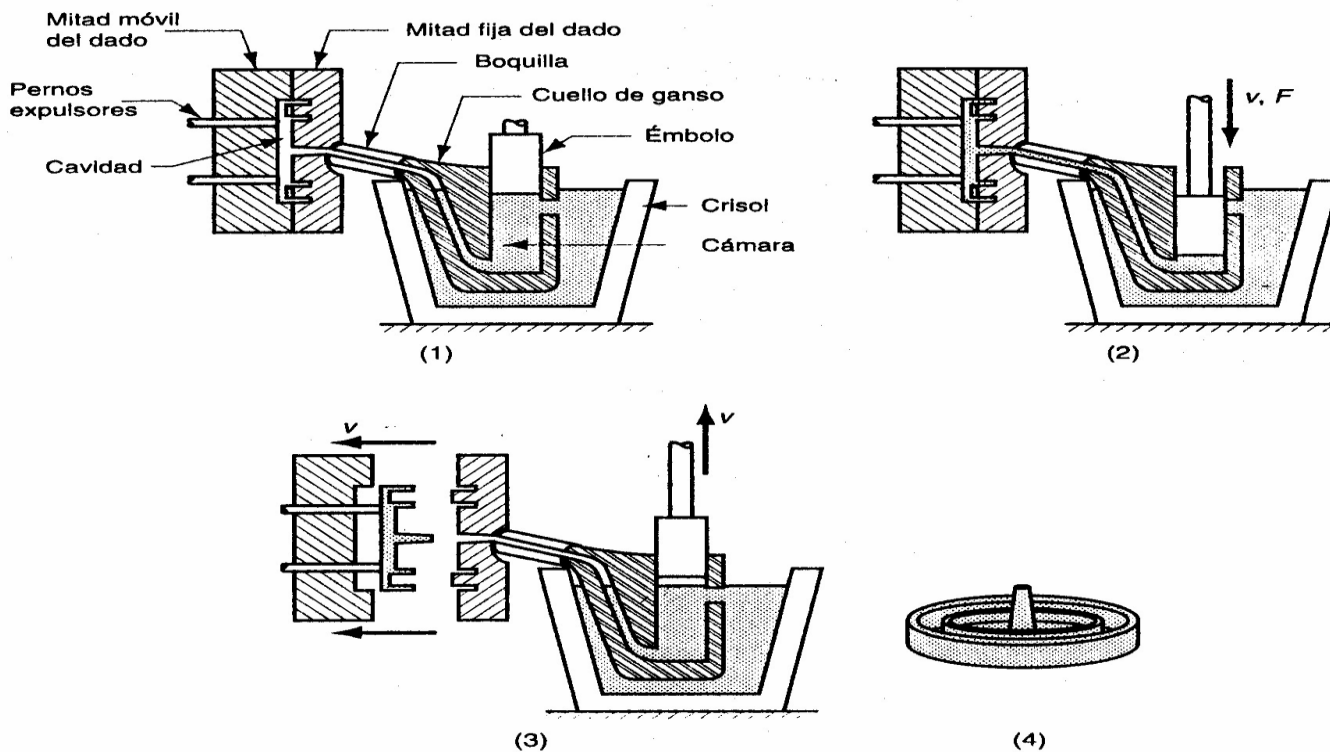
Los moldes en la operación de fundición se llaman dados, de aquí el nombre de fundición en dados. El uso de alta presión para forzar al metal dentro de la cavidad del dado es la característica más notable que distingue a este proceso de otros en la categoría de molde permanente.

Las operaciones de fundición en dados se llevan a cabo en máquinas especiales. Las máquinas modernas de fundición en dados están diseñadas para mantener un cierre preciso de las dos mitades del molde y mantenerlas cerradas, mientras el metal fundido permanece a presión dentro de la cavidad. La configuración general se muestra en la figura anterior.



Configuración general de una máquina de fundición en dados (cámara fría).

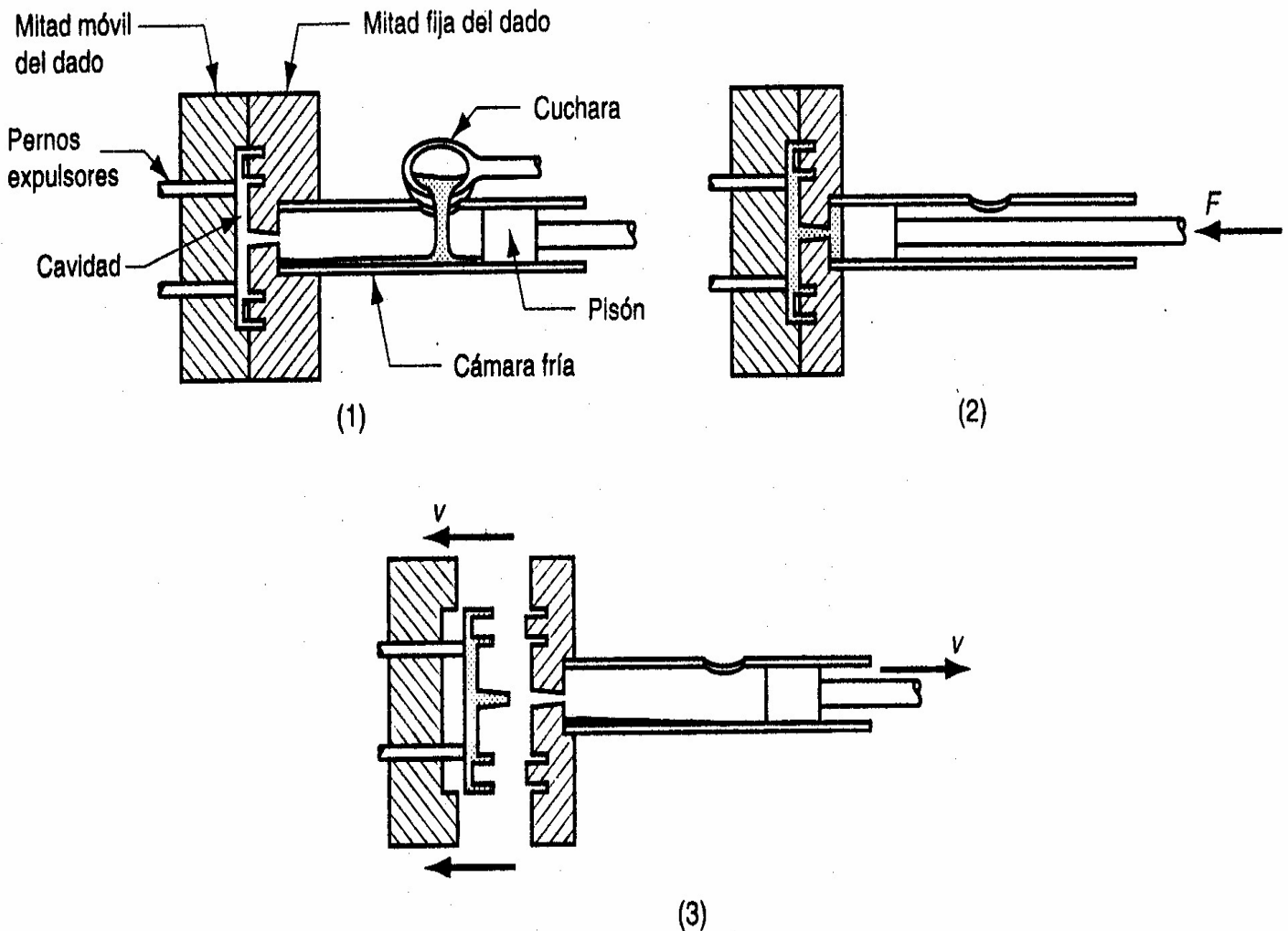
Existen dos tipos principales de máquinas de fundición en dados: 1) de cámara caliente y 2) de cámara fría; sus diferencias radican en la forma en que se inyecta el metal a la cavidad.



Ciclo de la fundición en cámara caliente: (1) el metal fluye en la cámara con el dado cerrado y el émbolo levantado; (2) el émbolo fuerza al metal de la cámara a fluir hacia el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación, y (3) se levanta el émbolo, se abre el dado y se expulsa la parte solidificada. La parte terminada se muestra en (4).

En las máquinas de cámara caliente, el metal se funde en un recipiente adherido a la máquina y se inyecta en el dado usando un pistón de alta presión. Las presiones típicas de inyección son de (7 a 35 MPa). La fundición se resume en la figura 1.31. Son velocidades características de producción de hasta 500 partes por hora. La fundición en dados con cámara caliente impone una dificultad especial en el sistema de inyección, porque gran parte de dicho sistema queda sumergido en el metal fundido. Por esa causa, las aplicaciones del proceso quedan limitadas a metales de bajo punto de fusión que no atacan químicamente al pistón y a otros componentes mecánicos. Estos metales incluyen al zinc, al estaño, al plomo y algunas veces al magnesio.

En las máquinas de fundición en dados con cámara fría, el metal fundido proveniente de un contenedor externo para colar, se vacía en una cámara sin calentar y se usa un pistón para inyectar el metal a alta presión en la cavidad del dado. Las presiones de inyección usadas en estas máquinas van típicamente (14 a 140 MPa). El ciclo de producción se explica en la figura 1.31. La velocidad de ciclo no es tan rápida con respecto a las máquinas de cámara caliente, debido a que es necesaria una cuchara de colada para vaciar el metal líquido desde una fuente externa en la cámara. Sin embargo, este proceso de fundición es una operación de alta producción. Las máquinas de cámara fría se usan típicamente para fundiciones de aluminio, latón y aleaciones de magnesio. Las aleaciones de bajo punto de fusión (zinc, estaño, plomo) pueden también fundirse en máquinas de cámara.



Ciclo de la fundición en cámara fría: (1) se vacía el metal en la cámara con el dado cerrado y el pistón retraído; (2) el pistón fuerza al metal a fluir en el dado, manteniendo la presión durante el enfriamiento y la solidificación; y (3) se retrae el pistón, se abre el dado y se expulsa la fundición. El sistema de vaciado está simplificado.

Los moldes que se usan en operaciones de fundición en dados se hacen generalmente con acero de herramienta y acero para moldes refractarios. El tungsteno y el molibdeno con buenas cualidades refractarias también se utilizan, especialmente en los intentos para fundir el acero y el hierro en dados.

Los dados pueden tener una cavidad única o múltiple. Los dados de cavidad única se muestran en las figuras 2.21 y 2.22. Se requieren pernos expulsores para remover la parte del dado cuando éste se abre, como se muestra en los diagramas. Estos pernos empujan la parte de manera que puedan removerse de la superficie del dado. También es necesario rociar lubricantes en las cavidades para prevenir el pegado.

Como los materiales del dado no tienen porosidad natural y el metal fundido fluye rápidamente en el dado durante la inyección, se deben construir barrenos o vías de paso en el plano de separación de los dados para evacuar el aire y los gases de la cavidad. Aun cuando los orificios son bastante pequeños, se llenan con el metal durante la inyección, pero éste debe quitarse después.

También es común la formación de rebabas en lugares donde el metal líquido a alta presión penetra entre los pequeños espacios del plano de separación o en los claros alrededor de los corazones y de los pernos expulsores. La rebaba debe recortarse de la fundición junto con el bebedero y el sistema de vaciado.

Las ventajas de la fundición en dados incluyen:

- 1) Altas velocidades de producción;
- 2) Son económicas para volúmenes grandes de producción;
- 3) Son posibles tolerancias estrechas, del orden de ± 0.076 mm en partes pequeñas;
- 4) Buen acabado de la superficie;
- 5) Son posibles secciones delgadas hasta cerca de 0.05 mm.
- 6) El enfriamiento rápido proporciona a la fundición granos de tamaño pequeño y buena resistencia.

Las limitaciones de este proceso, además de los metales que maneja, son la restricción en la forma de las piezas. La geometría de la parte debe ser tal que pueda removerse de la cavidad del dado.



Tipos de Colados en Moldes de Metal.