

CAPÍTULO 19: SOLIDIFICACIÓN

19.1. INTRODUCCIÓN

Las sustancias se pueden clasificar como amorfas o cristalinas. En el estado cristalino los átomos están dispuestos en una estructura atómica regular, o sea, un orden geométrico en el espacio guardando una relación bien definida con sus vecinos. El estado amorfo no posee esta característica.

Todos los verdaderos sólidos son cristalinos, sus átomos están dispuestos según una estructura atómica que depende de los elementos en particular. Como los átomos están enlazados con sus vecinos el sólido es una sustancia más o menos rígida que se resiste a cambiar su volumen y su forma. Pero no todas las sustancias que son más o menos rígidas están sólidas, por ejemplo, el vidrio es una sustancia formada por átomos de Na, Si y O que no están dispuestos en una forma perfectamente ordenada y es más bien una sustancia amorfa o un líquido de muy alta viscosidad pues si le damos tiempo fluirá y tomará la forma del recipiente que lo contiene igual que un líquido subenfriado.

Debemos poder distinguir si los átomos están o no ordenados en el espacio, esto es posible usando la técnica de difracción de rayos-X. Por último el estado gaseoso, es donde los átomos están totalmente libres en el espacio y así la sustancia permite un fácil cambio de volumen y de forma. Estos átomos se encuentran libres debido a la alta energía térmica de la sustancia que fue capaz de vencer los enlaces que unían los átomos. Si enfriamos el gas, o sea, quitamos energía térmica, los enlaces volverán a ser suficientemente fuertes como para restringir y localizar el movimiento de los átomos ya sea en forma de un líquido o de un sólido (Figura 1).

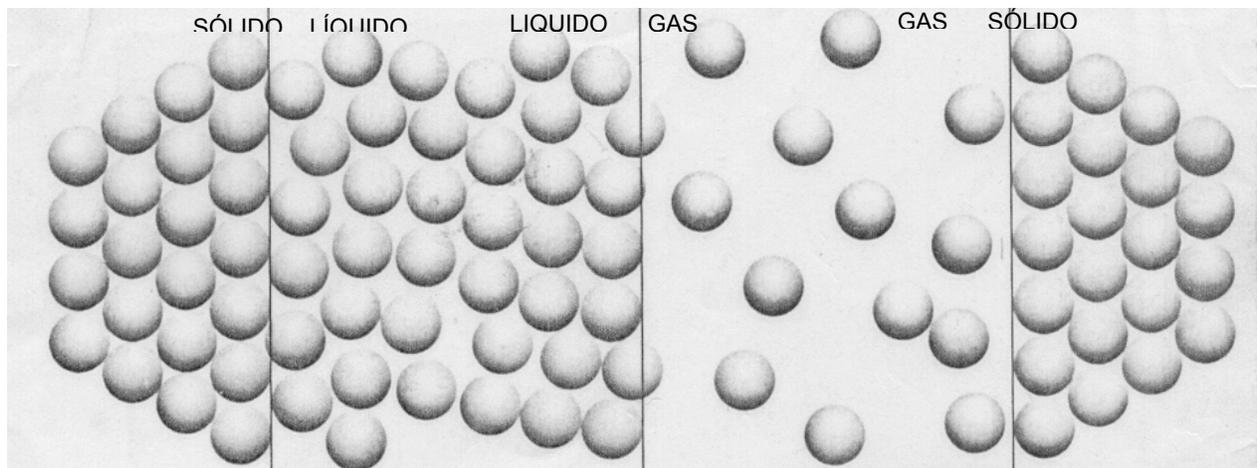


Figura 1: Disposiciones atómicas en los tres estados de la materia.

19.2. MODELO ATÓMICO DE LOS ESTADOS DE LA MATERIA.

El estado líquido podría caracterizarse como poseyendo un ordenamiento localizado sólo con sus vecinos más cercanos o como un sólido con muchos defectos tales como vacancias, razón por la cual, la densidad del líquido es menor que la de un sólido, tal como lo ilustra la figura 2, volumen específico (que es el inverso de la densidad) versus temperatura para el hierro. Note el cambio pronunciado entre el líquido y el sólido.

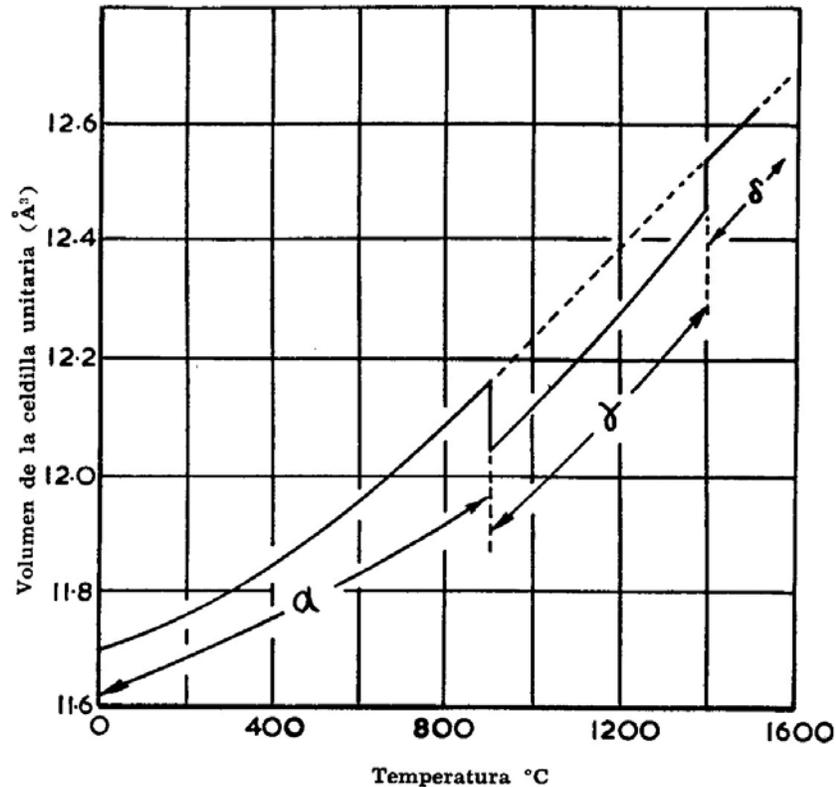


Figura 2: Efecto de las transformaciones alotrópicas sobre la expansión del hierro puro.

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 (ver Figura 3 para unas curvas de enfriamiento típicas en un metal puro).

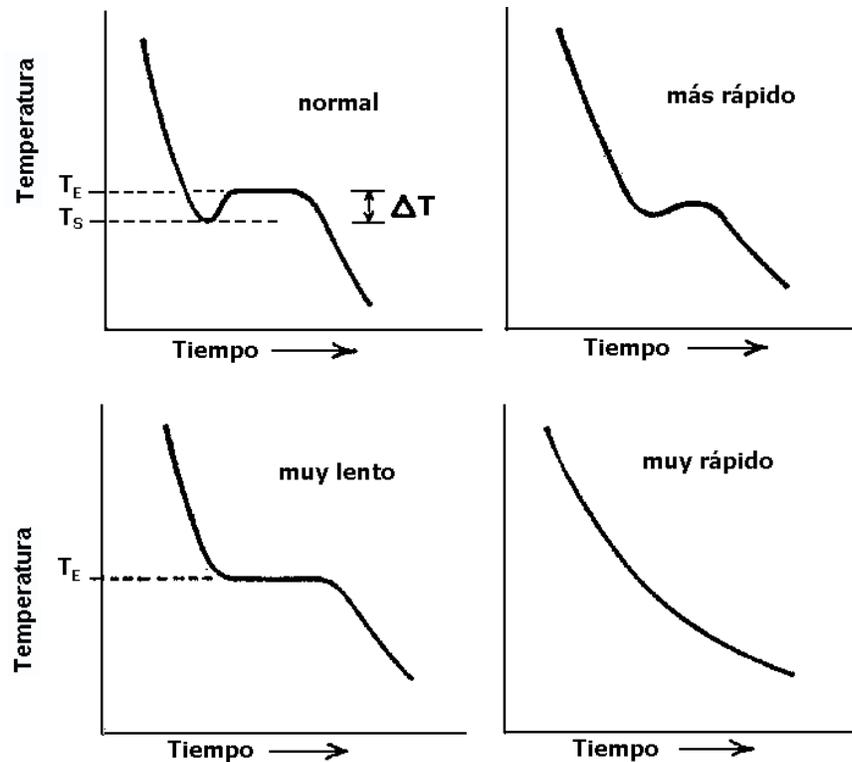


Figura 3: Curvas de enfriamiento típicas de un metal puro.

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

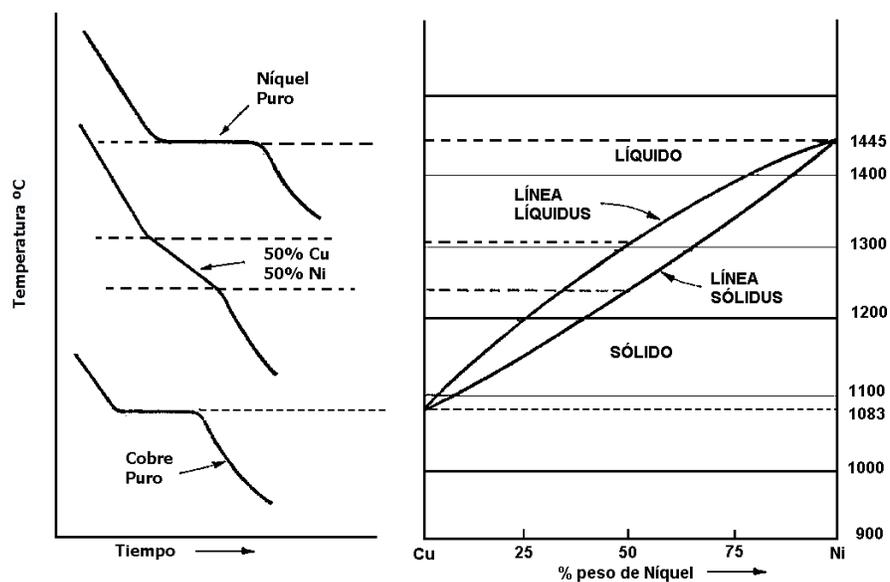


Figura 4: Curvas de enfriamiento y diagrama de fases para Cu-Ni

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 (fcc en el Cu y Al, etc.) 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" (Figura 5), semejantes a los cristalitos de hielo.

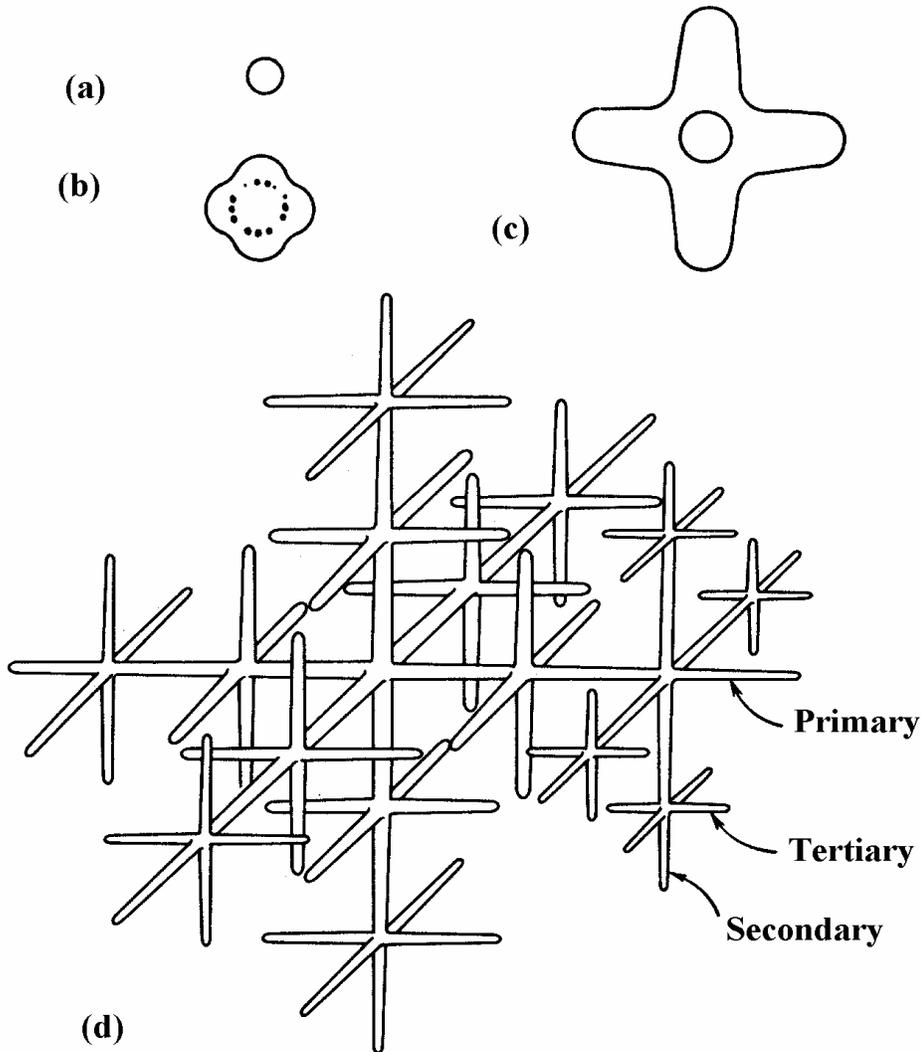


Figura 5: Esquema de una dendrita

Esta es una especie de esqueleto de cristal, con forma de un tronco de árbol con ramas, de ahí su nombre, pues viene del griego dendrita = arbolito.

Un cristal metálico crece de esta forma debido a que las direcciones preferenciales de crecimiento son las aristas de los cubos en los metales que cristalizan en el sistema

cúbico. (100). Esto se cumple estrictamente siempre que el calor también se disipe en esa dirección. Luego la dirección de crecimiento preferencial es consecuencia de la coincidencia de dos factores:

- Tendencia de las partículas a crecer en una dirección cristalográfica definida.
- Efecto del flujo calórico en la orientación o ubicación en el espacio de los cristales metálicos.

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 (ver Figura 6).

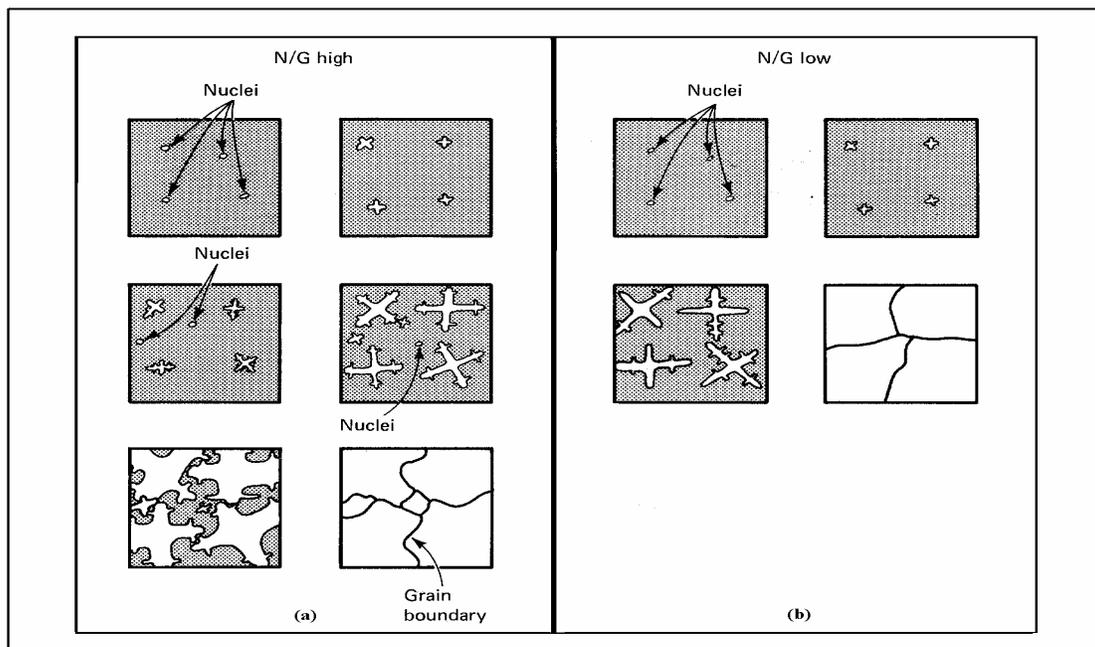


Figura 6: Nucleación y crecimiento a) enfriamiento rápido y b) enfriamiento lento

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 (Figura 6b). 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.

19.3. ESTRUCTURA DE LINGOTES

En un lingote industrial el tamaño del cristal o grano puede variar considerablemente de la superficie al centro Figura 7. 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.

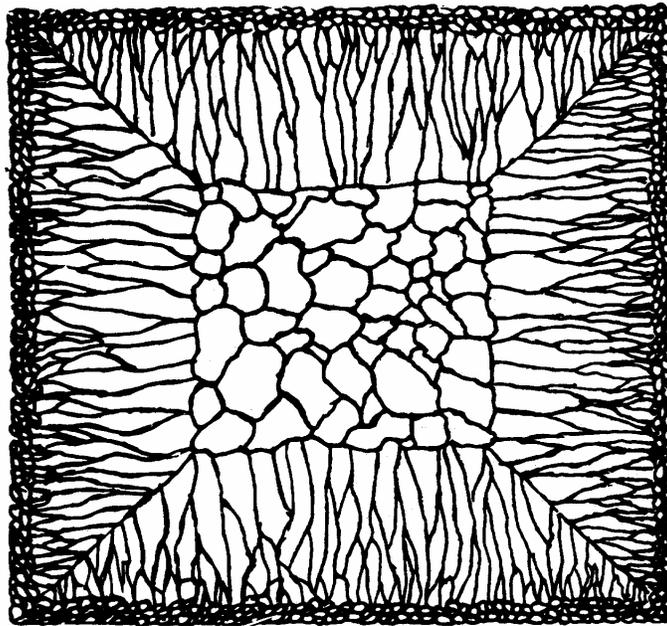


Figura 7: Estructura de una sección de un lingote

19.4. 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 ilustrado en la Figura 8. Este rechupe también puede ser interno (b) si la superficie se enfría muy rápido.

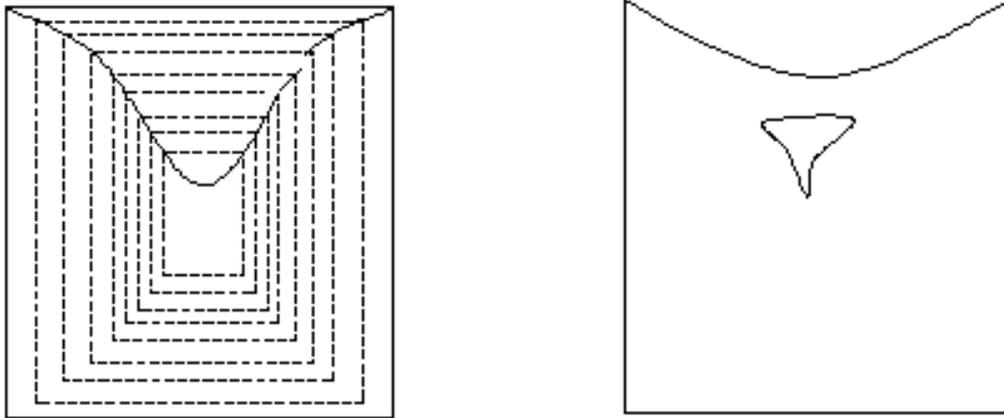


Figura 8: Esquema de la formación del rechupe.

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 9 para el hidrógeno.

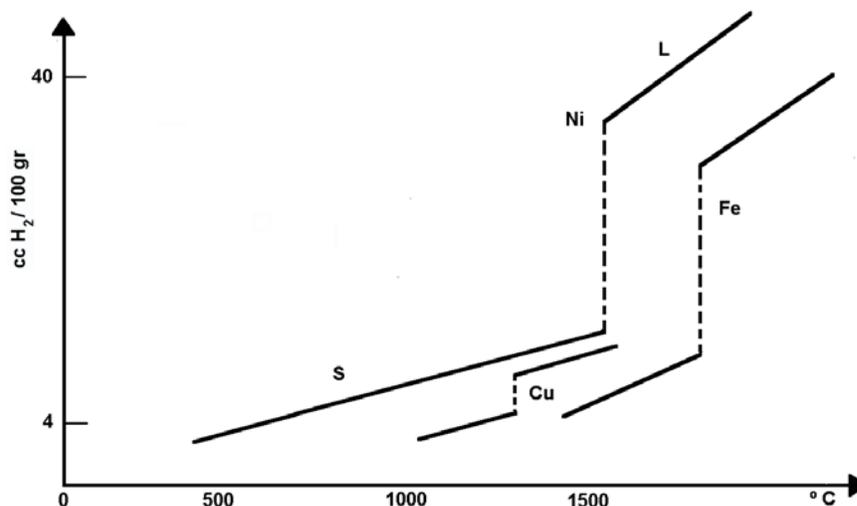


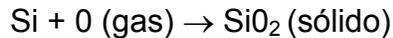
Figura 9: Disolución de hidrógeno en distintos metales.



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.

19.5. 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).

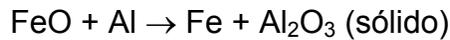
Para lograr este porcentaje tan bajo de carbono se trabaja con un baño de acero algo oxidado. Cuando el acero comienza a solidificar en la lingotera se forma primeramente una capa de metal bastante puro contiguo a la pared del molde. Esto causa que la concentración de oxígeno en el líquido restante aumente 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.

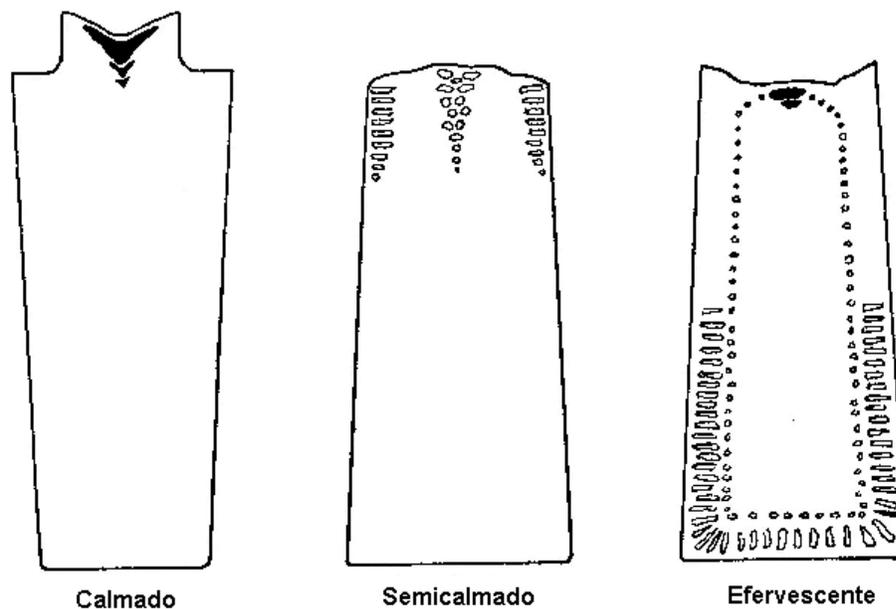


Figura 10: Tipos de lingotes de acero

19.6. OTROS PROCESOS INDUSTRIALES DE COLADA O VACIADO

La Figura 11 muestra un dispositivo para vaciar lingotes de acero por el fondo que evita la salpicadura de las lingoteras durante el vaciado obteniéndose un lingote sin gotas frías en la superficie.

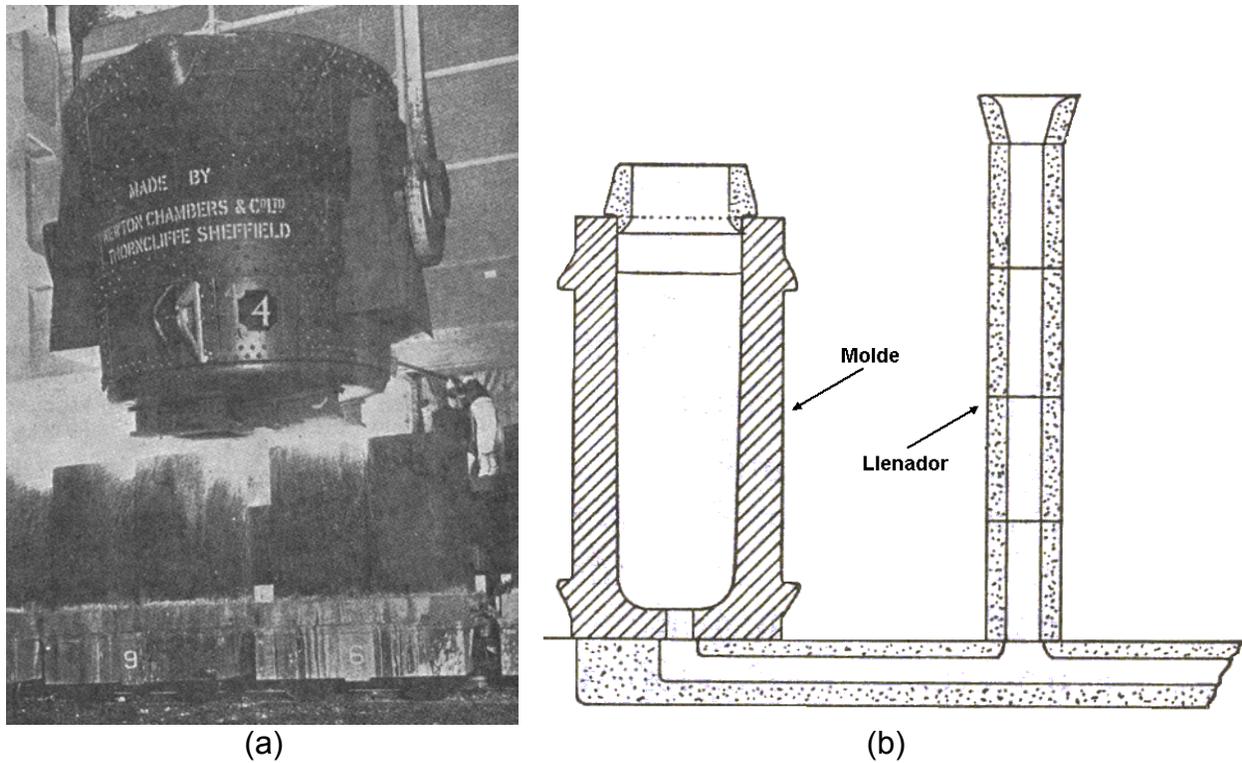
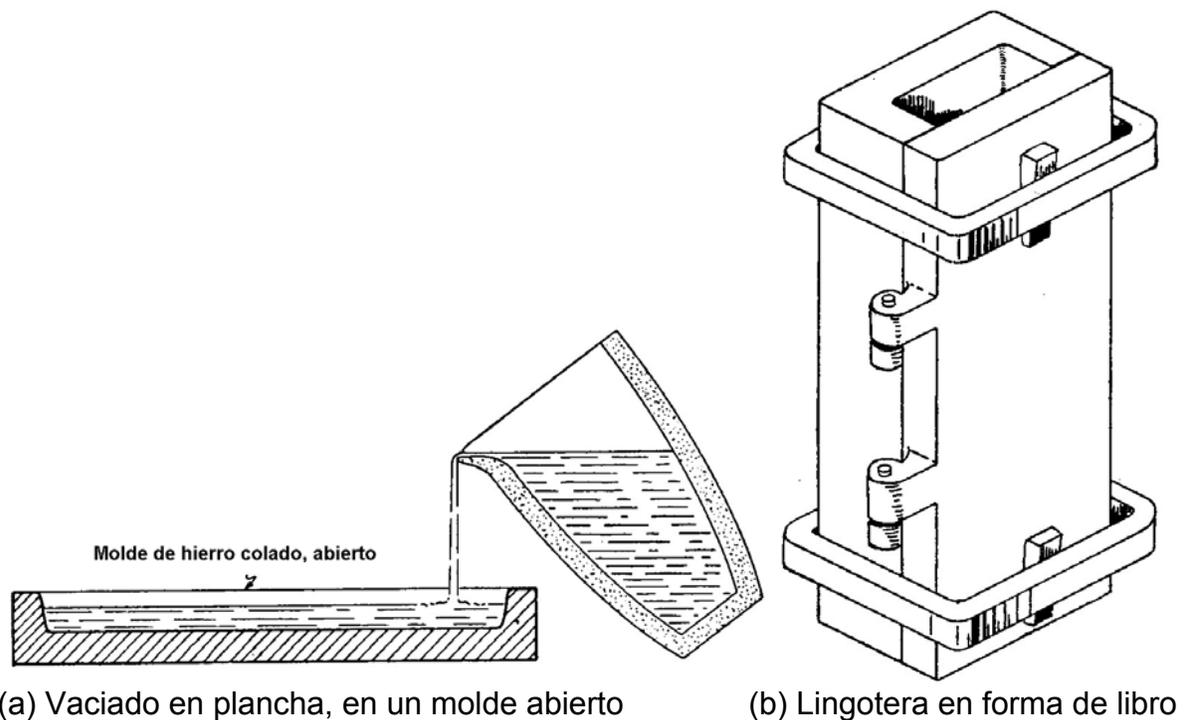
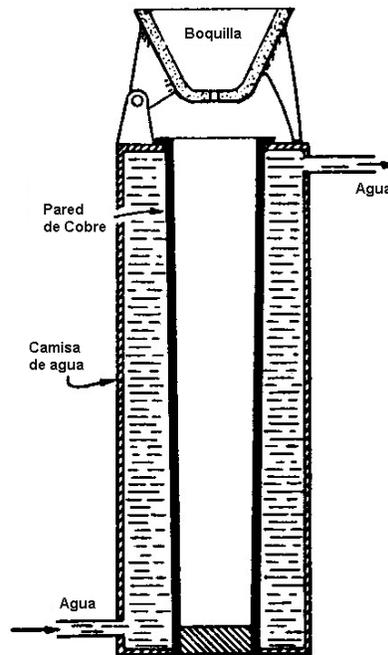


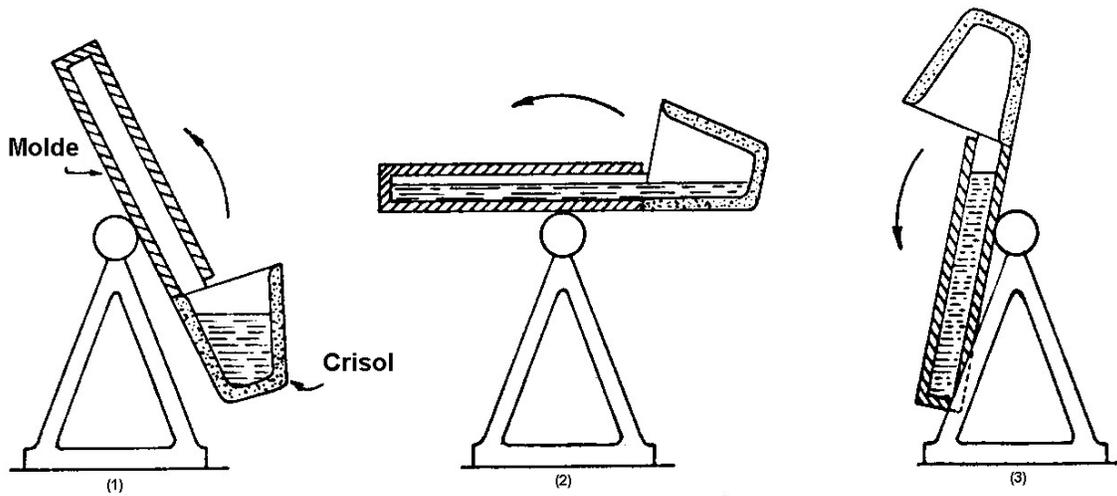
Figura 11: (a) Vaciado de acero de una cuchara grande a moldes de lingotes y (b) dispositivo para vaciar lingotes de acero por el fondo.

En la figura 12 se presentan algunos dispositivos para el vaciado de metales no ferrosos.





(c) Lingotera enfriada por agua



(d) Principio del proceso de Durville

Figura 12: Dispositivos para el vaciado de metales no ferrosos.

La figura 13 presenta algunas unidades de colada continua.

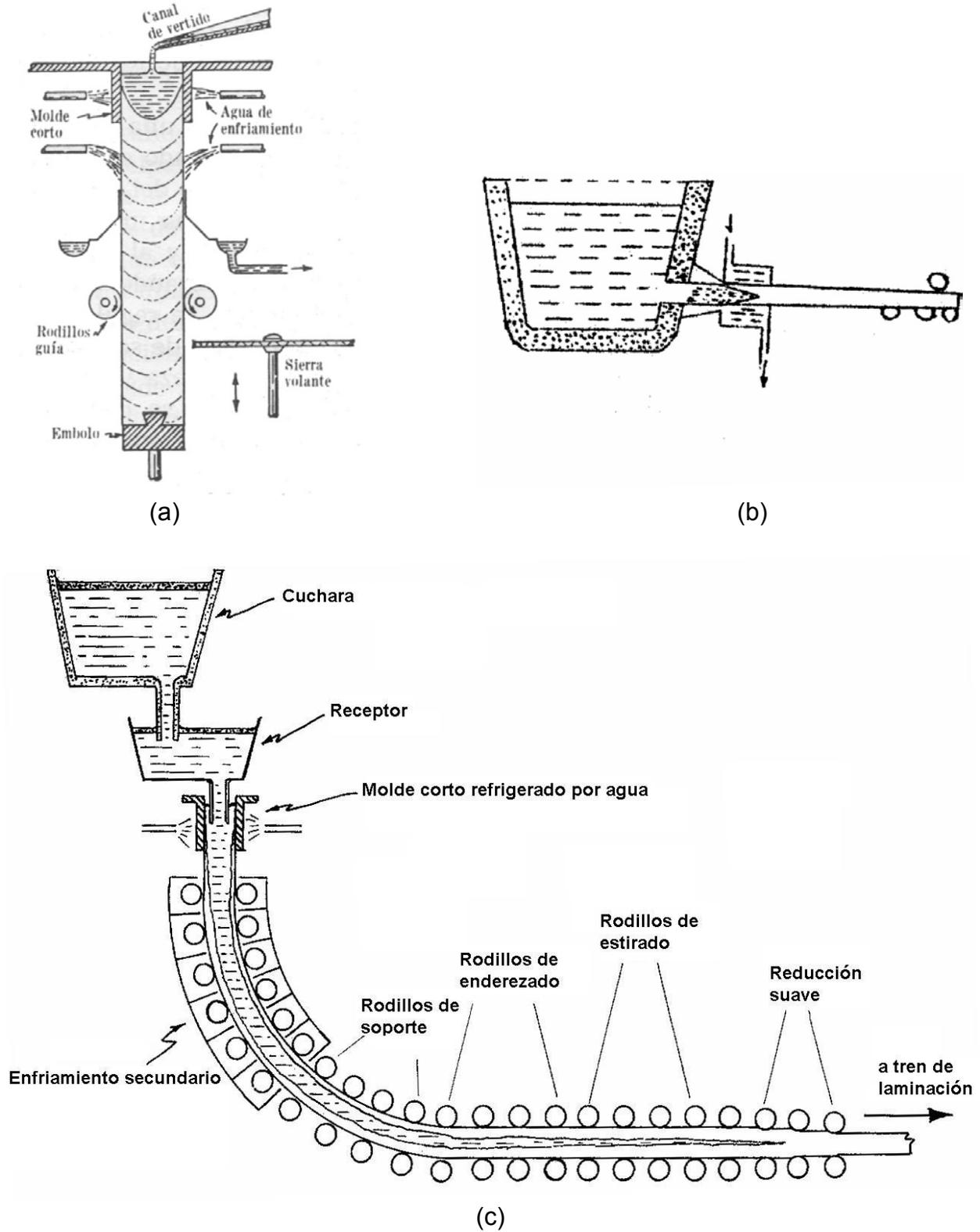


Figura 13: Dispositivos de colada continua, (a) colada vertical semicontinua, (b) colada continua horizontal y (c) colada continua vertical.