

2.1.3 SOLIDIFICACIÓN Y ENFRIAMIENTO

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

2.1.3.1 Solidificación de los metales

La solidificación involucra el regreso del metal fundido al estado sólido. El proceso de solidificación difiere, dependiendo de si el metal es un elemento puro o una aleación.

Metales puros. Un metal puro solidifica a una temperatura constante que constituye su punto de congelación o punto de fusión. Los puntos de fusión de los metales puros son bien conocidos. El proceso ocurre en un tiempo determinado como se muestra en la figura 2.3, conocida como curva de enfriamiento. La solidificación real toma un tiempo llamado, *tiempo local de solidificación*, durante el cual el calor latente de fusión del metal escapa fuera del molde. El *tiempo total de solidificación* va desde el momento de vaciar el metal hasta su completa solidificación. Después que la fundición se ha solidificado completamente, el enfriamiento continúa a una velocidad indicada por la pendiente hacia abajo de la curva de enfriamiento.

Debido a la acción refrigerante de la pared del molde, se forma una delgada película inicial de metal sólido en la pared inmediatamente después del vaciado. El espesor de esta película aumenta para formar una costra alrededor del metal fundido que va creciendo hacia el centro de la cavidad conforme progresa la solidificación. La velocidad del enfriamiento depende del calor que se transfiere en el molde y de las propiedades térmicas del metal.

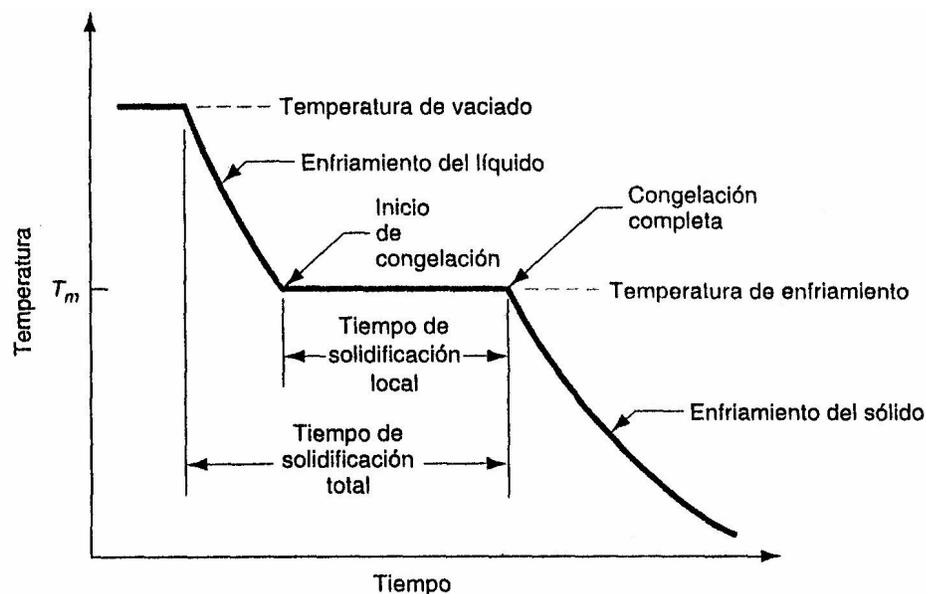


FIGURA 2.3 Curva de enfriamiento para un metal puro durante la fundición.

Es interesante examinar la formación del grano metálico y su crecimiento durante este proceso de solidificación. El metal que forma la película inicial se ha enfriado rápidamente por la extracción de calor a través de la pared del molde. Esta acción de enfriamiento causa que los granos de la película sean finos, equiaxiales y orientados aleatoriamente. Al continuar el enfriamiento se forman más granos y el crecimiento ocurre en direcciones alejadas de la transferencia de calor. Como el calor se transfiere a través de la costra y la pared del molde, los granos crecen hacia adentro como agujas o espinas de metal sólido. Al agrandarse estas espinas se forman ramas laterales que siguen creciendo y forman ramas adicionales en ángulos rectos con las primeras. Este tipo de crecimiento llamado crecimiento dendrítico del grano ocurre no solamente en la solidificación de los metales puros, sino también en la de las aleaciones. Estas estructuras tipo árbol se llevan a cabo en forma gradual durante el enfriamiento, al depositarse continuamente metal adicional en las dendritas hasta completar la solidificación. Los granos resultantes de este crecimiento dendrítico adoptan una orientación preferente y tienden a ser burdos y alinearse en forma de granos columnares hacia el centro de la fundición. La estructura granulada resultante se ilustra en la figura 2.4

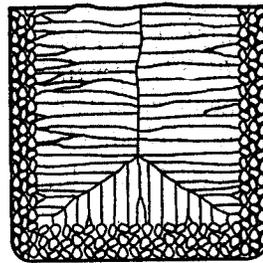


FIGURA 2.4 Estructura cristalina característica del un metal puro, mostrando los granos, pequeños orientados aleatoriamente cerca de las paredes del molde, y los granos columnares grandes orientados hacia el centro de la fundición

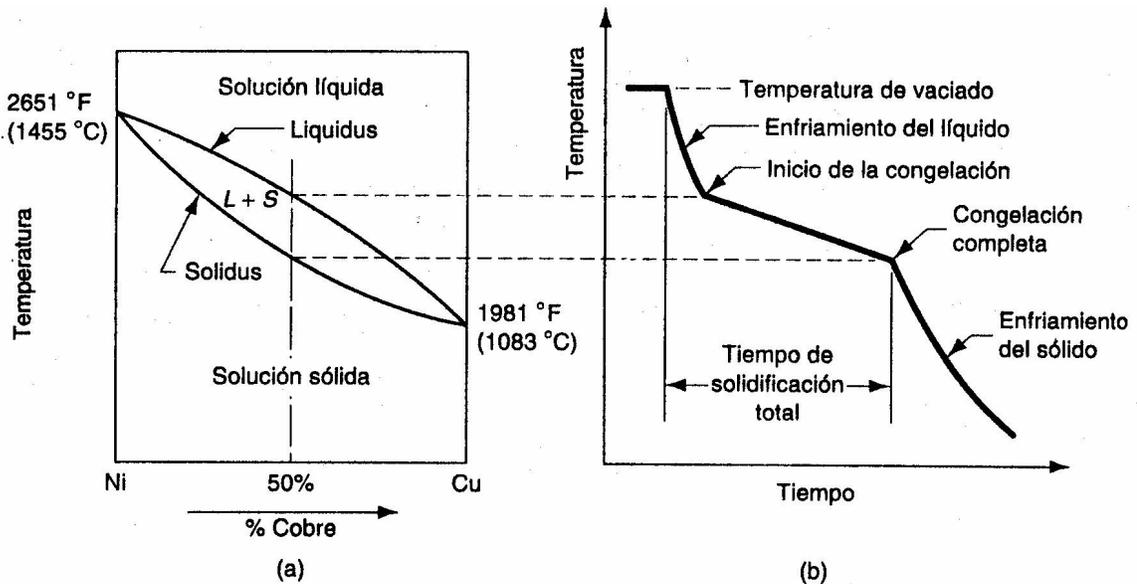


FIGURA 2.5 (a) Diagrama de fase para un sistema, de aleación cobre-níquel y (b) curva de enfriamiento asociada para una composición Ni-Cu 50-50% durante la fundición.

Aleaciones en general. Las aleaciones solidifican generalmente en un intervalo de temperaturas en lugar de una temperatura única. El rango exacto depende de la aleación y su composición particular. Se puede explicar la solidificación de una aleación con referencia a la figura 2.5, que muestra el diagrama de fase de una aleación en particular y a la curva de enfriamiento para una composición dada. Conforme descende la temperatura, empieza la solidificación en la temperatura que indica la línea *liquidus* y se completa cuando se alcanza la *solidus*. El inicio de la solidificación es similar a la del metal puro. Se forma una delgada película en la pared del molde debido a un alto gradiente de temperatura en esta superficie. La solidificación continúa como para un metal puro, mediante la formación de dendritas alejadas de las paredes. Sin embargo, debido a la propagación de la temperatura entre *liquidus* y *solidus*, el crecimiento de las dendritas es tal que se forma una zona avanzada donde el metal sólido y el líquido coexisten. La porción sólida está constituida por estructuras dendríticas que se han formado lo suficiente y han atrapado en la matriz pequeñas islas de líquido. La región sólido-líquido tiene una consistencia suave que da lugar a su nombre de *zona blanda*. Dependiendo de las condiciones del enfriamiento, la zona blanda puede ser relativamente angosta o puede ocupar la mayor parte de la fundición. Los factores que promueven la última condición son una lenta transferencia de calor fuera del metal caliente y una amplia diferencia entre *liquidus* y *solidus*. Las islas de líquido en la matriz de dendrita se solidifican gradualmente al bajar la temperatura de la fundición hasta la temperatura *solidus* que corresponde a la composición de la aleación.

Otro factor que complica la solidificación de las aleaciones es la composición de las dendritas que al iniciar su formación son favorecidas por el metal que tiene el punto de fusión mayor. Al continuar la solidificación las dendritas crecen y se genera un desbalance entre la composición del metal solidificado y el metal fundido remanente. Este desbalance de composición se manifiesta finalmente como segregación de elementos en las fundiciones terminadas. La segregación es de dos tipos, microscópica y macroscópica. A nivel microscópico, la composición química varía a través de cada grano individual. Esto se debe a que la espina inicial de cada dendrita tiene una proporción más alta de uno de los elementos de la aleación. La dendrita crece a expensas del líquido remanente que ha sido parcialmente agotado de este primer elemento. Finalmente, el último metal que solidifica en cada grano es el que quedó atrapado en las ramas de las dendritas, cuya composición es aún más desbalanceada. El resultado es una variación en composición química dentro de cada grano de la fundición.

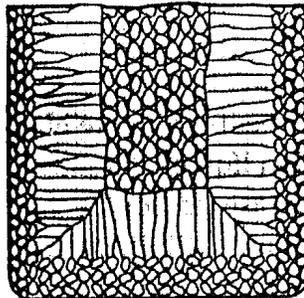


FIGURA 2.6 Estructura cristalina característica de fundición para una aleación, mostrando la segregación de los componentes en el centro de la fundición.

A nivel macroscópico, la composición química varía a través de la fundición. Como las regiones de la fundición que se solidifica primero (generalmente cerca de las paredes del molde) son más ricas en un componente que en otro, la composición de la aleación fundida remanente queda modificada cuando ocurre la solidificación en el interior. Se genera entonces, una segregación general a través de la sección transversal de la fundición, llamada algunas veces segregación de *lingote* como se muestra en la figura 2.6.

Aleaciones eutécticas. Las aleaciones eutécticas constituyen una excepción del proceso general de solidificación de las aleaciones. Una *aleación eutéctica* tiene una composición particular en la cual las temperaturas sólidos y líquidos son iguales. En consecuencia, la solidificación ocurre a una temperatura constante, y no en un rango de temperaturas como se describió para un metal puro, el hierro fundido (4.3%C) son ejemplos de aleaciones eutécticas que se usan en fundición.

2.1.3.2 Tiempo de solidificación

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

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

Donde:

TST = Tiempo de solidificación total, min;

V = Volumen de fundición, (m³);

A = Área superficial de la fundición, (m²);

n = Exponente que toma usualmente un valor de 2;

C_m = Es la constante del molde.

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

La regla de Chvorinov indica que una fundición con una relación de volumen a área superficial se enfriará y solidificará más lentamente que otra con una relación más baja. Este principio ayuda en el

diseño de la mazarota del molde. Para cumplir su función de alimentar metal fundido a la cavidad principal, el metal en la mazarota debe permanecer en fase líquida más tiempo que el de la fundición. En otras palabras, la *TST* para la mazarota debe exceder la *TST* de la fundición principal. Como la condición del molde para la mazarota y la fundición es la misma, las constantes del molde serán iguales. Si el diseño de la mazarota incluye una relación de volumen a área más grande, podemos estar más o menos seguros de que la fundición principal solidificará primero y se reducirán los efectos de la contracción. Antes de considerar el diseño de la mazarota mediante la regla de Chvorinov tomemos en cuenta el tema de la contracción, razón por la cual se necesitan las mazarotas.

2.1.3.3 Contracción

Nuestro análisis de la solidificación ha omitido el impacto de la contracción que ocurre durante el enfriamiento y la solidificación. La contracción ocurre en tres pasos: 1) contracción líquida durante el enfriamiento anterior a la solidificación; 2) contracción durante el cambio de fase de líquido a sólido, llamada *contracción de solidificación*, y 3) contracción térmica de la fundición solidificada durante el enfriamiento hasta la temperatura ambiente. Los tres pasos pueden explicarse con referencia a una fundición cilíndrica hipotética hecha en un molde abierto, como se muestra en la figura 2.7.

El metal fundido inmediatamente después de vaciado se muestra en la parte (0) de la serie. La contracción del metal líquido durante el enfriamiento, desde la temperatura de vaciado hasta la temperatura de solidificación, causa que la altura del líquido se reduzca desde el nivel inicial como en (1) de la Fig. La cantidad de esta concentración líquida es generalmente alrededor del 0.5%. La contracción de solidificación que se observa en la parte (2) tiene dos efectos. **Primero**, la contracción causa una reducción posterior en la altura de la fundición. **Segundo**, la cantidad de metal líquido disponible para alimentar la porción superior del centro de la fundición se restringe. Ésta es usualmente la última región en solidificar; la ausencia de metal crea un vacío en este lugar de la fundición. Esta cavidad de encogimiento es llamada por los fundidores *rechupe*. Una vez solidificada, la fundición experimenta una contracción posterior en altura y diámetro mientras se enfría como en (3). Esta contracción se determina por el coeficiente de expansión térmica del metal sólido, que en este caso se aplica a la inversa para determinar la contracción.

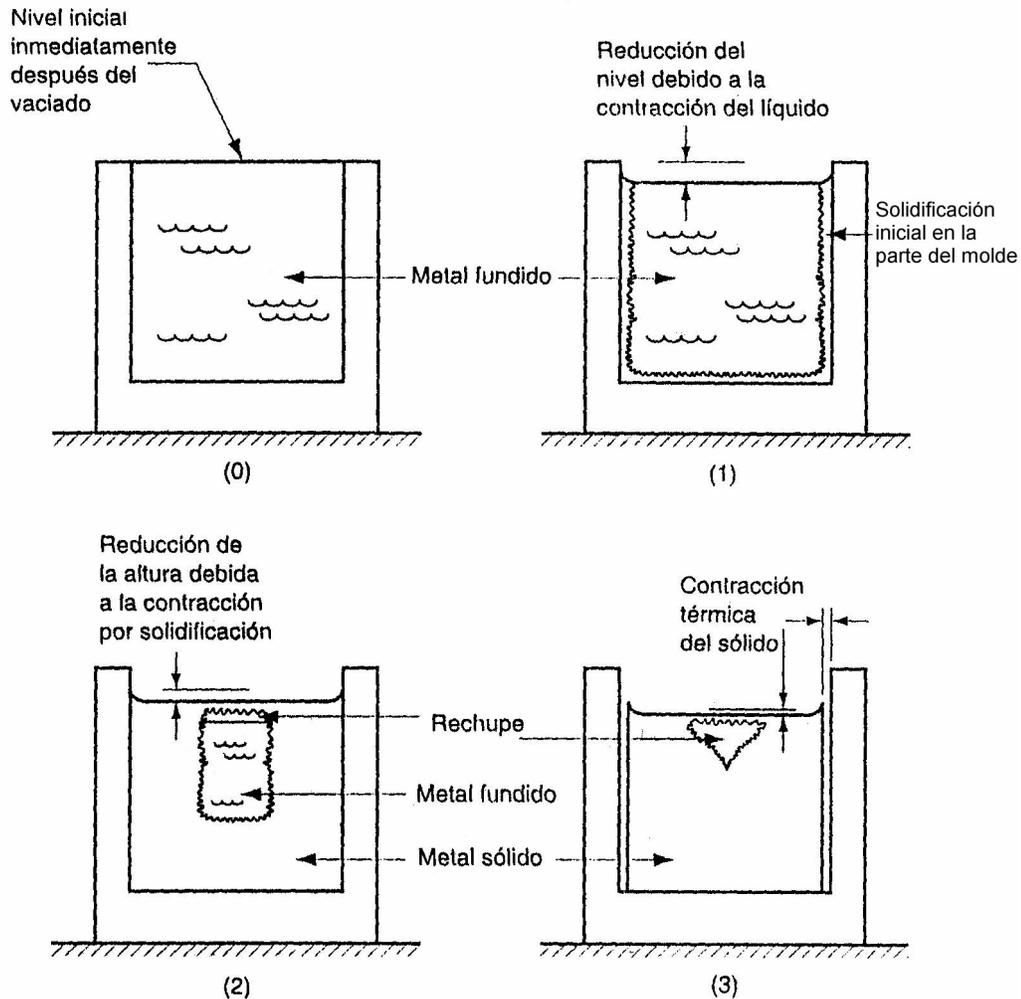


FIGURA 2.7 Contracción de una fundición cilíndrica durante la solidificación y enfriamiento: (0) niveles iniciales del metal fundido inmediatamente después del vaciado; (1) reducción del nivel causada por la contracción del líquido durante el enfriamiento; (2) reducción de la altura y formación de la bolsa de contracción causada por la contracción por solidificación; y (3) reducción posterior de la altura y diámetro debido a la contracción térmica durante el enfriado del metal sólido. Las reducciones están exageradas para mayor claridad.

La Tabla 2.1, presenta algunos valores típicos de la contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debidos a la contracción por solidificación y a la contracción sólida paso (2) y (3). La contracción por solidificación ocurre casi en todos los metales porque la fase sólida tiene una mayor densidad que la fase líquida. La transformación de fase que acompaña la solidificación causa una reducción en el volumen por unidad de peso del metal. La excepción en la tabla 2.1 es el hierro fundido con un contenido alto de carbono, cuya solidificación se complica por un período de grafitación durante las etapas finales de enfriamiento, que provoca una expansión tendiente a contrarrestar el crecimiento volumétrico asociado con el cambio de fase.

TABLA 2.1 Contracción volumétrica para diferentes metales de fundición debida a la contracción por solidificación y contracción del sólido

Metal	Contracción volumétrica debida a:	
	Contracción por solidificación %	Contracción térmica del sólido %
Aluminio	7.0	5.6
Aleación de aluminio (típica)	7.0	5.0
Fundición de hierro gris	1.8	3.0
Fundición de hierro gris al alto carbono	0	3.0
Fundición de acero al bajo carbono.	3.0	7.2
Cobre	4.5	7.5
Bronce (CuSn)	5.5	6.0

Los modelistas toman en cuenta la contracción por solidificación para sobredimensionar las cavidades de los moldes. La cantidad que hay que aumentar a las dimensiones del molde con respecto al tamaño de la pieza final se llama *tolerancia de contracción del modelo*. Aunque la contracción es volumétrica, las dimensiones de la fundición se expresan linealmente. Para hacer los modelos y los moldes más grandes que la pieza, se usan reglas especiales de contracción que consideran una ligera elongación en proporción adecuada. Estas reglas varían en elongación desde menos de 3 mm a 16 mm por cada 300 mm de longitud con respecto a una regla normal, dependiendo del metal a fundir.

2.1.3.4 Solidificación direccional

Para minimizar los efectos dañinos de la contracción es conveniente que las regiones de la fundición más distantes de la fuente de metal líquido se solidifiquen primero y que la solidificación progrese de estas regiones hacia la mazarota. En esta forma, el metal fundido continuará disponible en las mazarotas para prevenir los vacíos de contracción durante la solidificación. Se usa el término - *solidificación direccional* para describir este aspecto del proceso de solidificación y sus métodos de control. La solidificación direccional deseada se logra aplicando la regla de Chvorinov al diseño de la fundición, a su orientación dentro del molde y al diseño del sistema de mazarotas. Por ejemplo, al localizar las secciones de la fundición con menores relaciones V/A lejos de las mazarotas la solidificación aparecerá primero en estas regiones y el suministro de metal líquido para el resto de la fundición permanecerá abierto hasta que solidifiquen las secciones más voluminosas.

Otra forma de fomentar la solidificación direccional es usar *enfriadores* sumideros de calor internos o externos que causan un enfriamiento rápido en ciertas regiones de la fundición. Los enfriadores *internos* son pequeñas partes de metal colocadas dentro de la cavidad antes del vaciado, cuyo objetivo es que el metal fundido solidifique primero alrededor de estas partes. El refrigerante interno debe tener una composición química igual a la del metal que se vacía. Esto se logra fabricando el enfriador del mismo metal que la fundición.

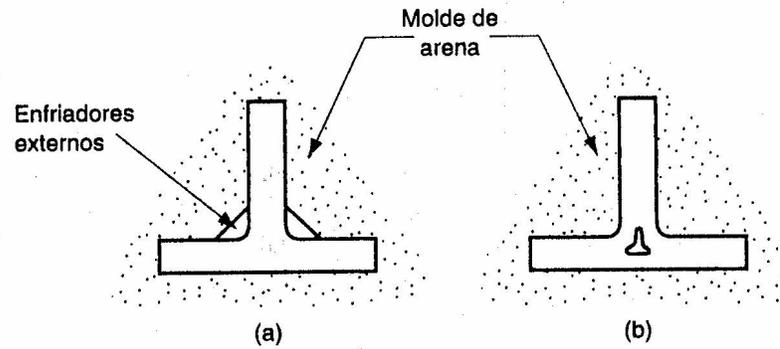


FIGURA 2.8 (a) Enfriadores externos para alentar la solidificación rápida del metal fundido en una zona delgada de la fundición y (b) resultado probable si no se usan los enfriadores.

Los **enfriadores externos** son insertos metálicos en las paredes de la cavidad del molde que remueven el calor del metal fundido más rápidamente que la arena circundante, a fin de promover solidificación. Se usan a menudo en secciones de la fundición que son difíciles de alimentar con metal líquido, el cual encuentra así un enfriamiento rápido que lo hace solidificar en estas secciones mientras la conexión con el metal líquido está todavía abierta. La figura 2.8 ilustra una posible aplicación de refrigerantes externos y el resultado probable si no se usaran.

2.1.3.5 Diseño de la mazarota

Tal como se describió antes, una mazarota figura 2.1(b) se usa en un molde de fundición para alimentar metal líquido al proceso durante el enfriamiento y compensar así la contracción por solidificación. La mazarota debe permanecer líquido hasta después de que la fundición solidifique. Para satisfacer este requerimiento se puede calcular el tamaño de la mazarota usando la regla de Chvorinov. El siguiente ejemplo ilustra los cálculos.

Ejemplo 2.3: Diseño de la mazarota usando la regla de Chvorinov

Debe diseñarse una mazarota cilíndrica para un molde de fundición en arena. La fundición es una placa rectangular de acero con dimensiones 0.0762 m x 0.127 X 0.0254 m. En observaciones previas se ha indicado que el tiempo de solidificación total (TST) para esta fundición = 1.6 min. La mazarota cilíndrica tendrá una relación de diámetro a altura de 1.0. Determine la dimensión que la mazarota de manera que $TST = 2.0$ minutos.

Solución: Determine primero la relación V/A para la placa. Su volumen $V = 0.0762 \times 0.127 \times 0.0254 = 0.0002458 \text{ m}^3$, y la superficie del área $A = 2(0.0762 \times 0.127 + 0.0762 \times 0.0254 + 0.127 \times 0.0254) = 0.032258 \text{ m}^2$. Dado que $TST = 1.6$ min podemos determinar la constante del molde C_m mediante la ecuación (2.7) usando un valor de $n = 2$ en la ecuación.

$$C_m = \frac{TST}{(V/A)^2} = \frac{1.6}{(0.0002458/0.03226)^2} = 27560.36 \left[\text{min}/\text{m}^2 \right]$$

Después debemos diseñar la mazarota de manera que su tiempo de solidificación total sea de 2.0 min, usando el mismo valor de la constante del molde ya que tanto la fundición como la mazarota están en el mismo molde. El volumen de la mazarota esta dado por

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

y el área de la superficie esta dada por

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

Como estamos usando una relación $D/h = 1.0$, entonces $D = h$. Al sustituir D por h en las formulas del volumen y el área tenemos

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

y

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

entonces la relación $V/A = D/6$. Usando esta relación en la ecuación de Chvorinov tenemos:

$$TST = 2.0 = 27560.36 \left(\frac{D}{6} \right)^2 = 4593.4 D^2$$

$$D^2 = \frac{2.0}{4593.4} = 4.35 \times 10^{-4} \left[\text{m}^2 \right]$$

$$D = 2.09 \times 10^{-2} \left[\text{m} \right]$$

Como $h = D$, también $h = 2.09 \times 10^{-2} \left[\text{m} \right]$

La mazarota representa el metal de desperdicio que se separa del proceso y se refunde para hacer fundiciones subsecuentes. Es deseable que este volumen de metal en la mazarota sea el mínimo. Como la forma geométrica de la mazarota se selecciona normalmente para maximizar V/A , esto tiende a reducir el volumen de la mazarota lo más posible. Nótese que el volumen de la mazarota en nuestro ejemplo es $V = \pi(2.09 \times 10^{-2})^3 / 4 = 7.14 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, solamente 55% del volumen de la placa (fundición), incluso cuando el tiempo de solidificación total es más grande por un 25%.

La mazarota se puede diseñar en diferentes formas. El diseño mostrado en la figura 2.1 (b) es una *mazarota lateral*. Está anexada a un lado de la fundición por medio de un pequeño canal. Una *mazarota superior* se conecta en la parte superior de la superficie de la fundición como en la figura 2.1(c). Las mazarotas pueden ser abiertas o sumergidas. Una *mazarota abierta* está expuesta al exterior en la superficie superior de la tapa, pero tiene la desventaja de permitir que escape más calor, promoviendo una solidificación más rápida. Una *mazarota sumergida* está completamente encerrada dentro del molde como en la figura 2.1 (b).