

3
209

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS
POR COLADA SEMICONTINUA DE
ZINALCO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

PRESENTA:
DAVID CASTAÑEDA ROSAS

MEXICO, D.F.
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1993



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE.

página.

Introducción.....	1
--------------------------	----------

CAPITULO I

Sistema de Colada Semicontinua

Sistema de Colada semicontinua.....	3
1.1 Proceso de colada semicontinua.....	3
1.1.1. Flujos caloríficos durante el proceso de colada semicontinua...5	
1.2 Sistema de colada semicontinua empleado.....	8
1.3 Obtención de barras.....	15
1.3.1 Preparación.....	15
1.3.2. Calefacción.....	15
1.3.3. Descripción de una prueba.....	15
1.4 Caracterización.....	16
1.4.1. Microscopía óptica.....	16
1.4.2. Microscopía por barrido electrónico.....	16
1.5 Preparación de muestras para análisis metalográfico.....	16

CAPITULO II

Resultados

2.1 Resultados.....	18
2.1.1 Microscopía óptica.....	18

2.1.1 Barra número 1.....	19
2.1.2 Barra número 2.....	21
2.1.3 Barra número 3.....	23
2.1.4 Barra número 4.....	25
2.1.5 Barra número 5.....	27
2.1.6 Barra número 6.....	30
2.1.7 Barra número 7.....	32
2.1.8 Barra número 8.....	34
2.1.9 Barra número 9.....	36
2.2 Microscopía por barrido electrónico.....	38
2.2.1 Microestructura intradendrítica.....	38
2.2.2 Microestructura interdendrítica.....	39
2.2.3 Cubierta dendrítica.....	40
2.2.4 Poros.....	41

CAPITULO III

<i>Discusión</i>	43
------------------------	----

CAPITULO IV

<i>Conclusiones</i>	52
---------------------------	----

<i>Bibliografía</i>	53
---------------------------	----

INTRODUCCION

En los países industrializados la colada continua es ampliamente usada hoy en día. Esta consiste en vaciar el metal líquido dentro de un molde vertical abierto por la parte superior e inferior, sacando el metal solidificado por el fondo del molde mediante un pistón de extracción. La colada continua fué inventada por el alemán Bessemer en 1865 [1]. Sin embargo, este proceso fué empleado en forma industrial a partir de 1950. Este proceso de solidificación presenta numerosas ventajas:

a) suprime el rechupe así como las sopladuras ya que el metal es enfriado energícamente y pasa con rapidez al estado sólido;

b) los constituyentes secundarios tales como impurezas o precipitados se encuentran finamente divididos debido a que su precipitación se realiza en un tiempo extraordinariamente corto [2].

La colada continua es muy usada para metales no ferrosos y es la base del proceso continuo para hacer lámina y alambre. El acero es obtenido por este proceso. El latón, cobre, aluminio y magnesio han sido vaciados exitosamente para la fabricación de lingotes redondos, varillas, láminas, billets cuadrados y hojas [3].

El objetivo principal de éste trabajo, es el de presentar las microestructuras obtenidas al aplicar el proceso de colada continua a aleaciones del sistema Zn-Al-Cu, y determinar la factibilidad del proceso en estas aleaciones. Para ello, se seleccionó la aleación Zn-22% peso-Al-2.5% peso-Cu (ZINALCO). Teniendo como referencia la microestructura de esta aleación preparada por la técnica de

colada en molde permanente, [4,5,6], uno de los resultados plausibles fué el refinamiento de grano obtenido. Cabe dejar claro, que el ZINALCO es esencialmente la aleación eutectoide del Zn-Al modificada con cobre (2-5%).

La presentación de este trabajo se organizó de la siguiente manera. En el primer capítulo se hace una descripción detallada del sistema de colada semicontinua empleado para Zinalco así como del proceso. En el segundo capítulo se presentan los resultados correspondientes tratando de enfatizar sobre la microestructura de las barras. En el tercer capítulo se hace una discusión en cuanto a la aplicabilidad de la colada semicontinua a Zinalco para la obtención de perfiles. Finalmente, en el último capítulo se exponen las conclusiones sobre este trabajo.

CAPITULO I.

SISTEMA DE COLADA SEMICONTINUA*

El diseño del sistema de colada semicontinua se hizo de manera que cumpliera los siguientes requisitos:

- a) Que tuviera la capacidad para obtener barra de Zinalco de hasta 1.5 m de longitud,*
- b) Que permitiera variar el diámetro y la forma de la sección de la barra,*
- c) Que evitara las reacciones químicas entre los elementos de la aleación en estado líquido y los contenedores.*

1.1 Proceso de Colada Semicontinua.

La colada semicontinua se realiza con una velocidad de desplazamiento del fondo falso constante, de manera que el perfil de las líneas líquido y sólido generadas dentro de la zona de moldeo permanezca estacionario (véase Figura 1). Para que ocurra lo anterior, el sistema debe mantener un equilibrio dinámico de los flujos caloríficos entre: la aleación en estado líquido y la barra solidificada; y el sistema de extracción de calor del aparato y el medio ambiente. En la siguiente sección se da una breve descripción de los flujos caloríficos característicos de la colada continua, y de las ecuaciones que gobiernan dichos flujos.

**El término semicontinua se emplea para dar a entender que el proceso es interrumpido por limitantes de espacio.*

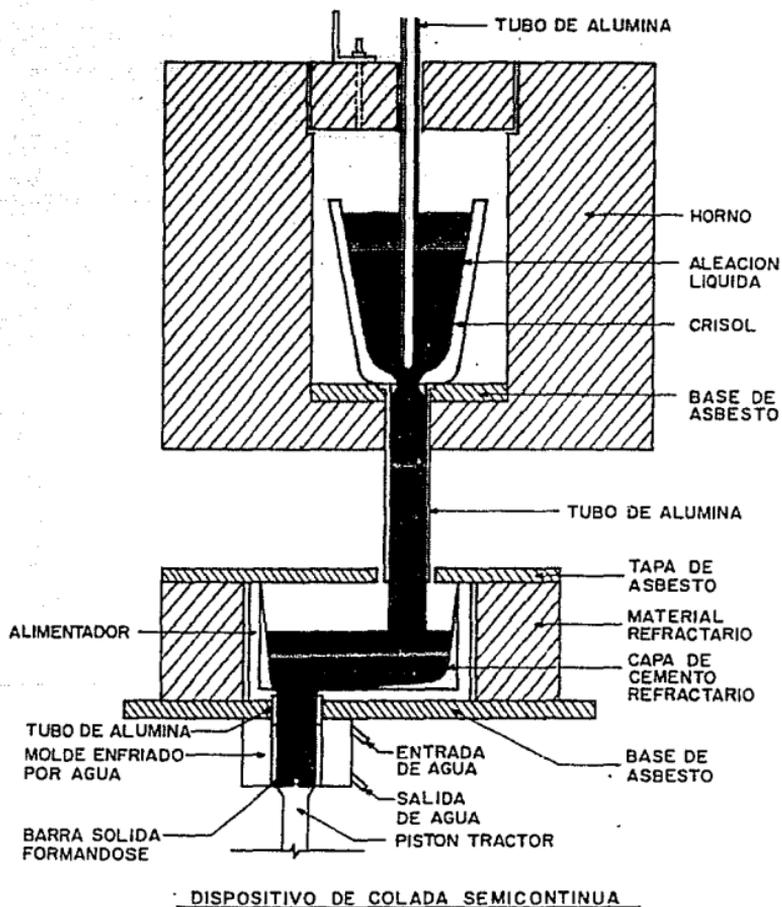


FIGURA 1. ESQUEMA DEL SISTEMA DE COLADA SEMICONTINUA. NOSE EL HORNO CON SU CRISOL, EL ALIMENTADOR Y EL MOLDE CON SU FONDO FALSO

1.1.1 Flujos caloríficos durante el proceso de colada semicontinua.

En la Figura 2 se muestra una representación típica del proceso de colada semicontinua. En ella se exhiben tres zonas de transferencia energética preferencial: la de conducción, la de convección y la de radiación; dichas zonas las describimos a continuación:

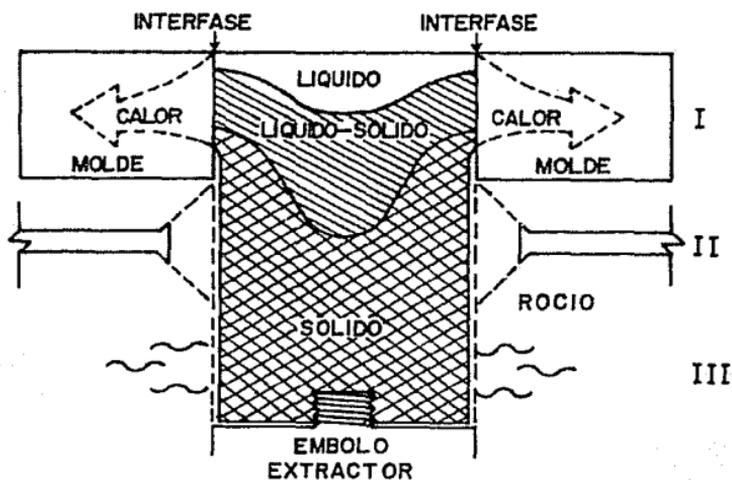


FIGURA 2. REPRESENTACION DEL PROCESO DE COLADA SEMICONTINUA. SE MUESTRAN LAS ZONAS DE TRANSFERENCIA PREFERENCIAL DE ENERGIA: (I) ZONA DE CONDUCCION; (II) ZONA DE CONVECCION; (III) ZONA DE RADIACION; TAMBIEN APARECEN LAS REGIONES: LIQUIDA; SEMISOLIDA SOLIDA.

I. Zona de conducción. En esta zona el enfriamiento es realizado por el molde con el propósito de crear una cáscara lo suficientemente gruesa capaz de resistir tanto la presión metalostática como los esfuerzos que se originan por la extracción del sólido. La contracción volumétrica del material recién solidificado provoca la separación de la cáscara de la pared del molde y reduce el área de contacto generándose una superficie con ondulaciones suaves y periódicas.

II. Zona de convección. En esta zona el material es enfriado por un rocío de agua con el objeto de solidificar totalmente el líquido, sin generar esfuerzos que causen grietas superficiales o internas.

III. Zona de radiación. Esta zona presenta gran importancia en los metales de alto punto de fusión como los aceros, ya que sus propiedades mecánicas dependen del enfriamiento en esta zona.

Los modelos matemáticos propuestos para el análisis térmico [7,8], parten de la ecuación diferencial parcial de transferencia de calor, que describe la conducción en un medio en movimiento con velocidad "u" en la dirección "z"

$$\rho C \frac{\delta T}{\delta t} + \rho C u \frac{\delta T}{\delta z} - \left[\frac{\delta}{\delta x} \left(\kappa \frac{\delta T}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\kappa \frac{\delta T}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(\kappa \frac{\delta T}{\delta z} \right) \right] = 0 \quad (1)$$

en donde:

C = Capacidad calorífica del sólido formado.

K = Conductividad térmica del sólido formado.

ρ = Densidad del sólido formado.

El primer término de la ec.(1) es el flujo de calor debido al cambio local de temperatura con el tiempo para un punto dado en el material solidificado. El segundo término nos indica el flujo térmico debido al movimiento de la interfase líquido-sólido. El tercer término se refiere al flujo debido a la conducción de calor.

Para simplificar la ec. (1), se establecen las siguientes suposiciones: a) no considerar la existencia de un gradiente de temperatura en el líquido ni la aparición de gradientes inducidos por distorsiones en el molde;

b) suponer constante el nivel del líquido en el molde;

c) considerar la conductividad térmica independiente de la temperatura;

d) suponer que la conducción de calor ocurre solo en dirección normal a la pared del molde. Estas suposiciones reducen la ec. (1) a:

$$C \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{K}{\rho} \left(\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \right) \quad (2)$$

la cual es una ecuación de flujo de calor en dos dimensiones. Las soluciones numéricas realizadas para aceros [9,10], han mostrado un

acuerdo cuantitativo regular con los resultados experimentales. Sin embargo, para el Zinalco, las suposiciones que permitieron llegar a la ec. (2) no son válidas ya que su conductividad térmica es tres veces mayor a la de del acero; por tal motivo la conducción de calor en el sólido ya no es despreciable. En estas condiciones el problema de flujo de calor se transforma en uno de tres dimensiones (ecuación 1). En vista de las complicaciones que presenta la solución de la ec.1, se decidió realizar la determinación de las variables de colada en forma experimental.

1.2 Sistema de colada semicontinua empleado.

El sistema de colada semicontinua empleado consta de cinco partes (véase Figura 3): a) la estructura, b) el subsistema de fusión y sobrecalentamiento del líquido, c) el subsistema de alimentación del molde, d) el subsistema de moldeo, e) el subsistema motriz del fondo falso. A continuación se describen cada una de sus partes constituyentes.

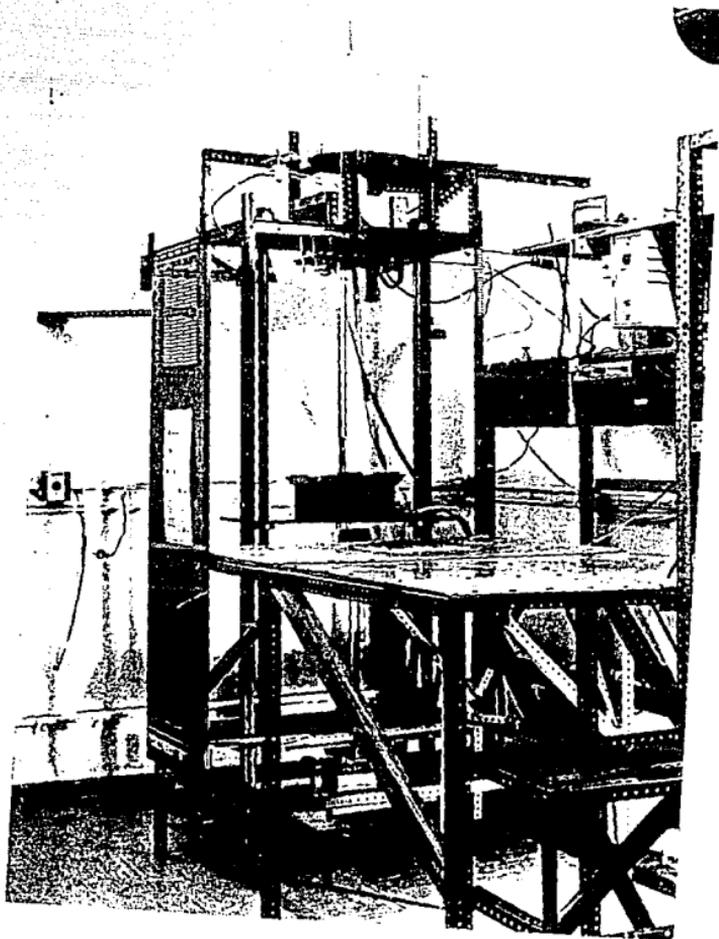


FIGURA 3. SISTEMA DE COLADA SEMICONTINUA.

a) La estructura soporta: el peso del horno de fusión con la carga de la aleación en su interior, el peso del alimentador, el peso del molde y el peso del subsistema motriz del fondo falso. Consiste de cuatro ángulos de acero en posición vertical soldados a las esquinas de dos placas paralelas del mismo material dispuestas en forma horizontal (véase Figura 4).

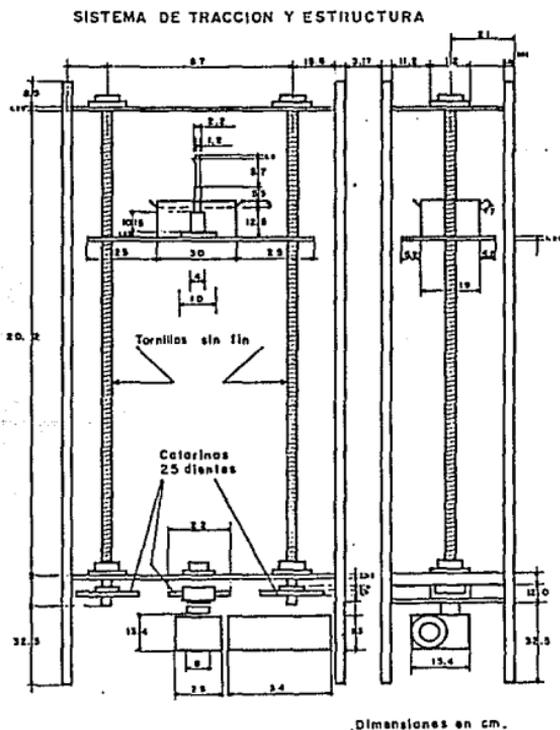


FIGURA 4. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE COLADA SEMICONTINUA.

b) El subsistema de fusión y sobrecalentamiento consiste de: un horno tubular con una zona de 0.23 m de altura a temperatura uniforme. Tanto la tapa desmontable del horno como la base del mismo son de ladrillo refractario y tienen un orificio concéntrico. La carga de Zinalco a fundir se coloca en un crisol cilíndrico de zirconita (óxido de Zirconio). El crisol está horadado en su base y dicho orificio se obstruye con la punta de una lanza de alúmina que entra desde fuera del horno atravesando la tapa. El horno disipa una potencia máxima de 8.8 kw lo que permite alcanzar la temperatura de trabajo (aproximadamente 873 K) en un tiempo aproximado de 1.5 horas. La temperatura del líquido se mantiene constante, con variaciones menores a 5 K, mediante un controlador de temperatura. Este horno descansa sobre el subsistema de alimentación del molde (véase Figura 5).

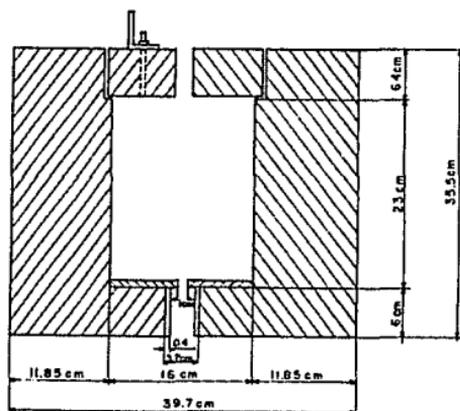


FIGURA 5. SUBSISTEMA DE FUSION.

c) El subsistema de alimentación del molde debe mantener constante la temperatura (873 K) del líquido proveniente del crisol. Dicho subsistema consta de: un contenedor hecho de ladrillo refractario, un horno en torno al contenedor el cual disipa una potencia máxima de 2.2 kw. La temperatura del alimentador se mantiene estable mediante el uso de otro controlador de temperatura. Antes de iniciar el movimiento del pistón extractor (fondo falso) éste debe sellar el fondo del molde. Este subsistema descansa sobre la placa superior de la estructura directamente debajo del horno de fusión (véase Figura 6).

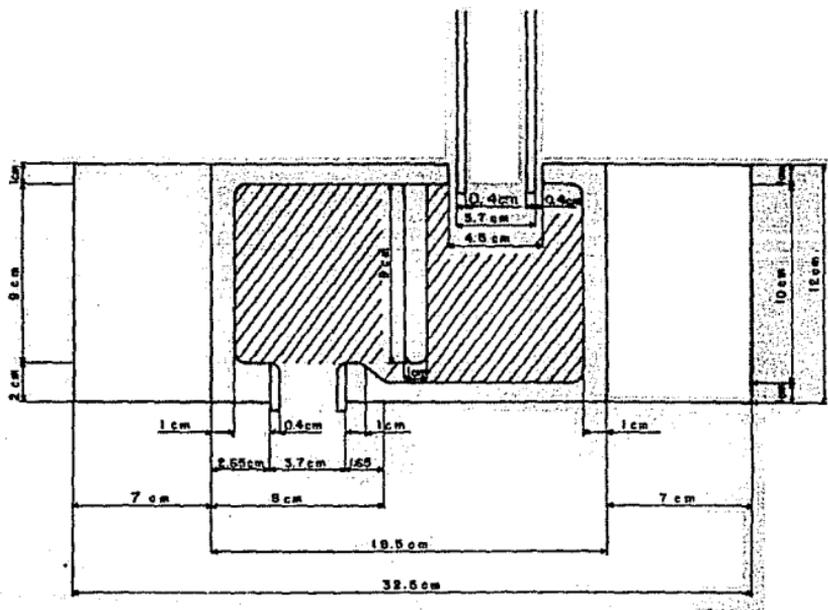


FIGURA 6. SUBSISTEMA DE ALIMENTACION DEL MOLDE.

d) El molde o lingotera extrae el calor del líquido hasta la formación del sólido, a medida que el líquido entra y el sólido sale. Consta de un tubo de Aluminio con camisa enfriado por agua (véase Figura 7). Este tubo tiene un acanalado interno a manera de serpentín para la circulación del agua. El flujo de agua se determina con un rotómetro. Las temperaturas del agua tanto a la entrada como a la salida del serpentín se miden con termómetros de mercurio. El subsistema de moldeo se encuentra alineado con la salida del alimentador, y está sujeto a la cara inferior de la placa superior de la estructura (véase Figura 3).

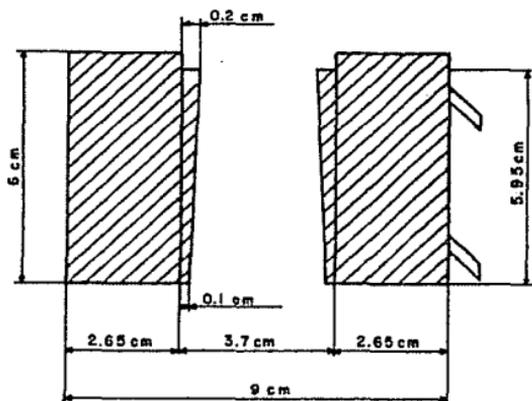


FIGURA 7. SUBSISTEMA DE MOLDEO.

e) El subsistema motriz del fondo falso permite una variación continua de velocidades en el intervalo comprendido entre 1×10^{-4} y 5×10^{-2} m/s. EL fondo falso descansa sobre una placa horizontal móvil que se desplaza verticalmente al girar dos tornillos sin fin que atornillan en dicha placa. El giro de los tornillos se debe a la acción de un motor eléctrico que actúa a través de una caja reductora de velocidad. La rapidez de giro del motor se varía utilizando un controlador de potencia. Tanto el motor como la caja reductora están colocados debajo de la placa inferior de la estructura (véase Figura 8).

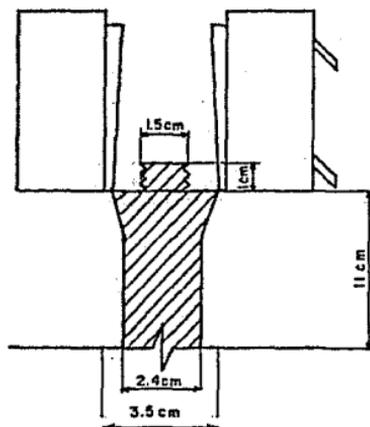


FIGURA 8. SUBSISTEMA MOTRIZ DEL FONDO FALSO.

1.3 Obtención de las barras.

1.3.1 Preparación. Al inicio, trozos de Zinalco con un peso total no mayor de 4 kg son colocados compactamente en el interior del crisol del horno de fusión. El orificio de la base del crisol se cierra con la lanza de alúmina. El fondo falso se coloca de manera que selle la salida del molde para evitar la fuga del líquido, (véase Figura 8).

1.3.2 Calefacción. Una vez realizado lo anterior, se activan los controladores de temperatura del horno de fusión y del alimentador a las temperaturas de trabajo respectivas, que en nuestro caso fueron de 873 ± 5 K. Dicha temperatura se seleccionó con el criterio de lograr máxima fluidez sin pérdida de zinc por evaporación. Se ha observado que el zinc inicia su evaporación cerca de los 823 K [11]. Luego, a los 873 K se obtuvo suficiente fluidez en el Zinalco líquido como para pasar libremente por los conductos hacia el alimentador.

1.3.3 Descripción de una prueba. En cuanto las temperaturas del horno y del alimentador han alcanzado los valores prefijados y se ha logrado la homogeneidad térmica del líquido, manualmente se retira la lanza de alúmina que obstruye el orificio del crisol; de esta manera, el líquido fluye hacia el alimentador y llega hasta el interior del molde de aluminio. El líquido en el molde solidifica muy rápidamente, por lo que el fondo falso deberá moverse de inmediato para extraer el sólido formado. Cabe mencionar que si el fondo falso es retirado a una velocidad mayor que la de solidificación del líquido se presentará un escurrimiento de este último, y que si se retira a una velocidad menor dicho líquido solidificará dentro del alimentador.

1.4 Caracterización.

1.4.1 Microscopía óptica. Parte del estudio metalográfico se hizo con un microscopio óptico. En nuestro caso utilizamos una amplificación de 66X. Con esta amplificación observamos la forma, la distribución y el tamaño de las dendritas. Se decidió tomar las fotografías desde el centro de la cara transversal de la muestra hasta la orilla.

1.4.2 Microscopía por Barrido Electrónico. Otra parte del estudio metalográfico se hizo con un microscopio electrónico de barrido (M.E.B.). La muestra se analizó detalladamente, practicándole un barrido hasta visualizar el interior de las dendritas, la zona interdendrítica, y algunos defectos tales como porosidad y fisuras.

1.5 Preparación de Muestras para Análisis Metalográfico.

Se realizaron cortes transversales al inicio y final de cada barra. Posteriormente a dichos extremos se les corto longitudinalmente por el centro con el propósito de realizar un estudio transversal y longitudinal de la microestructura a ambos extremos. Los cortes transversales se hicieron a 5 cm de cada extremo en cada barra. Después, las muestras se pulieron mecánicamente. En seguida se procedió a hacer el pulido fino. Esta etapa consiste en usar una rueda con paño para pulido y pasta de diamante, agregando periódicamente unas gotas de aceite metalográfico para lubricación de la superficie.

Una vez obtenido el pulido especular, se realizó el ataque químico por inmersión. Un reactivo común para atacar al Zinc y a sus aleaciones es la

mezcla de trióxido de cromo (CrO_3) con sulfato de sodio (Na_2SO_4) en agua con la siguiente composición:

200 gr. CrO_3 , 15 gr. Na_2SO_4 en 1000 ml. de agua.

Son suficientes de 1.5 a 2 minutos para que el ataque químico sea adecuado. Inmediatamente después se lavó la muestra con agua corriente, se enjuagó con metanol y se secó mediante chorro de aire, quedando de esta manera lista para el examen microscópico.

CAPITULO II

Resultados

2.1 Microscopía óptica.

Las observaciones hechas a lo largo de las direcciones longitudinal y transversal de cada barra, mostraron que solo existe variación en cuanto a tamaño y forma del grano en la dirección transversal. Las formas típicas encontradas en dicha dirección fueron: dendritas equiaxiadas, dendritas columnares, dendritas en forma de roseta y granos equiaxiados. La mayoría de las secciones mostraron radialmente dos formas de grano y únicamente una mostró tres. Una de las causas de tal diferencia en la microestructura fué la velocidad de colada. Esto es, la sección que presentó radialmente tres formas de grano correspondió a una barra colada a velocidad mayor que el resto de las barras.

Las microestructuras observadas en la sección transversal, tanto de la parte inicial como de la parte final de cada barra, se muestran a continuación con una descripción detallada del tamaño y forma de los granos. Nótese en las imágenes la existencia de una estructura intergranular (zona interdendrítica) no resuelta con la amplificación empleada (66 X).

2.1.1 Barra número 1.

Sección inicial.

La sección inicial de la barra 1 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas columnares y dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 380 μ m de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 75 μ m (véase Figura 9); mientras que, los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 μ m y las dendritas equiaxiadas aprox. 15 μ m de ancho y 30 μ m de largo. (véase Figura 9).

Sección final.

La sección final de la barra 1 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 12 mm de radio constituida por dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 2 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 82 μ m (véase Figura 9); mientras que, los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 15 μ m y las dendritas equiaxiadas aprox. 15 μ m de ancho y 45 μ m de largo (véase Figura 9).

BARRA N.º 1

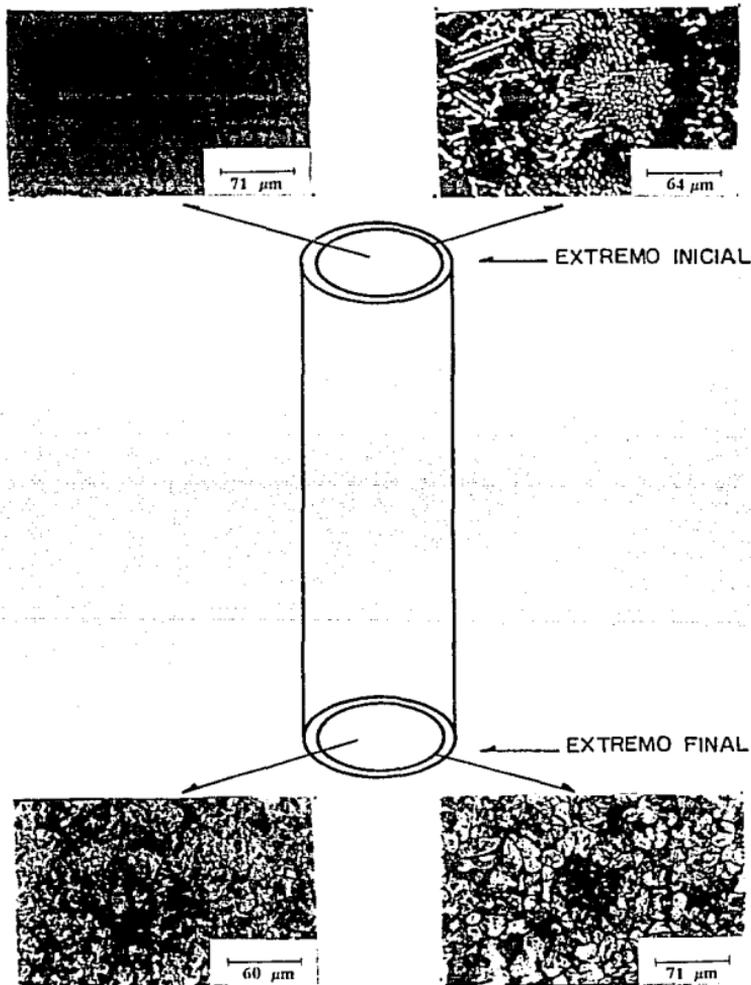


FIGURA N.º 9 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 1 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA.

2.1.2. Barra número 2.

Sección inicial.

La sección inicial de la barra 2 presentó radialmente tres microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 12 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas. Una zona intermedia de aprox. 1 mm de ancho conformada por dendritas columnares orientadas hacia el centro. Una zona de rocío de aprox. 1 mm de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 15 μm de ancho y 45 μm de largo (véase Figura 10). El tamaño promedio de las dendritas columnares fué de aprox. 1000 μm (véase Figura 10). Finalmente, en la zona de rocío los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 μm y las dendritas equiaxiadas aprox. 7 μm de ancho y 35 μm de largo (véase Figura 10).

Sección final.

La sección final de la barra 2 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas. Una zona de rocío de aprox. 450 μm de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 15 μm de ancho y 45 μm de largo (véase Figura 10). En la zona de rocío el tamaño promedio de los granos equiaxiados fué de aprox. 7 μm y el de las dendritas equiaxiadas fué de aprox. 10 μm de ancho y 30 μm de largo (véase Figura 10).

BARRA N.º 2

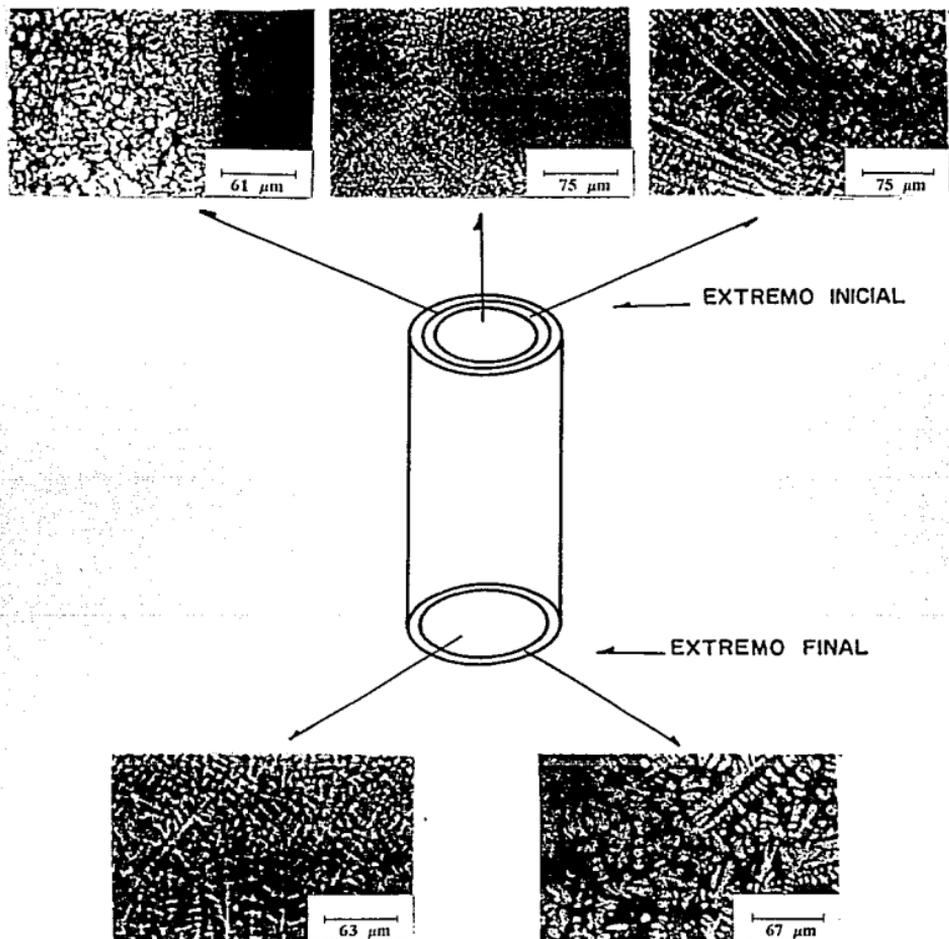


FIGURA N.º 10 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 2 PREPARADAS POR COLADA SEMICONTINUA.

2.1.3. Barra número 3.

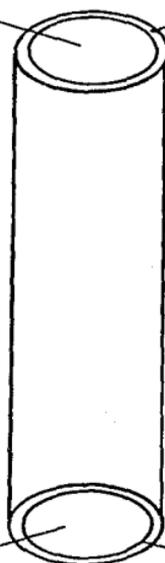
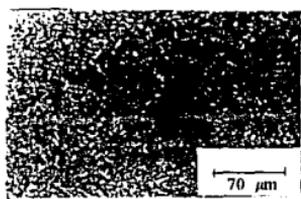
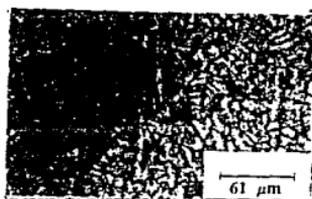
Sección inicial.

La sección inicial de la barra 3 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas columnares y algunas dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 300 μm de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 85 μm (véase Figura 11); mientras que los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 μm y las dendritas equiaxiadas de aprox. 7 μm de ancho y 30 μm de largo (véase Figura 11).

Sección final.

La sección final de la barra 3 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 13 mm de radio constituida por dendritas en forma de roseta y dendritas equiaxiadas. Una zona de rocío de aprox. 1 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 150 μm y aprox. 22 μm de ancho y 42 μm de largo para las dendritas equiaxiadas (véase Figura 11); mientras que, los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 15 μm y las dendritas equiaxiadas aprox. 15 μm de ancho y 45 μm de largo (véase Figura 11).

BARRA N. 3



EXTREMO INICIAL

EXTREMO FINAL

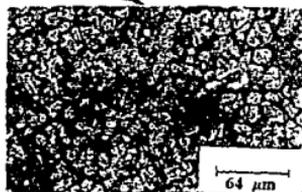
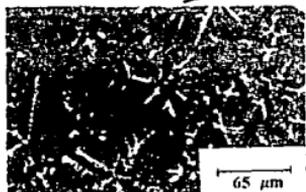


FIGURA N.º II ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 3 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA,

2.1.4 Barra número 4

Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 4 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas. Una zona de rocío de 300 μm de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas fué de aprox. 15 μm de ancho y 60 μm de largo (véase Figura 12); en tanto que los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 μm y las dendritas equiaxiadas aprox. 8 μm de ancho y 30 μm de largo (véase Figura 12).

Sección Final.

La sección final de la barra 4 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas y algunas dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 470 μm de ancho conformado por una mezcla de granos cuasiesféricos y dendritas equiaxiadas. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas fué de aprox. 15 μm de ancho y 52 μm de largo, mientras que el radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de 150 μm (véase Figura 12); en tanto que, los granos cuasiesféricos obtuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 μm y las dendritas equiaxiadas aprox. 10 μm ancho y 35 μm de largo (véase Figura 12).

BARRA N.º 4

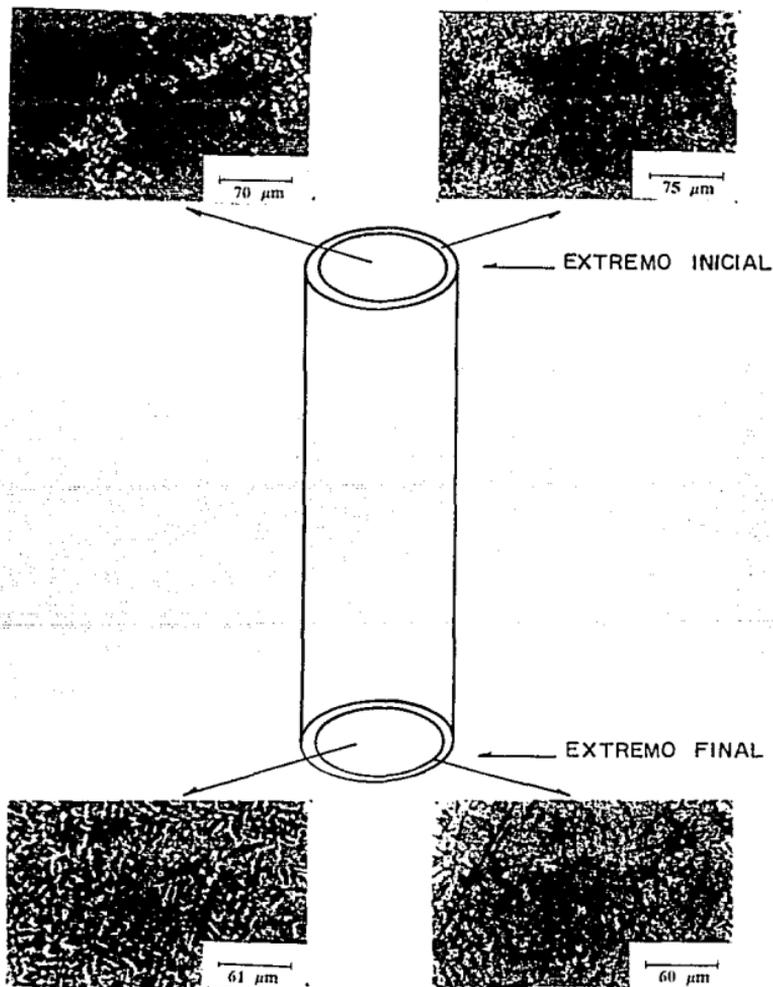


FIGURA N.º12 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 4 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA,

2.1.5 Barra número 5.

Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 5 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 13 mm de radio constituida por una mezcla de dendritas equiaxiadas y dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de 1 mm de ancho conformada por una mezcla de dendritas equiaxiadas y de granos equiaxiados. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 15 μm de ancho y 45 μm de largo mientras que, el radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 75 μm (véase Figura 13); en tanto que el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona de rocío fué de aprox. 9 μm de ancho y 30 μm de largo y 7 μm para los granos equiaxiados. (véase Figura 13).

Sección Final.

La sección final de la barra 5 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por una mezcla de dendritas equiaxiadas y dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 250 μm de ancho que es una combinación de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas de la zona central fué de aprox. 22 μm de ancho y 52 μm de largo, en tanto que el radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 165 μm (véase Figura 13); mientras que el tamaño promedio de las

dendritas equiaxiales en la zona de rocío fué de aprox. 15 μm de ancho y 45 μm de largo y aprox. 7 μm para los granos equiaxiales (véase Figura 13).

BARRA N. 5

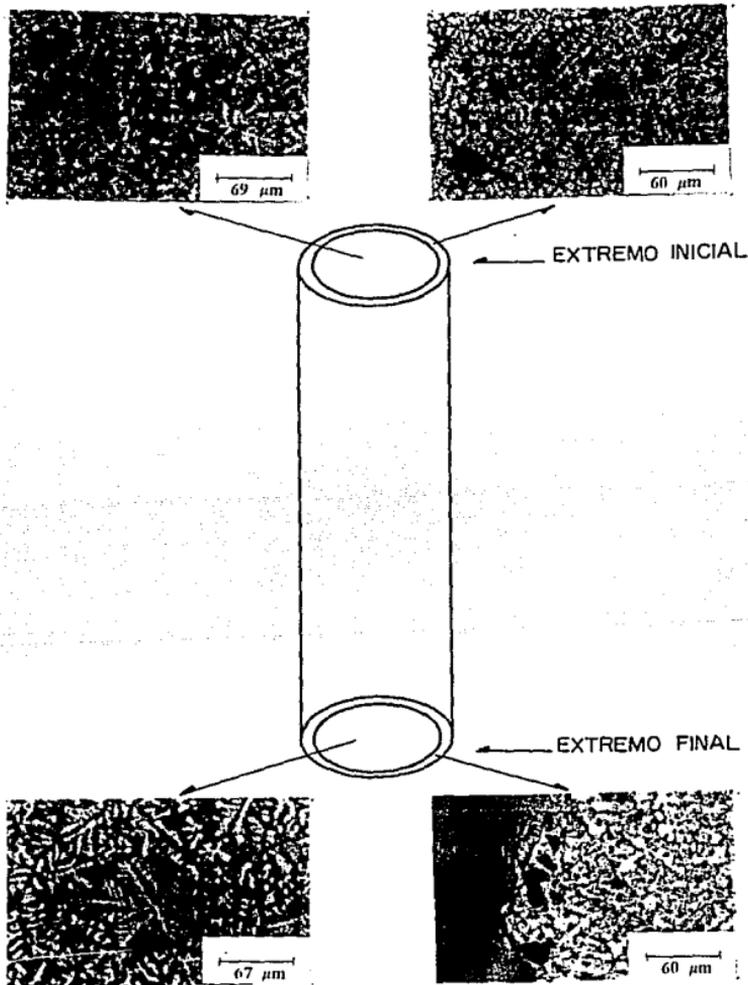


FIGURA N. 13 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.5 PREPARADAS POR COLADA SEMICONTINUA,

2.1.6 Barra número 6

Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 6 presentó dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 13 mm de radio constituida por dendritas columnares y algunas dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 1 mm de ancho conformada por dendritas equiaxiadas y granos cuasiesféricos. El tamaño promedio de las dendritas columnares fué de aprox. 52 mm de largo en tanto que el radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 75 mm (véase Figura 14); mientras que el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas fué de aprox. 7 mm ancho y 30 mm largo y aprox. 7 mm para los granos cuasiesféricos (véase Figura 14).

Sección Final.

La sección final de la barra 6 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituidas por dendritas equiaxiadas y dendritas en forma de roseta distribuidas uniformemente. Una zona de rocío de aprox. 220 mm de ancho compuesta por dendritas equiaxiadas. El tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 22 mm de ancho y 45 mm de largo, mientras que, el radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 150 mm (véase Figura 14); Las dendritas equiaxiadas en la zona de rocío tuvieron un tamaño promedio de aprox. 15 mm de ancho y 30 mm de largo (véase Figura 14).

BARRA N.º 6

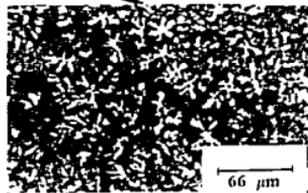
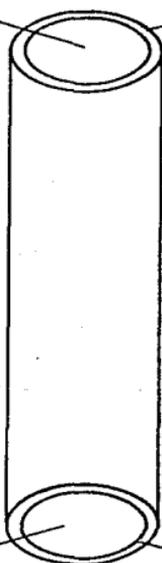
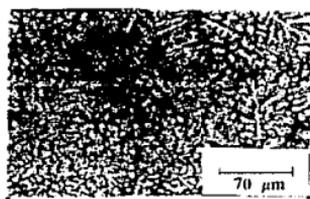
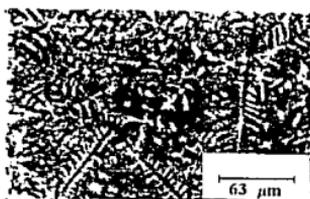


FIGURA N.º14 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 6 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA.

2.1.7 Barra número 7.

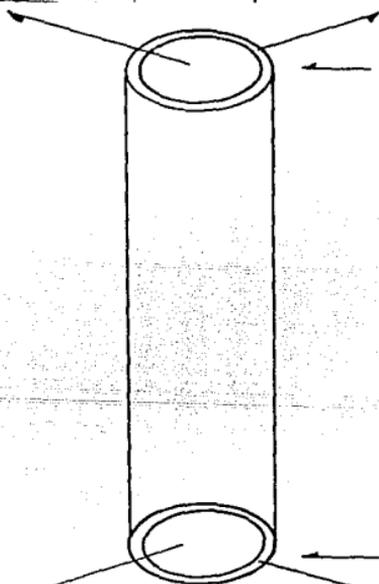
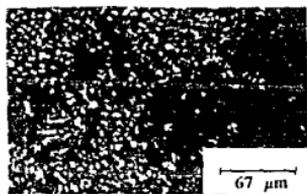
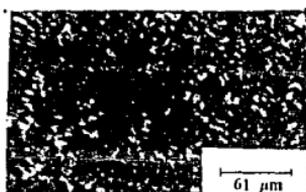
Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 7 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 13 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas y algunas dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 1 mm de ancho que es una mezcla de granos cuasiesféricos y dendritas equiaxiadas. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 75 mm y el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 15 mm de ancho y 45 mm de largo (véase Figura 15); mientras que, el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona de rocío fué de aprox. 7 mm de ancho y 30 mm de largo y aprox. 7 mm para los granos cuasiesféricos (véase Figura 15).

Sección Final.

La sección final de la barra 7 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas y dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 380 mm de ancho que es una mezcla de granos equiaxiados y dendritas equiaxiadas. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 120 mm y el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 22 mm de ancho y 52 mm de largo (véase Figura 15); en tanto que, los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 mm y aprox. 15 mm de ancho y 30 mm de largo para los dendritas equiaxiadas en la zona de rocío (véase Figura 15).

BARRA N. 7



EXTREMO INICIAL

EXTREMO FINAL



FIGURA N. 15 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N. 7 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA.

2.1.8 Barra número 8

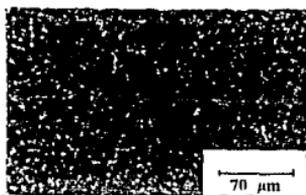
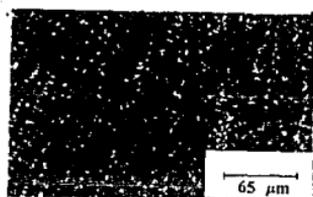
Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 8 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas equiaxiadas y dendritas en forma de roseta. Una zona de rocío de aprox. 200 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 75 mm mientras que el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 15 mm de ancho y 45 mm de largo (véase Figura 16); en tanto que, en la zona de rocío se tuvieron tamaños promedio aprox. 7 mm de ancho y 30 mm de largo para las dendritas equiaxiadas y aprox. 6 mm para los granos equiaxiados (véase Figura 16).

Sección Final.

La sección final de la barra 8 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas en forma de roseta y dendritas equiaxiadas. Una zona de rocío de aprox. 610 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El radio promedio de las dendritas en forma de roseta fué de aprox. 150 mm mientras que el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas en la zona central fué de aprox. 30 mm de ancho y 52 mm de largo (véase Figura 16); en tanto que, los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 7 mm y aprox. 15 mm de ancho y 30 mm de largo para las dendritas equiaxiadas en la zona de rocío (véase Figura 16).

BARRA N. 8



EXTREMO INICIAL

EXTREMO FINAL

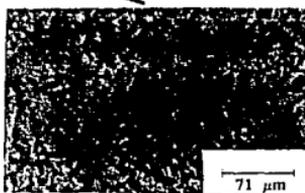
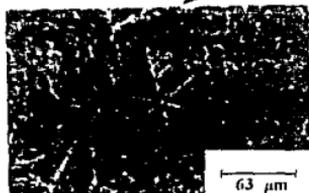


FIGURA N. 16 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LAS MICRO ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N. 8 PREPARADA POR COLADA SEMICONTINUA.

2.1.9 Barra número 9

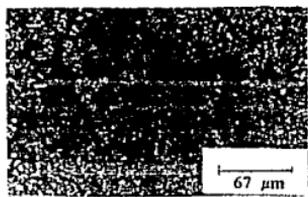
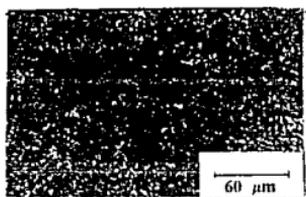
Sección Inicial.

La sección inicial de la barra 9 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas bidireccionales y dendritas columnares. Una zona de rocío de 930 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos cuasiesféricos. El tamaño promedio de las dendritas bidireccionales fué de aprox. 18 mm de ancho y 30 mm de largo mientras que, para las dendritas columnares fué de aprox. 15 mm de ancho y 40 mm de largo (véase Figura 17); en la zona de rocío el tamaño promedio de las dendritas equiaxiadas fué de aprox. 8 mm de ancho y 25 mm de largo y aprox. 7 mm para los granos cuasiesféricos (véase Figura 17).

Sección final.

La sección final de la barra 9 presentó radialmente dos microestructuras; a saber. Una zona central de aprox. 14 mm de radio constituida por dendritas bidireccionales y dendritas columnares. Una zona de rocío de aprox. 550 mm de ancho que es una mezcla de dendritas equiaxiadas y granos equiaxiados. El tamaño promedio de las dendritas bidireccionales fué de aprox. 20 mm de ancho y 30 mm de largo en tanto que, para las dendritas columnares fué de aprox. 45 mm de largo (véase Figura 17); en la zona de rocío los granos equiaxiados tuvieron un tamaño promedio de aprox. 5 mm y las dendritas equiaxiadas aprox. 8 mm de ancho y 25 mm de largo (véase Figura 17).

BARRA N.º 9



EXTREMO INICIAL

EXTREMO FINAL

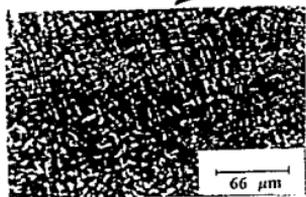


FIGURA N.º 17 ESQUEMA MOSTRANDO LA DISTRIBUCION DE LA MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS EN LA BARRA N.º 9 PREPARADAS POR COLADA SEMICONTINUA.

2.2 Microscopía por barrido electrónico.

La microscopía por barrido electrónico se empleó principalmente con el objeto de resolver el interior de las dendritas así como la estructura de la zona interdendrítica. Luego, dado que el portamuestras del microscopio electrónico permitió utilizar las mismas muestras empleadas en el microscopio óptico, cada una de las secciones transversales fué reobservada a ampliaciones mucho mayores. De las observaciones realizadas se encontró que la conformación, tanto del interior de las dendritas (microestructura intradendrítica) como de la zona interdendrítica, fué la misma en todas las secciones. Luego, en las secciones siguientes se hará la descripción de las microestructuras mencionadas en general.

2.2.1. Microestructura intradendrítica.

La microestructura del interior de las dendritas (equiaxiales, columnares y en roseta) fué de tipo laminar (véase Figura 18). El espesor promedio de las láminas, en todos los casos, fué aprox. menor a una micra. Esta microestructura corresponde perfectamente a la estructura de las denominadas celdas eutécticas. Las imágenes mostradas a continuación corresponden a dendritas observadas en el interior de poros y a dendritas seccionadas por el proceso de pulido.

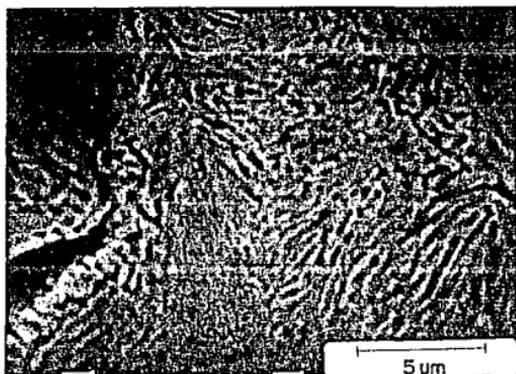


FIGURA 18. FOTOMICROGRAFIA DE LA ZONA INTRADENDRITICA. SE PUEDE OBSERVAR LA MICROESTRUCTURA LAMINAR DE LAS DENDRITAS.

2.2.2. Microestructura interdendrítica.

La microestructura de la región interdendrítica también fué de tipo laminar (véase Figura 19) pero con láminas de espesor varias veces mayor al de las láminas intradendríticas. La estructura de esta región es la típica de aleaciones binarias con composición eutéctica (ejemplo: eutéctico Al-CuAl₂). Luego, puesto que en el Zinalco el zinc (Zn) y el aluminio (Al) son mayoritarios, es de esperarse que las láminas correspondan a las facetas a y b del diagrama de estado Al-Zn.

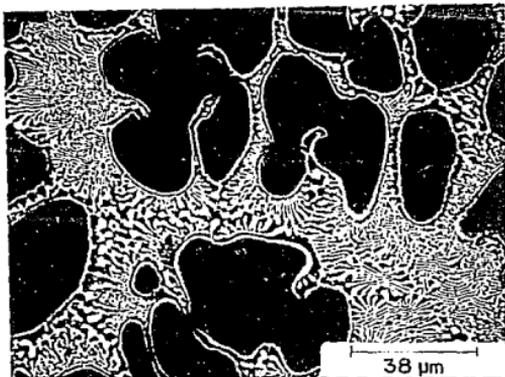


FIGURA 19. FOTOMICROGRAFIA DE LA ZONA INTERDENDRITICA. SE OBSERVA QUE LA ESTRUCTURA DE ESTA REGION ES TAMBIEN DE TIPO LAMINAR.

2.2.3. Cubierta dendrítica.

Adicional a la microestructura observada en el interior de las dendritas, se detectó la presencia de una cubierta o "cáscara" algunas veces gruesa y otras casi transparentes sobre las dendritas (véase Figura 20). La formación de dicha "cáscara" se atribuye a una reacción química entre los aleantes y los elementos del reactivo empleado en el ataque químico. El espesor de dicha capa, por comparación con la escala de la fotomicrografía, puede considerarse del mismo orden que el espesor de las láminas al interior de las dendritas.



FIGURA 20. FOTOMICROGRAFIA DE LA CUBIERTA DENDRITICA, DETECTADA SOBRE LAS DENDRITAS.

2.2.4. Poros.

Finalmente, poros con tamaños comprendidos entre aprox. 15 y 25 μm fueron observados en todas las barras preparadas por colada semicontinua (véase Figura 21). Sin embargo, la frecuencia de aparición de poros fué más baja en aquellas barras obtenidas con mayor velocidad de colada. Lo anterior puede explicarse como el resultado de una mejor alimentación de líquido a las regiones interdendríticas, debido a movimientos convectivos vigorosos en el líquido provocados por un gradiente térmico alto en el líquido enfrente de la interfase líquido-sólido. Tal gradiente térmico alto es necesario para una mayor velocidad de colada.

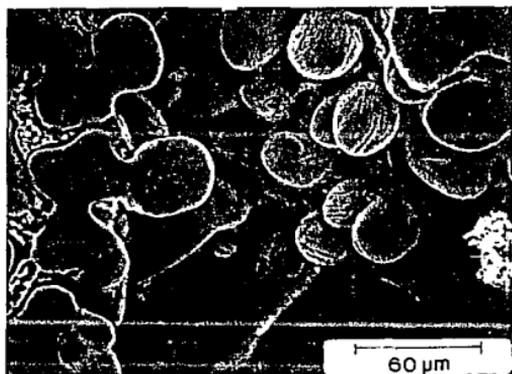


FIGURA 21. FOTOMICROGRAFIA DE LOS POROS OBSERVADOS EN TODAS LAS BARRAS OBTENIDAS POR ESTE PROCESO.

CAPITULO III.

Discusión.

Como se sabe, la formación y el crecimiento celular y dendrítico son debidos a la inestabilidad de la interfase líquido-sólido en el proceso de transformación de fase; esto es, un desequilibrio en los flujos de masa y de calor provocados por una potente extracción de energía térmica a partir del líquido. La técnica de colada semicontinua, entre otras, es un proceso de solidificación que se caracteriza precisamente porque mediante su aplicación se puede extraer el calor del líquido rápidamente y además en forma continua. Luego, toda aleación obtenida mediante este proceso tendrá una estructura granular metaestable, ya sea celular o dendrítica [12].

Para realizar una extracción de calor vigorosa a partir de la masa líquida, es condición necesaria que el material del molde posea una alta conductividad térmica. Además, para mantener constante (estado estacionario) la extracción de calor, el calor entrando al molde deberá ser liberado de inmediato (función que es realizada comunmente mediante enfriamiento del molde con agua). Para alcanzar un estado estacionario con avance de la interfase, la curva del perfil térmico deberá ser continua en todo punto desde el líquido hasta el exterior del molde con una pendiente media dentro del molde. En otras palabras, supongamos que el molde es buen conductor térmico pero carece totalmente de refrigeración. Los perfiles térmicos, dentro del molde (véase Figura 22), desde que la masa líquida hace el primer contacto con el molde ($t = 0$) hasta un tiempo posterior ($t \gg 0$) serán los siguientes:

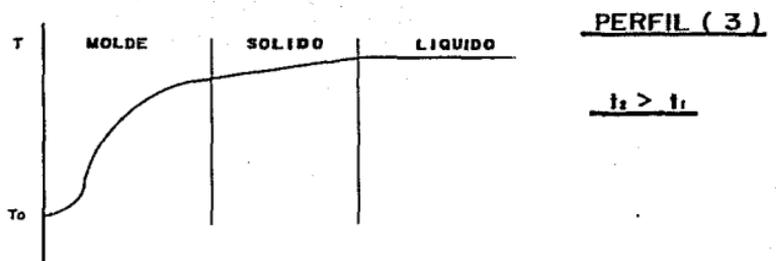
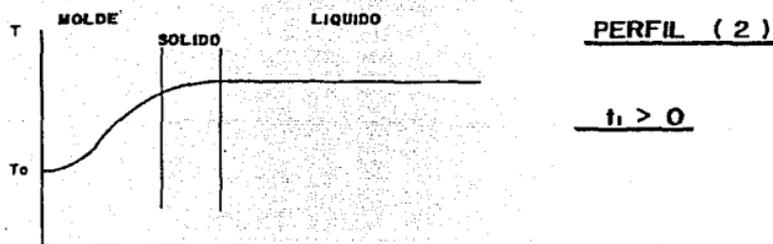


FIGURA 22. PERFILES TERMICOS PRESENTES DENTRO DEL MOLDE.

de lo anterior, el perfil 3 indica que el molde ha sufrido un calentamiento por la acumulación de calor, lo que dará como consecuencia una disminución continua de la rapidez de solidificación hasta detenerse. Si suponemos que las paredes exteriores del molde están aisladas térmicamente, la integral bajo la curva en el perfil 3 será la cantidad de calor acumulada en el molde en ese momento. Luego, para alcanzar un estado estacionario en el desplazamiento de la interfase líquido-sólido, un perfil como el mostrado en el perfil 2 será lo ideal, lo que implica una extracción continua del calor entrando al molde mediante algún mecanismo externo como refrigeración del molde con agua. La eficiencia en la refrigeración del molde dependerá principalmente de su masa, de su geometría y del flujo del refrigerante.

Por otra parte, ya que la difusión de soluto es mayor dentro de la masa líquida que dentro del sólido formándose, los átomos del soluto en el líquido justo enfrente de la interfase líquido-sólido tenderán a permanecer más dentro del líquido que a ingresar en la estructura del sólido. Esta tendencia es el resultado de la excitación térmica presente. Consecuentemente, dicha tendencia provoca un cambio de composición del líquido enfrente de la interfase líquido-sólido que produce una disminución de temperatura en el líquido enfrente de dicha interfase. Tal cambio de temperatura en el líquido se denomina sobreenfriamiento constitucional o composicional. Existen dos criterios para determinar cuando tendremos crecimiento celular o dendrítico, a saber, el criterio de sobreenfriamiento constitucional y el criterio de inestabilidad de la interfase. El criterio de sobreenfriamiento constitucional se describe mediante la siguiente relación:

$$\frac{G_L}{R} \geq \frac{m_L C_s^* (1 - k)}{k D_L} \quad (3)$$

donde G_L es el gradiente de temperatura en el líquido enfrente de la interfase; R es la rapidez de desplazamiento de la interfase; m_L es la pendiente de la línea líquidus en el diagrama de estado para un líquido de composición CL^* ; $k = CS^*/CL^*$ es la razón de partición de equilibrio. Luego, dicho criterio establece que cuando el cociente del lado izquierdo en la ecuación (3) sea mayor o igual que el cociente del lado derecho el frente plano será estable, mientras que en caso contrario será inestable. El criterio de inestabilidad de la interfase es descrito mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{G_L}{R} + \frac{\rho_L H}{2K_L} \geq \frac{m_L C_o(1-k)}{kD_L} \frac{K_s + K_L}{2K_L} A \quad (4)$$

donde K_s y K_L son las conductividades térmicas del sólido y líquido, respectivamente, ρ_L es la densidad del líquido, H es el calor latente de fusión, y A es una función de estabilidad adimensional. Luego, de la misma forma que el criterio anterior, este criterio establece que cuando el cociente del lado izquierdo en la ecuación (4) sea mayor o igual que el cociente del lado derecho el frente plano será estable, mientras que en caso contrario será inestable. Es de notarse que si en el primer criterio solo se considera la variación de composición del líquido enfrente de la interfase, en el criterio de inestabilidad de la interfase además de la variación de la composición del líquido también se considera: equilibrio

termodinámico en la interfase líquido-sólido; energía superficial isotrópica; no convección. Dado lo anterior se puede decir que el criterio de inestabilidad de la interfase es más completo que el criterio de sobreenfriamiento constitucional, sin embargo para fines prácticos puede aplicarse éste último sin mayor problema [12]. En nuestro caso, ambos criterios predicen la estructura dendrítica observada. El análisis detallado de la aplicación de ambos criterios no forma parte del presente trabajo, ya que quedaría fuera de la intención del mismo que es la de presentar las microestructuras del Zinalco preparado mediante el proceso de colada semicontinua.

La direccionalidad del flujo de calor determina también la dirección de crecimiento de las dendritas, así, altos gradientes térmicos en la interfase líquido-sólido dan lugar a una dirección de crecimiento dendrítico de sólido a líquido perfectamente definida (véase Figura 23) [12]; mientras que, bajos gradientes térmicos dan lugar a flujos térmicos con baja direccionalidad y crecimientos dendríticos que muestran poca preferencia direccional (véase Figura 24) [12].

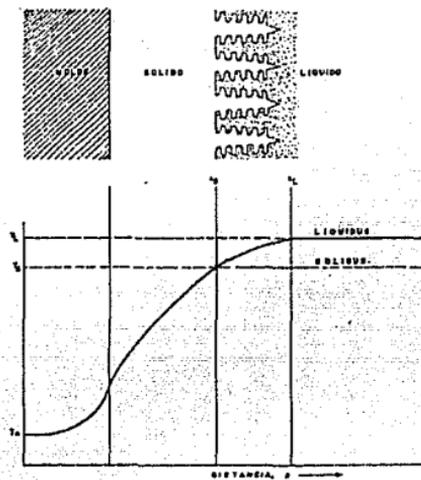


FIGURA 23. SOLIDIFICACION UNIDIRECCIONAL DE UNA ALEACION CONTRA UNA PARED DE MOLDE PLANO.

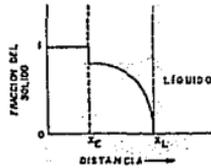
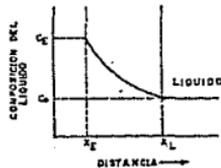
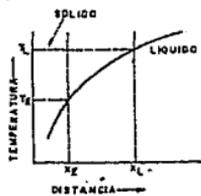
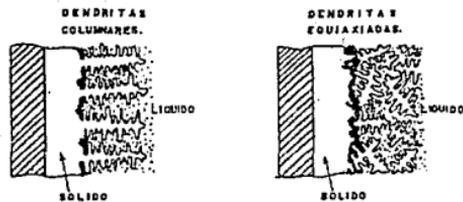


FIGURA 24. MODELO DE LA REGION LIQUIDO-SOLIDO.

Luego, la nucleación y el crecimiento tanto de las dendritas unidireccionales como de las dendritas equiaxiadas se realiza dentro del líquido exactamente enfrente de la interfase líquido-sólido, denominándose a esta región zona semi-sólida o zona pastosa. La zona semi-sólida es una característica que presentan únicamente las aleaciones en el proceso mismo de solidificación (véase Figura 25) [12]. El Zincolco como aleación presenta una zona semi-sólida durante el proceso de colada semicontinua, cuya profundidad no ha sido aún determinada pero que se estima en tres veces el diámetro del molde.

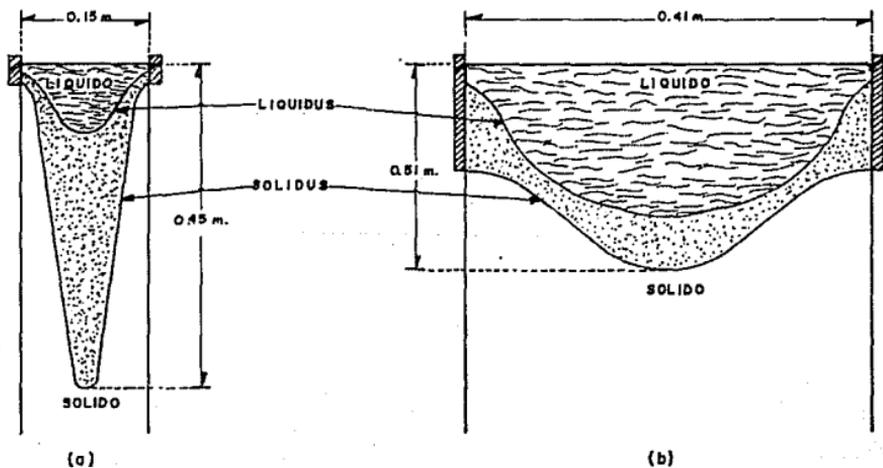


FIGURA 25. ISOTERMAS DE LIQUIDUS Y SOLIDUS CALCULADOS EN COLADA CONTINUA. TROZO DE ACERO COLADO A UNA VELOCIDAD DE 152 cm/min; (b) LINGOTE CILINDRICO DE UNA ALEACION DE MAGNESIO COLADO A UNA VELOCIDAD DE 5 cm/min.

La microestructura observada en la figura 10, es el resultado del rompimiento de las dendritas que crecen perpendicularmente a la interfase líquido-sólido en la dirección del flujo de calor. Varios mecanismos explican tal rompimiento: a) Flujos convectivos dentro del líquido que son provocados por los gradientes térmicos, b) Flujos locales del líquido interdendrítico provocados por el cambio de volumen al formarse el sólido [12]. En consecuencia, entre más altos sean los gradientes térmicos en la interfase líquido-sólido, más fuertes serán los movimientos convectivos dentro del líquido próximo al sólido y habrá un mejor refinamiento de grano. Tal refinamiento es semejante al que ocurre en colada con agitación [12]. La microestructura mostrada en la figura 11 se obtuvo con una velocidad de colada y un gradiente térmico menores que los correspondientes a la mostrada en la Figura 10 (comparese el tamaño de las dendritas).

La observación de la morfología de las dendritas por medio de MBE mostró que éstas son en realidad celdas eutécticas de microestructura laminar. Esta microestructura fué originada por la descomposición de la fase α por debajo de la temperatura eutectoide (véase el diagrama de estado para Al-Zn mostrado en la Figura 26). Por otra parte, la cáscara observada sobre las dendritas (véase Figura 20) fué producto de una reacción de pasivación (según evidencias) con el reactivo durante la reparación para su observación al microscopio. Se considera que la fisuración de dicha cáscara se debe a diferencias notables entre su coeficiente de dilatación térmica y el de la estructura que se encuentra por debajo de ésta.

Al-Zn Aluminum-Zinc

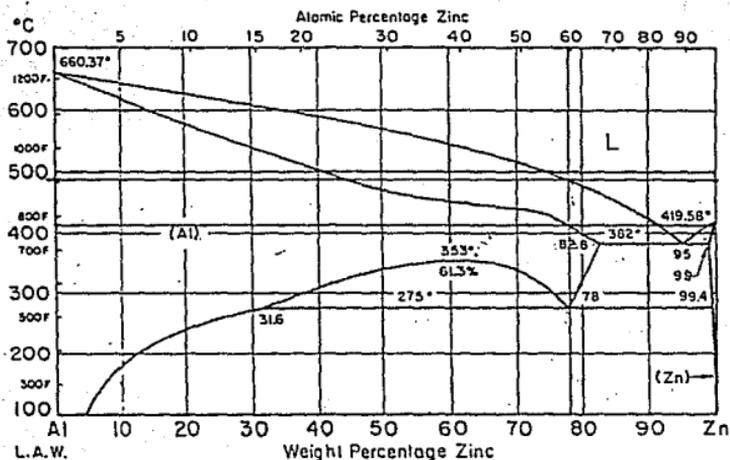


FIGURA 26. DIAGRAMA DE ESTADO DEL SISTEMA Al-Zn.

CAPITULO IV

Conclusiones.

Finalmente, en conclusión: a). Se obtuvieron barras de Zinalco con estructura dendrítica fina mediante el proceso de colada semicontinua. b). Este proceso produjo una distribución más homogénea de los aleantes que las logradas por colada en molde permanente. c). En cuanto a la microestructura, tanto en la región interdendrítica como al interior de las dendritas se obtuvo una microestructura laminar.

Con base a lo antes mencionado se considera que será fácil variar las dimensiones y perfiles de las piezas a obtener con este proceso, si se reajustan para cada caso los parámetros de colada. Así mismo, es posible que el proceso de colada semicontinua elimine, en algunos caso, la necesidad de extruir durante la producción de perfiles.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- A.H. Cotrell, F.R.S., *An Introduction To Metallurgy*, Edward Arnold (Publishers) Ltd. (1967), pp 183-186.
- 2.- J.Benard, A. Michel, J. Philibert y J. Talbot, *Metalurgia General*, Edit. Hispano Europea, (1969), pp 565-568.
- 3.- Howard F. Taylor, Merton C. Flemings y John Wulff, *Foundry Engineering*, Edit. John Wiley and Sons, (1966), pp 222-226.
- 4.- G. Torres Villaseñor, *Rev. Mex. Fís.* 3(1985) 489
- 5.- G. Torres Villaseñor y J. Hinojosa Torres, *Moldeo y Fundición* 51 (1987) 33
- 6.- G.Torres Villaseñor and J: Negrete "Superplasticity and Superplastic Forming ", *Rhe Minerals, Metals and Materials Society*, C. H. Hamilton and N.E. Paton (1988) 51.
- 7.- E.A. Mizikar, *Trans. TMS-AIME* 239 (1967) 1747.
- 8.- J. K. Brimacombe y F. Weingberg, *J. Iron and Steel Inst.* 211 (1973) 24.
- 9.- C.R. Taylor, *Metall. Trans. B.*, 6 (1975) 359.
- 10.- A.W.D. Hills, *J. Iron and Steel Inst.*, 203 (1965) 18.
- 11.- J. Negrete, *Propiedades Mecánicas de Aleaciones Zn-Al*, Tesis de Maestría, E.S.F. y M., I.P.N., 1979.
- 12.- Merton C. Flemings, *Solidification Processing*, Edit. McGraw- Hill, (1974), Cap. I,II,III y V.