

21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Química



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

SISTEMAS DE ALIMENTACION PARA LA OBTENCION
DE PIEZAS SANAS DE FUNDICIONES DE ALUMINIO

Tesis Mancomunada

Que para obtener el título de :

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P r e s e n t a n :

FELIX VELAZQUEZ ANSELMO

LUIS ARTURO NAFARRATE CONTRERAS

México, D.F.

1986



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

I Introducción.

II Conceptos teóricos.

II.1 Definiciones.

II.2 Principios generales de sistemas de coladas.

II.2.1 Turbulencia y generación de óxido.

II.2.2 Aspiración de gases en el molde.

II.2.3 Elementos de un sistema de colada.

II.2.4 Elementos auxiliares.

II.2.5 Recomendaciones para la construcción de sistemas de colada.

II.3 Principios de solidificación.

II.3.1 Factores relacionados con la solidificación.

II.3.2 Contracción.

II.3.3 Composición química.

II.4 Efectos de gas.

II.4.1 Solubilidad del hidrógeno.

II.4.2 Medición del gas.

II.4.3 Reducción de gas.

II.5 Defectos en molduras.

II.5.1 Origen y prevención de los defectos del primer grupo.

II.5.2 Origen y prevención de defectos del segundo grupo.

II.5.3 Origen y prevención de defectos del tercer grupo.

II.5.4 Origen y prevención de defectos del cuarto grupo.

II.6 Control de calidad de las molduras.

II.6.1 Composición química.

II.6.2 Dimensionamiento geométrico.

II.6.3 Propiedades mecánicas.

II.6.4 Estructura del metal.

II.6.5 Control de defectos por pruebas no destructivas.

II.7 Sistema aluminio-silicio.

II.7.1 Características de fundición de las aleaciones
aluminio-silicio.

III Procedimiento experimental.

III.1 Diseño de modelos.

III.2 Descripción de modelos.

III.3 Preparación de la arena y moldeo.

III.4 Preparación de las aleaciones eutécticas.

III.5 Determinación de las condiciones experimentales.
(selección de variables).

III.5.1 Alimentación.

III.5.2 Temperatura.

III.5.3 Degasificación.

III.5.4 Relación de colada.

III.5.5 Composición química.

III.5.6 Fundentes (escorificantes).

III.6 Desarrollo del experimento.

III.7 Análisis químicos.

III.8 Metalografía.

III.9 Descripción de resultados.

III.9.1 Experimentos preliminares.

III.9.2 Eliminación de las causas de porosidad.

III.9.3 Observaciones sobre la degasificación con hexacloro
roetano y nitrógeno.

III.9.4 Búsqueda de variables causantes de porosidad.

III.9.5 El sistema de alimentación como fuente de porosidad.

III.9.6 La composición química como origen de la porosidad.

III.9.7 El gradiente de temperatura como solución al problema de la porosidad.

III.10 Discusión global.

IV Conclusiones.

V Bibliografía

I. INTRODUCCION

Una de las condiciones más importantes para obtener piezas de buena calidad, es el correcto diseño de un sistema de colada y - un buen control de las variables que intervienen en el proceso, por lo que el objetivo del presente trabajo es analizar algunas de las variables clave para la obtención de piezas sanas obtenidas por fundición de aleaciones de aluminio-silicio.

La importancia del aluminio y sus aleaciones es muy amplia y los usos a los cuales se destinan son múltiples, tienen una gran gama de aplicaciones, sustituyendo en un gran número de casos a otros materiales y es utilizado como materia prima en industrias tan importantes como la automotriz en forma de partes coladas en algunos casos. De ahí el interés del trabajo en la obtención de piezas sanas coladas.

Por lo general el aluminio se emplea en forma de aleaciones - de manera de poder incrementar algunas propiedades que nos sean de especial interés, como en el caso del silicio con el cual disminuye el punto de fusión, formando un eutéctico, lo cual incrementa la facilidad de fusión de la aleación, lo que hace a esta aleación adecuada para la soldadura. Sin embargo también se puede usar como material para pistones de motores o tapas de motores eléctricos, por ejemplo.

Es de mucha utilidad el obtener un control de las variables - metalúrgicas más importantes, para de esta manera producir molduras con propiedades físicas y estructurales adecuadas, redundando en un menor número de piezas defectuosas y de esa manera mejorar la producción.

Tomando en consideración lo anterior, el buen diseño del sistema de colada de una pieza, cobra interés el optimizar el uso - del metal en la producción de piezas obtenidas por fundición.

II. CONCEPTOS TEORICOS.

Con el fin de uniformizar la terminología utilizada dentro de este trabajo, a continuación se darán una serie de definiciones para ilustrar que se entiende cuando se utiliza un termino en particular ya que es muy común en la literatura metalurgica en español, encontrar un defecto o una propiedad en especial descrita con diferentes denominaciones. Posteriormente se se describirán cada una de las variables que influyen en la producción de piezas sanas.

II.1 Definiciones.

Sistema de colada.- Lo constituye el arreglo de canales que conducen el metal líquido dentro de la cavidad del molde.

Tazón de colada.- Es un tazón o artesa que sirve como receptor al metal colado, antes de alimentarse a la copa de colada. Fig. II.1 (a).

Copa de colada.- Es la cavidad localizada en la cima del vertedero vertical, que sirve como cámara anterior del metal en su paso al vertedero vertical. Fig. II.1 (b).



Fig. II.1 a) copa de colada y b) tazón de colada.

Vertedero vertical.- Es el primer canal que recibe el metal líquido y sirve para transmitir la masa fundida a los otros elementos del sistema de colada.

Pozo (base del vertedero).- Es un alargamiento, generalmente de sección redonda en el fondo del vertedero, usado para ayudar aerodinámicamente al flujo de metal en el corredor.

- Corredor.**- Es el segundo canal, colocado en un plano horizontal a través del cual el metal fluye hacia o es distribuido alrededor de la cavidad de la pieza a colar.
- Extensión del corredor.**- Es la parte del corredor el cual se extiende más allá de la última sección de ataque (entrada) como un extremo ciego. Este extremo actúa como una trampa de escoria o arena para el primer metal que llega, ya que éste puede contener muchas impurezas que quedarían atrapadas en la extensión del corredor.
- Sección de ataque (entrada).**- Es el tercer canal a través del cual el metal deja el corredor para entrar al hueco del molde o al alimentador adyacente a la cavidad del molde.
- Cavidad del molde.**- Es el espacio en el cual, cuando se llena con metal se convierte en la moldura deseada. Los alimentadores y las secciones de ataque no se consideran parte de la cavidad del molde.
- Tapón del vertedero.**- Es un tapón puesto en la entrada del vertedero. Usualmente de hierro fundido o grafito, esto asegura un flujo positivo de metal limpio dentro del vertedero después de que el tapón es sacado, solo después de comenzar la colada, cuando el tazón está lleno de metal líquido.
- Alimentador (elevador).**- Es una reserva conectada a la fundición para suministrarle metal líquido durante la solidificación para compensar la contracción que tiene lugar cuando el metal solidifica.
- Contracción.**- Es una diferencia de volumen, de uno de mayor a uno de menor. Fundiciones de aleaciones de alta contracción requieren que metal extra fluya dentro de la fundición mientras esta solidificando, de otra manera habrá

una cavidad de contracción en el lugar del último metal en solidificar.

Alimentador superior.- Es un alimentador agregado sobre la cima o superficie superior de la fundición.

Alimentador lateral.- Alimentador a un lado de la fundición.

Cuello del alimentador.- El pasaje de conexión entre el alimentador y la moldura.

Plataforma del alimentador.- Es un alargamiento del cuello del alimentador en donde se une a la moldura. El propósito de esta plataforma es evitar el rompimiento del alimentador cuando este es golpeado o cortado de la moldura de manera que la moldura no sea afectada.

Altura del elevador.- Es la distancia desde la cima del alimentador cuando esta líquido, a la parte superior del cuello del alimentador. La altura del alimentador puede tener varios centímetros menos cuando esta sólido que cuando esta líquido debido a la pérdida de metal alimentado a la moldura y a su propia contracción.

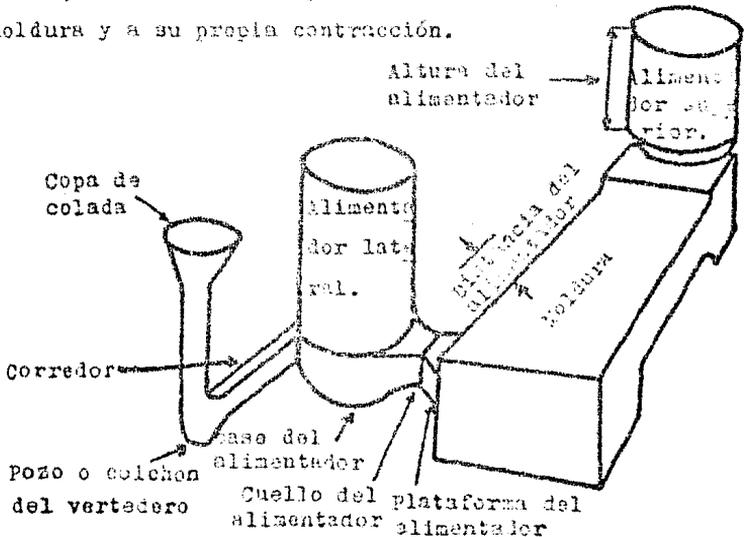


Fig. II.2 Sistema de colada con alimentadores.

Moldura.- Es la pieza de interes que se desea obtener por medio de la técnica de fundición.

Viento.- Es un pequeño canal hecho desde la cima del molde hasta un lugar cercano a la cavidad del molde para permitir el escape de aire y gases contenidos en el molde mientras éste es llenado con metal líquido.

II.2 Principios generales de sistemas de coladas.

Probablemente una de las características más importantes del aluminio es la formación de un óxido muy estable que se forma - muy facilmente. Si se maneja este óxido con mucho cuidado duran te las operaciones de fusión y colada, podemos prevenir la oxidación posterior y también la contaminación. De otra manera por métodos de colada impropios, el óxido puede quedar atrapado en forma de inclusiones indeseables.

II.2.1 Turbulencia y generación de óxido.

En el instante en que el metal queda expuesto a la atmósfera circundante se inicia la oxidación y una capa de óxido se desarrolla de manera que es necesario diseñar un sistema de colada tal, que se obtenga un flujo suave de metal con un mínimo de agitación y turbulencia.

La turbulencia causa el atrapamiento de óxidos superficiales y de gases en el interior de la corriente de metal líquido de donde es llevado hacia el interior de la cavidad del molde quedando atrapados en el interior de la moldura.

Tres fuentes de turbulencia son evidentes en sistemas de colada mal diseñados, y son: velocidad excesiva, cascadeo y formación de vortices o remolinos.

- a) Velocidad excesiva.- Los sistemas de colada son generalmente limitados en extensión y, por lo tanto, es difícil y en algunos casos imposible disipar la energía de la corriente a alta velocidad. La liberación continua de energía resulta en la formación de corrientes que atrapan gases y generan películas de óxido.
- b) Cascadeo.- Es la caída libre del fluido, lo cual puede exponer mucha superficie líquida a la oxidación, ya que la energía ganada en la caída da como resultado mucha agitación con la consecuente formación de óxido y el atrapamiento de éste.
- c) Vortices.- Los vortices pueden formarse en la parte superior del vertedero vertical si durante la colada la copa no es llenada completamente. Cuando un vortice o remolino es formado, el aire y los óxidos son atraídos dentro del remolino y, por lo tanto, llevados al interior de la cavidad del molde.

II.2.2 Aspiración de gases en el molde.

Los cambios repentinos en la dirección del flujo son perjudiciales para la obtención de piezas sanas, pues son causantes de formar regiones de baja presión en las esquinas interiores donde ocurre el cambio de dirección dentro de los espacios del molde, lo cual causará una aspiración de gases y aire del molde hacia el interior de la corriente de metal líquido.

Sin embargo existen otras fuentes por las cuales los gases del molde pueden penetrar en la corriente de metal líquido y son:

- a) El aire que llena los poros del molde y que se dilata al calentarse.
- b) La humedad que se halla en la mezcla de moldeo y que se evapora en el momento de la colada.
- c) Impurezas orgánicas casuales o introducidas en forma de aditivos (carbon, aglutinantes, etc.).
- d) El aire que se impulsa con el chorro de metal durante la colada.
- e) Reacciones químicas en la superficie metal-molde.

Si las burbujas de aire que penetran en el metal fundido no se retienen adecuadamente en el sistema de colada penetrarán a las molduras con lo que se originarán sopladuras o porosidades. Por consiguiente, el sistema de colada debe estar siempre lleno y la presión en todas las partes debe ser positiva y superior a la presión de los gases en las paredes de sus canales, tratando de evitar las regiones de baja presión.

II.2.3 Elementos de un sistema de colada.

Los elementos usados han sido desarrollados, más como el resultado de un arte tardío que como la aplicación de principios científicos. Cada uno será mencionado en el orden secuencial - en el cual están en contacto directo con el metal durante el llenado. Fig. II.3.

- a) Tazón de colada.- Un tazón de colada es un excelente me-

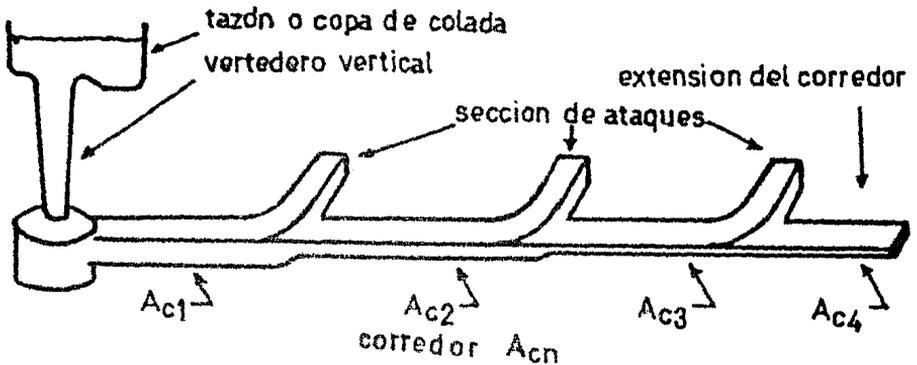


Fig. II.3 Esquemmatización de los elementos de un sistema de colada.

El objetivo es de minimizar el óxido y aire atrapados en la corriente de metal antes de entrar al vertedero. Los puntos importantes en el diseño de un tazón de colada son:

- Obtener un flujo suave de metal.
- No deben de existir ángulos pronunciados en el tazón de colada.
- El metal debe de ser colado dentro del tazón de colada en el punto más alejado del vertedero.
- Permitir la formación de un volumen de metal en reposo para facilitar que la escoria y el aire atrapado se pongan a la altura de la superficie y suministrar un flujo suave y limpio desde el fondo del tazón.
- El tazón de colada ayuda a minimizar la formación de remolinos en lo alto del vertedero vertical.

b) Copa de colada.- Una copa de colada es a menudo usada en trabajos en los cuales se tiene una tendencia a formar discontinuidades. El tipo embudo permite vaciar una gran cantidad de metal en un periodo relativamente corto de

tiempo. La copa de colada puede ser bastante grande para facilitar la colada y conservar llena la copa durante la operación, si no esta llena la copa se puede formar un - remolino, el cual aspirará aire y óxido dentro de la corriente de metal líquido.

- c) Diseño del vertedero vertical.- El vertedero vertical evita la caída libre del metal fundido lo cual podría crear turbulencias que darían como consecuencia gases atrapados e inclusiones de óxidos. El mejor diseño es aquel en el - cual esta presente el efecto de vena contracta para ayudar con la disminución natural del área transversal, a la prevención del atrapamiento de gases, generación de óxidos y a la aspiración de gases en el molde, lo cual puede observarse en la fig. II.4.

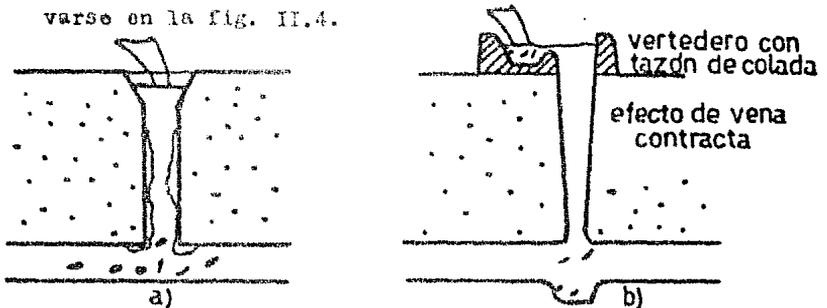


Fig. II.4 Efecto del diseño del vertedero en la turbulencia
a) aspiración severa y b) aspiración despreciable.

Un colchón en la base del vertedero absorberá algo de la energía cinética de la corriente metálica que sale - del vertedero y suministra un mejor patrón de flujo al metal líquido.

De estudios realizados en flujo de fluidos resulta que la velocidad crítica a la cual el flujo se vuelve turbu-

lento, es considerablemente más alta para una sección transversal rectangular⁽¹⁾ además de tener menor tendencia para la formación de remolinos que una sección transversal redonda. Sin embargo a pesar de este concepto son mucho más usados los vertederos de sección transversal redonda y con el efecto de vena contracta.

- d) Diseño del corredor.- El corredor en sistemas de colada tiene dos fines; Primero, formar un canal a través del cual el flujo de metal es distribuido alrededor de la cavidad del molde. Segundo, formar un volumen relativamente quieto de metal en el cual los gases y óxidos atrapados puedan flotar y ser atrapados en el corredor. Bajo condiciones ideales de diseño del tazón de colada el segundo factor no es necesario, sin embargo es un factor de seguridad adicional.

El corredor debe ser aerodinámico para asegurar un flujo de metal que sea suave y además debe de tener una extensión más allá de la última sección de ataque para actuar como trampa de escoria.

Es deseable mantener el vertedero en una posición central sobre el corredor con un igual número de secciones de ataque de cada lado, de esta manera se implementa una distribución de metal más uniforme en el sistema de corredores.

- e) Diseño de la sección de ataques.- La longitud de la sección de ataque desde el corredor a la cavidad puede ser crítica. Para moldes grandes una distancia de 10.2 cm puede ser apropiada, en tanto que para fundiciones pequeñas es suficiente una distancia de 1.9 cm..

II.2.4 Elementos auxiliares.

- a) Trampas de escoria.- El tipo más común de trampas utiliza una simple cámara de flotación formada por la expansión local del corredor, dentro de la cual las inclusiones no metálicas son retenidas. Muchas variaciones de este principio son posibles, incluyendo aquellas en las cuales la sección de los corredores son moldeados en el semimolde superior y las secciones de ataque en el semimolde inferior⁽²⁾, tal que, el corredor sirva a sí mismo como una cámara de flotación.

Las inclusiones pueden ser introducidas con el metal líquido en forma de escoria o pueden consistir de partículas disgregadas del molde refractario, por lo que los métodos de separación dependen de las diferencias de densidad o de una malla de filtración.

La eliminación de escoria se puede efectuar colocando un corazón poroso en la cima del vertedero para que funcione como una rejilla de filtración, o bien, colocar un tapón en el vertedero de manera que el tazón de colada se llene, la escoria flote y el metal limpio penetre a la cavidad. También discos perforados de arena para corazones son colocados a la entrada del vertedero o a través del corredor y en última instancia en las secciones de ataque.

Los corazones porosos ejercen una doble función, que es la de retener el mayor número posible de inclusiones y la de reducir la velocidad y turbulencia del líquido en el sistema.

La fig. II.5 ilustra algunas de las trampas para escoria.

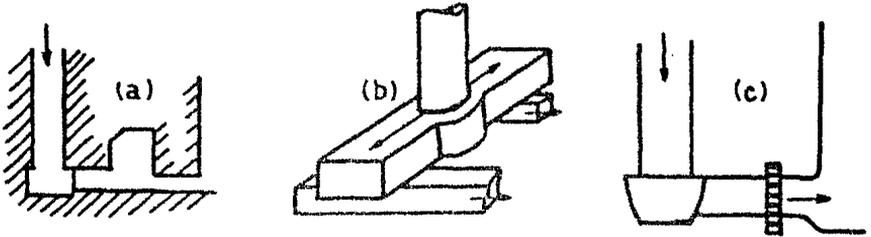


Fig. II.5 (a) cámara de flotación, (b) desnivel de corredor y secciones de ataque, (c) rejilla de filtración.⁽²⁾

b) Alimentadores.

Las aleaciones de aluminio sufren una contracción en volumen entre el 4 y 6,5 durante la solidificación y es necesario compensar la contracción por un suministro adicional de metal fundido. Si el suministro de metal fundido no es adecuado se forman huecos por contracción, para eliminarlos se recurre a la técnica de solidificación direccional.

El alimentador es por definición, una reserva de metal líquido conectada a la fundición y que actúa durante la solidificación para compensar la contracción promoviendo la solidificación direccional. Para el óptimo funcionamiento del alimentador es necesario efectuar la correcta colocación del mismo de acuerdo a la geometría de la fundición.

Cuando dos o más alimentadores son necesarios para una fundición, las áreas de alimentación deben de visualizarse separadamente.

Se tratará que el alimentador siempre se llene con el metal más caliente (el que ha perdido menos temperatura) en tanto que la cavidad del molde debe llenarse con el metal más frío (el que ha perdido menos temperatura) para promover la solidificación direccional. Cuando no sea posible

realizar lo anterior se llevan a cabo varias acciones para efectuar una solidificación en la dirección más adecuada. Primero: el sistema de colada puede suministrar un número suficiente de puntos de entrada de metal a la cavidad del molde para permitir un llenado rápido y minimizar así la diferencia de temperatura entre el primero y el último metal que entra al molde. Segundo: frecuentemente es necesario el uso de enfriadores. Tercero: los alimentadores aislados ayudan y mantienen el calor, lo cual es deseable. Cuarto: se aconsejan pequeñas adiciones de metal caliente a las cimas de los alimentadores después que la solidificación ha comenzado para calentarlos. Algunas fundiciones usan material exotérmico alrededor de los alimentadores en situaciones de este tipo.

Al diseñar un alimentador deben seguirse las siguientes reglas:

- El alimentador debe solidificarse después que la parte de la moldura a la cual alimenta.
- Las dimensiones del alimentador deben ser suficientes para compensar la contracción de las molduras.
- La altura del alimentador debe ser tal que, toda la oquedad de contracción quede en él; la garganta o unión del alimentador debe ser lo más corta posible. En el subcapítulo II.3 se hablará sobre los alimentadores con más detalle, en base a la solidificación.

c) Enfriadores. Los gradientes de temperatura dentro de un molde pueden ser controlados por varios métodos:

- Por el uso de puntos de entrada de metal.

- Por alimentadores para controlar y asegurar la solidificación direccional.
- Promoviendo un apropiado gradiente térmico con el uso de enfriadores.

Los enfriadores son formas metálicas posicionadas dentro del molde para formar una cara de material de moldeo, la cual removerá calor a mayor velocidad. Fig. II.6.

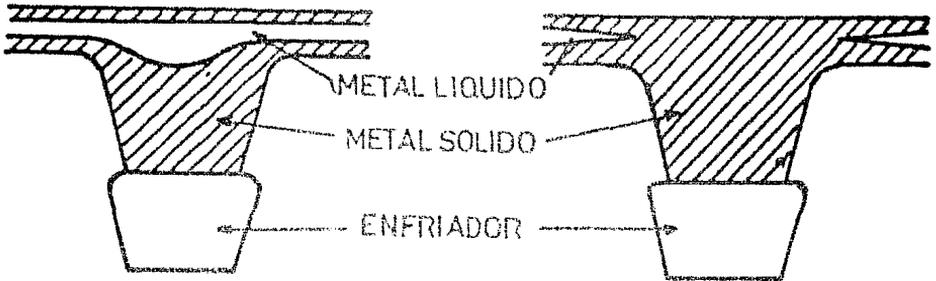


Fig. II.6 Acción del enfriador durante la solidificación.(1)

II.2.5 Recomendaciones para la construcción de sistemas de colada.

Uno de los requerimientos de un buen sistema de colada es suministrar metal líquido limpio a la cavidad del molde. Investigaciones patrocinadas por la APS (Sociedad Americana de fundidores) en el Instituto Memorial Betells⁽³⁾ dieron como resultado las siguientes recomendaciones para sistemas de colada horizontales:

- a) Empleo de un tazón de colada sobre el vertedero.
- b) Usar una disminución gradual del vertedero para prevenir - la aspiración de aire y gases en el molde, de manera que con la menor sección transversal en el fondo se podrá prevenir discontinuidades en la fundición.
- c) Diseñar un pozo en la base del vertedero para absorber al-

go de la energía cinética del chorro de metal cuando deja el vertedero, además de crear un patrón de flujo que rápidamente limpia esta área del líquido inicial el cual puede estar cargado de escoria y gas.

- d) Ensachar el área de la sección transversal del corredor - varias veces el área de la sección transversal de la base del vertedero para disminuir la velocidad del metal líquido en el corredor.
- e) Disminuir el área del corredor a medida que cada sección de ataque es sobrepasada. Esto causará que todas las secciones de ataque suministren metal líquido a la cavidad - del molde simultaneamente en tanto que cada sección de ataque tendrá aproximadamente la misma velocidad de flujo.
- f) Se deberá proporcionar un radio de curvatura adecuado y lo más amplio posible en donde la dirección del flujo sea cambiada. Esto es aplicable, por ejemplo, a un corredor - que cambia de dirección o a una sección de ataque que surge del corredor.
- g) Extender el corredor varios centímetros después de pasar la última sección de ataque para poder atrapar el primer metal líquido vertido, el cual puede contener arena y gases atrapados.
- h) Varias investigaciones de la sociedad americana de fundidores (AFS) han recomendado una relación vertedero-corredor-sección de ataque de 1:4:4 para sistemas de colada horizontal. Sin embargo, Titov y Stepanov⁽⁴⁾ recomiendan para aluminio y sus aleaciones relaciones de 1:2:3, 1:2:4 y 1:3:6 para vertedero-corredor-sección de ataque, respectivamente.

1) Para determinar un sistema apropiado de colada y alimentadores para una fundición, el siguiente procedimiento puede ser empleado.

- 1^o) Determinar las áreas en las cuales los alimentadores o elevadores son requeridos.
- 2^o) Decidir sobre los puntos deseados para la entrada de metal dentro de la cavidad del molde. Es preferible en secciones pesadas de la fundición donde no hay problemas de llenado del molde. De preferencia introducir el metal líquido a través de los alimentadores.
- 3^o) Decidir el sistema apropiado de corredores para surtir las secciones de ataque.
- 4^o) Finalmente se determina el tamaño del vertedero.

Excepto en casos especiales, el vertedero puede ser tan pequeño como sea posible y no obstante lograr un completo llenado del molde.

Otras recomendaciones son:

- Conservar el borde de la cuchara de colada lo más bajo posible y dirigir la corriente de metal líquido a la parte posterior del tazón de colada. No vaciar dentro del hoyo del vertedero.
- Llenar el tazón de colada rápidamente y mantenerlo lleno a través de la colada para prevenir la formación de remolinos que puedan succionar aire o escoria dentro del vertedero.

II.3 Principios de solidificación.

II.3.1 Factores relacionados con la solidificación.

En las investigaciones prácticas relacionadas con la solidificación de molduras, se ha demostrado que existen varios factores que la afectan, como son: El medio en el cual se efectúa y el mecanismo de solidificación según el metal del que se trate. De estos factores dependen, el tiempo de solidificación, el volumen de contracción, etc.. Estas variables rigen los principios básicos de los sistemas de alimentación.

Puede considerarse que el problema general de transferencia de calor está relacionado con la forma de la pieza y los moldes bajo tres aspectos:

- a) Leyes básicas de transferencia de calor y las variables del molde.
- b) Material de la pieza.
- c) Variables de forma y tamaño.

La aplicación de dichos principios se relaciona con el cálculo de la alimentación de las piezas.

Estos principios que son los que van a normar la relación entre el molde y la pieza, deben de tomarse en cuenta y mantenerse constantes. Por ejemplo, la transferencia de calor en moldes de arena en verde dependerá de la densidad de compactación, tamaño de grano promedio, cantidad de aglutinante en la mezcla de arena y del por ciento de humedad.

II.3.2 Contracción.

Durante el proceso de solidificación se extrae calor de la pieza continuamente desde el momento en que el metal es vaciado en el molde, hasta que no alcanza el equilibrio con la temperatu

ra ambiente. Este intercambio calórico con el molde y el medio - externo reduce el movimiento de los átomos y moléculas disminuyen do el espacio entre ellas, lo cual causa la contracción del metal en cuestión.

Los tres tipos de contracción que ocurren cuando una pieza se enfría son los siguientes (fig. II.7):

- a) Contracción líquido-líquido.- Esta contracción sucede cuando el metal se enfría desde la temperatura de colada al -- punto de inicio de la solidificación.
- b) Contracción de solidificación (líquido-sólido).- Se lleva a cabo cuando el metal pasa del estado líquido al estado - sólido.
- c) Contracción sólido-sólido.- Esta contracción ocurre cuando el metal se enfría desde la temperatura a la cual la solidificación es completa hasta la temperatura ambiente.

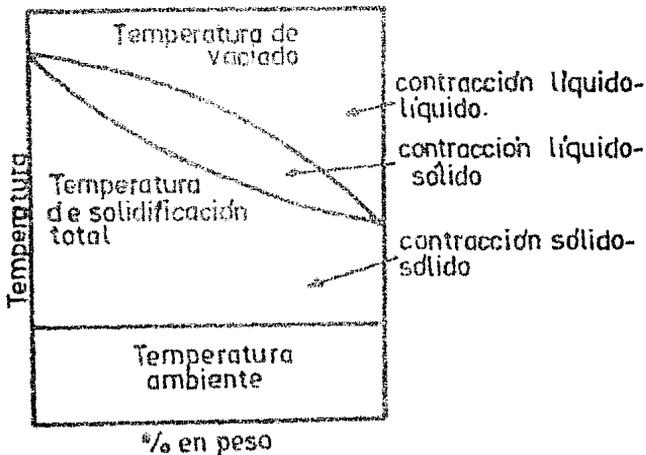


Fig. II.7 Representación gráfica de los tres tipos de contracción en un metal cuando se enfría.

Para producir piezas sanas con las dimensiones deseadas, es necesario compensar la contracción volumétrica que se genera durante el enfriamiento. Esto se consigue mediante el uso de alimentadores, de modelos correctamente diseñados y del control de las variables de las arenas de moldeo.

La alimentación compensa el rechazo líquido-líquido y el de solidificación por el abastecimiento adicional de metal a la pieza en el tiempo correcto. El tamaño del alimentador requerido depende de que tanto se contrae el metal durante el enfriamiento y del tiempo que la pieza necesita para solidificar.

La contracción sólido-sólido es corregida mediante el uso de la regla de contracción, o sea, diseñando el modelo lo suficientemente grande para dar a la pieza las dimensiones deseadas a la temperatura ambiente.

II.3.3 Composición química.

La composición química del metal es importante para saber que mecanismo de solidificación y que volumen de contracción tendrá una moldura.

Existen tres mecanismos⁽⁵⁾ de solidificación, los cuales explican el proceso del paso del metal líquido al sólido de grupos diferentes de metales y sus aleaciones. Los mecanismos son:

- Metales y aleaciones de corto rango de solidificación o de capa delgada.
 - Aleaciones de amplio rango de solidificación o de capa gruesa.
 - Aleaciones de la combinación de los anteriores.
- a) Corto rango de solidificación.- En este grupo están comprendidos los metales puros y las aleaciones 100% eutécticas o muy cercanas a este punto. Muchas aleaciones comerciales

con contenidos bajos de aleantes también se comportan en forma similar.

En el momento en que el metal líquido entra en contacto con las paredes del molde, empieza el enfriamiento e inmediatamente después, la solidificación. Es en esta área en donde se forman las primeras capas delgadas solidificadas contra la pared, las cuales son la base para la formación de las siguientes capas, incrementándose progresivamente el espesor hasta que la pieza este completamente sólida.

En cuanto se construyen estas capas sólidas, el nivel de metal líquido va disminuyendo. Durante la solidificación se va formando el rechupe en el centro térmico de la pieza o del alimentador. El rechupe es una cavidad formada por la contracción del metal durante la solidificación.

Los metales puros funden y solidifican a una misma temperatura⁽⁶⁾. Bajo condiciones de equilibrio y a una temperatura inferior a la de solidificación el metal esta completamente sólido. La curva de enfriamiento del metal puede ser dibujada para mostrar que la solidificación ocurre a una misma temperatura durante el cambio de fase debido a que el metal pierde su calor de fusión durante la solidificación. La fig. II.8 muestra la curva de enfriamiento de metales que solidifican en capa delgada.

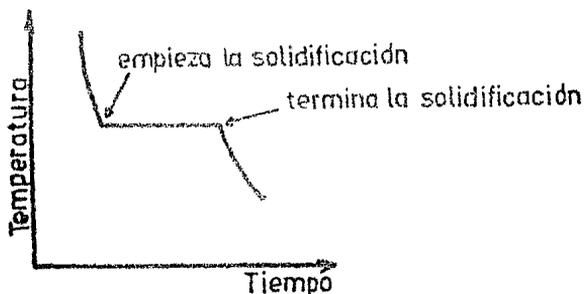


Fig. II.8 Curva de enfriamiento para capa delgada.

La solidificación en estas aleaciones comienza tan pronto - como el metal alcanza la temperatura de solidificación en las paredes del molde. Esto es indicado por la formación sobre las paredes, de un gran número de pequeñísimos cristales, lo más - favorablemente orientados en un crecimiento rápido en base a las capas ya formadas, para crear un frente continuo que es co- nocido como "solidificación frontal" o frente de solidifica- ción. Después de esto, el enfriamiento continua por el avance de este frente hacia el interior de la pieza (fig. II.9).

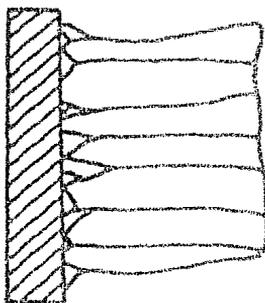


Fig. II.9 crecimiento de cristales en la solidificación de un metal puro.(9)

Las etapas separadas en el enfriamiento de una pieza, son mostradas en la fig. II.10 para un metal puro y en la fig. II.- 11 para aleaciones de corto rango de solidificación tales como los metales con bajos porcentajes de aleantes o de composición cercana al eutéctico. En el caso de las aleaciones de - corto rango de solidificación, el frente no es plano sino den- tado. Deberá hacerse notar, con respecto a este grupo que hay una pequeña diferencia en el modo de enfriamiento de piezas - coladas en arena y aquellas que son coladas en molde permanen- te.

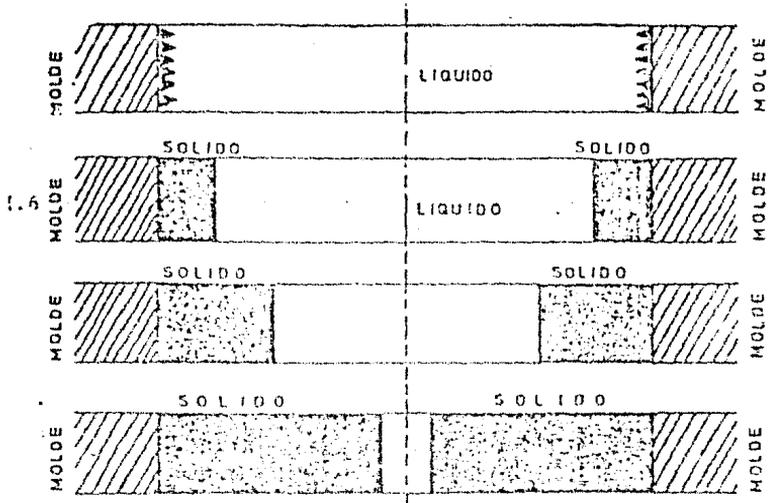


Fig.II.10 Etapas en el enfriamiento de un metal puro (11)

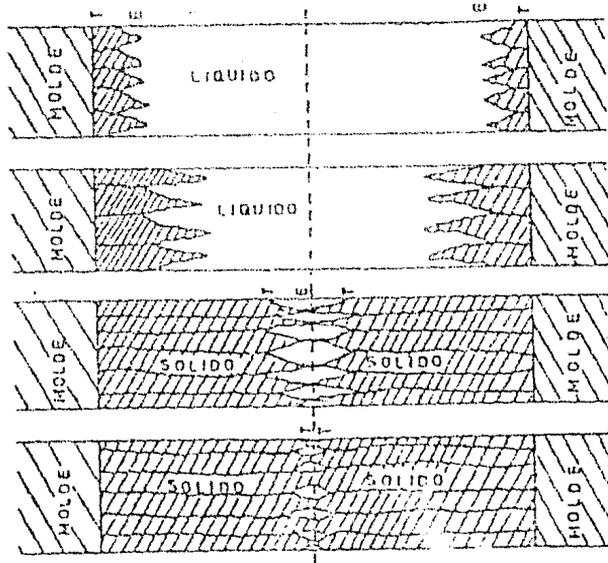


Fig.II.11 Etapas en el enfriamiento de una aleación baja. (11)

b) Aleaciones de amplio rango de solidificación.

Este grupo incluye un gran número de materiales importantes, como son las aleaciones de aluminio, magnesio, - cobre y ferrosas. Cuando estas aleaciones empiezan a solidificar, lo hacen con la formación de cristales en la pared del molde tan pronto como la temperatura de liquidus es alcanzada por dicho metal. Los primeros cristales formados contienen cantidades más bajas de elementos aleantes que el metal líquido de los cuales están formados, - por lo que los aleantes presentes en el líquido y en los cristales que están formados son expulsados dentro del líquido rodeando así los cristales. Este líquido que rodea se enriquece en elementos aleantes y estos a su vez disminuyen considerablemente el punto de solidificación del líquido. Si el enfriamiento fuera lento habría tiempo para la difusión, provocaría la continuación del crecimiento y daría como resultado una estructura columnar.

En la mayor parte de las situaciones prácticas no hay tiempo para que las concentraciones en el líquido sean difundidas por difusión, por lo que el metal líquido que rodea los cristales está disponible para solidificar hasta una etapa posterior a la pieza como un todo. Esto explica lo que sucede en lo que se llama solidificación pastosa, por lo que se ha observado que en muchas aleaciones la rigidez no es total hasta que la pieza esté del 60 al 70% sólida.

c) Solidificación de metales y aleaciones como combinación de los mecanismos anteriores.

No hay transición pronunciada de la formación de pla-

cas en el enfriamiento de tipo pastoso, según sea incrementado el contenido aleante de un metal de cero a un valor el cual nos eleve al tipo pastoso de enfriamiento descrito anteriormente. En la práctica, los tipos intermedios de enfriamiento se observan en muchos rangos de composición. En una aleación de este tipo, los primeros cristales formados tienen su propio crecimiento un poco restringido, pero no detenido totalmente; el crecimiento toma una forma columnar, las dendritas largas y delgadas son formadas perpendicularmente al molde como se muestra en la fig. II.11. El espacio entre las dendritas es lleno con líquido enriquecido, el cual solidifica mucho más tarde en el proceso de solidificación, dado su bajo punto de fusión. Algunas veces el crecimiento de las dendritas es suspendido totalmente en cierto tiempo como se muestra en la fig. II.12. En este tipo de solidificación, el enfriamiento pastoso, tiene lugar en la región central de la pieza y propicia la formación de una estructura equiaxial ahí.

El tipo intermedio de enfriamiento tiene relación con el enfriamiento de capa gruesa o de amplio rango de solidificación en el cual el enfriamiento tiene lugar al mismo tiempo por toda la pieza, algo de metal en la pared del molde permanece líquido hasta la última etapa de enfriamiento. Ninguna capa sólida completa es formada al principio del enfriamiento de la pieza en contradicción con la anterior solidificación por capas.

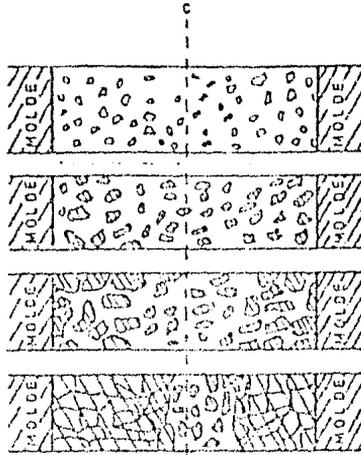


Fig. II.12 Etapas en la solidificación pastosa de una aleación de largo rango de enfriamiento. (11)

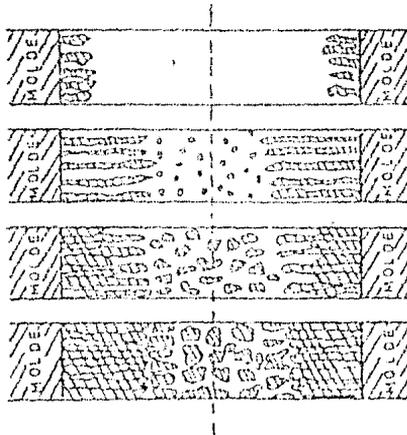


Fig. II.13 Etapas en el enfriamiento de una aleación de solidificación intermedia. (11)

II.4 Efectos de gas.

II.4.1 Solubilidad del hidrógeno.

Por fortuna las aleaciones de aluminio practicamente solubilizan unicamente al hidrógeno. El gas hidrógeno es soluble en aluminio líquido y esencialmente insoluble en aluminio sólido, - por lo tanto, cuando una fusión solidifica conteniendo hidrógeno este es rechazado del metal líquido y forma la porosidad. Para el aluminio fundido la fuente de gas hidrógeno es el agua o el vapor de agua.

Dada la afinidad del aluminio por el oxígeno, este reacciona con el agua para formar hidrógeno nascente y óxido de aluminio. Este hidrógeno nascente, facilmente se disuelve con el aluminio fundido. El hidrógeno gaseoso ordinario o molecular no es soluble en el aluminio en ninguna cantidad apreciable. En el punto de fusión del aluminio la solubilidad del hidrógeno es bastante baja, pero se incrementa rápidamente con la temperatura (fig.

II.14)

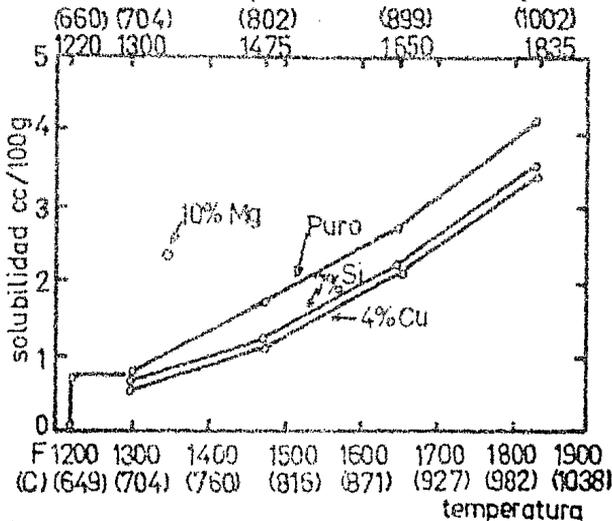


Fig. II.14 solubilidad del hidrógeno en aluminio y sus aleaciones en función de la temperatura. (1)

Se puede decir que es prácticamente imposible fundir aluminio a 815°C sin experimentar gasificación, dada la alta reactividad del aluminio con el vapor de agua. Hay muchas fuentes de vapor de agua, la más importante de las cuales son los productos de combustión mezclados con el aire usado para la misma com bustión, o el aire de los alrededores durante la fusión y colado o puede ser el que esta presente en el metal sólido que se carga en el aluminio fundido. Muchos fundentes contienen componentes higroscópicos y, por lo tanto, los fundentes húmedos son una fuente de hidrógeno en fundiciones de aluminio.

Dada la ausencia de productos de combustión, los hornos elec tricos de cualquier tipo tienen la capacidad de producir aluminio fundido con el más bajo contenido de gas. En hornos que uti lizan combustibles, el control de los mismos (petróleo y gas) es importante y la atmósfera de combustión para este propósito debe ser ligeramente oxidante, esta condición mantendrá una capa de óxido de aluminio sobre la fusión, la cual tiende a prote ger la fusión de una posterior reacción con el orige no del vapor de agua. Una atmósfera de combustión reductora minimiza la capa de óxido protector y por consiguiente esto promueve la ga sificación.

Cualquier cosa introducida bajo la superficie de la fusión debe estar seca; tales como instrumentos, metales o fundentes, además debe tenerse cuidado al transferir el metal de un reci- piente a otro. Una severa agitación del metal causa suficiente reacción con la mezcla del aire para introducir subs tanciales de hidrógeno.

II.4.2 Medición del gas.

Con bastante frecuencia, es deseable medir o evaluar la cantidad de gas presente en una fusión de aluminio. Hay un gran número de caminos por los cuales esta medición puede ser realizada y que van desde la aproximación más burda hasta métodos precisos. Sin embargo, el aumento en la precisión incrementa agudamente el costo de la operación.

El método más fácil, el más simple y el más apropiado es simplemente solidificando una pequeña muestra de metal fundido en arena en verde o en un molde de arena para corazón, un cilindro de dos pulgadas de diámetro. La observación de si esta muestra se contrae o no, dara una burda indicación del contenido de gas en la muestra. Seccionando la muestra y maquinando la superficie cortada nos permitira una evaluación del contenido de gas por la observación de porosidad.

Un mejor método y uno de los más usados, es el aparato de solidificación al vacío. en este método, una pequeña muestra de fusión de aluminio es puesta en una cámara en la cual es reducida rápidamente la presión hasta cerca del 10% la presión atmosférica normal. Un valor común es de 27 pulg. (69 cm) de mercurio de vacío o 70 mm Hg de presión. La solidificación bajo presión reducida tiene el efecto de agrandar la severidad de la porosidad cuando el hidrógeno es liberado de la solución.

La muestra solidificada en vacío puede ser evaluada de varias maneras, la más simple es mirar en la superficie de la muestra. Si se infla ésta, el contenido de gas es alto; si la superficie permanece en su nivel, el contenido de gas es moderado y; si la superficie muestra contracción el contenido de gas es bajo. Las muestras pueden ser cortadas por la mitad, revelando la porosi-

dad interna y una estimación del contenido de gas puede ser hecha por la evaluación del tamaño y número de burbujas (fig.

II.15).

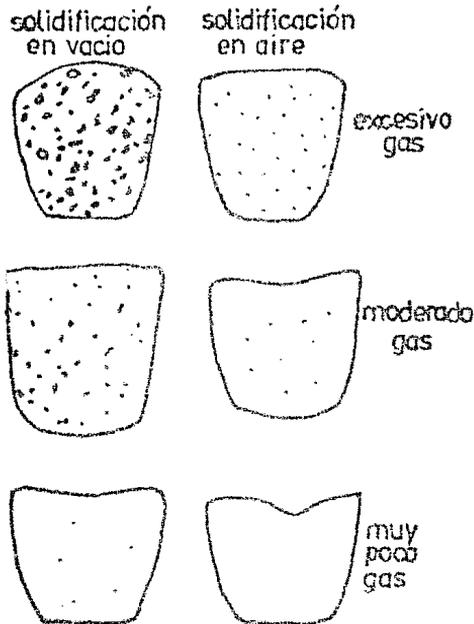


Fig. II.15 Diferencia entre muestras solidificadas al vacío y en aire con diferentes contenidos de gas. (1)

Probablemente el método más preciso de medición para uso general, es un instrumento el cual burbujea nitrógeno seco dentro de la fusión de aluminio, colecta el nitrógeno de la superficie de la fusión, mide su contenido de hidrógeno e indica en una ca rátula el contenido de hidrógeno de la fusión usada como muestra. El uso de este instrumento en la fundición requiere de gran cuidado.

Para la mayoría de las fundiciones que trabajan con aluminio comercial, un muy bajo contenido de gas no es deseable a causa

de las dificultades de contracción que son encontradas.

La mayoría de los fundidores de aluminio están acostumbrados a trabajar con aluminio con cierto contenido de gas y con la contracción normal que resulta. Cuando son usados bajos contenidos de gas ocurre una contracción severa, requiriéndose entradas y alimentadores más grandes.

II.4.3 Reducción de gas.

Cuando ha sido determinado por algún medio que el contenido de gas en el aluminio fundido es alto, este puede ser reducido a un nivel deseado puesto que existen muchos métodos para llevarlo a cabo. El más común, que viene desde 1940, estriva en fundir una carga de aluminio permitiéndole solidificar y refundiéndolo rápidamente, llevándolo a la temperatura de colada y vertiéndolo en el molde. Este método es muy efectivo pero no muy usado actualmente porque consume mucho tiempo, es costoso y pueden ser usados mejores métodos.

Se pueden mencionar dos métodos de uso común. El primero involucra el uso de gases como el nitrógeno, el cloro o la mezcla de ambos, los cuales son burbujeados a través de la fusión. El segundo método involucra el uso de compuestos químicos como el hexaclorohetano (C_2Cl_6). Este compuesto es usado en forma de comprimidos o tabletas las cuales son sumergidas al fondo del aluminio fundido donde se volatilizan liberando cloro, el cual lleva a cabo la acción desgasificadora.

Un tercer método, raramente usado es poner el crisol con el aluminio fundido en una cámara al vacío donde es expuesto a baja presión, esto causa que el hidrógeno sea eliminado de la fu-

sión, después de lo cual es colada. Aunque efectivo, la desgasificación en vacío requiere de alto capital de inversión para el equipo, el cual, necesita considerable mantenimiento para retener la eficiencia de operación.

El uso de gas cloro o nitrógeno es un proceso bien establecido. Cada gas tiene sus ventajas y sus desventajas. El nitrógeno es inodoro, no tóxico y no produce humos, sin embargo, ha sido encontrado que no es tan eficiente como el cloro. En suma, el nitrógeno debe ser extremadamente seco pues ocasiona dificultades en la desgasificación si no está completamente seco. Para incrementar la eficiencia del nitrógeno una cubierta de fundente es usada en la superficie de la fusión para proteger al metal de la atmósfera cuando la desgasificación es llevada a cabo.

El uso de gas cloro tiene varias desventajas notables. Tiene un fuerte olor desagradable, es tóxico y genera considerable humo el cual es corrosivo y ataca rápidamente al hierro de los tubos de conducción. Cuando el cloro es introducido dentro de la fusión casi instantáneamente es convertido en cloruro de aluminio. Es este un gas que se difunde a través de la fusión y realiza la desgasificación. El gas cloruro de aluminio es considerablemente más pesado que el aire y se cree que forma una cubierta protectora sobre la superficie de la fusión excluyendolo y previniendo la re-entrada de hidrógeno dentro del metal líquido.

En años pasados un nuevo sistema de desgasificación fue introducido y consiste en el uso de una mezcla de nitrógeno y cloro en proporciones tales como 90% nitrógeno- 10% cloro o de 80% nitrógeno- 20% cloro.

Este método de mezcla de gases parece combinar las ventajas y minimiza las desventajas del cloro. La desgasificación es usualmente realizada por la conducción de cada gas desde su respectivo tanque hacia un aparato mezclador que contiene un medidor de flujo, el cual mide la cantidad de cada componente y permite ajustar la relación deseada. La experiencia indica que este método es probablemente, el medio más efectivo de desgasificación de fundiciones de aluminio.

Es esencial que todo el equipo de desgasificación sea precalentado y secado antes de usarse, esto es especialmente importante en el uso de gas cloro o de sustancias químicas que contengan cloro pues son muy higroscópicos y rápidamente absorben agua.

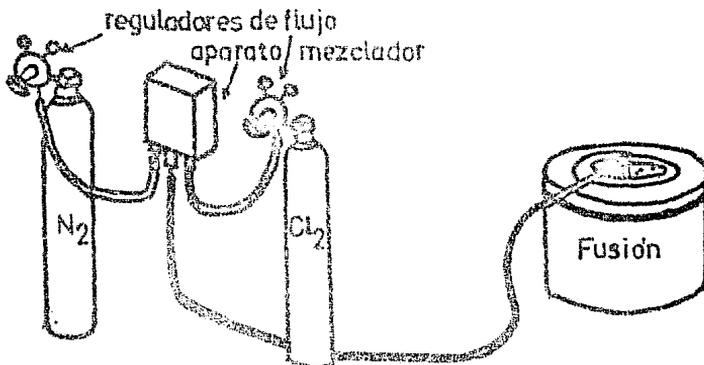


Fig. II.16 dispositivo para desgasificar la fusión con una mezcla de nitrógeno y cloro. (4)

Otra manera de desgasificar una fusión es por medio de ultrasonido sometiendo fusiones a una frecuencia ultrasonica (entre 0.5 y 2 KHz). El gas presente se difunde a través del metal debido a las ondas que provocan la formación de burbujas de gas por cavitación. La desgasificación es favorecida por la presencia de Ti o Nb.

Como se ha visto que el hidrógeno es el gas que más contamina al aluminio, un procedimiento para eliminarlo es tratar de formar en el caldo metálico compuestos llamados hidruros que -- sean estables. Los elementos que forman hidruros estables y más utilizados son:

Zr, Ca, Na, Sr, Ba, Tl, Li.

II.5 Defectos en molduras.

Cuando no se sigue en forma estricta el control de las variables en el proceso de fundición como lo pueden ser la composición, el sistema de colada, la temperatura de sobrecalentamiento, etc., surgen con frecuencia defectos en las piezas obtenidas. Los desechos en las fábricas a causa de piezas defectuosas llegan en algunos casos a niveles bastantes elevados, razón por la cual deben de evitarse en lo posible los defectos en las fundiciones, de manera que se eleve la producción y al mismo tiempo se mejere el costo unitario de las molduras.

Dada la importancia de los defectos, a estos se les ha clasificado en cuatro grandes grupos, que son:

- 1^o.-Defectos externos, que se detectan directamente en la superficie (dimensiones incorrectas, rechupes, etc.).
- 2^o.-Defectos volumetricos, dispuestos dentro de las molduras (grietas, porosidad, etc.).
- 3^o.-No correspondencia de la composición química.
- 4^o.-Propiedades mecánicas no satisfactorias.

II.5.1 Origen y prevención de los defectos del primer grupo.

- a) La no correspondencia de las dimensiones de la moldura a las deseadas puede ser el resultado de un calculo incorrecto de la contracción al hacer el modelo o de un armado inexacto del molde. Este defecto puede ser eliminado modifican

- do el modelo y elevando la exactitud del armado del molde.
- b) Uniones soldadas y llenado incompleto de las molduras.- se crean por el paso del metal semifundido. Este metal se forma al llenar el molde con metal parcialmente solidificado, cuando atraviesa pasajes de sección delgada.
 - c) Rebabas de junta.- aparecen en la moldura en el plano de separación del molde como consecuencia del desgaste de las cajas de moldeo, por la deformación o sujeción incorrecta del molde.
 - d) Sesgo.- surge por un mal armado del molde o desplazamiento de un semimolde a causa del desgaste del buje y pasadores.
 - e) Costras.- aparecen a causa de una fuerte unión entre el metal y la mezcla de moldeo como resultado de un insuficiente poder refractario de los materiales de moldeo o de una insuficiente compactación del molde.
 - f) Los veteados.- son abolladuras en la moldura o capas de arena intercalada en la misma. Se crean generalmente en las grandes superficies planas por excesiva compactación de moldes sin secar, ya que al pasar el metal líquido sobre estas superficies se calientan y se deforman. A veces la deformación es tan grande que una cáscara se desprende creando una grieta a través de la cual penetra el metal.

Para evitar este defecto no se debe compactar mucho el molde y el llenado del mismo debe ser rápido con metal sin mucho sobrecalentamiento además de emplear pinturas especiales que excluyan la aparición de grietas al calentarse el molde.

II.5.2 Origen y prevención de defectos del segundo grupo.

- a) Grietas en caliente.- son defectos que aparecen por diferentes causas, como son: alta temperatura de sobrecalentamiento,

elevada contracción del metal, diseño incorrecto del sistema de colada y alimentadores, mala compresibilidad de los corazones, mal diseño de las molduras o un enfriamiento irregular que provoca tensiones internas, así como diferencias en la composición química (segregación).

- b) Grietas en frío.- se dan como consecuencia de una contracción no uniforme de la moldura o como deterioros mecánicos durante el desmoldeo y desbarbado. Para evitar las grietas en frío es necesario asegurar un enfriamiento uniforme de la moldura en sus partes delgadas y gruesas así como un cuidadoso desmoldeo y desbarbado.
- c) Sopladuras de gas.- son oquedades que tiene una superficie limpia y lisa; pueden ser abiertas (externas) o cerradas (internas). Surgen por excesivo poder gasógeno o baja penetrabilidad de la arena; mal secado del molde, del corazón o de su incorrecta elaboración; por un contenido elevado de gases en el metal líquido, así como por un incorrecto suministro de metal.
- d) Derruabe del molde.- es un defecto que se da por insuficiente compactación o insuficiente resistencia de la mezcla de moldeo como también por fuertes golpes sobre la caja de moldeo durante el armado del molde.
- e) Inclusiones de arena.- ocurre por baja resistencia y humedad de la mezcla de moldeo, por insuficiente compactación y mal soplado del molde. Este defecto puede eliminarse mediante una compactación normal y un minucioso soplado además de un acabado correcto del embudo de colada.
- f) Inclusiones de escoria.- este defecto aparece a consecuencia de una insuficiente depuración de la masa fundida de escoria en la cuchara, un bajo poder refractario del revesti-

miento de las cucharas y un diseño incorrecto del sistema de colada.

- g) Rechupes de contracción.- aparecen como consecuencia de la mala alimentación de las partes gruesas de la pieza, mal diseño de la moldura, incorrecta posición de las secciones de ataque y alimentadores, llenado con metal excesivamente caliente o por elevada contracción.
- h) Porosidad por contracción.- este defecto surge cuando no es suficiente la alimentación de la pieza moldeada con metal líquido en el proceso de solidificación.

II.5.3 Origen y prevención de defectos del tercer grupo.

- a) No correspondencia de la composición química.- aparece a consecuencia del pesaje incorrecto de los materiales de carga, de la mezcla de diversas clases de materiales o por errores en el proceso de fundición. Para evitar los defectos por esta causa, se deben de controlar los materiales iniciales de carga, observar estrictamente el orden a seguir durante el pesaje y controlar el proceso de fundición.

II.5.4 Origen y prevención de defectos del cuarto grupo.

- a) La variación de las propiedades mecánicas.- esta variación se observa generalmente cuando la composición química y las propiedades microestructurales (microestructura) no corresponden a las planeadas.

II.6 Control de calidad de las molduras.

El control de las molduras comienza por la revisión exterior en dos etapas; antes del desbarbado y recocido (si es que lleva

tratamiento termico) y después de la limpieza final. Se controla la calidad en los siguientes aspectos:

II.6.1 Composición química.

La composición química de las molduras se determina por medio de análisis químico y espectral. Como probeta para análisis se emplea una muestra fundida, la moldura o la probeta para pruebas mecánicas.

En el análisis espectral, entre el electrodo y la superficie de la moldura se crean chispas o un arco eléctrico cuya luz se descompone con un prisma en el espectro cromático que caracteriza la composición. Este procedimiento está basado en la comparación del espectro del metal que se ensaya, con un patrón. La ventaja principal del análisis espectral, es la rápida determinación de Mn, Cr, Ni, Si y otros elementos.

II.6.2 Dimensionamiento geométrico.

Se controla con plantillas, dispositivos especiales y por el trazado en la placa. Las desviaciones de las medidas no deben superar las admisibles.

II.6.3 Propiedades mecánicas.

Para verificar las propiedades mecánicas se funden probetas especiales que se someten a diferentes pruebas como son la de tracción, compresión, prueba de impacto, etc..

II.6.4 Estructura del metal.

La estructura del metal se determina por medio de muestras metalográficas preparadas a simple vista (análisis macroscópico)

o para análisis con microscopio metalográfico (análisis microscópico).

II.6.5 Control de defectos por pruebas no destructivas.

Los defectos pueden ser detectados por procedimientos magnéticos, de rayos x o gamma, por penetración fluorescente, por inspección ultrasonica, etc.⁽⁷⁾.

Una prueba no destructiva es aquella que al realizarla no impida la utilización futura de la pieza. Aunque estas pruebas no dan mediciones de propiedades mecánicas, son valiosas para detectar materiales defectuosos antes de que entren en funcionamiento. Se usan para descubrir defectos que pudieran desarrollarse durante el uso, pues las piezas pueden examinarse cuando estas en funcionamiento las partes. Algunas de las pruebas son:

a) Radiografía de metales.

La radiografía de metales se puede realizar mediante rayos X o rayos gamma que son rayos electromagnéticos de longitud de onda corta capaces de atravesar espesores de metal relativamente grandes. La radiación gamma es más penetrante que los rayos X pero su sensibilidad inferior limita su aplicación.

Una radiografía es una fotografía sombreada de un material más o menos transparente a la radiación. Los rayos X oscurecen la película de modo que las regiones de menor densidad que permiten fácilmente la penetración de éstos - aparecen oscuras en el negativo, comparadas con las regiones de mayor densidad. De este modo un orificio o una fractura aparece como una área oscura, es tanto que las inclusiones de cobre en una aleación de aluminio aparecen como áreas más claras.

b) Inspección por partículas magnéticas (Magnaflux)

Es un método para detectar fisuras, discontinuidades, inclusiones o recubrimientos en materiales ferromagnéticos y dada la naturaleza no magnética del aluminio, solo se menciona como un método no destructivo para control de calidad el proceso Magnaflux y el Magnaglo. El proceso Magnaglo es una variante del proceso Magnaflux y se diferencia en la utilización de una suspensión de partículas magnéticas fluorescentes.

c) Inspección por penetración fluorescente (Zygo).

Aunque este método puede aplicarse tanto a materiales magnéticos y no magnéticos, se usa principalmente en materiales no magnéticos.

Las partes que se van a probar se tratan primero con un colorante (sustancia penetrante) que es un líquido ligero y aceitoso que se aplica por inmersión, rociado o con brocha. El colorante es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que ha penetrado se limpia la superficie o se lava, en tanto que el colorante permanece en la discontinuidad. A continuación la superficie se trata con un polvo seco o en suspensión -- que es un revelador y actúa como esponja que extrae el colorante fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación. Un método para facilitar la inspección, es usar un colorante de tonalidad contrastante al revelador. Otro método es usar un colorante fluorescente, los pasos a seguir son los mismos, excepto que ahora el líquido penetrante contiene un material que emite luz visible cuando se expone a una radiación ultravioleta. Cuando algún defecto va a ser revisado, se observa bajo luz negra que aparece el defecto

como marca fluorescente contra fondo negro (fig. II.17).



Fig. II.17 inspección por penetración fluorescente.(7)

d) Inspección ultrasónica

Es un método que utiliza ondas de sonido con una frecuencia de 1 a 10^{10} Hz (ciclos por segundo) para detectar defectos, esta es una prueba no destructiva, confiable y rápida. Dentro de la inspección ultrasónica existen los métodos comunes que son el de transmisión continua y el de eco-pulsos.

El método de transmisión continua utiliza un transductor a cada lado del objeto que va a revisarse. Fig. II.13.

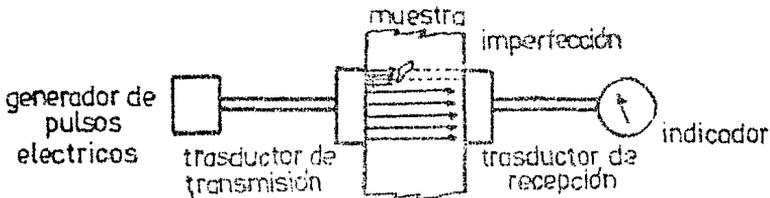


Fig. II.13 inspección ultrasónica por el método de transmisión continua.(7)

Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico a la frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado. El transductor de recepción situado al lado opuesto recibe las vibraciones y las convierte en una señal eléctrica que se puede amplificar y observar en un osciloscopio. Si la señal viaja sin encontrar ninguna imperfección ésta será rela

tivamente grande y si hay algún defecto en la trayectoria - de la onda parte de la energía se reflejará y la señal reci bida se reducirá.

El método de eco-pulso utiliza un solo transductor que sir ve como transmisor y receptor. Cuando la onda sonora penetra en el material de prueba, parte de ella se refleja hacia el cristal donde se convierte en un pulso eléctrico, el cual - se amplía y se hace visible en un osciloscopio. Cuando la - onda original alcanza el otro extremo del material a prueba se refleja y se observa como otra señal en el osciloscopio a la derecha de la primera señal. Si hay imperfecciones en el material se delatarán como una tercera señal entre las - dos antes mencionadas correspondientes a las superficies. - Como las indicaciones miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso de las superficies frontal y posterior la distancia entre las indicaciones es una medida del espesor del material, por lo tanto, la localización de un defec to puede determinarse con exactitud por la indicación que - aparece en la pantalla.

La inspección ultrasónica se utiliza para detectar y loca lizar defectos como; cavidades de contracción, fisuras internas, porosidades y grandes inclusiones no metálicas.

e) Inspección por corrientes parasitas.

Se utiliza para inspeccionar electricamente materiales - conductores en busca de defectos, irregularidades estructurales y variaciones en composición. En esta prueba si una - fuente de corriente alterna se conecta a una bobina se produce un campo magnético variable. Cuando este campo se colo ca cerca de una muestra capaz de conducir una corriente -- eléctrica, se inducirán en la muestra corrientes parásitas

a su vez estas corrientes producirán un campo magnético propio. La unidad de detección medirá este nuevo campo magnético y convertirá la señal en un voltaje que puede leerse en un medidor, esto puede emplearse para detectar defectos superficiales y subsuperficiales, espesor de placas y tubos.

f) Holografía.

La Holografía es un método para registrar en película datos visuales de un objeto tridimensional y reproducir una i imagen tridimensional del mismo. Un angosto haz de luz de un laser, pasa a través de un ensamble formado por una lente y un orificio muy pequeño para aumentar su área de cobertura. El haz divergente incide sobre un espejo y el objeto. El -- haz de referencia reflejado del objeto y el reflejado del - espejo inciden sobre una placa fotográfica. Como no se usa ninguna lente para enfocar la luz proveniente del objeto, - la película registra no una imagen sino un patrón de la interferencia resultante de la mezcla de estos dos haces.

Después de la exposición, la película se revela y el holograma esta listo para estudiarse. Al observarlo, la luz del laser, semejante al haz de referencia empleado durante la - exposición, ilumina al holograma. Se observa una imagen tri dimensional reconstruida del objeto original aparentemente en la posición exacta ocupada por el objeto durante la expo sición.

En el método de tiempo real, el holograma original se observa de tal manera que la imagen virtual reconstruida esté sobrepuesta al objeto; entonces el objeto se tensiona. Cual quier deformación del objeto inducida por la tensión aplica da aparecerá bordeada, entre líneas en la fotografía y reve lará vacíos, imperfecciones, áreas desligadas e inclusiones.

II.7 Sistema aluminio-silicio.

Las aleaciones de aluminio se emplean en gran escala en la industria pues tienen elevada resistencia, buenas propiedades de fundición, resistencia a la corrosión, conductibilidad térmica y eléctrica. Es posible fabricar soldaduras complicadas, resistentes y compactas, livianas y de buena maquinabilidad a partir de aleaciones de aluminio.

Las aleaciones aluminio-silicio tienen buenas propiedades de fundición; el silicio hace descender el punto de fusión incrementando la facilidad de fundirse. El silicio está presente en todas las aleaciones de aluminio comercial, es la impureza más abundante en el aluminio, pero es también una de las adiciones más importantes a las aleaciones de aluminio. El sistema binario aluminio-silicio es mostrado en la fig. II.19. La solubilidad del silicio en el aluminio, la fase α , es limitada a 1.65% a 577°C y menor a 0.05% a temperatura ambiente. El sistema es un simple eutéctico, en el cual las dos fases en equilibrio son prácticamente aluminio y silicio a temperatura ambiente.

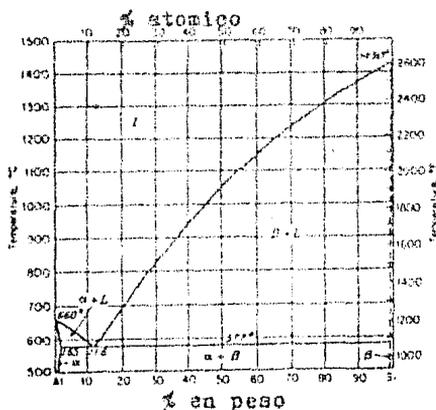


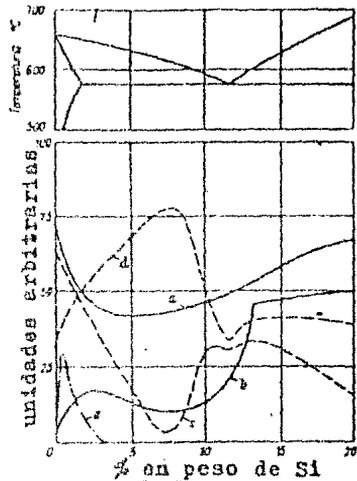
Fig. II.19 Diagrama de fases Al-Si.(9)

II.7.1 Características de fundición de las aleaciones aluminio-silicio.

La colabilidad de aleaciones de fundición es determinada principalmente por el tipo y rango de solidificación. Cada una depende de la posición de la aleación en el diagrama de fases. La interrelación entre el diagrama de fases y las características de fundición son presentadas en la fig. II.20.

Fig. II.20 Relación entre el diagrama de fases y las propiedades de fundición Al-Si. (8)

(a) fluidez; (b) capacidad de llenado; (c) sensibilidad a la contracción; (d) uniformidad de contracción (e) tendencia a la rotura en caliente.



Una explicación más a fondo de cada una de las variables consistiría en lo siguiente:

- (a) La fluidez es una medida de la capacidad o habilidad de una aleación para cubrir grandes áreas dentro del molde hasta que la solidificación ha comenzado en el punto en que todo el flujo se detiene. La fluidez depende principalmente del contenido de calor.
- (b) La capacidad de llenado del molde da una medida del llenado de contornos durante la colada. Lo más favorable es un período de solidificación lo más pequeño posible y una tendencia a la so

lidificación endogénea. Por lo tanto las aleaciones eutécticas tienen una alta capacidad de llenado.

(c) y (d) Estas curvas dan información sobre el comportamiento de la fundición durante la solidificación. Este conocimiento es importante en el diseño del molde, especialmente para la colocación de los alimentadores.

(e) La curva de la tendencia a la rotura en caliente describe el peligro que presenta la fundición de poder desarrollar fisuras, bajo la influencia de tensiones de contracción después de completar la solidificación. La rotura en caliente ocurre si con largos periodos de solidificación, la cristalización no eutéctica tiene lugar cerca del fin de la solidificación. Si un residuo eutéctico está presente éste puede fluir dentro de las fisuras con lo cual pudiera "sanar" completamente la moldura.

Para determinar las características de fundición se usan -- pruebas especiales, las cuales se puede decir que son un poco idealizadas. Debido a su forma se pone especial interés en una o más propiedades, por ejemplo, para determinar la fluidez se utiliza un ensayo de fundición en espiral con una pequeña sección transversal de varios metros de longitud. La longitud que alcanza es usada como una medida de la fluidez. La tendencia a la rotura en caliente es determinada en un molde de prueba el cual causa grandes tensiones de contracción a causa de diferencias abruptas en la sección transversal⁽⁸⁾, etc.. Los números obtenidos de esta manera no tienen significancia cuantitativa, ellos informan al fundidor de la relativa tendencia y muestran que medidas pueden ser empleadas a fin de eliminar el correspondiente defecto de fundición.

El porcentaje de silicio en la aleación es de primera importancia, seguido de cerca por los defectos microestructurales de

modificación, por colada en moldes permanentes o por practicas de fundición especiales. Estos factores son observados en la -- fig. II.21.

El efecto general de incrementos en el contenido de silicio es mostrado en la misma figura y es un incremento en la resistencia a la tensión hasta el eutéctico. La ductilidad sin embargo se ve disminuida.

El efecto benéfico de la modificación con elementos tales como el sodio y por fundición con enfriamiento es mostrada en la fig. II.21. De estas observaciones se deduce que las aleaciones Al-Si tendrán mejores propiedades cuando son modificadas o cuando son coladas en moldes metálicos.

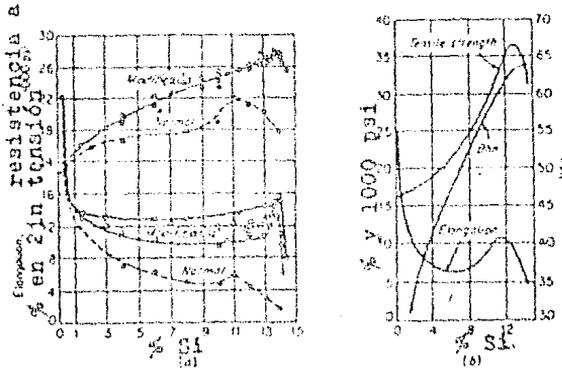


Fig. II.21 Propiedades de fundiciones Al-Si como una función del silicio en la aleación. (a) Aplicadas a aleaciones normales y modificadas (tratadas con sodio) fundidas en arena; (b) Aplicadas a fundiciones con enfriamiento. (9)

III. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Objetivo.- Obtener piezas sanas de aluminio-silicio con un buen acabado superficial, además de optimizar el sistema de colada para mejorar la relación entre el peso de las molduras obtenidas y el peso de a leación utilizada.

III.1 Diseño de modelos.

- La fig. III.1 muestra un sistema de colada con dos correedores cuatro secciones de ataque y una relación de colada de 1:2:4. Se asume que el vertedero es circular.

Para diseñar el vertedero se utilizó la siguiente fórmula: (9)

$$A_{iv} = \frac{w}{p \cdot c \cdot t \sqrt{2gh}}$$

en donde:

A_{iv} = Área inferior del vertedero vertical (cm^2)

w = peso de la fundición (gr)

p = densidad del metal líquido (gr/cm^3)

c = constante igual a 1

t = tiempo de colada (seg)

h = altura del vertedero (cm)

g = gravedad (cm/seg^2)

Datos para sustituir en la fórmula:

w = 600 gr, p = 2.38 gr/cm^3 , c = 1, t = 3 seg, h = 10 cm

g = 980 cm/seg^2 por lo tanto:

$$A_{iv} = \frac{600}{(2.38)(1)(3)\sqrt{(2)(10)(980)}} = 0.6 \text{ cm}^2$$

Si:

$$A = \pi D^2 / 4 \implies D = \sqrt{4A/\pi} \quad D = \sqrt{(4)(0.6)/\pi} = 0.874 \approx 0.9 \text{ cm}$$

Se tomo como criterio para dimensionar el área superior del vertedero, el hacerlo tres veces⁽⁹⁾ el área inferior del vertedero.

$A_{sv} = 3A_{iv}$ en donde A_{sv} = área superior del vertedero.

$$A_{sv} = (3)(0.6) = 1.8 \text{ cm}^2 \implies D = 1.52 \text{ cm}$$

Por la relación de colada se tiene que:

Si es 1:2:4 entonces $A_{c1} + A_{c2} = 2A_{iv}$ en donde A_{cn} es igual al área del corredor n.

Si $A_{c1} = A_{c2}$ entonces $A_{c1} = A_{c2} = A_{iv}$ por lo tanto

$$A_{c1} = A_{c2} = 0.6 \text{ cm}^2$$

Con el área obtenida para los corredores podemos dimensionar la sección transversal de los corredores de la siguiente manera:

Altura = 0.64 cm y ancho promedio = 0.95 cm para un área transversal en forma de paralelogramo.

Pozo.- Para un corredor ancho poco profundo el pozo en la base del vertedero puede tener un área cinco veces el área de la base del vertedero. El pozo puede ser dos veces - tan profundo como el corredor. Sin embargo, se consideraran suficientes las siguientes medidas:

$$D = 1.65 \text{ cm} \quad h = 1.0 \text{ cm}$$

De acuerdo con la relación de colada, el área total de las secciones de ataque debe ser:

$$\begin{aligned} \text{Área total de las secciones de ataque} &= (4)(A_{iv}) = (4)(0.6) \\ &= 2.4 \text{ cm}^2 \end{aligned}$$

si se usan cuatro secciones de ataque, dos para cada corredor, el área transversal de cada una será:

$$\text{Área de una sección de ataque } (A_{sa}) = 2.4/4 = 0.6 \text{ cm}^2$$

como el área transversal de las secciones de ataque es la misma que la de los corredores, se dimensionarán igual.

La tabla No. 1 muestra los resultados anteriores.

Tabla No. 1

	Area cm ²	Diametro cm	Ancho cm	Altura cm
A _{iv}	0.60*	0.90		
A _{sv}	1.80	1.52		
A _{c1}	0.60		0.95	0.64
A _{c2}	0.60		0.95	0.64
Pozo	2.13	1.65		1.00
A _{sa 1-4}	0.60		0.95	0.64

*Este valor debe ser en realidad 0.64 de acuerdo al diametro, aunque 0.64 cm se utiliza para dimensionar el vertedero en su parte superior se usa el valor de 0.60 para obtener las medidas del resto del sistema de colada.

La fig. III.5 muestra un sistema de colada semejante al anterior, con dos corredores y cuatro secciones de ataque, pero con relación 1:3:6 con lo cual los calculos para su diseño son los siguientes:

Tomando como base el diseño del vertedero del modelo anterior tenemos:

$$\begin{aligned} A_{iv} &= 0.64 \text{ cm}^2 & D_{iv} &= 0.9 \text{ cm} \\ A_{sv} &= 1.92 \text{ cm}^2 & D_{sv} &= 1.56 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$A_{c1} + A_{c2} = 3A_{iv} \quad \text{y} \quad A_{c1} = A_{c2} \quad \therefore \quad A_{c1} = A_{c2} = (3/2)A_{iv}$$

$$\implies A_{c1} = A_{c2} = (3/2)(0.64) = 0.96 \text{ cm}^2$$

dimensionando cada corredor queda:

$$\text{Altura} = 0.8 \text{ cm} \quad \text{ancho promedio} = 1.25 \text{ cm}$$

Pozo

$$\text{Diametro} = 2.4 \text{ cm} \quad \text{altura} = 1.5 \text{ cm}$$

Secciones de ataque.

Area total de secciones de ataque = $6A_{iv} = (6)(0.64) = 3.84 \text{ cm}^2$

Area de una sección de ataque (A_{sa}) = $3.84/4 = 0.96 \text{ cm}^2$

∴ altura = 0.8 cm ancho promedio = 1.25 cm

La tabla No,2 resume los resultados anteriores.

Tabla No. 2

	Area cm ²	Diametro cm	Ancho cm	Altura cm
A_{iv}	0.64	0.90		
A_{sv}	1.92	1.56		
A_{cl}	0.96		1.25	0.8
A_{c2}	0.96		1.25	0.8
Pozo	4.52	2.40		1.5
$A_{sa} 1-4$	0.96		1.25	0.8

Descripción de modelos

El modelo A es un sistema de colada de relación 1:2:4 con un vertedero, dos corredores y cuatro secciones de ataque que suministran metal líquido a cuatro molduras, como se observa en las figs. III.1 y 2. Molduras en posición vertical.

El modelo B es una variante del modelo A pues solo difiere - en la colocación de dos alimentadores en la unión entre corredor y secciones de ataque. Figs. III.3 y 4. Relación 1:2:4.

El modelo B' es igual al modelo B, solo que dos de las secciones de ataque de un mismo lado disminuyeron de longitud de manera que la distancia entre las dos molduras de ese lado se encuentren más cerca del alimentador. Relación 1:2:4.

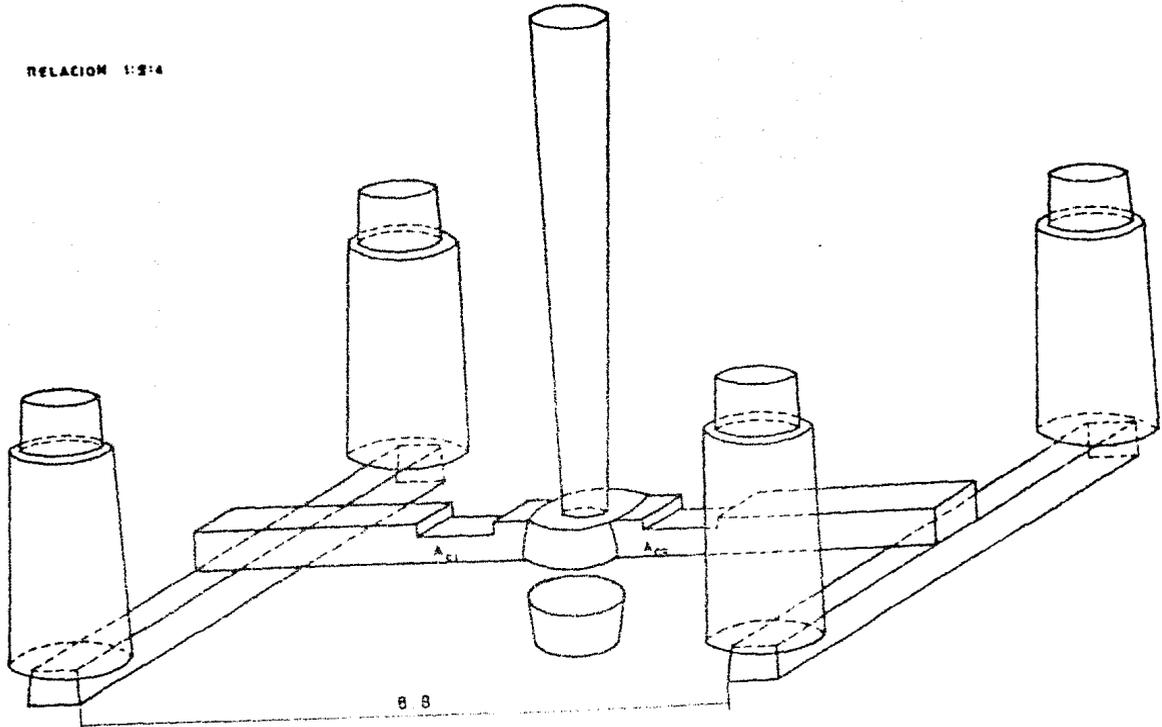
Modelo C. Es un sistema de colada con relación 1:3:6. Modelo igual en características al modelo B', difiriendo solo en la relación de colada. Figs. III.5 y 6.

El modelo D es un sistema de colada con relación 1:3:6 con un vertedero, dos corredores, dos corredores y cuatro secciones de ataque. Molduras en posición horizontal y alimentadores más pequeños que en los modelos anteriores. La longitud en las secciones de ataque son iguales (Fig. III.7).

Modelo E. Sistema de colada igual al D pero con dos molduras más, agregadas cada una en cada alimentador (Fig. III.8).

MODELO A

RELACION 1:5:4

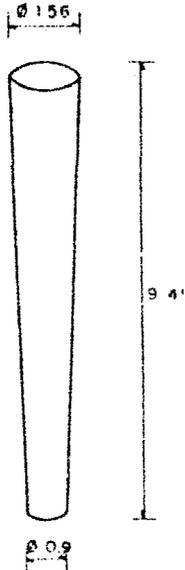


(52)

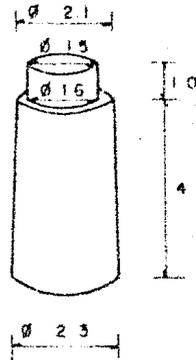
FIG. 1E1

MODELO A

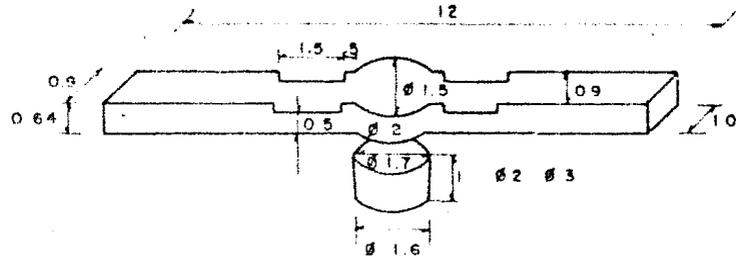
(53)



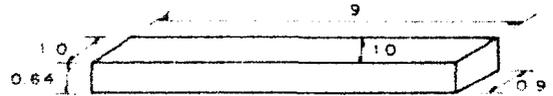
VERTEDERO VERTICAL



MOLDURA (CUATRO)



CORREDOR Y COLCHON DEL BEBEDERO



ENTRADAS A LAS MOLDURAS (DOS)
ACOTACIONES EN CENTIMETROS

MODELO PARA LA FABRICACION DE MOLDURAS DE ALUMINIO - SILICIO

RELACION: 1 2 4

MODELO B

(54)

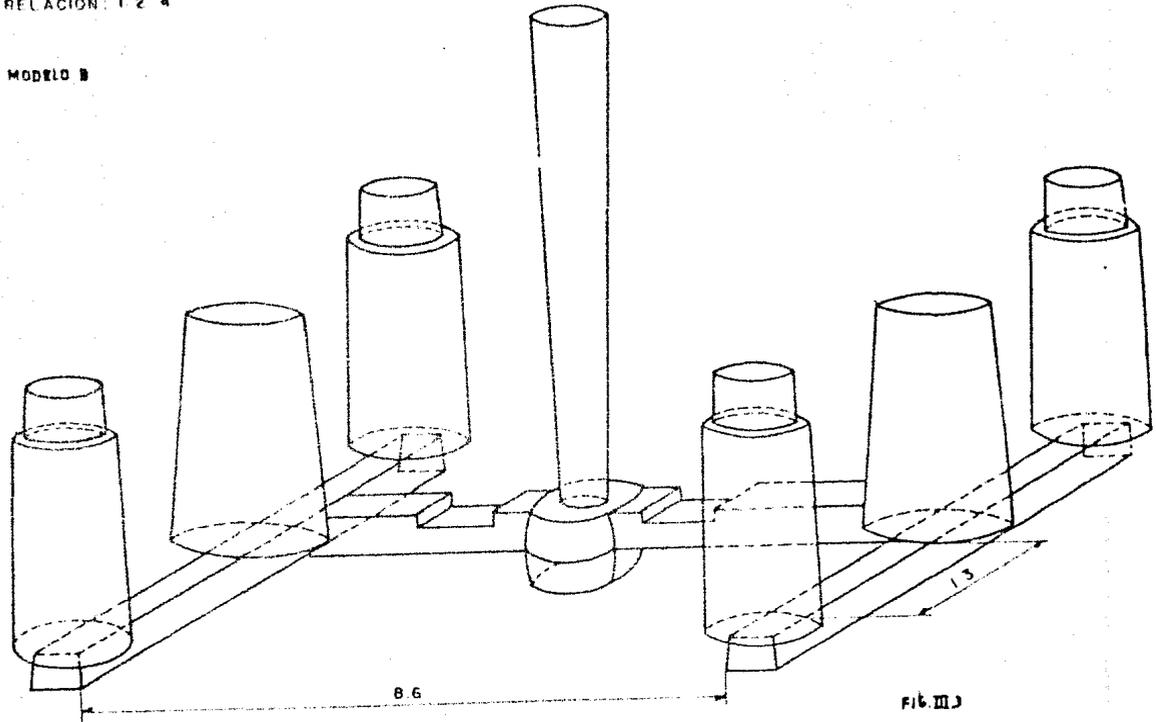
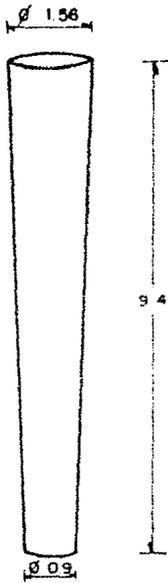


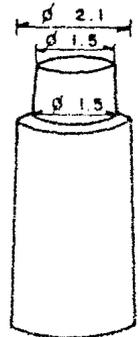
FIG. III J

RELACION 1 : 2 : 4

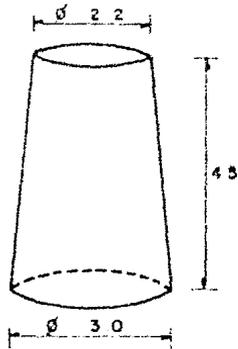
MODELO B



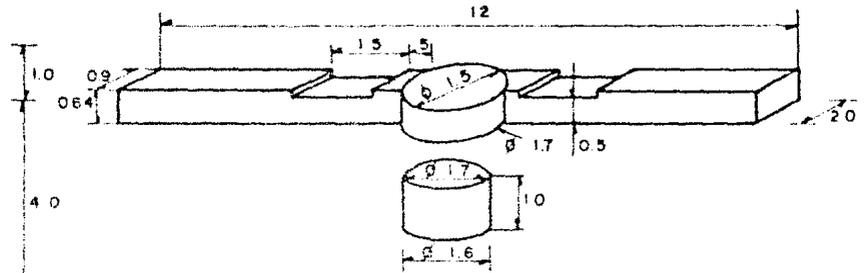
VERTEDERO VERTICAL



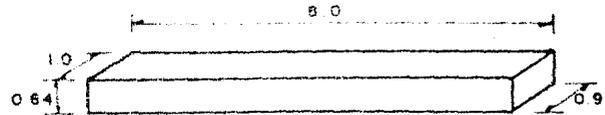
MOLDURA (CUATRO)



ALIMENTADOR



CORREDOR Y COLCHON DEL BEBEDERO



ENTRADA A LAS MOLDURAS (DOS)

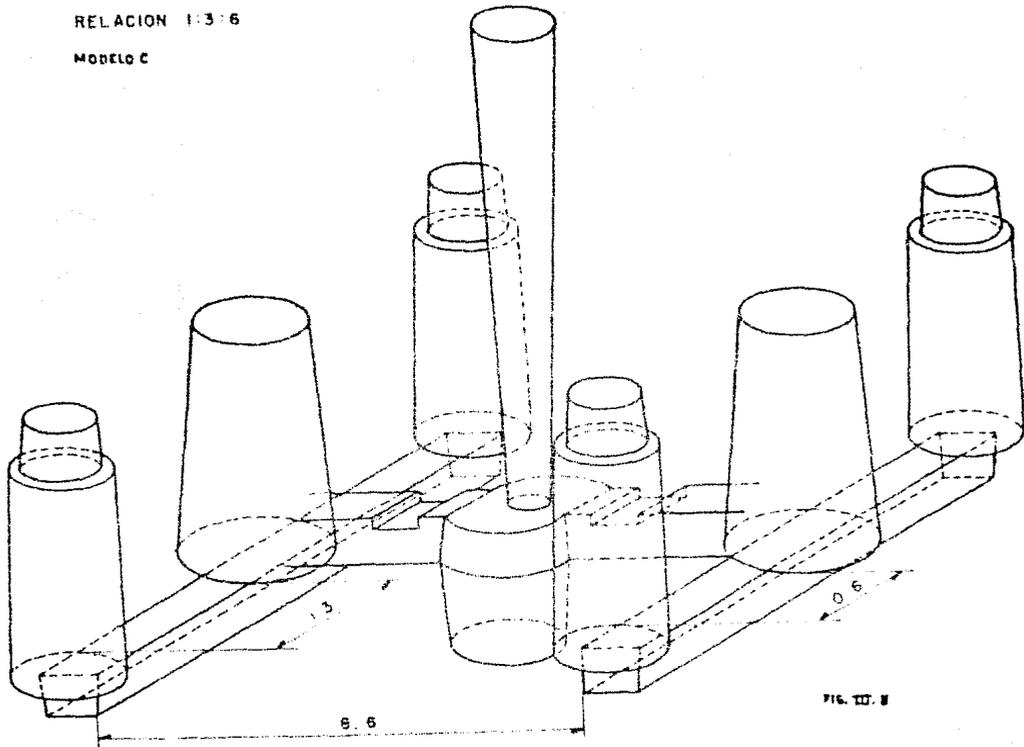
ACOTACIONES EN CENTIMETROS

FIG. III. 4

(55)

RELACION 1:3:6

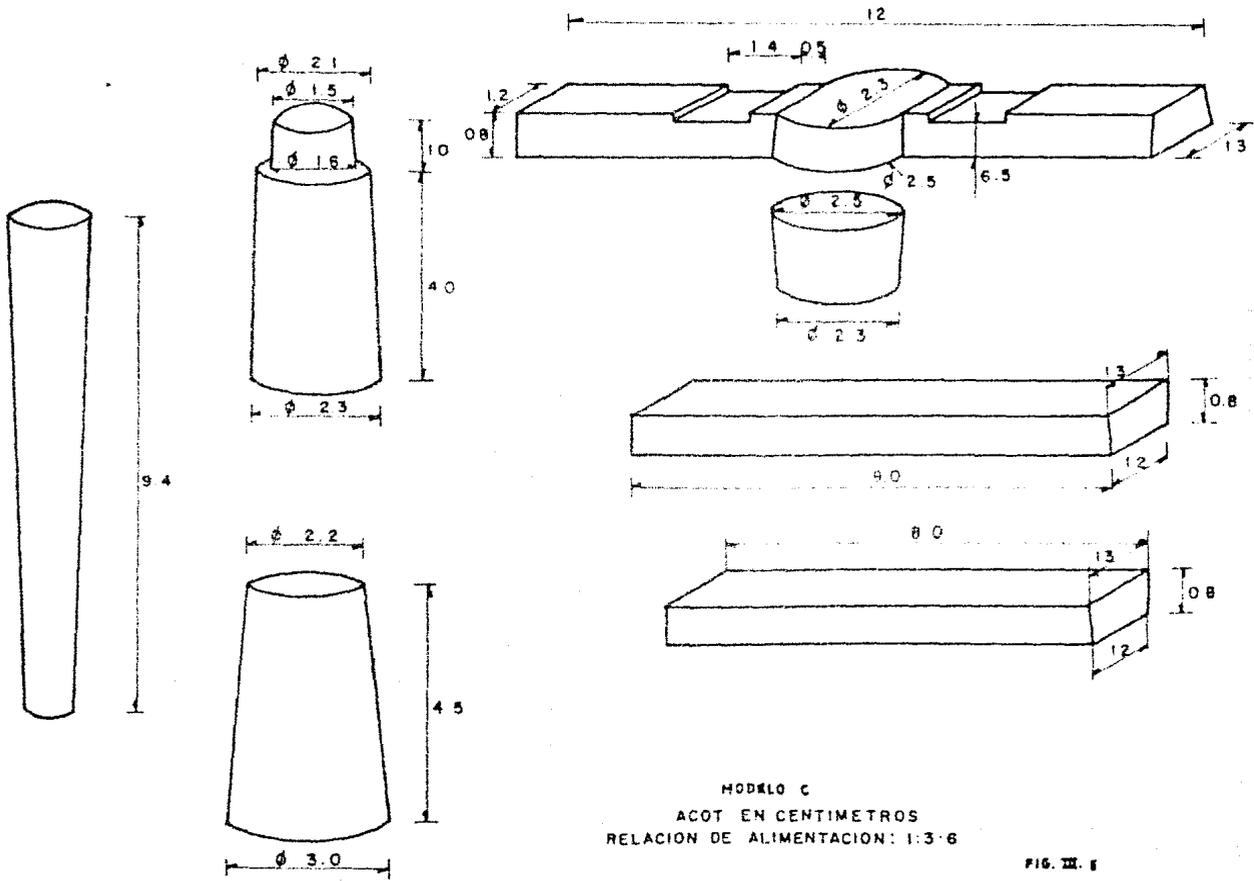
MODELO C



(56)

FIG. III. B

(57)



MODELO C
ACOT EN CENTIMETROS
RELACION DE ALIMENTACION: 1:3:6

NOMBRE: MODELO PARA LA ELABORACION DE PIEZAS
CILINDRICAS

RELACION: 1:3:6

MODELO 0

NOTA: DISTANCIA ENTRE ALIMENTADOR Y
ALIMENTADOR EN SU DIAMETRO MAYOR = 6.4 cm
DISTANCIA ENTRE ALIMENTADOR
Y MOLDURA = 0.7 cm

NOTA: TODAS LAS DEMAS MEDIDAS SON
IGUALES AL DIBUJO (3)

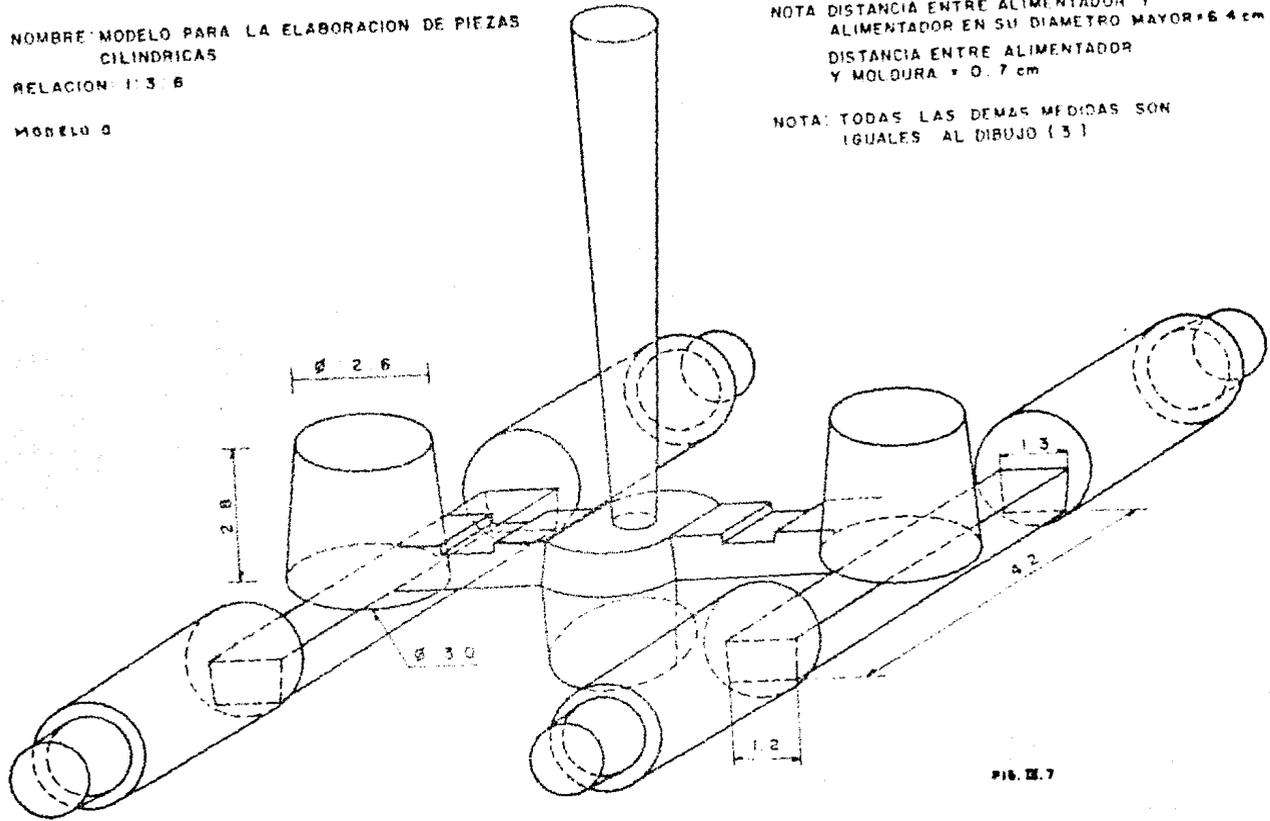


FIG. III.7

RELACION 1:2:6

MODELO E

(59)

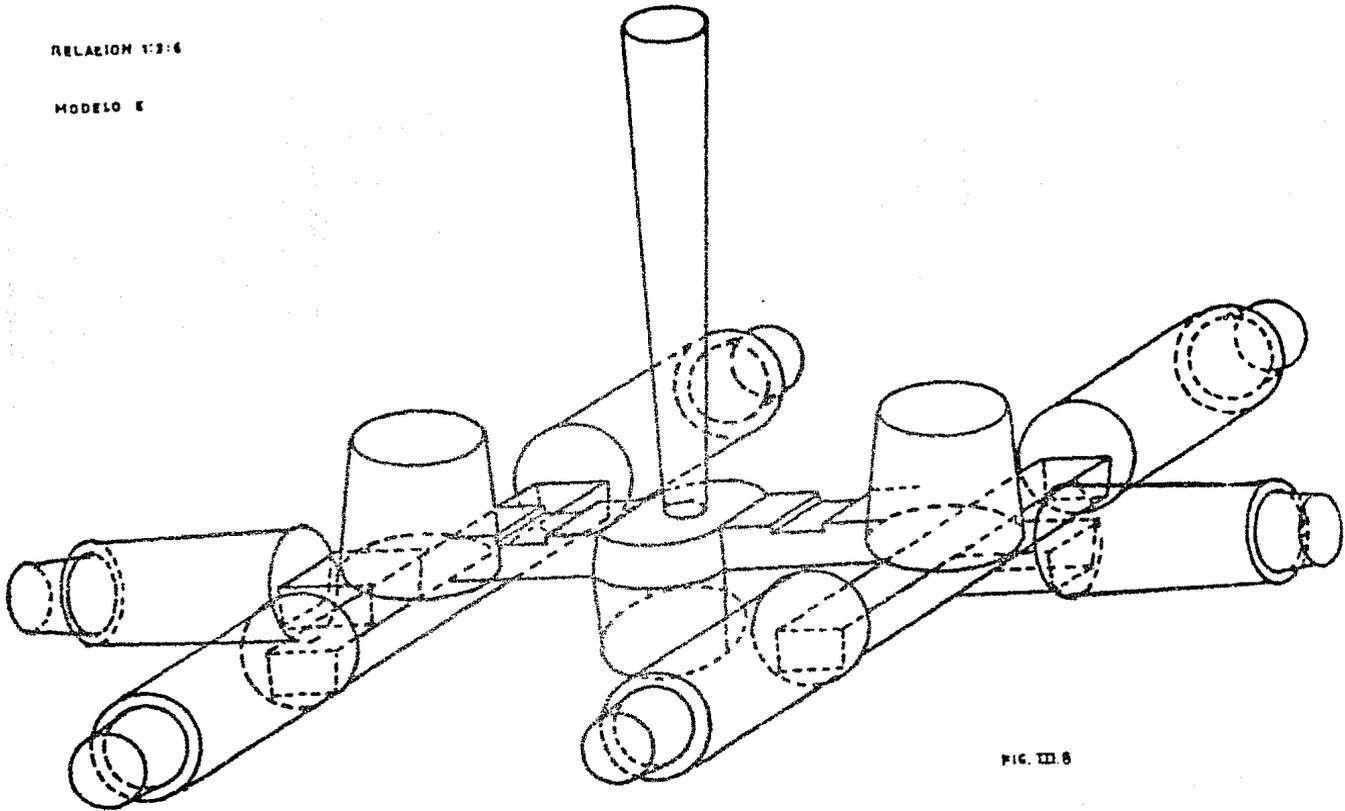


FIG. III.6

III.3 Preparación de la arena y moldeo.

En la preparación de los moldes, fue utilizada arena cuarzosa con 10% de bentonita como elemento aglutinante y 4% de agua como promedio. Todos estos materiales fueron mezclados en forma manual con pala y criba dado que la arena, bentonita y agua forman grumos que tenían que destruirse. Esta operación se realizó hasta que se consideró que la mezcla tenía la consistencia adecuada.

La fabricación del molde se llevó a cabo utilizando dos cajas de moldeo y con un modelo que queda fijo entre las cajas por medio de pasadores.

La elaboración del molde de arena comienza con la instalación de una de las cajas de moldeo en la parte superior del modelo, - se centran ambas partes por medio de pasadores, después de lo cu al el modelo se recubre con polvo desmoldeante como lo ilustra - la fig. III.9.1. Después se recubre el modelo con arena fina (ma lla 80-90) de manera que todas las partes del modelo quedan cubiertas, esta operación puede llevarse a cabo con la ayuda de una criba para cubrir el modelo con partículas de mezcla lo más finas posibles. Fig. III.9.2.

Posterior a la colocación de la arena de careo, se agrega la arena de relleno y se compacta. Para obtener una compactación uniforme del molde, la mezcla de relleno se agrega por capas y se compacta sucesivamente con un apisonador. Una vez hecha la compactación el exceso de arena es removida con un rasador a fin de dejar la superficie lo mas uniforme posible para facilitar el ma nejo del semimolde. Fig. III.9.3.

Una vez hecho el semimolde superior, se extrae el vertedero - vertical que es una pieza desmontable; con una cucharilla se fabrica el tazón de colada y posteriormente con un alambre recto se

practican los vientos en el semimolde a fin de poder facilitar la salida de gases durante la colada (fig. III.9.4). Después se separa el molde del modelo con sumo cuidado de tal forma que al separar el modelo no se destruyan las paredes o los bordes del molde.

En la fabricación del semimolde inferior se realizan los pasos ilustrados en las figs. III.9.2, 3 y 4, ya que aquí no se realizan vientos, fig. III.9.5. También en este paso al separar el modelo y el molde se debe de tener cuidado de no destruir las paredes del molde, en caso que así sea se procedera a reparar el molde, siempre y cuando los desperfectos no sean muy grandes.

Una vez realizados tanto el semimolde superior como el inferior se arma el molde completo, tal que, una vez armado cada componente del sistema quede exactamente en la posición que le fue asignada originalmente, esto se hace con la ayuda de pasadores - como se ilustra en la fig. III.9.6 y colocando pesas en la superficie del semimolde superior para evitar que el metal líquido - pueda introducirse en la línea de partición.

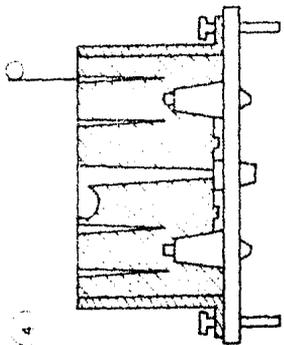
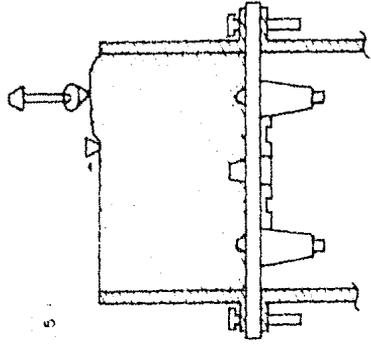
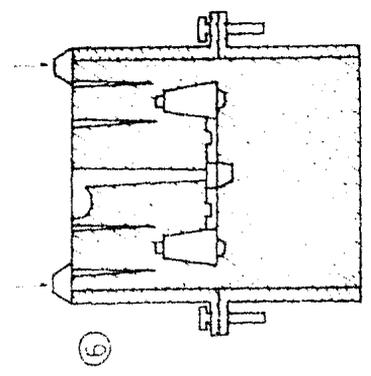
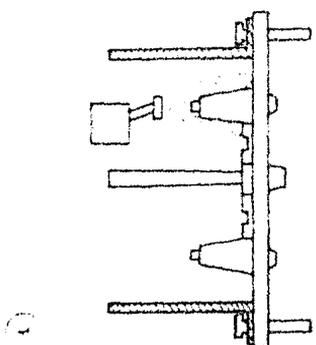
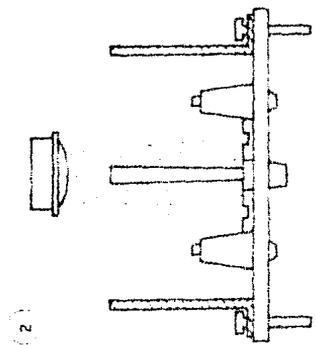
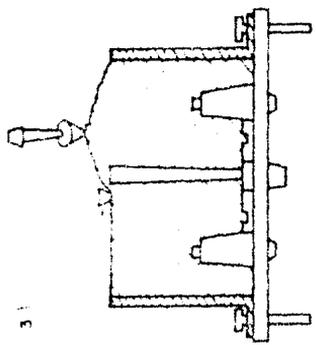


FIG. 1-6

III.4 Preparación de las aleaciones eutécticas.

Para el desarrollo de los experimentos se llevó a cabo la preparación de una aleación de composición eutéctica de la siguiente manera:

Calculo de la carga:

Composición deseada: 88.3% Al + 11.7% Si

Material disponible: Aluminio comercial y aleación Al-Si al 50%

haciendo calculos a partir de 500 grs. de aleación Al-Si al 50% las cantidades involucradas quedan como sigue:

Tabla No. 3

Material	Cantidad gr	Componentes	
		Al(gr)	Si(gr)
Aleación Al-Si al 50%	500	250	250
Aluminio comercial	1637	1637	-
Producto deseado aleac. eutéctica.	2137	1887	250

En donde 1887 grs. de aluminio significan el 88.3% del total por lo que con 500grs. de aleación Al-Si al 50% y 1637 grs. de aluminio comercial se obtiene la aleación requerida.

La fusión se realizó en un crisol de grafito dentro de un horno de inducción al aire en el cual la carga se llevó hasta una temperatura de 1150°C para asegurar que la fusión se llevara a cabo completamente, pues la aleación Al-Si al 50% funde a una temperatura aproximada de 1050°C , de manera que toda la carga se mezcló perfectamente formando el eutéctico. Una vez fundida la aleación esta se coló en una lingotera de acero para su posterior solidificación.

Para verificar la composición química se realizaron análisis de los materiales utilizados después de las ccladas obteniéndose los siguientes resultados:

<u>Tabla No. 4</u> Análisis químicos.		Si (esperado)	Si (exp.)
Aleación hipoeutectica	Muestra 1	7.00	7.31
	Muestra 2	7.00	7.30
Aleación eutectica	Muestra 1	11.70	12.07
	Muestra 2	11.70	12.89

Se observa que los resultados son más altos que los valores esperados pero aunque para la aleación eutectica el contenido de silicio es 0.73% más alto en promedio, se considera aceptable pues algunos diagramas de fase⁽¹⁰⁾ indican el eutectico en 12.6% de silicio.

III.5 Determinación de las condiciones experimentales.

(selección de variables)

III.5.1 Alimentación.

Dada la alta contracción de las aleaciones de aluminio (4 a 6%) es necesario, en la mayoría de los casos, colocar alimentadores para compensar las contracciones. El tamaño y el volumen de los alimentadores deben ser tales que cumplan con los siguientes requerimientos:

- El alimentador debe solidificar después que la parte de la moldura a la cual alimenta.
- Las dimensiones del alimentador deben ser suficientes para compensar las contracciones.
- La altura del alimentador debe ser tal, que la contracción

d) La unión alimentador-moldura debe ser lo más corta posible.

III.5.2 Temperatura.

a) Temperatura de sobrecalentamiento. Es la temperatura a la cual se lleva la fusión para poder llevar a cabo las operaciones de desgasificación y escorificación en el baño líquido. Se recomienda, cuando la aleación Al-Si lo permita, no llevar el baño metálico más allá de 700°C , pues la solubilidad del hidrógeno aumenta rápidamente con la temperatura — después de los 700°C según la gráfica II.14.

b) Temperatura de colada. Es la temperatura en la cual el metal líquido es vertido en el tazón de colada para llenar el molde, esta temperatura debe ser adecuada para evitar que el metal líquido solidifique antes de llenar el molde completamente. Aquí se recomienda usar 100°C arriba de la temperatura de fusión para asegurar una buena fluidez de las aleaciones Al-Si (fig. II.20). En el caso de temperaturas bajas de colada se corre el riesgo, independientemente de no llenar el molde completamente, de que al tener alimentadores el cuello de unión moldura-alimentador solidifique antes de tiempo inutilizando al alimentador.

III.5.3 Desgasificación.

Operación llevada a cabo a causa de la fácil solubilidad del hidrógeno en el aluminio. La operación de desgasificación se lleva a cabo por el uso de tabletas de hexacloroetano o por el uso de nitrógeno gaseoso burbujeado a través del baño metálico.

El uso de nitrógeno debe realizarse teniendo en cuenta que puede estar húmedo y dado que el vapor de agua reacciona con el alu-

minio para producir hidrógeno que se solubiliza en el baño metálico, el uso de este elemento debe hacerse después de eliminar la humedad por el uso de compuestos desecantes.

El hexacloroetano no tiene problemas de humedad ya que este compuesto no es higroscópico y por lo tanto no existe el peligro de que pueda introducir agua al baño metálico.

III.5.4 Relación de colada.

Es la proporción que guarda el o los corredores y las secciones de ataque con respecto a la parte inferior del vertedero en cuanto a las áreas transversales. Las relaciones de colada que se recomiendan para fundiciones de aluminio y sus aleaciones son 1:2:4, 1:3:6 y 1:4:4 (para vertedero-corredor y sección de ataque respectivamente) que son relaciones que se manejan como variables para alimentar a través de las áreas transversales, metal líquido a las molduras de manera que se disminuya la velocidad de entrada a la moldura del metal líquido para obtener un flujo más suave de metal.

III.5.5 Composición química.

En la experimentación se utilizó composición hipoeutectica y eutectica de 7 y 11.7% de silicio respectivamente.

III.5.6 Fundentes (escorificantes).

La utilización de fundentes tiene dos propósitos: 1) purificar la aleación extrayendo las inclusiones de óxidos y 2) proteger al baño metálico de la atmosfera circundante.

III.6 Desarrollo del experimento.

La obtención del molde de arena a partir del cual se realiza-

ron los experimentos se hizo por el método de moldeo a mano tal como se describió en la sección III.3.

Una vez terminado el molde y antes de armarlo se procedió a disminuir la humedad de las paredes del molde mediante un soplete de manera que se produjera la menor cantidad posible de vapor de agua en el interior del molde y en consecuencia disminuir la formación de hidrógeno.

Cuando el molde hubo sido ensamblado se procedió a la fusión de la aleación eutectica o hipoeutectica según el caso, utilizando un horno eléctrico de resistencias. La fusión se llevo a cabo en un crisol de grafito pintado con arcilla refractaria.

Una vez fundida la aleación en cada caso particular se controla la temperatura para dar al baño líquido un sobrecalentamiento adecuado según el tipo de aleación utilizada.

El control de temperatura se efectúa utilizando un termopar - cromel-alumel además de un medidor de temperatura de tipo digital. Previo a la colada se desgasifica o no según sea el caso e inmediatamente después se descorifica procediendo enseguida a colar el metal líquido.

Las temperaturas de colada para cada aleación fueron:

Aleación eutectica	675°C
Aleación hipoeutectica	705°C

Una vez lista la aleación para colarse, si hubo formación de una capa de óxido en la superficie del líquido se elimina y se vierte rápidamente el metal líquido en el tazón de colada teniendo cuidado de que el suministro de metal líquido sea uniforme, - manteniendo el vertedero vertical siempre lleno a fin de evitar vórtices y en consecuencia la aspiración de gases.

Una vez que solidifica la pieza, se desmoldea y se observan

los defectos externos y posteriormente se corta la pieza para observar los defectos internos.

III.7 Análisis químicos.

Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio de absorción atómica del Instituto de Investigación en materiales de la U.N.A.M. con el fin de corroborar que se estaba trabajando con la composición adecuada. Los resultados son mostrados en la sección III.4 así como un breve análisis de los mismos.

III.8 Metalografía.

En la selección de muestras para su preparación metalográfica se siguieron los siguientes criterios de comparación:

- a) Ausencia y presencia de alimentadores.
- b) Muestras sin desgasificar, con desgasificación con C_2Cl_6 y muestras desgasificadas con nitrógeno.
- c) Variación de la distancia entre la moldura y el alimentador
- d) Variación de la relación de colada.
- e) Variación de la composición química.

La operación de pulido se llave a cabo en la forma usual y consistió en las siguientes operaciones: corte, desbaste, pulido sobre papel de lija de grados 240, 360, 400 y 600, efectuándose el pulido final sobre lona y posteriormente sobre paño usando como abrasivo alumina de 0.3 y 0.05 μ . El reactivo de ataque fue una solución de HF al 0.5% durante un intervalo de 5 seg. aproximadamente.

III.9 Descripción de resultados.

III.9.1 Experimentos experimentales.

Para llevar a cabo los primeros experimentos se utilizó el modelo A (fig. III.1), a partir del cual se obtuvieron piezas coladas que presentaban rechupes en su parte media. Estos rechupes surgieron posiblemente debido a la contracción de la aleación al solidificar y que se hizo evidente por la falta de llenado de las molduras. Lo anterior produjo una modificación del sistema, al agregar un par de alimentadores, colocados cada uno en la unión corredor-ataques, desarrollandose así el modelo B, fig. III.3.

Las piezas obtenidas al colar el modelo B, produjeron cilindros sin contracciones externas visibles, dimensionalmente efectivas y de buen acabado superficial. Varias muestras fueron cortadas longitudinalmente a la mitad y se pusieron para observar posibles defectos interiores, notandose la aparición de porosidad interna, lo cual puede ser motivado por dos causas a saber:

- a) Por disolución de gases, b) Por contracción.



Fig. III.10 Modelo A, molduras con contracción.

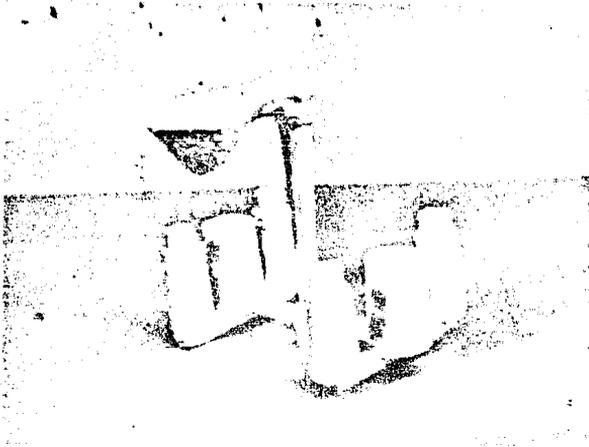


Fig. III.11. Modelo B, molduras sin rechupe.

III.9.2 Eliminación de las causas de porosidad.

Tomando en cuenta el posible origen de la porosidad por la disolución de gases, se plantearon soluciones varias que consistieron de lo siguiente: realización de coladas sin desgasificar el metal líquido, la cual serviría como estándar o blanco y a su vez llevar a cabo varios experimentos de colada en los cuales se desgasificaría el metal líquido en una instancia con hexacloroetano y en otra con burbujeo mediante nitrógeno. De lo anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) Las molduras sin desgasificar presentaron porosidad concentrada en la parte central de la pieza, los poros observados son grandes.

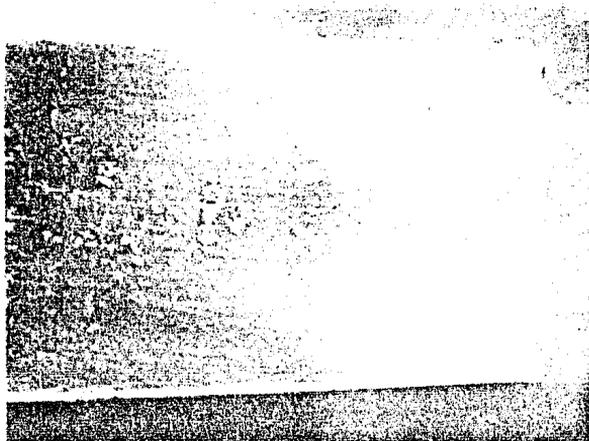


Fig. III.12. Muestra sin desgasificar.

- b) En las molduras desgasificadas con hexacloroetano se nota una leve reducción de la porosidad, aunque esta se encuentra más homogéneamente distribuida en todo el cuerpo del cilindro (fig. III.13).

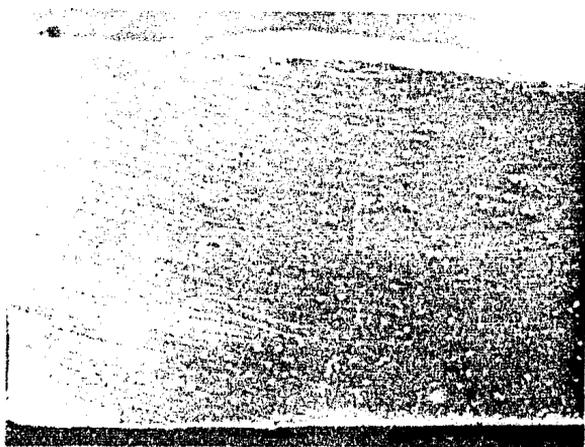


Fig. III.13. Muestra desgasificada con hexacloroetano.

- c) En las piezas coladas y desgasificadas con nitrógeno se observaron poros distribuidos en toda la pieza, en mayor proporción que en el caso del uso del hexacloroetano (fig. III. 14)

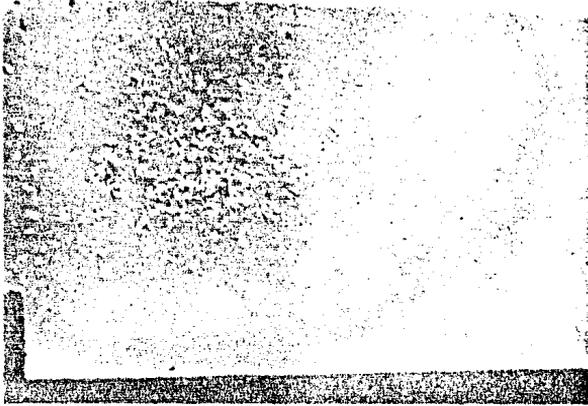


Fig. III.14. Muestra desgasificada con nitrógeno.

III.9.1 Observaciones sobre la desgasificación con hexacloroetano y nitrógeno.

La razón por la cual las molduras desgasificadas con nitrógeno presentaron esa dispersión de porosidad en el cuerpo de la pieza colada posiblemente se pueda atribuir a dos razones: a) a la pequeña cantidad de metal líquido usado y b) a la presión de salida del nitrógeno al momento del burbujeo en el metal líquido; la combinación de ambos factores provocaba que parte del baño metálico salpicara fuera del recipiente, por lo que por un lado se perdía metal y por el otro se exponía la superficie líquida metálica al aire, provocando cierta disolución de hidrógeno.

La degasificación con hexacloroetano fue llevada a cabo más fácilmente, por lo que se eligió esta técnica para los experimentos sucesivos, ya que usualmente se encuentra en forma de pastillas sólidas que se gasifican en el seno del líquido metálico.

III.9.4 Búsqueda de variables causantes de porosidad.

Una vez que se observó que las molduras aun después de ser degasificadas, mostraban cierto grado de porosidad, se intentó controlar otras posibles variables que pudieran incorporar gases al baño líquido. Estas variables fueron las siguientes:

- a) Control estricto del porcentaje de humedad de la arena manteniéndola en 4% y mediante el secado ligero del interior del molde antes de la colada.
- b) Eliminación de la humedad del escorificante.
- c) Calentamiento de la campana degasificadora y secado del revestimiento superficial de óxido de aluminio de la misma, antes de su inmersión en el metal líquido.

A pesar de que se siguió este procedimiento, no dejaron de manifestarse los poros en las piezas, por lo que se enfocó su origen a otra fuente diferente a los gases.

III.9.5 El sistema de alimentación como fuente de porosidad.

Como una variación en el análisis y en base a lo observado en las piezas obtenidas, se podría asociar el origen de la porosidad al fenómeno de la contracción durante la solidificación, la cual se manifiesta cuando no existe una buena alimentación de las partes que forman la pieza colada, por un deficiente diseño del sistema de colada o alimentación. Tomando lo anterior en consideración se procedió a modificar el sistema de colada en los siguientes parámetros:

- a) Disminuyendo la longitud de las secciones de ataque.

b) Cambiando la relación de colada de 1:2:4 a 1:3:6.

Con la disminución de la longitud de las secciones de ataque, modelo B, las molduras siguieron apareciendo con porosidad aunque en menor proporción relativa a la estandar. Este defecto se concentro en la parte inferior de la moldura, en tanto que el resto de la misma se mostraba libre de porosidad.

Con el cambio de relación de colada de 1:2:4 a 1:3:6, la porosidad disminuyó ligeramente. Se notó que a medida que se pasaba de una temperatura de colada de 700°C a 750°C aumentaba la porosidad en forma manifiesta.

III.9.6 La composición química como origen de la porosidad.

Los experimentos iniciales se llevaron a cabo con una aleación de composición química eutéctica. En vista de que era difícil discernir el origen de la porosidad, detectada en piezas coladas de composición eutéctica, se procedió a seleccionar una aleación diferente en cuanto a composición para ver su efecto sobre la formación de poros. La selección se hizo sobre una aleación hipoeutéctica al 7% de silicio.

Con este cambio de composición se busca tener un intervalo de temperatura adecuado, en los cuales se lleva a cabo la solidificación de tal forma que la aleación líquida se conserve así el mayor tiempo posible, para que los espacios originados por la contracción líquido-sólido se llenen con el líquido remanente.

Como resultado del cambio a una aleación de composición hipoeutéctica (7% Si), se obtuvieron moladuras sanas, tanto en el caso de no haber sido degasificadas en donde las molduras aparecen -- con una ligera manifestación de porosidad, como al haber usado hexa cloroetano en donde las molduras aparecen limpias de poros. Es me

nester hacer notar como parte del análisis, la diferencia entre estas últimas piezas y aquellas obtenidas usando aleaciones eutécticas en las cuales se observan zonas de porosidad homogénea (desgasificadas) y heterogéneamente (no tratadas) distribuidas.

Lo precedente resalta la importancia de la composición en la secuencia que sigue el proceso de solidificación, una vez que el metal líquido ha llenado la cavidad interna del molde.

III.9.7 El gradiente de temperatura como solución al problema de la porosidad.

Considerando que las molduras usadas son muy pequeñas, tanto en volumen como en peso, es muy difícil pensar en el establecimiento de un gradiente térmico inducido por el diseño del sistema de alimentación. A lo anterior hay que agregar que la aleación de composición eutéctica tiene una temperatura de solidificación única, y que una vez iniciada la solidificación, el paso del líquido al sólido se lleva a cabo en forma de capas, lo cual hace un poco más difícil una solidificación direccional tal que, no permita la aparición de rechupes, porosidades y otro tipo de defectos.

Para solucionar este problema se pensó en usar un dispositivo que permitiera establecer un gradiente térmico que hiciera lugar a una solidificación direccional adecuada de la pieza. Con este objetivo, se procedió a colocar un enfriador en la parte superior de la moldura para inducir forzosamente la extracción de calor.

Mediante este arreglo se obtuvo una soldura sana libre de porosidad (fig. III.15). La diferencia se aprecia cuando se analiza la porosidad que aparecía en molduras en donde no se uso el enfriador (fig. III.16).

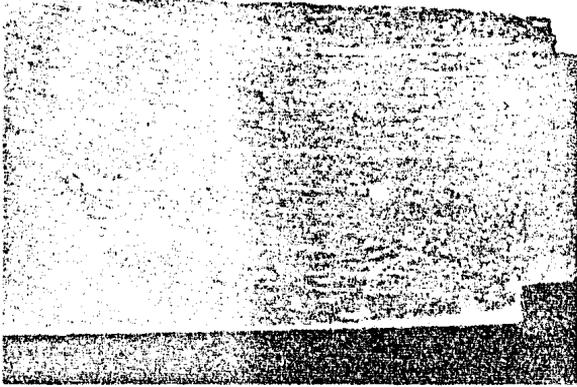


Fig. III.15. Moldura de aleación eutectica con porosidad.

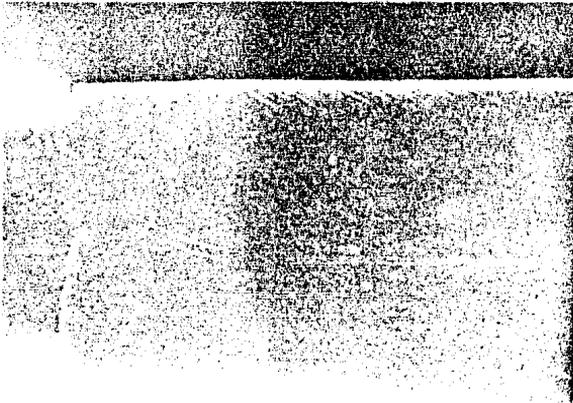


Fig. III.16. Moldura de aleación eutectica sin porosidad.

Para optimizar el uso de metal se reacomodaron las piezas y los alimentadores en forma horizontal y de menor tamaño en forma respectiva (fig. III.7). Un segundo prototipo incluye tres piezas horizontales conectadas a un alimentador. Los resultados fueron positivos no hallándose ningún tipo de contracción, ni tampoco porosidad en las molduras coladas.

La eficiencia de molduras obtenidas a metal utilizado fue de 31% para el modelo B en tanto que para el modelo D la eficiencia aumento a cerca de 34% con las molduras en posición horizontal y una disminución en el tamaño de los alimentadores y para el modelo E con las molduras en posición horizontal y con seis piezas a obtener, la eficiencia es de 43% creciendo en mas de 10% con respecto al modelo anterior.

III.10 Discusión global.

De la descripción de resultados se desprende que existen dentro de los procesos de colada para la obtención de piezas sans-factores metalúrgicos de diversos orígenes que tienen que ver en la formación de defectos de las piezas obtenidas.

Se pueden mencionar varios factores en conexión con el presente trabajo:

- a) Origen de la materia prima
 - Composición química
 - Preparación de la aleación maestra
- b) Horno de fusión usado
 - De inducción eléctrica abierto al aire
 - De resistencias eléctricas
- c) Temperaturas procesadas
 - De sobrecalentamiento
 - De refinación
 - De colada
- d) Disolución de gas
 - Hidrógeno
- e) Procesos de degasado
 - Burbujeador con nitrógeno
 - Pastillas de hexocloroetano
- f) Tipo de material de moldeo usado
 - Arena (bentonita, arena sílice, agua)
- g) Diseño del sistema de colada.
 - Razón de colada, copa de colada, pezo, corredores, secciones de ataque.
 - Relación de colada
 - Tipo de alimentadores
 - Distribución de las piezas a obtener

h) Accesorios de los sistemas de colada

- . Enfriadores.

i) Métodos de análisis de piezas obtenidas

- . Macroestructurales
- . Microestructurales

El objetivo del presente trabajo ha sido el de obtener piezas coladas en forma de cilindros con reducción de área transversal - en la parte superior, sin ningún tipo de defectos, que en este caso los más evidentes fueron preponderantemente la contracción y - la aparición de porosidad en las piezas obtenidas.

El fenómeno de la contracción en algunas de las piezas obtenidas se manifestó debido a carencias en el diseño del sistema de colada inicial, que sufrió mejoras. Una vez que se adicionaron 2 alimentadores en lugares estratégicos se permitió un llenado adecuado de las piezas durante la contracción final, eliminándose así este defecto. En esta etapa de la experimentación se usó una aleación eutéctica preparada en el laboratorio, usando para su manufactura partes proporcionales de una aleación comercial Al-Si - al 50% y con aluminio comercial. Se utilizó un horno de inducción al aire para la preparación de la aleación maestra y un horno de resistencias para la fusión antes de la colada. Para su elección se tomaron en cuenta sus propiedades de fluidez que son menores - en el punto eutéctico aunque para otras aleaciones sea el óptimo.

El hecho de que se eliminara la contracción como defecto en los cilindros no eliminó de tajo la presencia de porosidad, por lo que todos los esfuerzos se encaminaron para su eliminación.

Se pensó en varios factores que pudieron contribuir a su aparición, entre los que destacaban la disolución de hidrógeno en el metal líquido, por lo que se practicaron dos métodos de remoción de gas hidrógeno asequibles en el laboratorio; como son el burbujeo

por nitrógeno y el uso de pastillas de hexafluoracetano. Se encontraron inconvenientes con el primero por varias razones, una de las cuales fue la pequeña cantidad de metal líquido usado que provocó durante el burbujeo el salpiqueo de metal y una fuerte agitación - lo cual hizo que en lugar de actuar como degasante provocaba una mayor disolución de gas, tal como se evidenció durante el análisis metalográfico de las piezas.

El hexafluoracetano a diferencia del nitrógeno se consigue en forma de pastillas, las cuales se sumergen en el baño líquido provocando su gasificación, limpiando el baño líquido por medio de las burbujas resultantes. Se noto un cambio en la cantidad de porosidad, más no la eliminó completamente.

Con la permanencia de la porosidad en las piezas se pensó en otras causas, tales como la humedad de la arena de moldeo, humedad del escoriificante y secado total de la campana degasificadora. Aunque se ejerció un control estricto de tales parametros, los patrones de porosidad no cambiaron, por lo que aun estaba latente el origen del problema.

En vista de tales resultados, se atacó el sistema de alimentación como posible causa de la porosidad. En consecuencia se cambiaron la longitud de las secciones de ataque, así como la relación de colada (1:2:4 a 1:3:6) sin que esto alterara mayormente la porosidad resultante.

Aun con el problema sin resolver, se enfocó su origen a otra fuente: a la forma de solidificación de la aleación tomando en consideración su composición química. Se sabe que la aleación eutectica de aluminio-silicio pertenece a la clasificación de aleación de corto rango de solidificación, porque tienen un solo punto de solidificación, aparte de que solidifica en forma de placas, lo que --

complica la alimentación de las últimas secciones por solidificar de la pieza. Este fenómeno se ve acentuado por el reducido tamaño de las piezas comparado con los tamaños comerciales.

De ahí que se eligiera una aleación que presentara características diferentes, como un rango amplio de solidificación, lo cual indica que hay permanencia de líquido a lo largo del proceso de solidificación y así, poder alimentar adecuadamente los últimos relictos de los canales dendríticos en la fundición. La aleación que se seleccionó fue la de Al-Si 7/3 y que llenaba las características anteriores. Las piezas obtenidas usando esta última aleación dieron buenos resultados. Aquellas fundiciones obtenidas sin desgasificar de aleación hipoeutéctica, presentan porosidad difícilmente perceptible a simple vista. En cambio aquellas en las cuales se practicó la desgasificación mostraron cero de porosidad, con lo cual finalmente se logró el control de los factores que la originaron.

Lo anterior dio pauta a pensar que también se podría lograr el obtener piezas sanas usando la aleación eutéctica a pesar de todos los inconvenientes previamente observados.

Esto se logró mediante el establecimiento de un gradiente térmico, al usar un enfriador en la parte superior de la pieza que provoca una solidificación direccional inducida. Utilizando este procedimiento se logró la obtención de piezas sanas. Se debe mencionar que el baño líquido previo a la colada fue tratado con hexacloroetano para su desgasificación.

Una vez que se controlaron tanto la porosidad como la contracción en las piezas coladas se pensó en alternativas para obtener el mayor número de piezas usando el mínimo de metal. Esto dio como resultado un diseño de colada re-estructurado en el cual las piezas se situaron en posición horizontal y los alimentadores disminuyeron de tamaño.

Como una segunda alternativa se agregaron dos piezas cilíndricas más, de tal forma que correspondieran 3 piezas asociadas a cada alimentador con un total de seis piezas a colar. Este modelo al igual que el anterior dio muy buenos resultados, ya que se eliminaron todos los defectos observados inicialmente en las primeras piezas coladas.

Debe hacerse notar que existen un buen número de métodos para detectar defectos en piezas metálicas, tal y como se hizo mención en el primer capítulo. El que no se utilizaran en este trabajo no implica que no se les haya dado importancia, sino más bien no se contaba con el equipo de apoyo en el laboratorio.

Tomando en consideración el procedimiento seguido en este trabajo se ha mostrado una manera de atacar problemas típicos en la fundición usando conceptos e ideas metalúrgicas, compaginándolo con el proceso de prueba y error que sirven de base en el planteamiento de soluciones a problemas existentes no únicamente en el área de la fundición, sino en el amplio campo de la metalurgia.

IV Conclusiones.

Se puede decir que las conclusiones más importantes a las cuales se llegaron en el desarrollo de este trabajo fueron las siguientes:

- 1.- Para el diseño efectivo de un sistema de colada se requiere lo siguiente:
 - a) Tomar en cuenta cada uno de los elementos que contribuyen a una buena alimentación de la moldura, por simple que sea (tazón de colada, copa de colada, vertedero, corredores, secciones de ataque).
 - b) Uso adecuado de accesorios al sistema de colada (enfriadores, vientos, etc.).
 - c) Cambio en la relación de colada (vertedero-corredor-sección de ataque) cuando así lo indiquen los resultados.
- 2.- Se debe ejercer un control minucioso de la preparación de la arena de moldeo para garantizar una buena compactación, un óptimo de humedad y de esta manera garantizar una buena interacción metal líquido-molde.
- 3.- Usar aleaciones de composición química adecuada que permita que a medida que pasa del estado líquido al sólido, llenar todos los espacios creados por la contracción del metal durante la solidificación.
- 4.- Evitar sobrecalentar en exceso el metal líquido para así disminuir el potencial de disolución de hidrógeno en el baño metálico, que da origen a la porosidad.
- 5.- Usar el método de degasado más adecuado, dependiendo de las facilidades en la fundición y de la cantidad de metal a tratar además de la interacción baño metálico-degasificador.
- 6.- Diseñar un sistema de alimentación de tal forma que se esta-

blesca un gradiente de temperatura, desde la parte más alejada de la moldura hacia los alimentadores.

- 7.- Mediante un buen diseño del sistema de colada se puede lograr una optimización del uso de metal, tal que se origine menos desperdicio.
- 8.- Es aconsejable utilizar el mayor número de métodos de detección de defectos que permitan no únicamente un análisis cualitativo (visual, metalográfico, partículas magnéticas, etc.) sino también cuantitativo como sería el de rayos x, el de ultrasonido, etc..

Bibliografía

- (1) AFS, Recommended practices for sand casting aluminium and magnesium alloys, American Foundryman's society 1975.
- (2) Beeley, P.R., Foundry technology. Butterworth scientific, London, 1980.
- (3) Kura, John G., Foundry facts, American foundryman, 27, 123, 1955
- (4) Titov, Stepanov, Tecnología del proceso de fundición, Mir Moscú, 1981
- (5) Wlodawer, Robert, Directional solidification of steel casting, 1966
- (6) Verhoeven, Fundamentals of physical metallurgy, John Wiley & Sons, N.Y. 1975.
- (7) Avner Sydney H., Introducción a la metalurgia física, Mc Graw Hill, N.Y. 1983.
- (8) D. Altenpohl, Aluminium viewed from within, Aluminium-verlag Düsseldorf Germany, 1982.
- (9) Heine, Loper & Rosenthal, Principles of metal casting, McGraw-Hill, N.Y. 1975.
- (10) Metals Handbook, vol.8, American society for metals, Metals Park, Ohio, 1973.
- (11) Bernal Lima, Luis, Alimentación de piezas de acero con medios auxiliares, Sociedad Mexicana de Fundidores.