



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DISEÑO DE SISTEMAS DE ALIMENTACION PARA PIEZAS
COLADAS DE COMPOSITOS Al-Si-SiCp.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

EDUARDO TREJO ESCALONA



MEXICO, D.F.

**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA**

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta 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.

DE LA BIBLIOTECA


Jurado Asignado:

Presidente Prof. : Bernardo Fabián Campillo Illanes
Vocal Prof. : José Alejandro García Hinojosa
Secretario Prof. : Arturo Alejandro Sánchez Santiago
1^{er}. Suplente Prof. : Adrián Manuel Amaro Villeda
2^{do}. Suplente Prof. : Jorge Sergio Téllez Martínez

Sitio en donde se desarrolló el tema:

Facultad de Química, UNAM, Edificio "D", Departamento de Metalurgia

Asesor : 
M. en C. José Alejandro García Hinojosa

Supervisor Técnico : 
I.Q.M. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

Sustentante : 
Eduardo Trejo Escalona

Agradecimientos:

A mis padres y hermanas: Fernando, Rosa María, Ofelia y Ana Fernanda, por todo el apoyo incondicional que me han brindado y por permitirme alcanzar esta meta. Gracias por creer en mí.

A mi tío: Chucho, por brindarme su ayuda en los momentos en que la necesitaba.

A mi asesor: Alejandro García, por la oportunidad de trabajar bajo su dirección y por todo el tiempo dedicado a mi desarrollo y superación.

A mis amigos: Lalo, Edith, Alejandra, Salomón, Dulce, Cuauhtémoc, Ángel, Diana. A todos aquellos que por memoria o espacio no los menciono muchas gracias por brindarme su amistad.

A todos ustedes, muchas gracias.

Eduardo.

Se agradece al proyecto DGAPA-PAPIIT IN102902-3 y IN105804

por el apoyo otorgado para realizar esta tesis.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Eduardo Trejo Escalona

FECHA: 27-Sep-04

FIRMA: 

INDICE

| | |
|---|----|
| Prologo ----- | 1 |
| Introducción ----- | 2 |
| Capítulo 1. Fundamento Teórico. | |
| 1.1 Contracción y Porosidad ----- | 4 |
| 1.2 Alimentador ó Sistema de Alimentación ----- | 10 |
| 1.3 Formas, Tipos y Clasificación de alimentadores ----- | 11 |
| 1.4 Efecto del rango de solidificación sobre las condiciones de alimentación de una pieza colada ----- | 17 |
| 1.5 Condiciones para la Alimentación ----- | 23 |
| 1.5.1 Reglas de Alimentación (según Campbell) ----- | 23 |
| 1.5.1.1 Requerimientos de Transferencia de Calor ----- | 24 |
| a) Materiales Aislantes y Exotérmicos ----- | 26 |
| 1.5.1.2 Requerimientos de Transferencia de Masa ----- | 27 |
| 1.5.1.3 Requerimientos de la Vía de Alimentación ----- | 29 |
| a) Solidificación Direccional hacia el Alimentador ----- | 29 |
| b) Distancia de Alimentación ----- | 30 |
| 1.6 Métodos de Cálculo de Alimentadores ----- | 34 |
| a) Método del Módulo de Solidificación ----- | 35 |
| b) Método del Factor de Forma ----- | 38 |
| c) Método de CTIF ----- | 40 |
| 1.7 Parámetros más importantes para el diseño de alimentadores ----- | 44 |
| Capítulo 2. Diseño Experimental. | |
| 2.1 Modelos Utilizados ----- | 45 |
| a) Modelo para determinar el % Contracción ----- | 45 |
| b) Modelo para determinar la Distancia de Alimentación ----- | 47 |
| 2.2 Variables y niveles ----- | 50 |

| | |
|--|----|
| a) % Contracción ----- | 50 |
| b) Distancia de Alimentación ----- | 51 |
| 2.3 Material y Equipo ----- | 52 |
| 2.4 Procedimiento ----- | 55 |
| 2.5 Evaluación de las Piezas Fabricadas ----- | 56 |
| Capítulo 3. Resultados y Discusión. | |
| 3.1 Resultados obtenidos en la fase experimental ----- | 62 |
| 3.2 Discusión de Resultados ----- | 76 |
| Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones. | |
| 4.1 Conclusiones ----- | 82 |
| 4.2 Recomendaciones ----- | 83 |
| Anexo 1. ----- | 84 |
| Anexo 2. ----- | 86 |
| Glosario ----- | 89 |
| Bibliografía ----- | 90 |

Prologo

El presente trabajo tiene por objetivo conocer dos de las variables fundamentales para el cálculo de alimentadores en compositos colados reforzados con partículas de SiC, donde la aleación matriz es Al-7%Si. Dichas variables son “% Contracción” y “Distancia de Alimentación”, las cuales tienen valores característicos dependiendo de el porcentaje de SiC contenido en la matriz.

Para la evaluación del % Contracción, se llevó a cabo la “Prueba Tatur”, la cual consiste de vaciar el metal líquido dentro de un molde metálico en forma de cono truncado; posteriormente se evalúa el volumen del rechupe, el cual se forma dentro de la pieza, para finalmente calcular el % Contracción. Las variables que se manejan en el desarrollo experimental, son el % de SiC y la Temperatura de Colada.

Para el caso de la “Distancia de Alimentación” se utilizó una placa modelo, la cual sirvió como patrón al momento de realizar los moldes de arena en verde. Así mismo se vació el metal líquido dentro de la cavidad y finalmente se evaluó la distancia efectiva de alimentación. La variable que se maneja en el desarrollo experimental es el % de SiC.

Finalmente, debido a que no existen datos reportados para compositos de matriz de Al, se compararon los resultados obtenidos con los reportados en la bibliografía para una aleación Al-7%Si.

Introducción.

Los compositos de matriz de aluminio (AMCs)

El Aluminio es la matriz más popular para los compositos de matriz metálica (MMCs). Las aleaciones de Al son bastante atractivas debido a su baja densidad, su capacidad para ser reforzadas por precipitación, su buena resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, y su alta capacidad de amortiguamiento. Los compositos de matriz de aluminio (AMCs) han sido ampliamente estudiados en los últimos años y son usados en artículos para el deporte, embalaje de electrónicos, en la industria automotriz, en la industria aeronáutica, etc. Dichos compositos ofrecen una gran variedad de propiedades mecánicas dependiendo de la composición química de la matriz de Al. Las matrices son usualmente reforzadas por Al_2O_3 , SiC, C, etc., aunque en el presente trabajo se estudiara para el caso de SiC.

El Diseño de alimentadores.

El diseño de un alimentador o sistema de alimentación es de fundamental importancia en la producción de piezas sanas o libres de rechupe. El tamaño y forma de cada alimentador debe satisfacer dos requerimientos. Primeramente, el alimentador debe solidificar suficientemente lento para asegurar que el metal líquido estará disponible a través de la solidificación de la sección a ser alimentada, permitiendo solidificación direccional desde la pieza hasta el alimentador. Es segundo lugar, el alimentador debe ser capaz de suministrar el suficiente volumen de metal líquido para compensar la contracción volumétrica de la pieza al solidificar.

Sin embargo un objetivo adicional es minimizar el consumo de metal utilizado en el alimentador, para con ello producir piezas a un mínimo costo. Por lo tanto el correcto diseño de alimentadores forma parte de la columna vertebral en la producción de piezas coladas.

Objetivo

Los objetivos del presente trabajo se definen en forma precisa, en los siguientes dos incisos:

- 1) Determinar el efecto del % SiC y la Temperatura de colada sobre el % Contracción en un compósito colado de matriz Al-7%Si.
- 2) Determinar el efecto del % SiC sobre la distancia de alimentación en un compósito colado de matriz Al-7%Si.

Justificación del presente trabajo.

La justificación de llevar a cabo el presente trabajo se resume en los siguientes puntos:

- El diseño de sistemas de alimentación tiene una gran importancia en la obtención de piezas libres de rechupes fabricadas por fundición.
- El correcto diseño de estos sistemas, evita la presencia de defectos, lo que asegura la calidad de las piezas fundidas.
- Es importante minimizar el consumo de metal para alcanzar un alto rendimiento y mínimo costo del proceso.
- Debido a que no existen datos reportados en la bibliografía sobre “% Contracción” y “Distancias de Alimentación”, para composites de matriz de Al-Si, estos sistemas se establecen de manera empírica, lo cual conduce a procesos de producción altamente costosos.
- El constante avance de la tecnología y nuevos materiales, requiere del estudio de nuevas técnicas de producción, así mismo es necesario conocer el comportamiento de estos materiales, con el objetivo de hacer más eficientes dichos procesos.

Capítulo 1. Fundamento Teórico.

1.1 Contracción y Porosidad.

Contracción

Es la propiedad de los metales y aleaciones de reducir su volumen durante la solidificación desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente.

Dicha contracción o cambios de volumen se pueden dividir en tres etapas:

- a) **Contracción en el estado líquido.**
- b) **Contracción durante la solidificación.**
- c) **Contracción en el estado sólido.**

a) **Contracción en el estado líquido:** Se lleva a cabo, desde la temperatura de colada hasta la temperatura de líquidus (inicio de la solidificación); el volumen del metal líquido se reduce casi linealmente con la caída de temperatura.

b) **Contracción durante la solidificación:** Se lleva a cabo cuando el metal pasa del estado líquido al estado sólido. Es decir entre el inicio y final de la solidificación; esta contracción se debe a que en general la densidad del sólido es más grande que la del líquido ($\rho_S > \rho_L$).

La contracción del líquido en el enfriamiento se debe a un rearrreglo de átomos, desde uno con empaquetamiento aleatorio a un arreglo cristalino regular de empaquetamiento significativamente más denso. En las Tablas 1 y 2 se presentan algunos valores de contracción asociados con la solidificación:

Capítulo I. Fundamento Teórico

| Metal | Estructura Cristalina | Punto de Fusión (°C) | Densidad del Líquido (Kg/m ³) | Densidad del Sólido (Kg/m ³) | Cambio de Volumen (%) |
|-------|-----------------------|----------------------|---|--|-----------------------|
| Al | fcc | 660 | 2368 | 2550 | 7.14 |
| Au | fcc | 1063 | 17380 | 18280 | 5.47 |
| Co | fcc | 1495 | 7750 | 8180 | 5.26 |
| Cu | fcc | 1083 | 7938 | 8382 | 5.30 |
| Ni | fcc | 1453 | 7790 | 8210 | 5.11 |
| Pb | fcc | 327 | 10665 | 11020 | 3.22 |
| Fe | bcc | 1536 | 7035 | 7265 | 3.16 |
| Li | bcc | 181 | 528 | - | 2.74 |
| Na | bcc | 97 | 927 | - | 2.6 |
| K | bcc | 64 | 827 | - | 2.54 |
| Rb | bcc | 39 | 1437 | - | 2.3 |
| Cs | bcc | 29 | 1854 | - | 2.6 |
| Tl | bcc | 303 | 11200 | - | 2.2 |
| Cd | hcp | 321 | 7998 | - | 4.00 |
| Mg | hcp | 651 | 1590 | 1655 | 4.10 |

Tabla 1. Contracción del volumen de metales en la solidificación (Ref. 1).

| Aleación de Al | % Contracción |
|----------------|---------------|
| Al puro | 8.0 |
| Al-4Cu-2Ni-Mg | 5.3 |
| Al -12Si | 3.5 |
| Al-5Si-2Cu-Mg | 4.2 |
| Al-9Si-Mg | 3.4 |
| Al-5Si-1Cu | 4.9 |
| Al-5Si-2Cu | 5.2 |
| Al-4Cu | 8.8 |
| Al-10Si | 5.0 |
| Al-7Si-Ni-Mg | 4.5 |
| Al-5Mg-Si | 6.7 |
| Al-7Si-2Cu-Mg | 6.5 |
| Al-5Cu | 6.0 |
| Al-11Mg-Si | 4.7 |
| Al-5Zn-Mg | 4.7 |

Tabla 2. Contracción para Al y Aleaciones.

- c) **Contracción en el estado sólido:** Se lleva a cabo desde la temperatura donde la solidificación es completa hasta la temperatura ambiente. Esta contracción provoca que la pieza sea algo más pequeña de lo que podría ser esperado, por lo que conduce a dificultades en el cálculo del modelo de fundición, y es entonces cuando se necesita un cierto grado de **sobredimensionamiento**. En este caso no interviene el sistema de alimentación.

Los tres tipos de contracción volumétrica antes mencionados se describen en la figura siguiente:

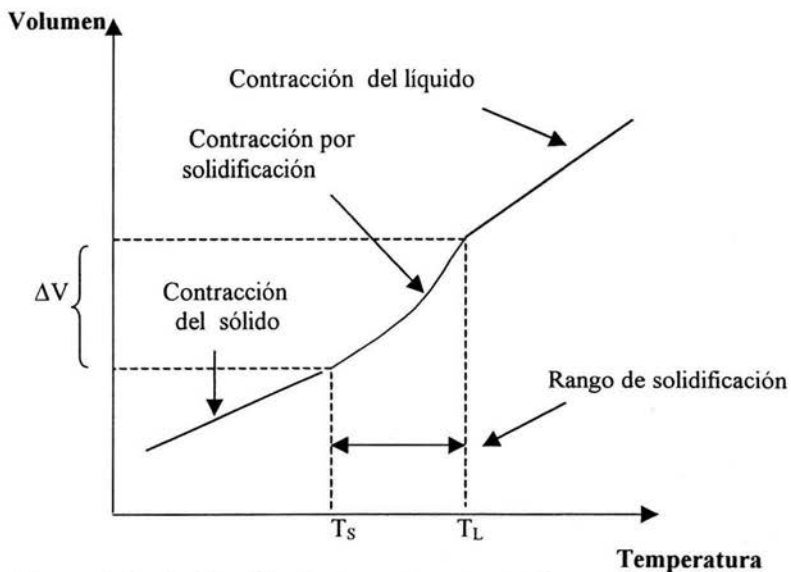


Figura 1. Variación del volumen con respecto a la temperatura.

Porosidad

La Porosidad por contracción, es la acumulación de pequeñas cavidades, las cuales se forman en la pieza como resultado de la contracción volumétrica al no tener afluencia del metal líquido. La porosidad por contracción es generalmente una característica de las aleaciones de rango largo de solidificación.

Los poros de contracción aparecen en los espacios interdendríticos, en el momento que la contracción volumétrica aun continúa y el suministro de metal líquido a los poros se interrumpe. Durante la solidificación las dendritas que crecen se unen, creando células aisladas, y cuando termina la alimentación, se crean pequeños poros, cuyo conjunto forma la porosidad por contracción.

Existen 3 tipos de Porosidad:

- 1) Porosidad Difusa: Son poros pequeños distribuidos uniformemente por una gran parte del volumen de la pieza. Esta porosidad se desarrolla durante la solidificación lenta de la pieza (de aleaciones de rango largo de solidificación).
- 2) Porosidad Axial: Son poros que aparecen en la parte central de la pieza como en las secciones largas y delgadas. Esto se explica porque la contracción volumétrica de la parte central aún no terminó de solidificar y disminuyó o se interrumpió el acceso de metal líquido.
- 3) Porosidad Local: Se crea en las partes separadas de la pieza ya solidificada, la cual cerró el acceso de metal líquido. Este tipo de porosidad consta de poros grandes.

Efecto del SiCp en la porosidad

La presencia de partículas de SiC estimula la nucleación heterogénea de poros en la interfase matriz-partícula, dando como resultado una fina porosidad dispersa. Dicho fenómeno se debe a que el crecimiento de los poros está restringido por las partículas de SiC comparada con la aleación base A356, donde una gran cavidad por contracción central es asociada con porosidad por gas.

El incremento en la temperatura del molde o del tiempo de agitación, resulta en el incremento en el nivel de la porosidad con efectos significativos en su distribución. Dicho incremento de porosidad puede ser explicada por la exposición del metal fundido bajo condiciones donde es probable la absorción de hidrógeno o contaminantes. Es importante mencionar que las partículas de SiC actúan como sitios de nucleación para la porosidad por gas.

Los poros pueden tomar diferentes formas dependiendo de cual sea la causa que los provoque; la forma de los poros producidos por absorción de gas tienden a tener formas esféricas, mientras que los poros producidos por contracción toman la forma de los brazos dendríticos.

De forma general se acepta que la porosidad se forma fácilmente cuando se presentan las siguientes condiciones:

- Una deficiente alimentación
- Dificultad en la alimentación interdendrítica
- Alta presión de gas en el metal, es decir alto contenido de hidrógeno

Contracción Total

La contracción total es la suma de la porosidad y el volumen de contracción, la cual puede ser calculada con el conocimiento de las densidades del metal o aleación, tal como se muestra a continuación, (Ref. 17):

$$\%C = \frac{(\rho_t - \rho_c)}{\rho_t} \times 100$$

donde:

% C = Porcentaje de contracción

ρ_t = Densidad teórica (g/cm^3)

ρ_c = Densidad aparente de la pieza (g/cm^3)

Dicha contracción forma parte importante en el cálculo de las dimensiones del alimentador, lo cual se verá posteriormente.

1.2 Alimentador ó Sistema de alimentación.

La solidificación de muchas piezas de fundición está acompañada por una contracción de volumen apreciable, y la precisa influencia de esta contracción varía con las condiciones de solidificación. Dicha contracción en la pieza solidificando, es resuelta por una compensación de metal líquido, por lo que es necesario adaptar sistemas de alimentación.

Por lo tanto, un **alimentador** o **sistema de alimentación** es una reserva de metal líquido, el cual tiene como objetivo proporcionar metal líquido a la pieza al solidificar, ya que sin la alimentación debida, la pieza estará sujeta a defectos de contracción en la forma de cavidades internas, superficies hundidas, etc., lo cual se traduce en una disminución de la calidad.

Componentes del Sistema de Alimentación

La mayoría de los estudios recientes, menciona los siguientes componentes básicos de un alimentador: El cuerpo del alimentador y el Cuello del alimentador, Figura 2.

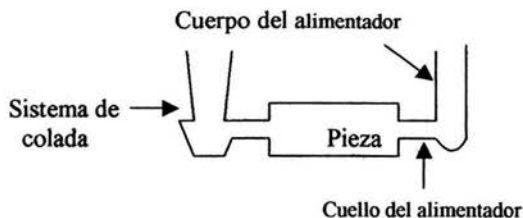


Figura 2. Componentes del alimentador

1.3 Formas, Tipos y Clasificación de alimentadores.

Formas de los Alimentadores

Debido a que el alimentador tiene que permanecer líquido más tiempo que la sección de la pieza para alimentar, su forma geométrica debe retardar la transferencia de calor desde el alimentador hasta el molde. Una forma de hacer esto es ajustando la razón: “volumen-área de superficie” del alimentador. Para un volumen dado de metal fundido, la forma seleccionada debe tener la menor cantidad posible de área de superficie.

La esfera tiene el área de superficie más pequeña para un volumen dado. De esta manera un alimentador esférico, Figura 3, retendría líquido un metal por más tiempo que uno cilíndrico o rectangular. Por lo tanto, en teoría, alimentadores esféricos debería ser usados. Sin embargo hay un problema, ya que el modelo patrón del alimentador no puede ser retirado del molde fabricado de arena (partido horizontalmente) sin llegar a romper parte de este. Por lo que, la forma geométrica más común adoptada para el diseño de alimentadores, es la cilíndrica, la cual se muestra en la Figura 3.

Los alimentadores cilíndricos tienen diversas relaciones altura:diámetro, siendo las más comunes para aleaciones de Aluminio:

1:1.5 y 1:2

los cuales se fundamentan en los siguientes puntos esenciales:

- La facilidad de moldeo.
- La relación V/A (volumen / área de superficie o de disipación térmica).
- El efecto de la carga metalostática de aleaciones de baja densidad como lo son las aleaciones base Al.

Así mismo, bajo circunstancias especiales pueden utilizarse alimentadores rectangulares, con el gran inconveniente de su pobre relación (V/A), Figura 3.



Figura 3. Formas geométricas de los alimentadores.

Tipos de Alimentadores.

Se tienen diferentes tipos de alimentadores, los cuales se definen dependiendo de su posición, respecto de la pieza, sistema de colada y atmósfera, cada uno de los cuales se presentan y explicarán a continuación

- a) **Respecto a su posición en la pieza.**
 - b) **Respecto a su posición al sistema de colada.**
 - c) **Respecto a la atmósfera.**
 - d) **Respecto a la pieza.**
-
- a) **Respecto a su posición en la pieza,** pueden dividirse en dos tipos: alimentadores superiores y alimentadores laterales, los cuales se aprecian en la Figura 4a y 4b, respectivamente:

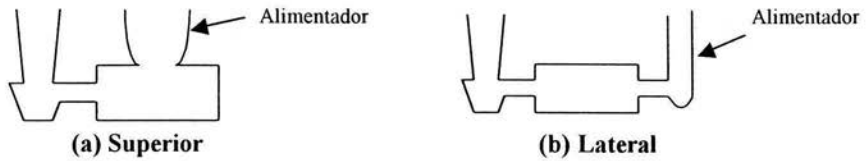


Figura 4. Alimentadores respecto a su posición en la pieza.

b) **Respecto a su posición al sistema de colada**, suelen denominarse como fríos y calientes. Se denominan así, por las razones siguientes:

- En el caso de los alimentadores fríos, estos se sitúan al extremo contrario de la entrada de metal, de tal forma que después de atravesar toda la pieza, el flujo de metal llega relativamente frío al alimentador, Figura 5a.
- En el caso de los calientes porque el alimentador está situado antes de la pieza, de tal forma que el metal que va entrando a él, está continuamente siendo renovado, de manera que el último metal que entró a la pieza después de terminada la colada está más caliente que el que entró a la pieza. Esta clase de alimentadores favorece en cierto grado la solidificación direccional que beneficia al diseño de alimentadores, Figura 5b.

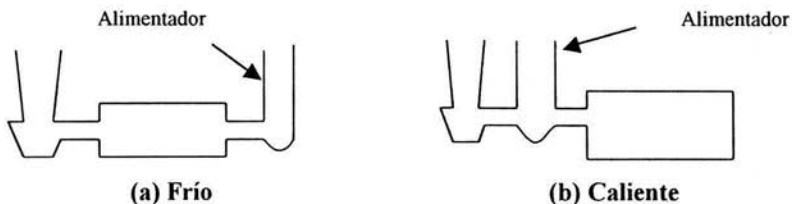


Figura. 5. Alimentadores respecto a su posición al sistema de colada.

- c) **Respecto a la atmósfera**, los alimentadores pueden clasificarse en abiertos y ciegos (o cerrados).

Los alimentadores abiertos son aquellos en que el metal del alimentador esta afectado directamente por el empuje de la presión atmosférica, o dicho de otro modo se encuentran abiertos al medio ambiente, Figura 6a.

Los alimentadores convencionales son abiertos a la atmósfera, por lo tanto, los alimentadores ciegos esta totalmente encerrados por el molde de arena, Figura 6b. Estos alimentadores están diseñados para tener una relación mínima Volumen/Área (V/A), de tal modo que se mejora la eficiencia. :

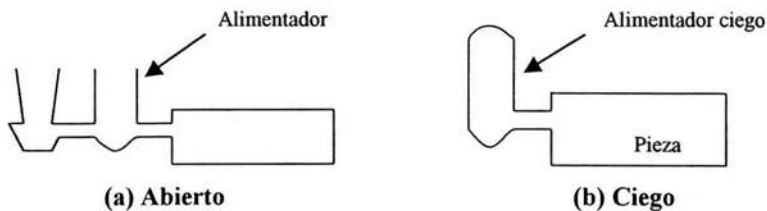


Figura 6. Alimentadores respecto a la atmósfera.

Los alimentadores ciegos tienen ciertas **ventajas**, las cuales se enlistan a continuación:

- 1) El metal caliente en el alimentador y el metal frío en la pieza promueven la solidificación direccional.
- 2) Gran flexibilidad para la ubicación de alimentadores ciegos.
- 3) Un alimentador ciego puede ser comparativamente más pequeño que uno abierto.
- 4) Los alimentadores ciegos pueden retirarse más fácilmente de la pieza colada.

- d) **Respecto a la pieza.** Aquellos alimentadores que están totalmente rodeados por la pieza se llaman **alimentadores internos**, estos pueden emplearse efectivamente en piezas circulares o cilíndricas, Figura 7. Debido a que los alimentadores están parcial o totalmente rodeados por la pieza, la velocidad de extracción de calor del alimentador es más lenta y consecuentemente su tiempo de solidificación es mayor, esto permite el uso de alimentadores pequeños y mejorar así el rendimiento de colada.

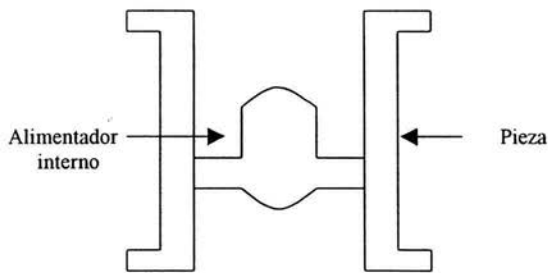
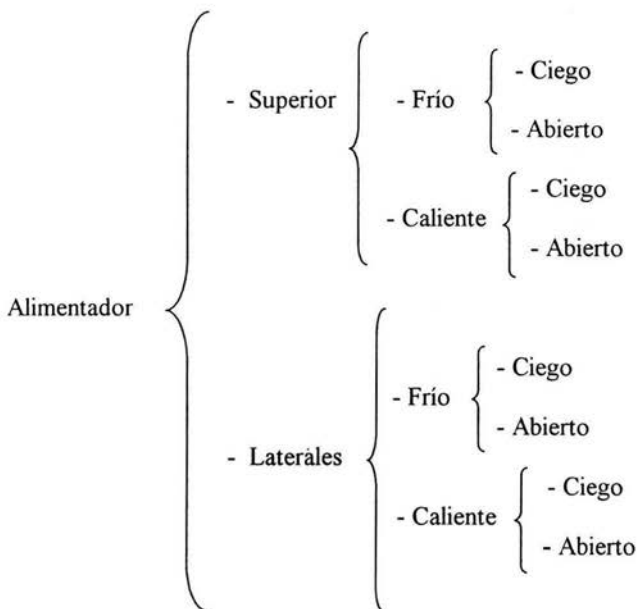


Figura 7. Alimentador respecto a la pieza.

Clasificación de los Alimentadores

Una vez explicados las formas y tipos de alimentadores, puede deducirse la siguiente clasificación y combinaciones:



La elección de una u otra clase, involucra consideraciones como:

- Forma del alimentador.
- Tamaño del alimentador como función de la forma y tamaño de la pieza.
- Ubicación del o los alimentadores.
- Agrupamiento de las piezas (si se tienen más de una).
- Unión alimentador-pieza (cuello de alimentación).
- Uso de enfriadores.
- Uso de materiales auxiliares (aislantes y/o exotérmicos).
- Consideraciones especiales en secciones que forman juntas ó uniones.

1.4 Efecto del rango de solidificación sobre las condiciones de alimentación de una pieza colada.

La composición química del metal puro o aleación determina el rango de solidificación y el modo básico de cristalización, por lo que indirectamente podemos conocer el mecanismo de solidificación y el tipo de contracción que sufrirá la pieza fundida.

Existen 3 tipos de patrones de solidificación para metales, los cuales se presentan a continuación:

- a) **Rango de Solidificación Corto**
- b) **Rango de Solidificación Largo**
- c) **Rango de Solidificación Intermedio o Mixto**

- a) **Rango de Solidificación Corto:** Metales puros y aleaciones eutécticas o cercanas a este punto comprenden este rango, las cuales solidifican a una temperatura aproximadamente constante.

En metales y aleaciones de este tipo, usualmente se forma una cáscara en la superficie. Cuando el metal líquido entra en contacto con las paredes del molde, empieza el enfriamiento e inmediatamente después la solidificación. A medida que el metal se encuentra solidificándose, se van formando las capas, incrementándose así sucesivamente hasta llegar a completar este proceso, y de esta manera obtener una pieza totalmente sólida.

La solidificación procede desde la superficie hacia el eje térmico de la pieza fundida, y puede ser dirigida hacia el alimentador, donde la contracción final toma la forma de una **cavidad o rechupe principal**, la cual tiende a ser concentrada en la región del centro térmico, por lo cual, es relativamente fácil la alimentación de las piezas, Figura 8.

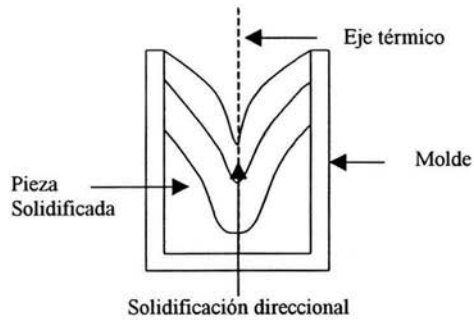


Figura 8. Cavidad o rechupe principal.

La solidificación de esta aleación 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 diminutos cristales, lo más favorablemente orientados en un crecimiento rápido en base a las capas ya formadas, para crear un frente continuo, que es conocido como “solidificación frontal” o frente de solidificación. Después de esto, el enfriamiento continúa por el avance de este frente hacia el interior de la pieza.

La distancia de alimentación tiende a ser mayor para las aleaciones con este rango de solidificación.

Las etapas separadas en el enfriamiento de una pieza, son mostradas en la Figura 9 para un metal puro, y en la Figura 10 para aleaciones de rango corto de solidificación. En el caso de las aleaciones de rango corto de solidificación, el frente no es plano sino dentado.

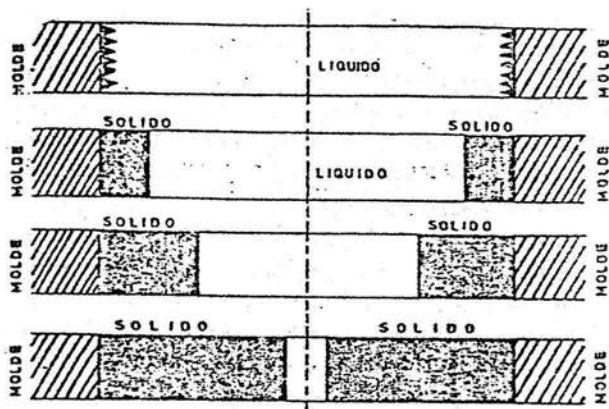


Figura 9. Etapas en el enfriamiento de un metal puro (Ref. 8).

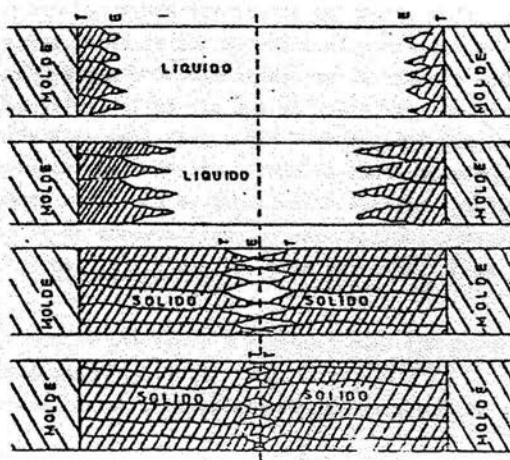


Figura 10. Etapas en el enfriamiento de una aleación con rango de solidificación corto (Ref. 8).

- b) **Rango de Solidificación Largo:** Muchas de las aleaciones de Al-Si, comprenden este rango de solidificación, las cuales solidifican en un intervalo de temperatura. Estas aleaciones generalmente presentan una **porosidad general o de rechupe disperso**, Figura 11.

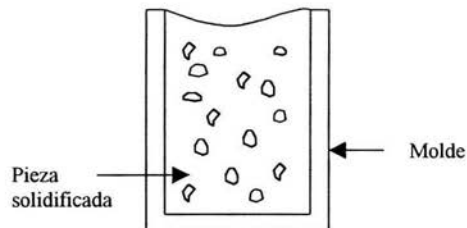


Figura 11. Rechupe disperso.

En metales y aleaciones de este tipo usualmente se forma una extensa zona pastosa durante la solidificación. Cuando el metal líquido entra en contacto con las paredes del molde, empieza el enfriamiento aunque la solidificación se lleva a cabo como un todo, de manera que no se forma una cáscara. A medida que el metal se encuentra solidificando, se van formando cristales en la pared del molde tan pronto como la temperatura del líquidus 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 se están formando 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 disipadas por difusión, por lo que el metal líquido que rodea los cristales esta disponible para solidificar hasta una etapa posterior como un todo (Ref. 7).

La distancia de alimentación tiende ser menor para las aleaciones con este rango de solidificación.

Las etapas separadas en el enfriamiento de una pieza, son mostradas en la siguiente Figura.

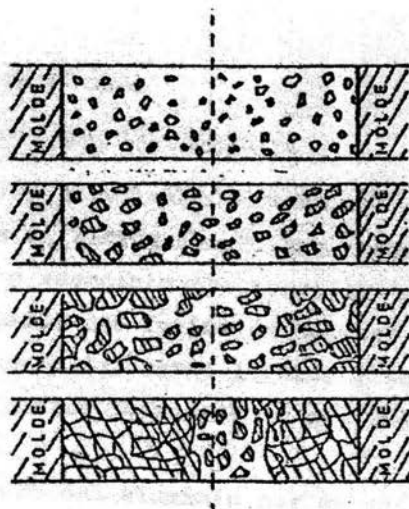


Figura 12. Etapas en el enfriamiento de una aleación con rango de solidificación largo (Ref. 8).

- c) **Rango de Solidificación Intermedio o Mixto:** Se presenta en una gran variedad de aleaciones, las cuales presentan una combinación de la forma de solidificación de una aleación de Rango corto y de Rango largo de solidificación. En general presentan una combinación de rechupe principal y disperso.

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 Figura 13. El espacio entre las dendritas es llenado con líquido enriquecido, el cual solidifica mucho más tarde en el proceso de solidificación.

El sistema de alimentación puede tener características de los dos rangos de solidificación.

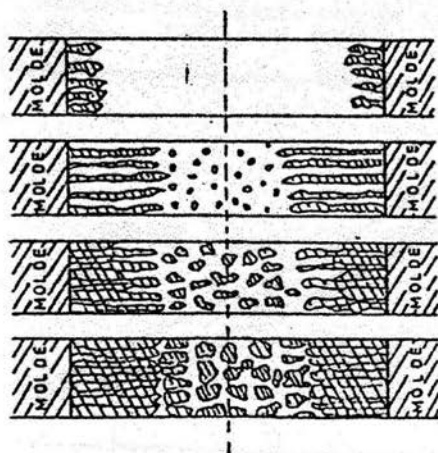


Figura 13. Etapas en el enfriamiento de una aleación con rango de solidificación intermedio o mixto (Ref. 8).

1.5 Condiciones para la Alimentación.

1.5.1 Reglas de Alimentación (según Campbell).

De acuerdo a Campbell, para el diseño de un alimentador se deben cumplir las siguientes reglas (Ref. 1):

- 1) El alimentador debe solidificar después de la pieza de fundición, de tal manera que se promueva la solidificación direccional (Criterio de transferencia de calor).
- 2) El alimentador debe contener el suficiente metal líquido para compensar los requerimientos volumen-contracción de la pieza (Criterio de volumen).

Sin embargo, hay reglas adicionales las cuales son frecuentemente pasadas por alto, pero que definen criterios térmicos, geométricos y de presión adicionales, los cuales representan condiciones necesarias para obtener una pieza sana.

- 3) El empalme entre la pieza y el alimentador no debe crear un punto caliente, por ejemplo tener un tiempo de solidificación más grande que el alimentador o la pieza.
- 4) Debe haber una vía que permita al metal de alimentación, alcanzar las regiones que lo requieran.
- 5) Debe haber suficiente presión diferencial para provocar que el material de alimentación pueda fluir, así como también dirigirse en la dirección correcta y suprimir la formación y crecimiento de cavidades.

1.5.1.1 Requerimientos de Transferencia de Calor.

Los requerimientos de transferencia de calor para una alimentación exitosa se traducen en lo siguiente: **el tiempo de solidificación del alimentador debe ser ligeramente mayor al tiempo de solidificación de la pieza.**

El tiempo de solidificación de una pieza solidificando es controlado por su relación volumen-área de superficie enfriando (V/A), más conocido como su modulo "M". De este modo, el problema de asegurar que el alimentador tiene un tiempo de solidificación más largo que el de la pieza, es simplemente asegurar que su modulo " M_A " es más grande que el modulo de la pieza " M_P ".

Para permitir un factor de seguridad, se introduce un factor de entre 1.1 y 1.3. De esta manera, la condición de transferencia de calor se vuelve simplemente:

$$M_A > K M_P$$

$$\text{donde: } 1.1 < K < 1.3$$

donde: M_A = módulo del alimentador

M_P = módulo de la pieza

En la siguiente tabla se muestran algunas formas simples y su modulo de solidificación en función de la relación Volumen /Área:

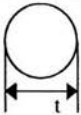
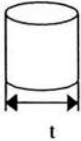
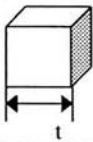
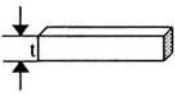
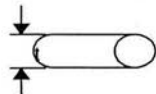
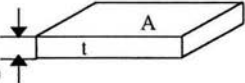
| Forma | Volumen | Área | Módulo V/A |
|---|---------------------|--------------------|---------------|
| Esfera  | $\frac{\pi^3}{6}$ | πt^2 | $\frac{t}{6}$ |
| Cilindro h = t  | $\frac{\pi^3}{4}$ | $\frac{3\pi^2}{2}$ | $\frac{t}{6}$ |
| Cubo  | t^3 | $6t^2$ | $\frac{t}{6}$ |
| Barra (Cuadrada semi-infinita)  | t^2 | $4t$ | $\frac{t}{4}$ |
| Barra (Cilíndrica semi-infinita)  | $\frac{\pi t^2}{4}$ | πt | $\frac{t}{4}$ |
| Placa (semi- infinita)  | $4 t$ | $2 A$ | $\frac{t}{4}$ |

Tabla 3. Derivación de valores de módulos de enfriamiento.

Cabe destacar, que el modulo de un alimentador puede ser fácilmente incrementado con el uso de una camisa aislante o exotérmica, así mismo también puede ser incrementado con el uso de polvo aislante o exotérmico, aplicado en la parte superior de la colada después de vaciar la pieza.

a) Materiales Aislantes y Exotérmicos

El uso de materiales aislantes y exotérmicos, los cuales, aplicados correctamente, aumentan el tiempo de solidificación de los alimentadores, permitiendo utilizarlos con un volumen pequeño, efectuando la misma función de un alimentador grande usado de manera convencional. **Los materiales exotérmicos** desprenden calor debido a reacciones químicas exotérmicas transmitiendo calor al metal líquido, elevando de esta forma la temperatura del material que cubre el alimentador. **Los materiales aislantes** usados tienen baja difusividad térmica (α), de tal forma que reducen la transferencia de calor.

Tanto los materiales aislantes como los exotérmicos requieren usarse alrededor o en la parte superior del alimentador, para eliminar las pérdidas por radiación hacia la atmósfera, tal como se muestra en la Figura 14.

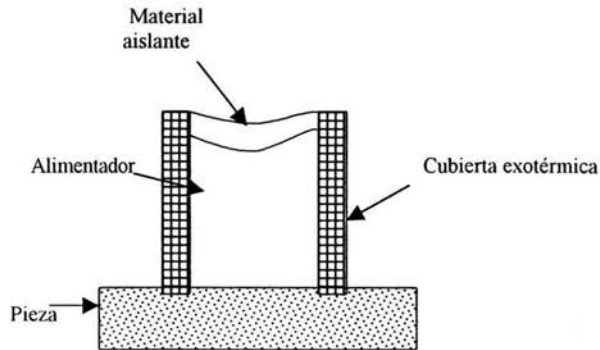
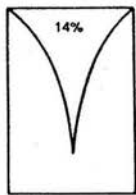
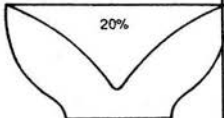
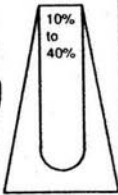
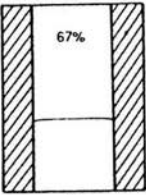


Figura 14. Uso de mangas aislantes y cubiertas para alimentadores

1.5.1.2 Requerimientos de Transferencia de Masa.

La figura 15, muestra algunos alimentadores normales, que son relativamente ineficientes en la cantidad de metal alimentado, el cual son capaces de proporcionar. Esto es porque ellos mismos solidifican al mismo tiempo que la pieza de fundición, agotando la reserva de líquido.

| | | | | |
|---------------------------|---|---|---|--|
| |  |  |  |  |
| | (a) | (b) | (c) | (d) |
| Relación de V_S y V_F | $V_S = 0.14 V_F$ | $V_S = 0.20 V_F$ | | $V_S = 0.67 V_F$ |
| Factor Aproximado | 7 | 5 | | 1.5 |

donde: V_S = Volumen del rechupe V_F = Volumen inicial

Figura 15. Utilización de metal de alimentadores de varias formas moldeados en arena. El (a) cilíndrico y (b) semiesférico han sido tratados con componentes de alimentación normal; (c) la eficiencia de la reserva de los alimentadores cónicos depende de la geometría detallada (Heine, 1982, 1983); (d) muestra una camisa exotérmica (Beeley, 1972), (Ref. 1).

Si denotamos la **eficiencia del alimentador "ε"** como la razón:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de metal alimentado disponible, } V_{MA}}{\text{Volumen del alimentador, } V_A}$$

Capítulo 1. Fundamento Teórico

entonces el volumen del metal alimentado es : $V_{MA} = \varepsilon V_A$

Como el líquido contrae una cantidad “ α ” durante la solidificación, entonces la demanda

de alimentación del alimentador y la pieza es : $\alpha (V_A + V_P)$

Por lo tanto: $\varepsilon V_A = \alpha (V_A + V_P)$ ó $V_A = \alpha V_P / (\varepsilon - \alpha)$ (1)

Por ejemplo, para aluminio: “ α ” es aproximadamente 7 (Tabla 1), y para un alimentador cilíndrico normal de $H = 1.5D$, $\varepsilon = 14\%$, obtenemos:

$$V_A = (7)V_P / (14 - 7) \Rightarrow V_A = V_P$$

El resultado anterior, quiere decir que se tiene tanto volumen en el alimentador como en la pieza. Esto es porque el rendimiento (medido como el peso del metal que va dentro de la fundición completa dividido entre el peso de las piezas entregadas) en la mayoría de las fundiciones de aluminio es raramente superior al 50%. De hecho, rendimientos del 45% son comunes.

Para aceros, el valor de “ α ” se sitúa entre 3% y 4% dependiendo de la solidificación. Entonces para $\alpha = 4$ y $\varepsilon = 14\%$, la ecuación (1) resulta:

$$V_A = 0.40 V_P$$

Y para aceros con $\alpha = 3$ y un alimentador de 14% de eficiencia:

$$V_A = 0.27 V_P$$

De esta manera, la contracción por solidificación más pequeña de metales ferrosos, reduce el requerimiento de volumen del alimentador de forma considerable.

1.5.1.3 Requerimientos de la Vía de Alimentación.

a) Solidificación Direccional hacia el Alimentador

Si el alimentador puede ser colocado en la sección más gruesa de la pieza, con secciones más delgadas extendiéndose progresivamente, entonces la condición de solidificación progresiva hacia el alimentador puede ser encontrada. Un método clásico para checar este proceso se debe a Heuvers (Ref. 1), el cual puede ser usado con círculos inscritos dentro de las secciones de la pieza. Si el diámetro de los círculos incrementa progresivamente hacia el alimentador, entonces la condición es encontrada, Figura 16.

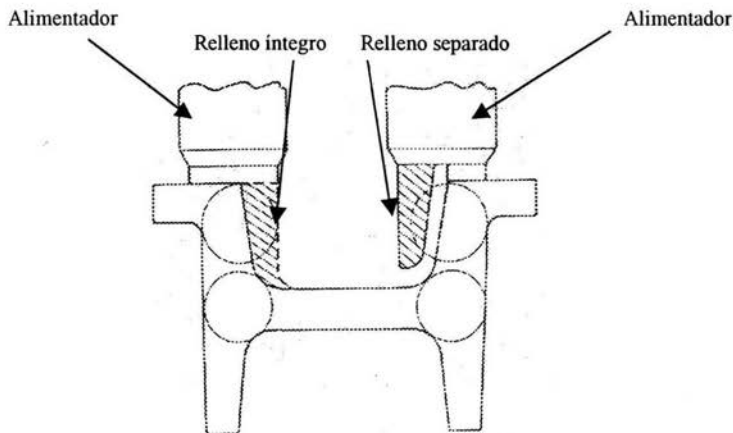


Figura 16. El uso de círculos de Heuvers para determinar la cantidad de relleno necesario (Beeley, 1972) y el uso de relleno indirecto (o separado) descrito por Daybell (1953) (Ref. 1).

Beeley (1972) puso atención al hecho de que la técnica de Heuvers es sólo en dos dimensiones, y que la condición sería más exacta representada en tres dimensiones, por un cambio progresivo en el modulo de la pieza hacia el alimentador. La razón fundamental por la que se necesita el estrechamiento de la pieza, es para lograr el flujo de metal líquido. Por conveniencia debemos llamar a esto, la **“Técnica del gradiente de módulos”**

Capítulo 1. Fundamento Teórico

Los medios para proporcionar un gradiente de módulos (suficiente) hacia el alimentador, pueden ser: modificando el alimentador, proporcionando alimentadores adicionales o modificando el módulo de la pieza.

El módulo de la pieza puede ser modificado, a condición de que un enfriador o aleta de enfriamiento sean colocados para provocar solidificación rápida, o también proporcionando metal extra para demorar la solidificación en la vecindad. Esta proporción extra es conocida como **relleno**, la cual se observa en la Figura 16.

Daybell (1953), fue probablemente el primero en describir el uso de esta técnica. El autor lo ha encontrado útil en la colocación de alimentadores cerca de las secciones adyacentes delgadas de la pieza, con una perspectiva de alimentación a través de las secciones delgadas hacia las secciones más gruesas.

b) Distancia de Alimentación

Es la distancia a la cual un alimentador es capaz de enviar metal líquido para compensar la contracción; esta depende del “Rango de Solidificación de una Aleación y del espesor crítico de la sección por alimentar.

Es fácil apreciar que en condiciones normales habrá un límite para poder alimentar metal líquido a través de una vía de flujo, por lo que es importante determinar la distancia de alimentación efectiva.

Una razón por la cual un alimentador puede parecer ineficaz, es cuando la Distancia de Alimentación ha sido probablemente excedida. La Figura 17 muestra la formación de cavidad por contracción debido a una distancia de alimentación demasiado larga:

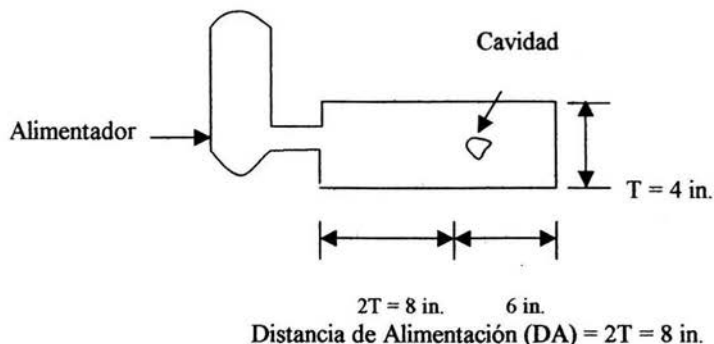


Figura 17. Una Distancia de Alimentación demasiado larga causaría una cavidad. (Ref. 3)

Para fundiciones de Al, una fórmula para aproximar la Distancia de Alimentación teórica de un alimentador caliente es (Ref. 3):

$$DA = 2T$$

donde :

DA = Distancia de Alimentación

T = Espesor de la sección siendo alimentada.

En la Figura 17, la cavidad por contracción ha ocurrido justo más allá de 8 in. de distancia de alimentación. En este caso, la **solidificación progresiva** ha vencido la **solidificación direccional** y el metal alimentado desde el alimentador es aislado de la cavidad por contracción.

Existen algunas formas para arreglar este problema.

- 1) Una es cambiar el espesor de la sección.
- 2) Otra es hacer la sección de la pieza como una cuña, es decir haciendo la sección junto al alimentador más gruesa y la sección final menos gruesa o debajo de 4 in.
- 3) Incrementar el efecto final colocando un enfriador al final de la pieza.

Este efecto final es causado por la facilidad con la cual el calor puede dejar el aluminio fundido debido al incremento en superficie de área. Este efecto final también puede ser llamado “**Solidificación Direccional**”, ya que es dirigido hacia el alimentador.

Posición del Alimentador

Los alimentadores son normalmente colocados en contacto directo con las secciones más pesadas de una pieza de fundición, ya que esto permite **solidificación direccional**, de esta manera se mantiene en todas partes de la solidificación. Como sólo una masa compacta puede ser alimentada por un alimentador sencillo, en muchas piezas de diseño complejo, la forma misma divide la pieza en zonas naturales de alimentación. Cada zona puede en estos casos ser alimentada por un alimentador calculado por separado, siendo éste el principal factor determinante del número de alimentadores requeridos.

Sin embargo, en el caso de muchas aleaciones, el rango de alimentación más que la contracción (o rechupe), es el factor de limitación de la operación de cada alimentador. Esto es debido al hecho de que gradientes de temperatura apreciables son necesarios para la alimentación, y estos son difíciles de inducir en secciones paralelas y sobre distancias largas. Ha sido establecido, por ejemplo que para obtener piezas libres de porosidad dispersa, gradientes de ~ 5.5 °C/cm e incluso ~ 13 °C/cm han sido citados son necesarios para aleaciones no ferrosas de rango de solidificación largo.

El patrón de distribución de temperatura característico dentro de una barra solidificando es ejemplificado en la Figura 18, hay una tendencia general hacia gradientes excesivos en contra de paredes finales y gradientes mínimos adyacentes al alimentador, con mesetas isotérmicas en regiones intermedias. **La alimentación puede sólo tomar lugar sobre distancias muy cortas en tales zonas de meseta** y la presencia de contracción de línea central es de este modo aceptada como inevitable en muchas fundiciones incorporando secciones paralelas largas.

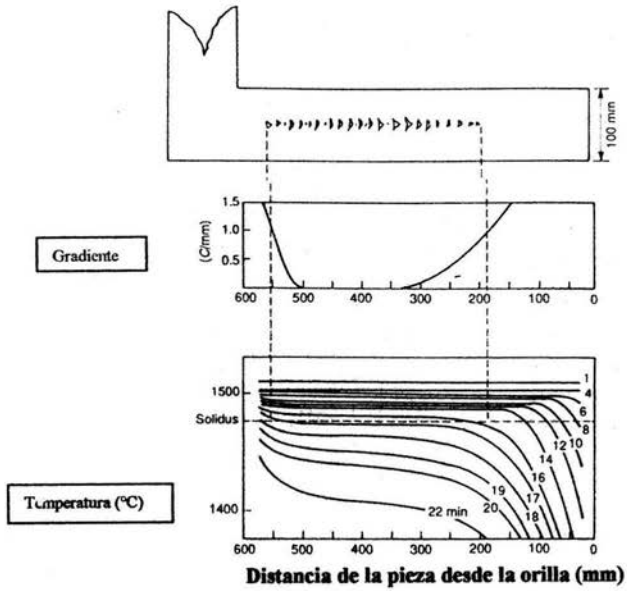


Figura 18. Distribución de temperatura característico en una barra solidificando (Ref. 1)

1.6 Métodos de Cálculo de Alimentadores

Algunos de los métodos para dimensionar los alimentadores toman en cuenta la contracción que sufre el metal durante el proceso de solidificación y enfriamiento del metal líquido, algunos otros, lo toman en cuenta de manera indirecta.

Un ejemplo típico para comprender la importancia de la contracción volumétrica en relación al volumen del alimentador puede verse en el siguiente algoritmo para el cálculo de alimentadores. Considerando un alimentador, la cavidad por contracción que aparecerá bajo condiciones normales de enfriamiento, es decir el alimentador y la pieza se encuentran rodeados por el mismo material de moldeo, la contracción total por solidificación es:

$$\beta_T = \beta (V_P + V_A)$$

esta contracción debe compensarse con una fracción de volumen del alimentador, a esta fracción se le denomina Coeficiente de Reparto o Demanda (η), dicho de otra forma, es el coeficiente que incluye la demanda de metal de la pieza y del propio alimentador, por lo tanto el balance queda:

$$\beta (V_P + V_A) = \eta V_A$$

$$\beta V_P = V_A (\eta - \beta)$$

$$\beta V_P + \beta V_A = \eta V_A$$

$$\beta V_P = \eta V_A - \beta V_A \quad \text{por lo tanto:} \quad V_P = V_A \left(\frac{\eta - \beta}{\beta} \right)$$

donde:

- V_P = Volumen de la pieza
- V_A = Volumen del alimentador
- β = Contracción específica del material a condiciones normales de enfriamiento.
- η = Coeficiente de reparto o demanda

de esta sencilla expresión puede visualizarse la importancia que juega la contracción para el cálculo del volumen del alimentador.

Métodos de Cálculo

Se tienen principalmente tres métodos para el cálculo de alimentadores para piezas de aluminio, cada uno de los cuales se explicarán de manera detallada.

- a) Método del Módulo de Solidificación.
- b) Método del Factor de Forma.
- c) Método de la CTIF

a) Método del Módulo de Solidificación.

De acuerdo a los primeros estudios realizados por Chworinov, para determinar el tiempo de solidificación, este llegó en forma experimental a la expresión:

$$t = k \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

donde:

- t = Tiempo de solidificación
- k = Constante que depende de las propiedades del metal y el molde
- V = Volumen de la pieza
- A = Área superficial de disipación térmica de la pieza

A la relación Volumen / Área se le denomina “Módulo de Solidificación”

El “módulo de solidificación” (Ms) se define por la relación de volumen entre área de disipación térmica de la pieza (V/A), dicho de otra forma, el parámetro “Ms” depende únicamente de la geometría de la pieza.

Esta expresión fue desarrollada teóricamente y fue encontrada para corresponder bien con determinaciones experimentales hechas en una amplia variedad de formas que van desde placas a esferas. Chworinov graficó en un diagrama log-log un gran número de piezas coladas y concluye que independientemente de la forma de la pieza colada, es correcto decir que los cuerpos con igual “módulo” solidifican en el mismo tiempo.

Tal como se vio en la sección 1.4.1.1. , el problema de asegurar que el alimentador tiene un tiempo de solidificación más largo que el de la pieza, es simplemente asegurar que su modulo “ M_A ” es más grande que el modulo de la pieza “ M_P ”. En la tabla 3, se muestran algunas formas simples y su modulo de solidificación en función de la relación Volumen /Área:

El tiempo de solidificación total para un volumen dado de metal es más grande a medida que la razón V/A aumenta. La determinación de esta razón puede ser aplicada para la estimación de tiempos de solidificación relativos de alimentadores y de secciones de piezas a alimentar, así como también para saber la mejor forma de un alimentador. Es la regla de Chworinov la cual proporciona la base para resolver el problema de alimentación, la cual usa un factor de forma o modulo como un criterio de tiempo de solidificación total.

Estudios de Wlodamer y Jeancolas realizados bajo los mismo principios de Chworinov, desembocando en conclusiones similares entre las que destaca que el “módulo de solidificación del alimentador” (M_A) debe ser 1.2 veces el “módulo de la pieza” (M_P). En todo caso la alimentación adecuada de una pieza está gobernada tanto por el “modulo de solidificación” (tiempo de solidificación) como por el volumen de metal demandado por la pieza. Por lo tanto es frecuentemente utilizada una corrección entre estas dos características para el diseño de alimentadores.

Capítulo 1. Fundamento Teórico

$$\Rightarrow M_A = 1.2 M_P (K_A/K_P)$$

donde:

- M_A = Modulo de solidificación de la pieza
- M_P = Modulo de solidificación del alimentador
- K_A = cte. (propiedades del medio de moldeo del alimentador)
- K_P = cte. (propiedades del medio de moldeo de la pieza)

Los pasos para el cálculo del alimentador son los siguientes:

- Determinar “ M_A ”
- Calcular “ M_P ”
- Calcular K_A y K_P (para el mismo medio de moldeo del alimentador y la pieza $K_A / K_P = 1$)
- Calcular (ó despejar) el diámetro (D), altura (H), etc., del alimentador correspondiente
- Determinar las dimensiones totales del alimentador.

Este método, en realidad tiene cierta limitante o desventaja, por ejemplo para el caso de uniones en forma de L, T ó +, ó para el caso de piezas con corazón, es difícil aplicar el concepto de “modulo de solidificación”, por lo que éste debe corregirse desde el punto de vista transferencia de calor.

b) Método del Factor de Forma.

Un desarrollo simplificado del Método de Caine, es el Método de Bishop o Método del Factor de Forma, el cual tiene como ventaja, reducir la complejidad de los cálculos para el dimensionamiento del alimentador. El concepto de factor de forma reemplaza el área de la superficie por una relación de volumen, y se expresa de la siguiente forma:

$$S = \frac{(L + W)}{T}$$

donde:

- L = Longitud de la pieza
- W = Ancho de la pieza
- T = Espesor de la pieza

La relación entre este factor y los requerimientos del alimentador son ilustrados en la siguiente Figura:

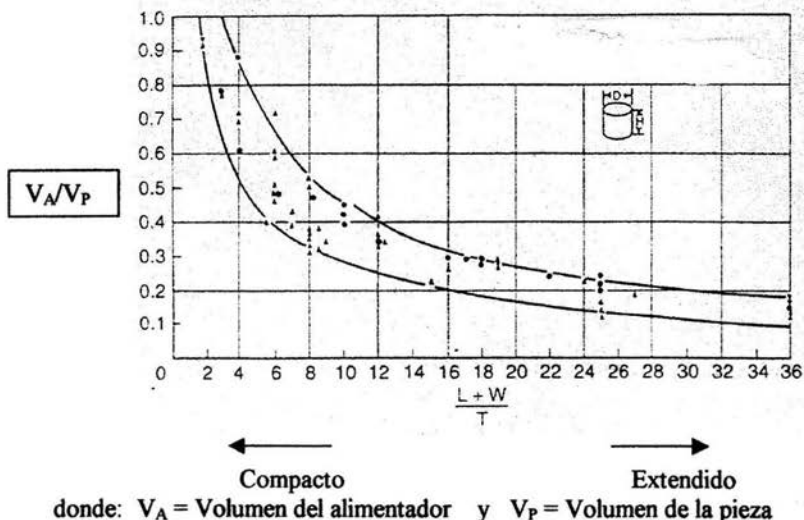


Figura 19. "Relación del Factor de Forma de una pieza con el volumen mínimo de alimentador expresado como una fracción del volumen de la pieza Para alimentadores cilíndricos con razones $H/D = 0.5 - 1.0$.

Capítulo 1. Fundamento Teórico

Con valores de S incrementando acompañando la transición hacia formas de piezas más delgadas y más extensas, los requerimientos del alimentador disminuyen hacia un nivel límite en el cual la variable que controla no es el factor de forma sino el volumen de metal requerido. Así mismo, una simplificación con el Método de Caine, es la omisión de la geometría del alimentador como una variable, ya que la relación graficada es restringida a alimentadores cilíndricos dentro de un rango óptimo de razones V/A , por lo que se permite la obtención directa del volumen del alimentador. Así mismo dicho método más simplificado aunque menos flexible, se basa en el hecho de que la “Relación de Solidificación” está relacionado con el “Factor de Forma”

Los pasos para el cálculo del alimentador son los siguientes:

- Calcular el Factor de Forma: $(L + W) / T$, usando las dimensiones del cuerpo principal de la pieza o de la sección siendo considerada.
- Determinar (V_A/V_P) con la gráfica correspondiente (dependiendo del metal o aleación).
- Calcular el volumen de la pieza
- Calcular el volumen del alimentador (V_A)
- Calcular las dimensiones del alimentador. Se puede consultar una gráfica ó cuadro, el cual representa las diferentes alternativas Altura-Diámetro y diferentes combinaciones para cada volumen de alimentador.

Este método tiene la desventaja de que se usa únicamente a piezas en forma de placa, algunos estudios han concluido que los alimentadores más eficientes para este caso deben tener una relación $H_R / D_R = 2 / 1$, donde: H_A = altura del alimentador y D_A = diámetro del alimentador.

c) Método recomendado por la CTIF (ó Método de Jeancolas)

La utilización de este método se resumen en tres reglas básicas:

- 1) **Regla de las zonas de acción.**
- 2) **Regla de los módulos.**
- 3) **Regla de las contracciones.**

1) **Regla de las zonas de acción.**

La pieza bajo estudio debe descomponerse en tantas partes como sea necesario, de tal forma que cada parte tenga preferentemente una forma geométrica simple, esto con el fin de asegurar que el alimentador desempeñe correctamente su función en cada parte considerada. Cada parte obtenida en la descomposición de la pieza se denomina "elemento", y cada elemento considerado será alimentado en forma independiente por un alimentador. La aplicación de esta regla permite determinar el número y la distribución de los alimentadores en la pieza, así mismo, esta regla debe complementarse conjuntamente con la **distancia de alimentación**.

2) **Regla de los módulos.**

Las dimensiones de cada alimentador se determinan de tal manera que el módulo de enfriamiento del alimentador (M_A) sea mayor que el modulo de enfriamiento del elemento considerado en la pieza (M_P), a la cual esté destinado dicho alimentador, por medio de la relación, (Ref. 15) :

$$M_A = k \cdot M_P \quad \text{en donde: } 1.1 < K < 1.3$$

Cuando se emplean **productos exotérmicos** en forma de cubiertas o mangas, los valores de "k" pueden reducirse en un 30% en el caso de los materiales más comunes. Los coeficientes reducidos corresponden en realidad entre 0.6 y 0.8, según las dimensiones del alimentador, la naturaleza y la cantidad del producto exotérmico o aislante utilizado.

3) Regla de las contracciones.

Se utiliza para verificar si el volumen final de cada alimentador es el adecuado (V_A). Este volumen final, se considera igual al volumen global de contracción técnica (contracción en estado líquido + contracción durante la solidificación), de cada elemento de la pieza de interés " rV_p ", multiplicado por un coeficiente de seguridad k' , el cual toma el valor de "2" para alimentadores en los que se utilizan productos exotérmicos, y de "6" para alimentadores ordinarios. Es decir, se debe verificar la siguiente relación:

$$V_A = k' \cdot rV_p \quad (\text{Ref. 15}) \quad \text{donde: } k' = 2 - 6$$

Los valores del coeficiente de contracción total técnica (r), son función de la naturaleza particular del metal colado.

Recomendaciones prácticas

Estas 3 reglas forman un ensamble coherente muy preciso. Es conveniente aplicar las tres reglas sobre todo para aquellas aleaciones con elevada contracción, en las cuales se necesita alimentar diversos elementos de la pieza con la ayuda de un mismo alimentador.

Para aplicar las reglas anteriores, a continuación se citan algunas recomendaciones prácticas para calcular el sistema de alimentación:

Para seleccionar los elementos a alimentar, es necesario estudiar la solidificación de la pieza de acuerdo a lo siguiente:

- 1) Descomponer la pieza en elementos simples de diferente masa, ayudándose del diseño natural de los elementos y la pieza.

Capítulo 1. Fundamento Teórico

- 2) Determinar la secuencia de solidificación de los diferentes elementos en estudio y calcular el módulo si es necesario.
- 3) Asegurar una solidificación direccional desde los elementos considerados hacia el alimentador.
- 4) Escoger el lugar de la colada más adecuado
- 5) Disponer convenientemente la distribución de entrada(s) del sistema de colada.
- 6) Utilizar accesorios (si es necesario): enfriadores, aislantes, excesos, etc.

Cada elemento de la pieza considerado, puede estudiarse en forma independiente, de tal forma que cada uno pueda tratarse como una pieza para ser alimentada en forma particular; además debe considerarse el posible hecho de que las partes menos masivas puedan ser alimentadas por las partes más masivas adyacentes. El alimentador es la parte que solidifica por último, por tanto esto ayuda a alimentar las secciones o partes más próximas.

Para calcular las dimensiones, así como el número de alimentadores, para cada elemento de la pieza definido anteriormente, se procede de la forma siguiente:

- 1) **Aplicar la regla de los módulos.** De tal forma que el tiempo de solidificación del alimentador sea mayor que el tiempo de solidificación local del elemento o la pieza a la que se va a alimentar. En general pueden aplicarse las relaciones siguientes:

- Para alimentadores ordinarios: $M_A = 1.2 M_P$
- Para alimentadores exotérmicos: $M_A = 0.9 M_P$

donde:

M_A = modulo del alimentador.

M_P = modulo del elemento o pieza a alimentar.

- 2) **Considerar para el cuello (unión-alimentador):** Una relación altura:diámetro de 1:1, como función del diámetro del alimentador, esto con el fin de que se permita colar el metal sobre la pieza.
- 3) **Aplicar la regla de las zonas de acción.** Para cada uno de los elementos de la pieza de interés que se deseen sanos (para ser alimentados). Considerando los puntos siguientes, referentes a la distancia de alimentación:
- Regla de acción de un alimentador: distancia a partir del borde del alimentador con la cual la alimentación es asegurada.
 - Efecto extremo (E): distancia sana a partir de un extremo.
 - Efecto extremo del enfriador (E'): distancia sana complementaria asegurada por la presencia de un enfriador.

1.7 Parámetros más importantes para el diseño de alimentadores

De acuerdo a los métodos descritos anteriormente, se observa que se tienen variables fundamentales para el diseño de alimentadores de Al y sus aleaciones, los cuales son:

- a) Tipo de metal o aleación: Cada aleación tiene valores diferentes de contracción (desde el estado líquido hasta que solidifica completamente); así mismo dicha contracción depende de la temperatura y de la composición química.

- b) Tamaño y Forma de la pieza: Representan las dimensiones de la pieza, el **modulo de solidificación** (volumen/área de transferencia de calor); así mismo de estos parámetros dependen la ruta de solidificación (**forma de solidificar**) y la posición y el número de los alimentadores que se deben colocar (los cuales se encuentran relacionados con la **distancia de alimentación**).

Cabe mencionar que para el caso de compositos colados base Al, la existencia de datos para % Contracción y Distancia de Alimentación, es nula, por lo cual se utilizaran los datos reportados para aleaciones Al-Si, para de esta manera tener un punto de partida al momento de proponer el diseño experimental.

Capítulo 2. Diseño Experimental

La experimentación realizada constó de dos partes, en la primera parte se evaluó el % Contracción, y en la segunda parte, la Distancia de Alimentación. Dicha experimentación, se diseñó de tal forma, que fuera posible determinar y comparar el comportamiento para estas variables, entre la aleación matriz A356 sin reforzar y el compuesto A356/SiCp con diferentes niveles de SiCp.

2.1 Modelos Utilizados.

Los modelos utilizados se fabricaron en base a la revisión bibliográfica, aunque para esta investigación se adaptaron para aplicarlos al compuesto A356/SiCp.

a) Modelo para determinar el % Contracción.

Se fabricó un molde metálico rediseñado llamado “Molde Tatur” (Ref. 13), el cual se coloca sobre una placa metálica, de manera que se permite colar en forma vertical. La forma y dimensiones del molde y la placa metálica se presentan en las siguientes figuras:

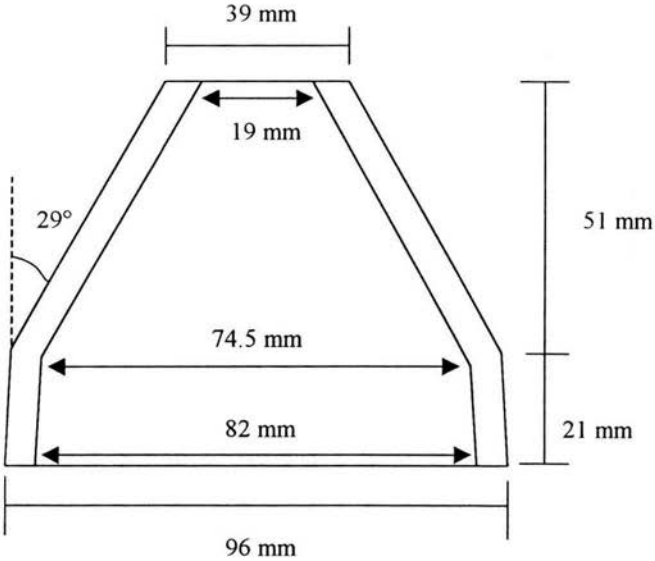


Figura 20. Dimensiones del Molde Tatur.

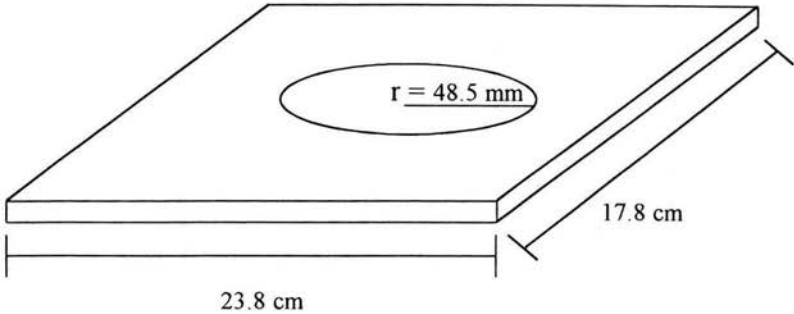
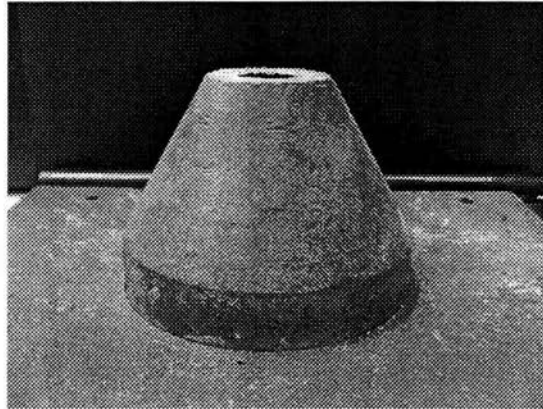


Figura 21. Dimensiones de la Placa Metálica.



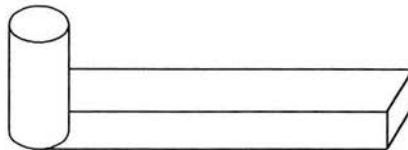
Fotografía 1. Molde Tatur y Placa Metálica.

b) Modelo para determinar la Distancia de Alimentación.

Se utilizó una placa-modelo hecha de madera, la cual tiene dos barra rectangulares (con las mismas dimensiones) unidas respectivamente a un alimentador diseñado de tal forma que basado en los módulos de solidificación, se tuviera un tiempo de solidificación mayor que el de las barras, además de poseer el suficiente volumen para compensar el volumen de metal demandado.

Módulo del Alimentador

$$M = V/A = 0.82$$



Modulo de la Barra

$$M = A/P = 9/12 = 0.75$$

Figura 22. Barra rectangular unida al alimentador indicando los módulos locales de solidificación

Capítulo 2. Diseño Experimental

Debido a que no se tienen datos reportados sobre distancias de alimentación para compósitos A356/SiCp, las dimensiones de la barra, parten de los datos reportados para una aleación A356.

La forma de la placa y las dimensiones de la barra rectangular se presentan en las siguientes figuras:

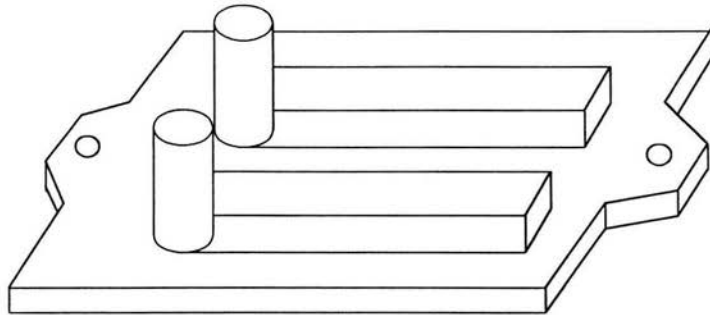


Figura 23. Forma de la placa-modelo.

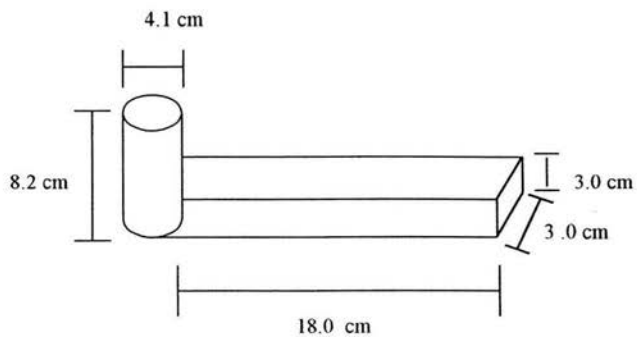
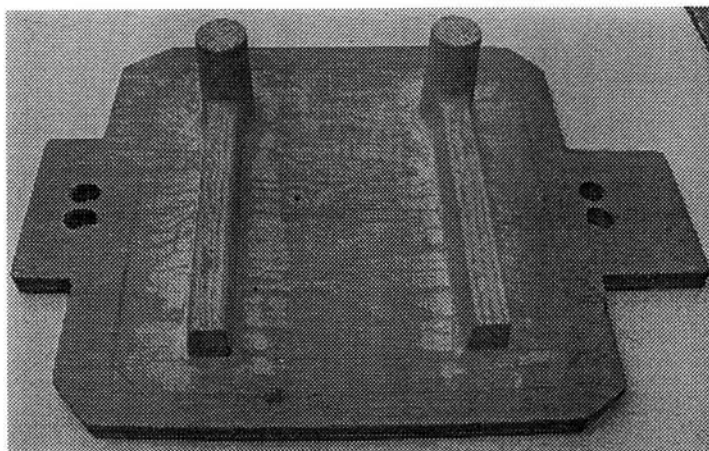


Figura 24. Dimensiones de la barra.



Fotografía 2. Placa - Modelo

2.1 Variables y niveles.

Las variables y los niveles de SiCp, se definieron en forma independiente para determinar el % Contracción y la Distancia de Alimentación; así mismo, cada experimento se realizó por duplicado, para asegurar la obtención de resultados confiables.

a) % Contracción

Las variables a tomarse en cuenta para la evaluación de este parámetro se dan a continuación, con la tabla correspondiente de diseño experimental:

- Variables principales:
 - 1) Temperatura de colada: 660, 710 y 760 °C .
 - 2) Porcentajes de SiC: 5, 10 y 15 %
- Las variables secundarias que se mantuvieron constantes en la fase experimental son:
 - 1) Aleación: A356
 - 2) Agitación: 1000 ± 100 RPM
 - 3) Tiempo de agitación: 2 minutos después de la adición total de SiCp
 - 4) Tamaño de partícula: 38 ± 4 micras
 - 5) Material del Molde Tatur y Placa Metálica: bronce

Por lo tanto, el diseño experimental quedó planteado de la siguiente forma:

| | Aleación base | Compósito | | |
|----------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| Temperatura de Colada (°C) | A356 | 5 % SiC | 10 % SiC | 15 %SiC |
| 660 | (A356T1) | (SiC5T1) | (SiC10T1) | (SiC15T1) |
| 710 | (A356T2) | (SiC5T2) | (SiC10T2) | (SiC15T2) |
| 760 | (A356T3) | (SiC5T3) | (SiC10T3) | (SiC15T3) |

Tabla 4. Diseño experimental para determinar % Contracción.

b) Distancia de Alimentación

Las variables a tomarse en cuenta para la evaluación de este parámetro se dan en el siguiente diseño experimental:

- Variables principales:
 - 1) Porcentajes de SiC : 5, 10 y 15 %
 - 2) Geometría del molde para alimentar: barra rectangular de 3x3x18 cm.

- Las variables secundarias que se mantuvieron constantes en la fase experimental son:
 - 1) Aleación: A356
 - 2) Agitación: 1000 ± 100 RPM
 - 3) Tiempo de agitación: 2 minutos después de la adición total de SiCp
 - 4) Tamaño de partícula: 38 ± 4 micras
 - 5) Material del Molde: arena para moldeo en verde
 - 6) Temperatura de colada: 760 °C

Por lo tanto, el diseño experimental quedó planteado de la siguiente forma:

| | Aleación base | Compósito | | |
|-----------------|----------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| Material | A356 | 5 % SiC | 10 % SiC | 15 %SiC |
| | (A356) | (A356/SiCp/5p) | (A356/SiCp/10p) | (A356/SiCp/15p) |

Tabla 5. Diseño experimental para determinar Distancia de Alimentación.

2.3 Material y Equipo.

Los materiales y el equipo utilizados en esta investigación, ya se mencionaron anteriormente, sin embargo, a continuación se listan de forma ordenada, dependiendo de su aplicación:

Material:

- 1) Aleación: A356, cuya composición química se muestra en la siguiente tabla:

| Elemento | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Zn | Sr | Otros | Al |
|----------|-----|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| % Peso | 6.7 | 0.41 | 0.29 | 0.12 | 0.39 | 0.44 | ---- | 0.07 | 91.58 |

Tabla 6. Composición química de la aleación matriz A356

- 2) Agente reforzante (SiCp), con un tamaño de partícula promedio de 38 ± 4 micras.
- 3) Pintura refractaria
- 4) Gas Argón
- 5) Agua destilada
- 6) Arena para moldeo en verde, la cual está constituida por una mezcla que contiene:
 - 90% Arena sílica (No. AFS110) y 10% de Bentonita (La bentonita utilizada se encuentra en una proporción 6% Sódica y 4% Calcica)
 - Humedad de 6%

Capítulo 2. Diseño Experimental

Equipo:

a) Equipo de fabricación:

- Horno eléctrico de resistencia
- Crisol A10
- Multímetro
- Termopar tipo “k” (Cromel-Alumel)
- Termómetro de contacto
- Cronómetro
- Pinzas para crisol
- Maneral para crisol
- Pinzas para Molde Tatur
- Propela de acero para agitación
- Taladro (para agitación)
- Tacómetro
- Cucharilla para limpieza de metal líquido
- Lanza para desgasificar
- Pintura refractaria
- Guantes de asbesto
- Careta
- Bata

b) Equipo para fabricación de las piezas

- Molde metálico de bronce (Molde Tatur)
- Placa metálica de bronce (base para Molde Tatur)
- Placa-Modelo de madera (para Distancia de Alimentación)
- Cajas de aluminio para moldeo

c) Equipo para evaluación de % Contracción y Distancia de Alimentación:

- Cierre cinta
- Balanza granataria
- Canastilla metálica (para sostener las piezas a evaluar)
- Recipiente con agua destilada
- Lijas (especificación 200, 320, 400 y 600)
- Paño (para pulido fino)
- Equipo Ultrasónico

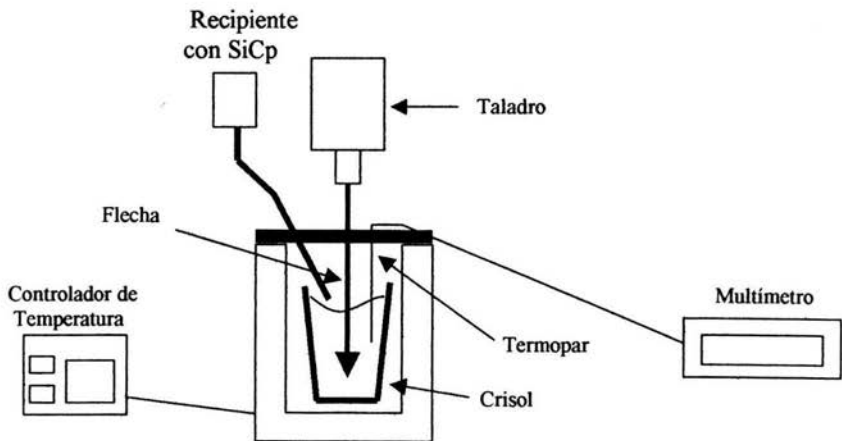


Figura 25. Equipo para fusión de la aleación A356 y fabricación de compuesto A356/SiCp.

2.4 Procedimiento

Preparación de los moldes:

- a) % Contracción: el Molde Tatur y la Placa Metálica se pintaron con refractario, para evitar un desgaste prematuro por el vertido del metal caliente.
- b) Distancia de Alimentación: para los moldes de arena, la compactación se realizó manualmente, procurando que fuera constante para todos los moldes.

Técnica de Fusión:

- 1) Se cargó el crisol con 1.0 Kg de aleación A356.
- 2) El metal se fundió 20-30 °C por encima de la temperatura de colada.
- 3) Una vez que se obtuvo dicha temperatura, se incorporó el SiCp (previamente calentado a una temperatura de 450 °C) agitando continuamente a una velocidad de 1000 RPM, por un tiempo de 2 minutos después de adicionar todo el SiCp.
- 4) Inmediatamente después se desgasificó con gas argón por un tiempo de 2 minutos.
- 5) Totalmente desgasificado el metal líquido, se procedió a limpiar la superficie para retirar la escoria.
- 6) Finalmente se vació el metal líquido dentro del respectivo molde.
 - a) % Contracción: el molde Tatur, se precalentó a una temperatura de 200 °C.
 - b) Distancia de Alimentación: para los moldes de arena, se tuvo cuidado de vaciar a una velocidad de flujo constante.
- 7) Una vez solidificada la pieza, se desmoldeó cuidadosamente.
- 8) Se repitió el mismo procedimiento para fabricar para los posteriores niveles de SiCp y la aleación A356.
- 9) Finalmente se procedió a evaluar las piezas fabricadas.

2.5 Evaluación de las piezas fabricadas.

a) Evaluación del rechupe generado para determinar el % Contracción

Se utilizó una balanza analítica y una balanza granataria para medir el peso de la pieza en el aire y en el agua respectivamente. La forma para evaluar el peso de las piezas del molde Tatur en la balanza granataria se muestra en la siguiente figura:

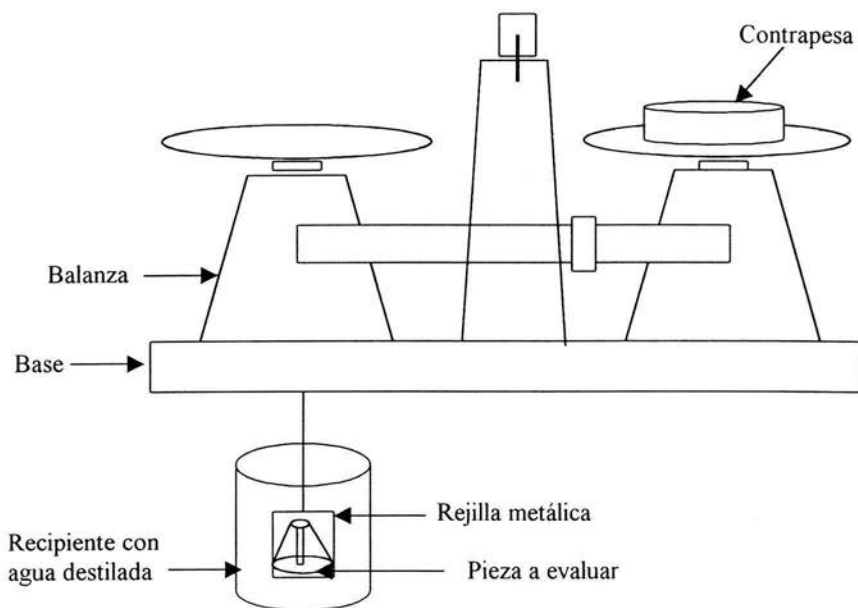
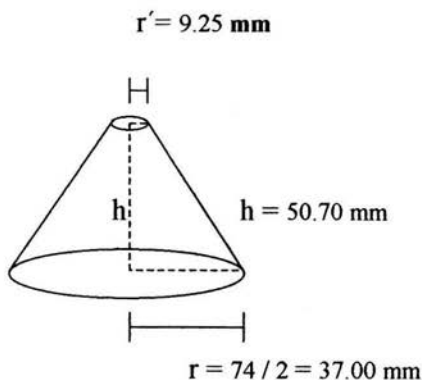


Figura 26. Esquema del equipo utilizado.

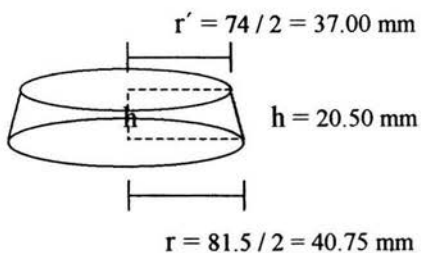
a. I Para obtener el % Contracción se realizaron los siguientes cálculos:

1) Cálculo del volumen teórico de la pieza

Cono truncado ó Tronco del Cono Circular Recto # 1



Tronco del Cono Circular Recto # 2



$$V_{\text{Tronco}} = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + r'^2 + r r')$$

donde:

r = Radio de la base mayor

r' = Radio de la base menor

h = Altura del cono

$$\therefore V_{\text{Total}} = V_{\text{Tronco \# 1}} + V_{\text{Tronco \# 2}}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow V_{\text{Total}} &= 95398.23 \text{ mm}^3 + 97405.20 \text{ mm}^3 = 192803.44 \text{ mm}^3 \\ &= 192.80 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

2) Calculo del volumen experimental de la pieza del Molde Tatur

$$V_c = \frac{(M_a - M_b)}{\rho}$$

donde:

V_c = Volumen de la pieza (cm^3)

M_a = Peso de la pieza en el aire (g)

M_b = Peso de la pieza en el agua destilada (g)

ρ = Densidad del agua destilada ($1\text{g}/\text{cm}^3$)

3) Calculo del porcentaje de contracción total

$$\%C = \frac{(V_t - V_c)}{V_t} \times 100$$

donde:

$\% C$ = Porcentaje de contracción

V_t = Volumen teórico (cm^3)

V_c = Volumen de la pieza (cm^3)

a. II Corte y preparación metalográfica de la pieza vaciada en el Molde Tatur

Las piezas fueron cortadas transversalmente, posteriormente se sometieron a desbaste, pulido fino y finalmente se fotografiaron, para evaluar la forma del rechupe generado. En la siguiente figura se muestra la forma y localización del corte:

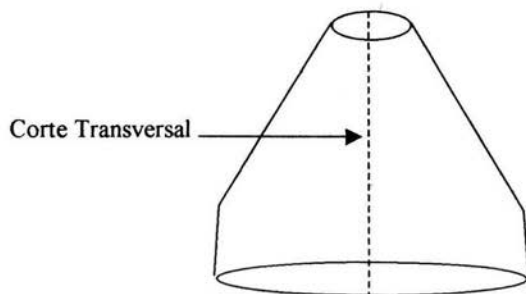


Figura 27. Corte de la pieza del Molde Tatur.

b) Evaluación de la Distancia de Alimentación Efectiva.

b. I Evaluación de la Distancia de Alimentación de la barra.

Para cada una de las piezas se realizó un corte transversal para eliminar el alimentador de la barra solidificada, la cual a su vez se cortó de forma transversal y longitudinal, posteriormente se sometieron a desbaste, pulido fino y finalmente se fotografiaron. En la siguiente figura se muestra la forma de los cortes:

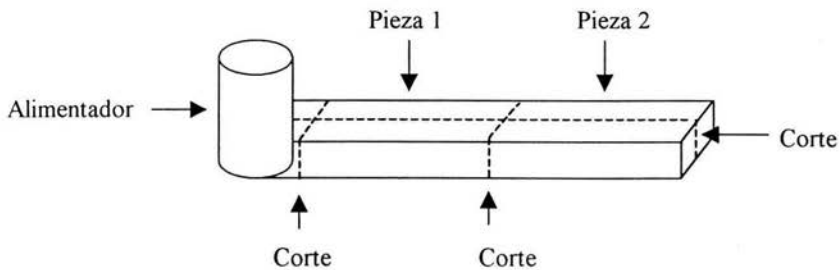
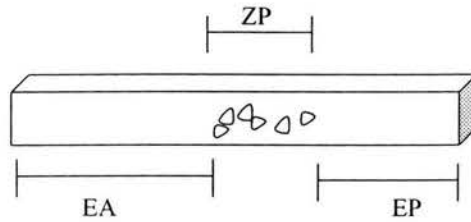


Figura 28. Corte de las barras

El criterio para determinar la “Distancia de Alimentación Efectiva” se deduce de la siguiente forma:

Se tiene una cierta distancia de alimentación por efecto del alimentador y otra distancia de alimentación por efecto de la punta del alimentador. En la siguiente figura se puede observar que se puede tener una zona intermedia la cual presenta porosidad, dicha zona representa la distancia en la cual debe de evitarse trabajar para evitar posibles defectos en las piezas de fundición.



donde:

EA = Efecto del alimentador

EP = Efecto de la punta

ZP = Zona que presenta porosidad

Figura 29. Evaluación de la Distancia de Alimentación Efectiva en la barra

Por lo tanto, dichas distancias se suman para obtener la "Distancia de Alimentación Efectiva".

$$\text{DAE} = \text{Distancia de Alimentación Efectiva} = \text{EA} + \text{EP}$$

b. II Evaluación del % Contracción del alimentador

En este caso los alimentadores fueron cortados y desbastados, de manera que tuvieran una geometría cilíndrica, tal como se muestra en la siguiente figura:

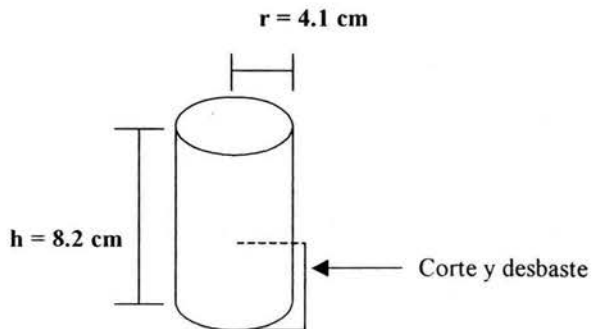


Figura 30. Alimentador de la barra.

Para calcular el % Contracción de cada alimentador, se utilizó el mismo procedimiento y equipo explicado anteriormente para las piezas fabricadas con el “Molde Tatur”, a excepción del cálculo teórico del volumen, el cual se presenta a continuación.

$$V_{\text{Cilindro}} = \pi r^2 h$$

donde :

r = Radio del cilindro o alimentador

h = Altura del cilindro o alimentador

$$\Rightarrow V_{\text{Cilindro}} = \pi (2.05\text{cm})^2(8.1\text{cm}) = 106.94 \text{ cm}^3$$

b. III Evaluación del % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra.

Una vez obtenidos los cálculos y resultados de % Contracción para los experimentos del “Molde Tatur” y % Contracción del alimentador, se procede a utilizarlos para calcular el % Metal Faltante para alimentar a la barra y el % Metal Enviado a la barra, tomando en cuenta las siguientes expresiones teóricas:

“ **Volumen teórico final del alimentador**”

$$V_{\text{TFA}} = V_A - \beta (V_A + V_P)$$

donde: - **V_A = Volumen del alimentador**

- **β = Contracción (%Contracción/100)**

- **V_P = Volumen de la pieza**

“ **Volumen experimental final del alimentador**”

$$V_{\text{EFA}} = V_A - \beta (V_A)$$

donde - **V_A = Volumen del alimentador**

- **β = Contracción (%C.A./100)**

Con los resultados de las expresiones anteriores se obtiene una diferencia entre el volumen teórico y el volumen experimental obtenido, por lo que es posible determinar un porcentaje de metal faltante y metal enviado a la barra, (ver anexo 2).

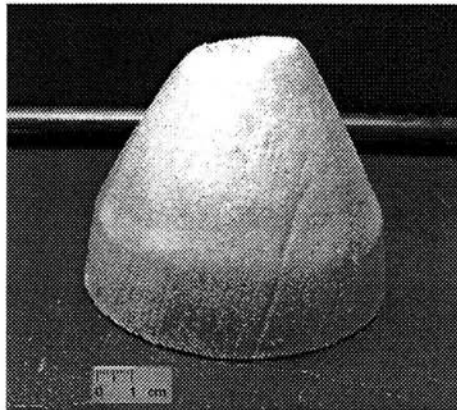
Capítulo 3. Resultados y Discusión.

3.1 Resultados obtenidos en la fase experimental.

Los resultados obtenidos para la aleación A356 y el compuesto A356/SiCp con diferentes niveles de SiCp, se presentan en dos partes, en la primera parte se muestra el % Contracción, y en la segunda parte, la Distancia de Alimentación y % Metal Demandado, así como también el análisis y discusión respectiva.

a) % Contracción.

En la fotografía 3, se muestra una pieza típica vaciada en el Molde Tatur, en la cual se puede apreciar la forma del rechupe principal (observar la punta del cono que esta incompleta debido al rechupe).



Fotografía 3. Pieza típica vaciada en Molde Tatur.

En las tablas 7 Y 8, se muestran los resultados obtenidos para las piezas fabricadas, de manera que es posible observar el comportamiento del % Contracción, por efecto de las variables experimentales definidas.

Capítulo 3. Resultados y Discusión.

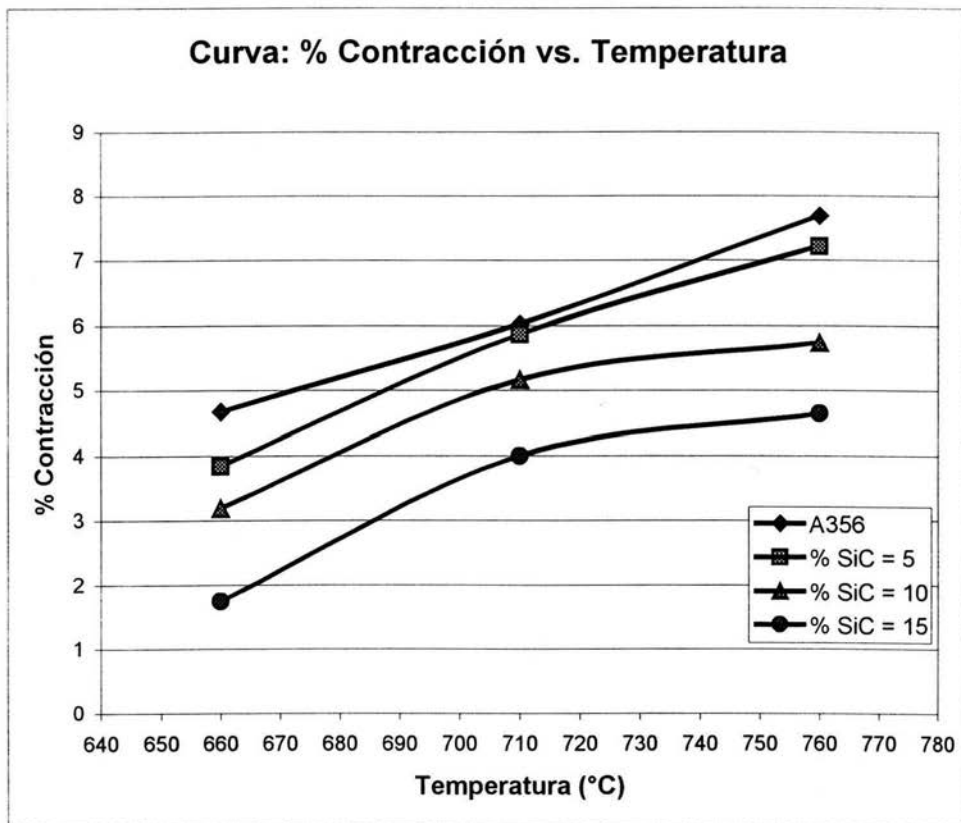
| Material | # Prueba | Peso de la pieza en el aire (g) | Peso de la pieza en el agua (g) | Densidad del agua (g/cm ³) | Volumen experimental de la pieza (cm ³) | Volumen teórico de la pieza (cm ³) | % Contracción | % Contracción (Promedio) |
|----------|----------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|--|---------------|--------------------------|
| A356T1 | 1 | 495.7 | 312.0 | 1.0 | 183.7 | 192.8 | 4.72 | 4.67 |
| | 2 | 495.3 | 311.4 | 1.0 | 183.9 | 192.8 | 4.62 | |
| A356T2 | 1 | 486.5 | 305.8 | 1.0 | 180.7 | 192.8 | 6.28 | 6.02 |
| | 2 | 491.7 | 310.0 | 1.0 | 181.7 | 192.8 | 5.76 | |
| A356T3 | 1 | 476.6 | 298.3 | 1.0 | 178.3 | 192.8 | 7.52 | 7.68 |
| | 2 | 478.5 | 300.8 | 1.0 | 177.7 | 192.8 | 7.83 | |
| SiC5T1 | 1 | 507.6 | 321.5 | 1.0 | 186.1 | 192.8 | 3.48 | 3.84 |
| | 2 | 510.5 | 325.8 | 1.0 | 184.7 | 192.8 | 4.20 | |
| SiC5T2 | 1 | 496.8 | 315.1 | 1.0 | 181.7 | 192.8 | 5.76 | 5.86 |
| | 2 | 492.1 | 310.8 | 1.0 | 181.3 | 192.8 | 5.96 | |
| SiC5T3 | 1 | 484.7 | 305.5 | 1.0 | 179.2 | 192.8 | 7.05 | 7.21 |
| | 2 | 480.5 | 301.9 | 1.0 | 178.6 | 192.8 | 7.37 | |
| SiC10T1 | 1 | 512.5 | 325.1 | 1.0 | 187.4 | 192.8 | 2.80 | 3.19 |
| | 2 | 502.5 | 316.6 | 1.0 | 185.9 | 192.8 | 3.58 | |
| SiC10T2 | 1 | 489.1 | 306.0 | 1.0 | 183.1 | 192.8 | 5.03 | 5.16 |
| | 2 | 483.2 | 300.6 | 1.0 | 182.6 | 192.8 | 5.29 | |
| SiC10T3 | 1 | 487.1 | 304.6 | 1.0 | 182.5 | 192.8 | 5.34 | 5.73 |
| | 2 | 484.0 | 303.0 | 1.0 | 181.0 | 192.8 | 6.12 | |
| SiC15T1 | 1 | 515.1 | 325.5 | 1.0 | 189.6 | 192.8 | 1.66 | 1.74 |
| | 2 | 508.7 | 319.4 | 1.0 | 189.3 | 192.8 | 1.82 | |
| SiC15T2 | 1 | 493.9 | 309.5 | 1.0 | 184.4 | 192.8 | 4.36 | 3.99 |
| | 2 | 499.6 | 313.8 | 1.0 | 185.8 | 192.8 | 3.63 | |
| SiC15T3 | 1 | 480.7 | 297.0 | 1.0 | 183.7 | 192.8 | 4.72 | 4.64 |
| | 2 | 482.3 | 298.3 | 1.0 | 184.0 | 192.8 | 4.56 | |

Tabla 7. % Contracción en función de la Temperatura de colada, para la aleación A356 y los compósitos.

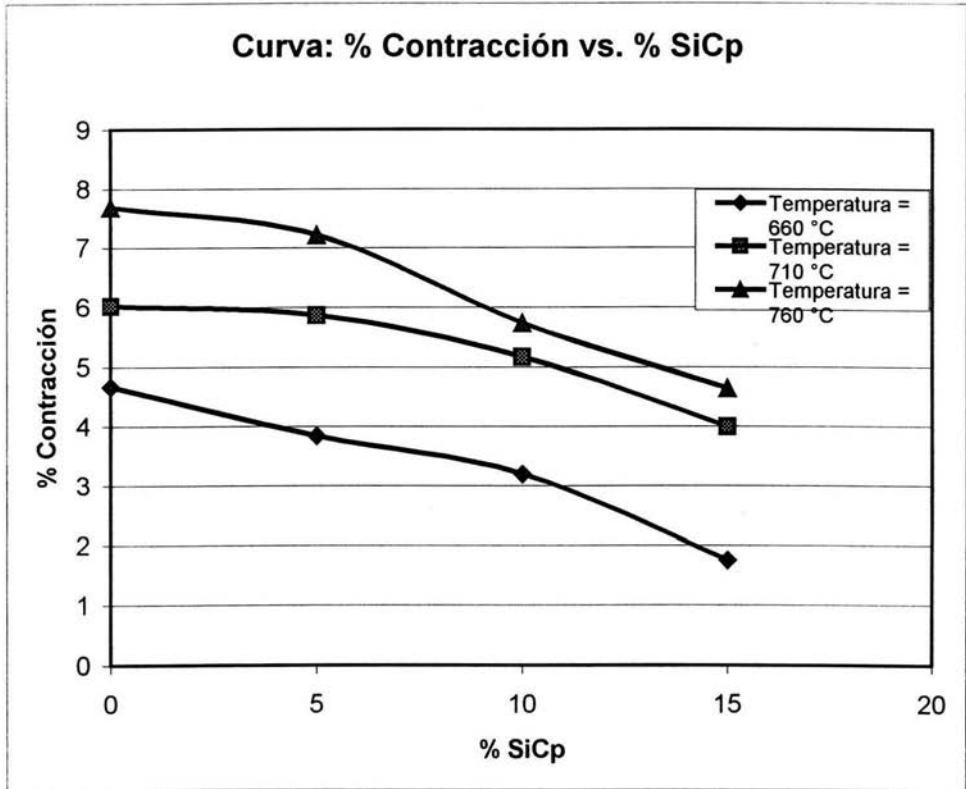
| % CONTRACCIÓN | | | | |
|----------------------------|---------------|---------------------|---------|---------|
| | Aleación base | Compósito A356/SiCp | | |
| Temperatura de colada (°C) | A356 | 5 %SiC | 10 %SiC | 15 %SiC |
| 660 | 4.67 | 3.84 | 3.19 | 1.74 |
| 710 | 6.02 | 5.86 | 5.16 | 3.99 |
| 760 | 7.68 | 7.21 | 5.73 | 4.64 |

Tabla 8. Promedios finales del % Contracción en función de la Temperatura de colada para la aleación A356 y los compósitos.

En la gráfica 1 se observa el comportamiento del % Contracción al modificar la temperatura y en la gráfica 2 al modificar la fracción de SiCp.



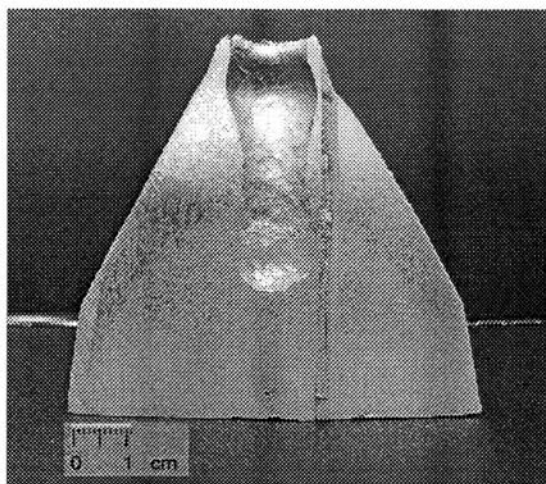
Gráfica 1. Comportamiento del % Contracción en función de la Temperatura de colada, para la aleación A356 y los compósitos.



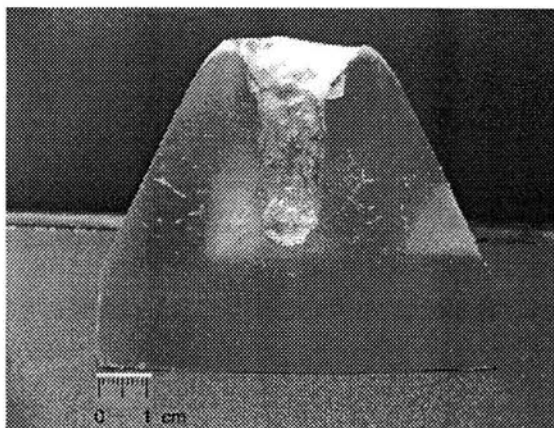
Gráfica 2. Comportamiento del % Contracción en función del % SiCp, para distintas Temperaturas de colada.

- Resultados de la preparación metalográfica.

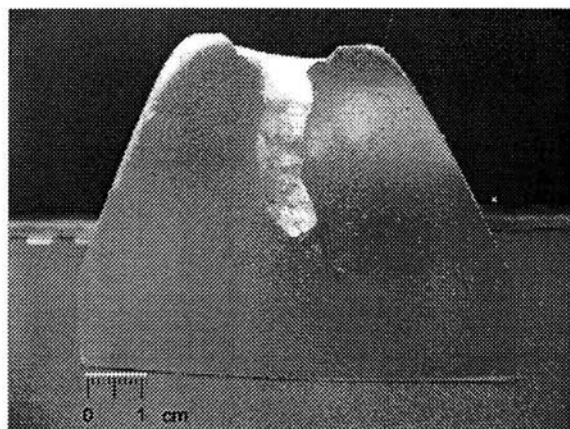
En la siguientes fotografías se muestra la forma y tamaño del rechupe dentro de la piezas vaciadas en el Molde Tatur.



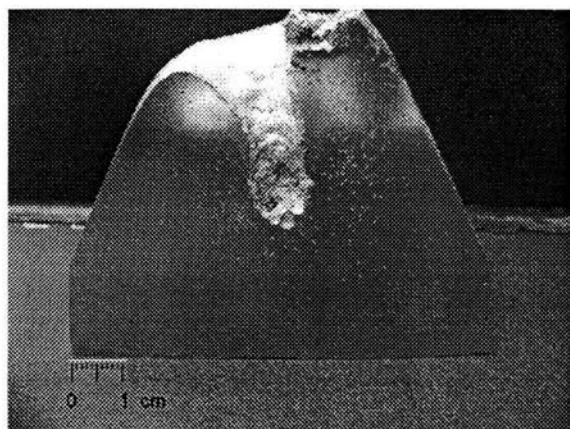
Fotografía 4. Aleación A356, colada de 760 °C



Fotografía 5. Compósito A356/SiCp/5p, colada de 760 °C



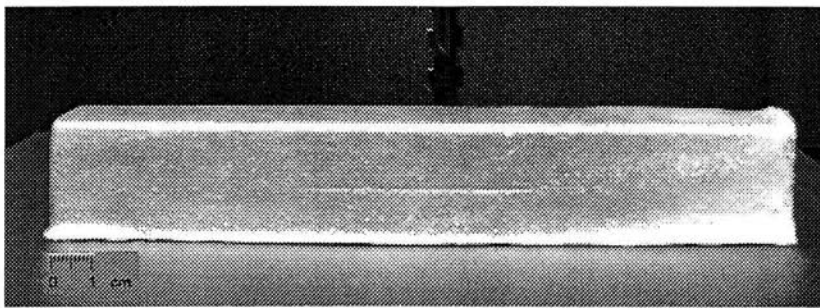
Fotografía 6. Compósito A356/SiCp/10p, colada de 760 °C



Fotografía 7. Compósito A356/SiCp/15p, colada de 760 °C

b) Distancia de Alimentación.

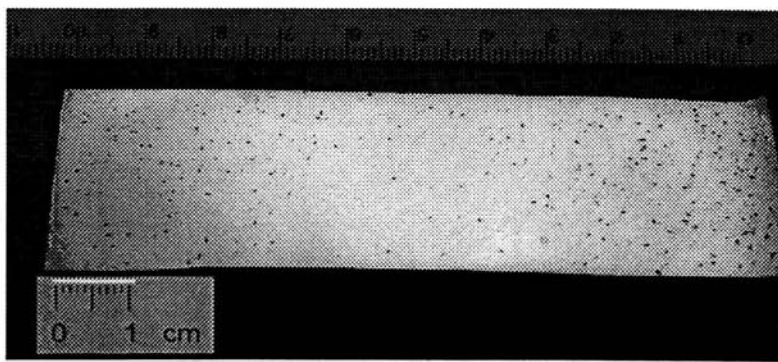
En la fotografía 8. se muestra una barra vaciada en molde de arena, la cual se utilizó para evaluar la Distancia de Alimentación.



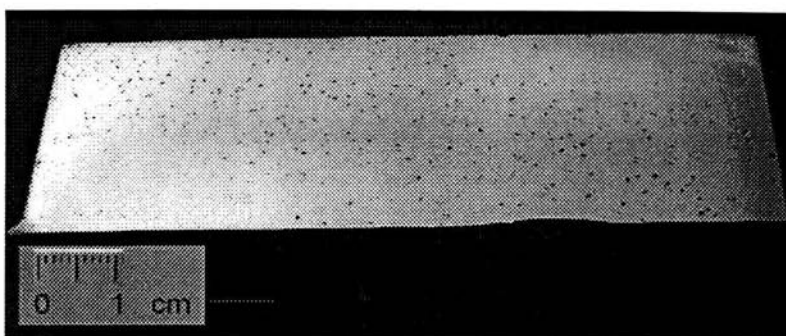
Fotografía 8. Barra vaciada en molde de arena.

- Resultados de la preparación metalográfica.

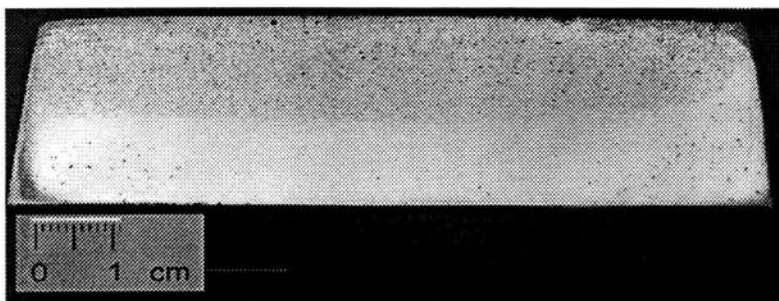
En las siguientes fotografías se muestra la porosidad dentro de las barras vaciadas en moldes de arena, para la aleación A356 y los compósitos. En el capítulo anterior se presentó la forma de los cortes en las barras, por lo que el número de pieza representa la forma en que se encuentra con respecto al alimentador.



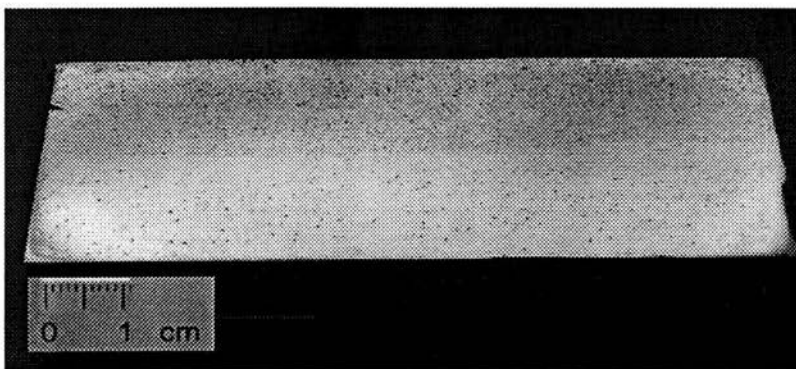
Fotografía 9. Aleación A356 (Pieza # 1).



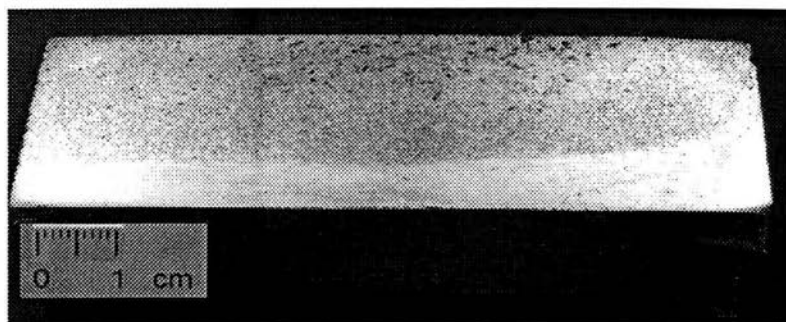
Fotografía 10. Aleación A356 (Pieza # 2).



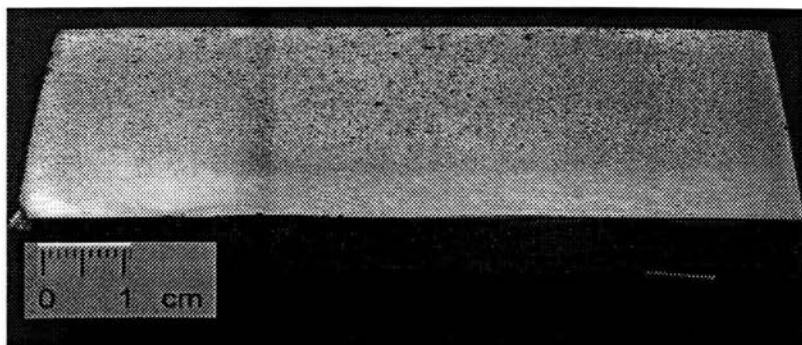
Fotografía 11. Compósito A356/SiCp/5p, (Pieza # 1).



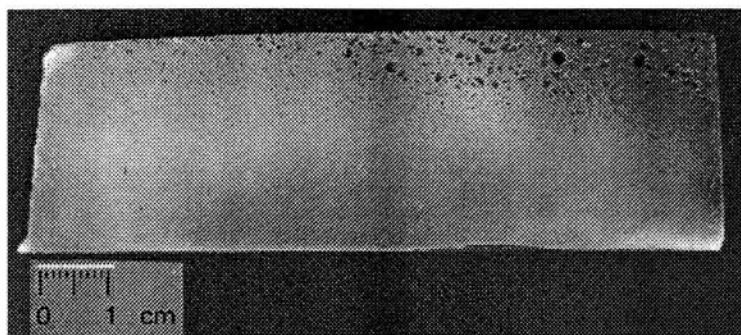
Fotografía 12. Compósito A356/SiCp/5p, (Pieza # 2).



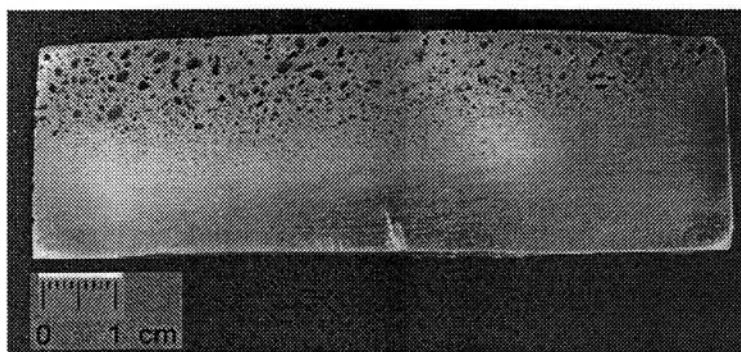
Fotografía 13. Compósito A356/SiCp/10p, (Pieza # 1).



Fotografía 14. Compósito A356/SiCp/10p, (Pieza # 2).



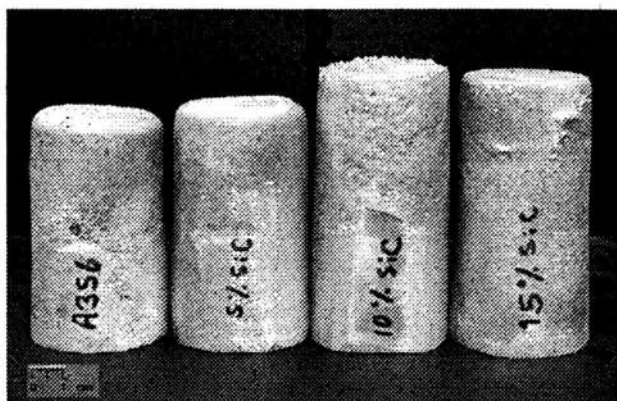
Fotografía 15. Compósito A356/SiCp/15p, (Pieza # 1).



Fotografía 16. Compósito A356/SiCp/15p, (Pieza # 2).

c) % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra.

Un parámetro adicional evaluado fue el % Metal Demandado por la pieza (barra) al alimentador. La fotografía 17 muestra el tamaño final de los alimentadores, a partir de los cuales se evaluó el % Metal Demandado.



Fotografía 17. Comparación del tamaño final de los alimentadores.

En la tabla 9 se muestra el % Contracción que sufrió cada alimentador unido respectivamente a la barra experimental. Así mismo también se presentan los resultados para los cálculos experimentales y teóricos del volumen de metal faltante y enviado a la barra, los cuales se presentan en el anexo 2.

| Material | % Contracción del alimentador | Volumen teórico final del alimentador (cm ³) | Volumen experimental final del alimentador (cm ³) | Volumen faltante para alimentar (cm ³) | % Metal Faltante para alimentar a la barra | % Metal Enviado a la barra |
|---------------|-------------------------------|--|---|--|--|----------------------------|
| A356 | 17.74 | 87.50 | 89.05 | 1.55 | 1.77 | 98.23 |
| A356/SiCp/5p | 15.94 | 88.77 | 91.00 | 2.23 | 2.51 | 97.49 |
| A356/SiCp/10p | 7.35 | 92.77 | 100.30 | 7.53 | 8.11 | 91.89 |
| A356/SiCp/15p | 7.45 | 95.71 | 100.19 | 4.48 | 4.68 | 95.32 |

Tabla 9. % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra para la aleación A356 y los compósitos.

3.2 Discusión de Resultados.

La discusión de resultados para una aleación A356 y compuesto A356/SiCp con diferentes niveles de SiCp, para cada uno de los parámetros evaluados se comentan en los párrafos siguientes:

a) % Contracción.

Primeramente, es importante mencionar que la aleación de A356 tiene un punto de fusión de 620 °C, por lo que las temperaturas de coladas son en realidad temperaturas de sobrecalentamiento de 40 °C, 90 °C y 140 °C respectivamente.

Aleación A356:

En los resultados tabulados y graficados, se observa claramente que a mayor temperatura de colada, se produce un mayor % Contracción, gráfica 1. Este comportamiento se debe, a que el metal al pasar del estado líquido al sólido, sufre un rearrreglo de átomos, desde uno con empaquetamiento aleatorio a un arreglo cristalino regular de empaquetamiento significativamente más denso. De acuerdo a la figura 1. (Capítulo. 1. Fundamentos Teóricos), se observa que a medida que aumenta la temperatura de colada y luego enfriar, aumenta el ΔV , del metal al solidificar, lo cual explica el fenómeno mencionado en el párrafo anterior.

Al comparar los resultados experimentales de 7.68 % contra los reportados en la literatura (Ref. 13) que son en promedio de 8.1%, se observa una pequeña diferencia entre estos. Aunque el orden de magnitud es similar, esta diferencia se debe a que posiblemente no se tuvieron las mismas condiciones de fabricación, las cuales no se explican con detalle.

Capítulo 3. Resultados y Discusión.

En la Gráfica 4 (Anexo 1) se observa que la curva teórica o de tendencia, la cual puede utilizarse para predecir el comportamiento del **% Contracción** en función de la **temperatura de sobrecalentamiento (ΔT)**, tiene la siguiente expresión

$$\text{Aleación A356} \quad \% \text{ Contracción} = 0.0301(\Delta T) - 15.248 \quad R^2 = 0.9965$$

Esta expresión es válida para el intervalo de temperaturas ensayado, así mismo el coeficiente de correlación cercano a uno, es aceptable para predecir dicho comportamiento.

Compósitos A356/SiCp:

En el caso de los materiales compuestos reforzados con partículas de SiCp, se pueden observar dos cosas:

- 1) La disminución de la contracción con la disminución de la temperatura de colada, la cual se puede explicar considerando el mismo mecanismo de la aleación sin reforzar.
- 2) La disminución de la contracción cuando se incrementa la fracción de refuerzo en el compósito, la cual se asocia a la fracción presente de refuerzo en la matriz. En primer lugar se puede atribuir a que conforme aumenta la fracción de SiCp disminuye la fracción en masa de la matriz, lo que sugiere que a menor fracción de metal en la masa total de compósito la contracción será menor. En segundo lugar se considera que el coeficiente de contracción volumétrica del SiCp asociado a la fracción presente, es muy pequeño en comparación con la contracción volumétrica total de la matriz, por lo que no tiene un efecto significativo en la magnitud de la contracción total expresada en %.

El comportamiento para los tres niveles ensayados, se muestra en la Gráfica 1 y 2, así mismo se pueden observar las curvas teóricas en función de la temperatura y la fracción de reforzante, Gráficas 4 y 5 (Anexo 1).

Las curvas teóricas para predecir el comportamiento del % **Contracción** en función de la **Temperatura de sobrecalentamiento (ΔT)**, tienen las siguientes expresiones:

$$5\% \text{ SiC: } \% \text{ Contracción} = -0.0001(\Delta T)^2 + 0.224(\Delta T) - 85.616 \quad R^2 = 1$$

$$10\% \text{ SiC: } \% \text{ Contracción} = -0.0003(\Delta T)^2 + 0.423(\Delta T) - 154.02 \quad R^2 = 1$$

$$15\% \text{ SiC: } \% \text{ Contracción} = -0.0003(\Delta T)^2 + 0.4834(\Delta T) - 177.91 \quad R^2 = 1$$

Las curvas teóricas para predecir el comportamiento del % **Contracción** en función del nivel de %SiCp, tienen las siguientes expresiones:

$$T = 660 \text{ }^\circ\text{C} \quad \% \text{ Contracción} = -0.0062(\% \text{ SiCp})^2 - 0.0958(\% \text{ SiCp}) + 4.621 \quad R^2 = 0.9896$$

$$T = 710 \text{ }^\circ\text{C} \quad \% \text{ Contracción} = -0.0101(\% \text{ SiCp})^2 + 0.0157(\% \text{ SiCp}) + 6.0235 \quad R^2 = 0.9999$$

$$T = 760 \text{ }^\circ\text{C} \quad \% \text{ Contracción} = -0.0062(\% \text{ SiCp})^2 - 0.119(\% \text{ SiCp}) + 7.75 \quad R^2 = 0.9831$$

Estas expresiones son válidas para el intervalo de temperaturas ensayado, así mismo los coeficientes de correlación cercanos a uno, son bastante aceptables para predecir dicho comportamiento.

Resultados de la preparación metalográfica.

Aleación A356:

Las piezas fabricadas con la aleación A356, presentan un rechupe de tipo principal a lo largo de la pieza, el cual aumenta, a medida que la temperatura de colada aumenta, Fotografía 4. Esto se asocia a la geometría del diseño del molde Tatur, el cual promueve el atrapamiento del rechupe principal en la última zona en solidificar y al patrón de solidificación de la aleación.

Es importante mencionar que la presencia de microrrechupes por contracción, la cual es mínima, también se cuantifica con la medición del % Contracción, de manera que no afectan el resultado final.

Compósitos A356/SiCp:

Las piezas fabricadas con compuesto, al igual que la aleación A356, sufrieron rechupe de tipo principal, el cual disminuye, a medida que la temperatura de colada disminuye, y aumenta a medida que el % SiCp disminuye, fotografías 5, 6 y 7. Esto indica que la geometría general del rechupe para esta aleación matriz no cambia significativamente por la presencia de SiCp en las fracciones ensayadas en esta tesis. Finalmente, se observa en todas las muestras que la distribución del reforzante es homogénea en todo el volumen de la pieza Tatur, por lo que no se observan aglomeraciones de SiCp, fotografías 5, 6 y 7, además de que se tiene una mínima presencia de microporosidad.

b) Distancia de Alimentación.

A partir de las muestra cortadas y con preparación metalográfica, se trató de determinar la distancia de alimentación en base al criterio definido en el “Capítulo 2. Diseño Experimental”, sin embargo se tuvieron algunos inconvenientes, los cuales se discuten a continuación.

Aleación A356:

En las fotografías 9 y 10, se observa una distribución de porosidad y microrrechupe disperso a lo largo de toda la barra, la cual representa un problema para tratar de determinar un valor de “Distancia de Alimentación Efectiva”. Dicha distribución no presenta un patrón definido de porosidad, tal como se esperaba obtener según la “Técnica de Evaluación” para este parámetro del Capítulo 2, por lo que no se hace claro el efecto del alimentador y el efecto de la punta de la barra, zonas en las cuales la presencia de rechupes debería ser mínima. Este comportamiento puede explicarse de la siguiente manera:

Capítulo 3. Resultados y Discusión.

Considerando que la aleación A356, es una aleación de rango largo de solidificación, ésta presentar una zona de coexistencia líquido sólido (zona pastosa) significativa, de manera que la pieza después de solidificar presenta rechupe de tipo disperso (Ref. 1). Por lo que, dicha característica dificulta la determinación de la Distancia de Alimentación Efectiva, a diferencia de las aleaciones de rango corto en las cuales es más clara debido al rechupe principal que presentan.

Compósitos A356/SiCp:

En el compuesto A356/SiCp/5p, fotografías 11 y 12, al igual que en el compuesto A356/SiCp/10p, fotografías 13 y 14, se observa la presencia de porosidad a lo largo de toda la barra, aunque en menor proporción que la aleación A356.

En ambos casos se observa que el SiCp se flota en la parte superior de las piezas, provocando una concentración localizada de la porosidad en estas zonas. Dicho comportamiento se debe a que la presencia del reforzante dificulta la alimentación interdendrítica durante la solidificación de la pieza, adicionalmente las partículas de SiCp pueden servir como centros de nucleación para la creación de microporosidad por contracción y por gas. Lo anterior hace que el fenómeno de alimentación sea mucho más complejo en composites que en aleaciones sin reforzar.

Finalmente para el compuesto A356/SiCp/15p, fotografías 15 y 16, se tiene una alta presencia de porosidad, la cual se puede atribuir a la excesiva aglomeración y flotación de SiCp en la parte superior de la barra, provocando un fenómeno aún más complejo durante la solidificación del compuesto con este nivel de refuerzo, el cual es difícil de explicar con los resultados obtenidos en esta tesis.

Por lo tanto, debido a que se tuvieron problemas al determinar valores específicos de distancias de alimentación, en el siguiente capítulo se sugieren algunas recomendaciones.

c) % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra.

Como una alternativa para tratar de explicar el comportamiento del alimentador y la distancia de alimentación en las barras, se propuso calcular el % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra, ya que de este modo se puede conocer la cantidad de metal que puede demandar una pieza con dicha geometría en particular.

En los resultados obtenidos, los cuales se observan en la tabla 9, se tiene que a medida que aumenta el % SiCp disminuye el % Contracción del alimentador, dicho de otra forma se tiene una reducción de metal demandado. En los alimentadores con 10 y 15 % de reforzante, aunque es menor el % Contracción, se pierde dicha tendencia, ya que se esperaría obtener una contracción menor para el alimentador con 10 % de reforzante. Dicho comportamiento sólo puede atribuirse al proceso de fabricación, en el cual posiblemente la temperatura de vaciado no fue la misma ya que la diferencia entre estos dos parámetros es mínima.

Con respecto al cálculo del volumen teórico y experimental de los alimentadores, se observa que se tiene una cantidad de metal la cual faltó alimentar, por lo que también puede relacionarse directamente con la porosidad existente en las barras solidificadas. Dicha cantidad o volumen de metal faltante, el cual se expresa en % Metal Faltante para alimentar a la barra, además del fenómeno de solidificación ya mencionado, interviene en la obtención de piezas sanas o libres de porosidad.

Finalmente se deduce que también se tiene un efecto del correcto diseño del alimentador sobre la cantidad de metal enviado a la barra, ya que en este caso se encontró una deficiencia debido a que la presión metalostática ejercida por el alimentador la cual fue insuficiente. Este problema se debe a la relación H/D del alimentador, y a la característica de que los alimentadores son “alimentadores ciegos”, es decir no se ejerce fuerza alguna por parte de la presión atmosférica. Por lo que no es concluyente este comportamiento y requiere de mayor experimentación.

Capítulo 4. Conclusiones y Recomendaciones.

4.1 Conclusiones.

De acuerdo a los resultados, y discusión de los mismos, las conclusiones obtenidas para evaluar el comportamiento de la aleación A356 y los compósitos A356/SiCp son:

% Contracción.

- La “contracción específica” de la aleación A356 y los compósitos con 5, 10 y 15 % vol. SiCp, aumenta a medida que aumenta la temperatura de sobrecalentamiento.
- La “contracción específica” de los compósitos con 5, 10 y 15 % vol. SiCp, disminuye con el incremento de refuerzo.
- La “contracción específica” de dichos materiales en función de los parámetros estudiados, puede predecirse mediante ecuaciones polinomiales con aceptable certidumbre, considerando el valor del coeficiente de correlación de las expresiones obtenidas.
- El aumento en la temperatura de colada aumenta la “contracción específica”, por lo que en el proceso de fabricación, dicha variable es muy importante para ser considerada en el diseño de alimentadores de piezas coladas de estos materiales.

Distancia de Alimentación

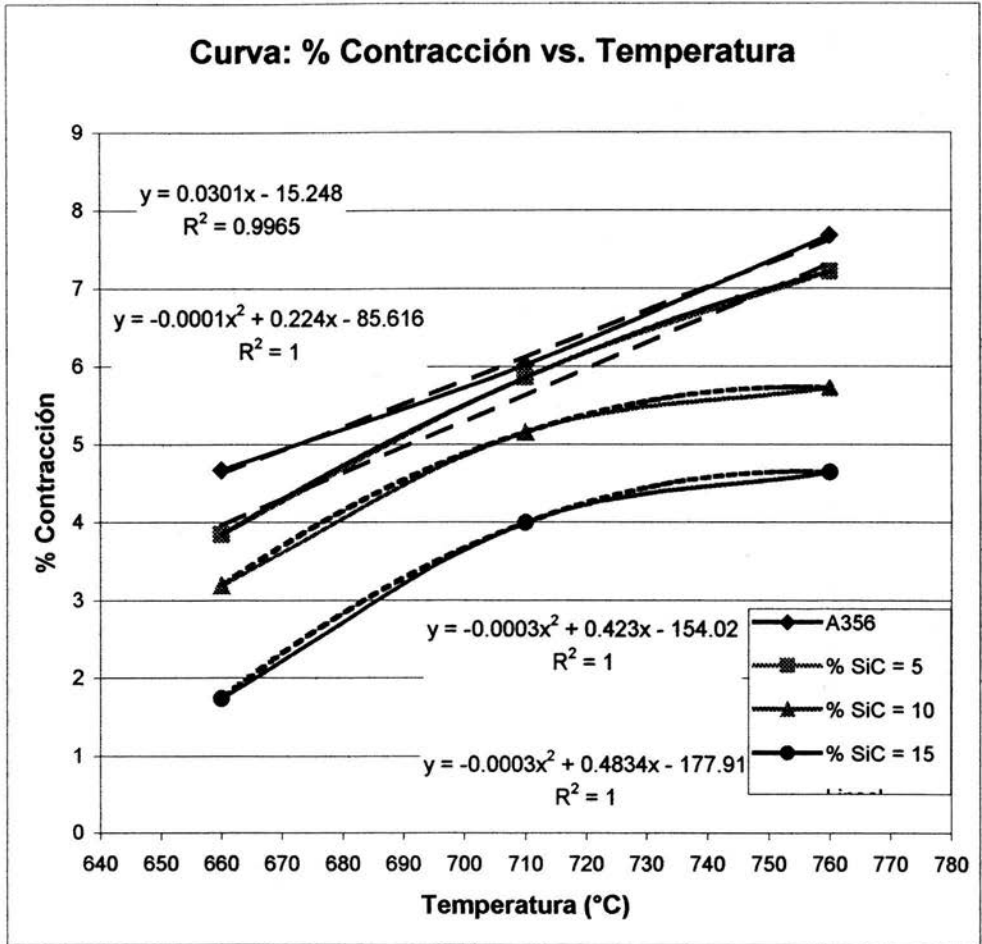
- La presencia de SiCp dificulta la alimentación interdendrítica y promueve la nucleación de poros por contracción durante la solidificación de la aleación matriz, cual dificulta en gran medida una correcta evaluación cuantitativa de la Distancia de Alimentación.
- La demanda de metal líquido durante la solidificación de la pieza bajo estudio se reduce para el caso de los compósitos, en comparación con la matriz sin reforzar (aleación A356).
- Los resultados del volumen final del alimentador, son una adecuada referencia de la magnitud de demanda de metal líquido para piezas de geometría simple como la utilizada en la fase experimental.

4.2 Recomendaciones.

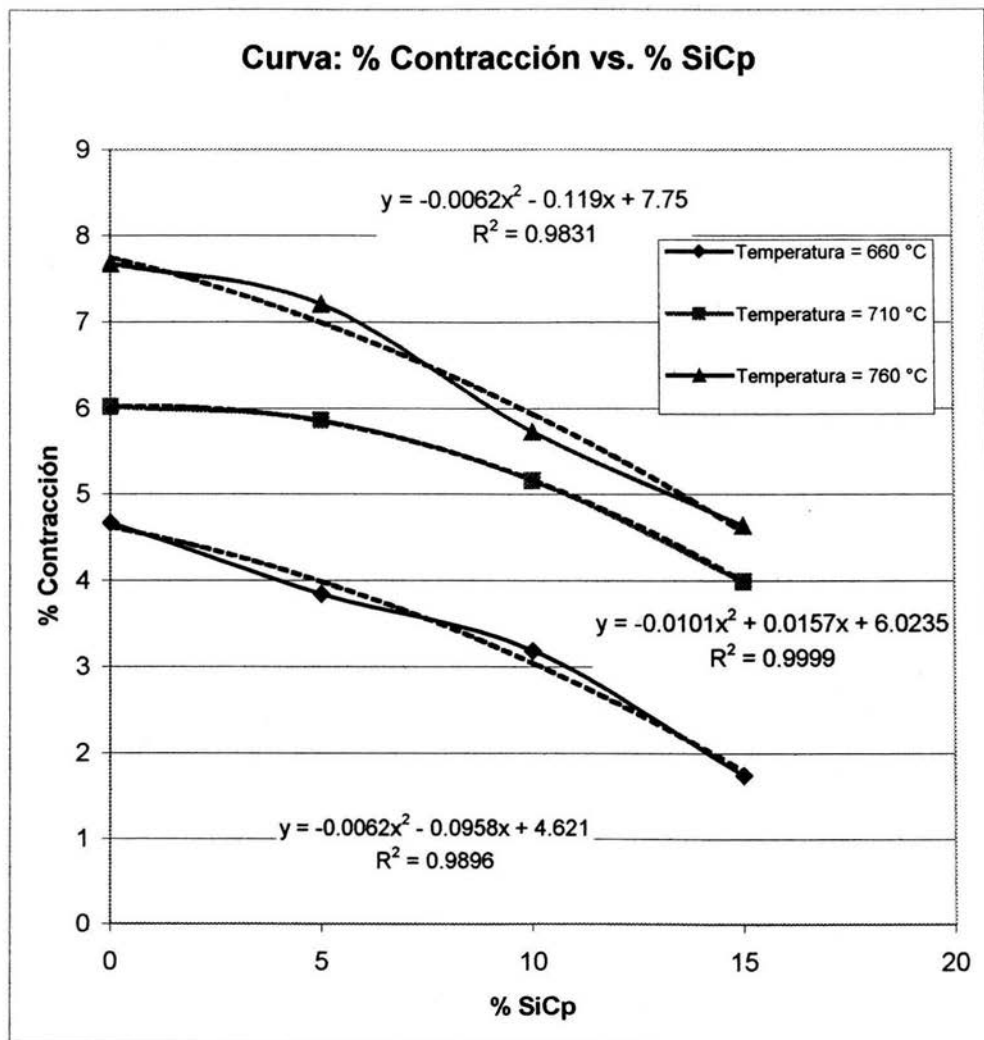
Para determinar Distancia de Alimentación con mayor grado de confiabilidad de los compósitos bajo estudio, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- La sección transversal de la barra rectangular debe tener una dimensión de entre cuatro y seis pulgadas, como lo sugieren algunos autores.
- La longitud de la barra de prueba debe tener una distancia mayor a 6.5 cm, la cual es una Distancia de Alimentación sugerida (Ref. 10), aunque no se especifican condiciones de experimentación.
- Vaciar a temperatura de colada menor de 760 °C, con esto se reduce el tiempo de solidificación y se evitaría la flotación o precipitación de SiCp.
- Aumentar la relación H/D del alimentador a por lo menos un valor de 2.5
- Trabajar con alimentadores abiertos

Anexo 1



Gráfica 4. Comportamiento del % Contracción en función de la Temperatura de colada, para la aleación A356 y los compósitos, con líneas de tendencia



Gráfica 5. Comportamiento del % Contracción en función del % SiCp, para distintas Temperaturas de colada, con líneas de tendencia.

Anexo 2

En el siguiente anexo se presenta la secuencia de calculo para determinar teóricamente el % Metal Faltante para alimentar la barra, así como también el cálculo para determinar el % Metal enviado a la barra desde el punto de vista de la barra fundida.

Volumen del Alimentador

$$D = 4.1 \text{ cm}$$

$$H = 8.2 \text{ cm}$$

$$V_A = (\pi/4)*D^2*H \Rightarrow V_A = (\pi/4)*(4.1 \text{ cm})^2*(8.2 \text{ cm}) = 108.26 \text{ cm}^3$$

Volumen de la pieza ó barra

$$A = 3 \text{ cm}$$

$$H = 3 \text{ cm}$$

$$L = 18 \text{ cm}$$

$$V_P = A*H*L \Rightarrow V_P = 3*3*18 = 162.00 \text{ cm}^3$$

Cálculo del % Metal Faltante para alimentar a la barra y % Metal Enviado a la barra

a T = 760 °C

$$\% \text{ Contracción}_{A356} = 7.68$$

$$\% \text{ Contracción}_{A356/SiCp/5\%} = 7.21$$

$$\% \text{ Contracción}_{A356/SiCp/10\%} = 5.73$$

$$\% \text{ Contracción}_{A356/SiCp/15\%} = 4.64$$

$$\% \text{ Contracción del alimentador}_{A356} = 17.74$$

$$\% \text{ Contracción del alimentador}_{A356/SiCp/5\%} = 15.94$$

$$\% \text{ Contracción del alimentador}_{A356/SiCp/10\%} = 7.35$$

$$\% \text{ Contracción del alimentador}_{A356/SiCp/15\%} = 7.45$$

“ Volumen teórico final del alimentador”

$$V_{TFA} = V_A - \beta (V_A + V_P)$$

- donde: - V_A = Volumen del alimentador
- β = Contracción (%Contracción/100)
- V_P = Volumen de la pieza

Anexo 2.

sustituyendo:

A356

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (7.68/100) (108.26 \text{ cm} + 162.0 \text{ cm})$$

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 20.75 \text{ cm}^3 = \underline{87.50 \text{ cm}^3}$$

A356/SiCp/5%

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (7.21/100) (108.26 \text{ cm} + 162.0 \text{ cm})$$

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 19.48 \text{ cm}^3 = \underline{88.77 \text{ cm}^3}$$

A356/SiCp/10%

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (5.73/100) (108.26 \text{ cm} + 162.0 \text{ cm})$$

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 15.48 \text{ cm}^3 = \underline{92.77 \text{ cm}^3}$$

A356/SiCp/15%

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (4.64/100) (108.26 \text{ cm} + 162.0 \text{ cm})$$

$$V_{TFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 12.54 \text{ cm}^3 = \underline{95.71 \text{ cm}^3}$$

“ Volumen experimental final del alimentador”

$$V_{EFA} = V_A - \beta (V_A)$$

donde - V_A = Volumen del alimentador
- β = Contracción (%C.A./100)

sustituyendo:

A356

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (17.74/100) * (108.26 \text{ cm}^3)$$

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 19.20 \text{ cm}^3 = \underline{89.05 \text{ cm}^3}$$

Anexo 2.

A356/SiCp/5%

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (15.94/100) * (108.26 \text{ cm}^3)$$

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 17.25 \text{ cm}^3 = \underline{91.00 \text{ cm}^3}$$

A356/SiCp/10%

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (7.35/100) * (108.26 \text{ cm}^3)$$

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 7.95 \text{ cm}^3 = \underline{100.30 \text{ cm}^3}$$

A356/SiCp/15%

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - (7.45/100) * (108.26 \text{ cm}^3)$$

$$V_{EFA} = 108.26 \text{ cm}^3 - 8.06 \text{ cm}^3 = \underline{100.19 \text{ cm}^3}$$

“Volumen faltante de metal líquido para alimentar”

$$V_{FMLA} = V_{EFA} - V_{TFA}$$

“% Metal Faltante para alimentar a la barra”

$$\% \text{ MFA} = V_{FMLA} * (100/V_{TFA})$$

“% Metal Enviado a la barra”

$$\% \text{ ME} = 100 - \% \text{ MFA}$$

A356

$$V_{FMLA} = 89.05 \text{ cm}^3 - 87.50 \text{ cm}^3 = \underline{1.55 \text{ cm}^3}$$

$$\Rightarrow \% \text{ MFA} = 1.77 \quad \Rightarrow \% \text{ ME} = 98.23$$

A356/SiCp/5%

$$V_{FMLA} = 91.00 \text{ cm}^3 - 88.77 \text{ cm}^3 = \underline{2.23 \text{ cm}^3}$$

$$\Rightarrow \% \text{ MFA} = 2.51 \quad \Rightarrow \% \text{ ME} = 97.49$$

A356/SiCp/10%

$$V_{FMLA} = 100.30 \text{ cm}^3 - 92.77 \text{ cm}^3 = \underline{7.53 \text{ cm}^3}$$

$$\Rightarrow \% \text{ MFA} = 8.11 \quad \Rightarrow \% \text{ ME} = 91.89$$

A356/SiCp/15%

$$V_{FMLA} = 100.19 \text{ cm}^3 - 95.71 \text{ cm}^3 = \underline{4.48 \text{ cm}^3}$$

$$\Rightarrow \% \text{ MFA} = 4.68 \quad \Rightarrow \% \text{ ME} = 95.32$$

Glosario

Solidificación Progresiva: Se lleva a cabo desde todos los frentes de solidificación hasta el centro térmico de la pieza o la sección correspondiente, de tal forma que induce al atrapamiento de líquido residual en el centro de la pieza provocando zonas rechupadas, lo cual se desea para lograr una buena alimentación.

Solidificación Direccional: Es la solidificación que se inicia en la parte más alejada o extrema del alimentador y avanza en dirección a este, de tal forma que la última parte en solidificar sea el propio alimentador. Es decir, el último líquido que solidifica, se encuentra en el alimentador, quedando ahí atrapado el rechupe, originado por la contracción volumétrica del metal líquido. Este tipo de solidificación beneficia el diseño de alimentadores. Así mismo, es importante mencionar que si la solidificación progresiva se mueve más rápido que la solidificación direccional, huecos por contracción ocurrirán dentro de la pieza.

Tiempo de solidificación: Es el tiempo que transcurre entre el final de la colada y la solidificación total de la pieza.

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.

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.

Desgasificación: Operación llevada a cabo a causa de la fácil solubilidad del hidrógeno en el aluminio. La operación de desgasificación se lleva a cabo con el uso de gases inertes, como por ejemplo nitrógeno gaseoso burbujeando a través del baño metálico.

Bibliografía

- 1) Campbell, John "Castings" Edit. Butterworth-Heinemann
Primera Publicación 1991
- 2) Beeley, P.R. "Foundry Technology" Edit. Butterworth-Heinemann
Segunda Edición 2001
- 3) "Aluminium Casting Technology", 2nd Edition 1993, AFS
- 4) Heine, Loper & Rosenthal, "Principles of Metal Casting", Mc Graw Hill, 1975
- 5) ASM Specialty Handbook, "Aluminium and Aluminium Alloys", Edited by J.R. Davis, 1993, Fourth printing, March 1998
- 6) M. Devaux, "Traité Pratique de Masselottage des Pièces Moulées en Sable", Editions Techniques des Industries de la Fonderie, France 1984
- 7) Velázquez Anselmo F. y Nafarrete Contreras L.A. "Sistemas de Alimentación para la Obtención de Piezas Sanas de Aluminio" Tesis UNAM, México D.F., 1986.
- 8) Bernal Lima Luis, "Alimentación de Piezas Sanas de Acero con Medios Auxiliares", S.M.F.
- 9) Flinn, Richard A., "Fundamentals of Metal Casting", Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1963
- 10) "Second International Conference on Cast Metal Matrix Composites"
Tuscaloosa, Alabama, 4-6 October 1993
- 11) G. P. Reddy and J. Issac, "Rising of Aluminium silicon alloy castings", The British Foundryman; December 1974
- 12) J. L. Davies and V. Kondic, "Mechanisms of formation of shrinkage cavities in castings", The British Foundry man; February 1976, Vol. 69
- 13) D. Argo and J. E. Gruzleski, "Porosity in Modified Aluminium Alloy Castings", AFS Transactions, Vol. 96, 1988, pp. 65-74

- 14) E.N. Pan and C.S. Lin, "Effects of Solidification Parameters on the Feeding Efficiency of A356 Aluminium Alloy", AFS Transactions pp. 90-117
- 15) M. Jeancolas, R. Chevriot and X. Virolle, "Méthode Générale Pour la Détermination des Masselottes", Fonderie 215, Janvier 1964, pp. 1-16
- 16) Defretin, "Calcul des Modules de Solidification apprents es Pieces de Fonderie., Fonderie 384, December 1978.
- 17) Baez Crespo J. C., "Estudio de la contracción por solidificación de Compositos A356/SiCp", Tesis UNAM, México D.F., 1997.
- 18) J.H. Kuo, P.J. Cheng, H.S. Wang, and W.S. Hwang, "Measurement of Density of A356.2 Aluminium Alloy From 25 °C to 750 °C by Modified Archmedes Method", AFS Transactions 2001, 01-060 pp. 461-468