



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

METODO PARA LA EVALUACION DE LA
CONTRACCION EN FASE LIQUIDA EN ALEACIONES

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
Presenta

JUAN CARLOS GUTIERREZ MIRAVETE

México, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

J N D J C E

CAPITULO 1

La contracción durante el enfriamiento de metales puros ó eutécticos y aleaciones.

CAPITULO 2

Defectos de las piezas de fundición debidos a la contracción

CAPITULO 3

Técnicas experimentales ya desarrolladas para la evaluación de la contracción líquida y la selección de una de ellas.

CAPITULO 4

Desarrollo de la técnica seleccionada.

CAPITULO 5

Resultados obtenidos y análisis de los mismos

CAPITULO 6

Conclusiones generales.

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

En la mayoría de las fundiciones que se dedican a fabricación de piezas moldeadas, con aleaciones ferrosas o no ferrosas, generalmente se trabaja con un desconocimiento casi total de los datos exactos sobre la contracción; generando así muchos problemas, los cuales podrían ser minimizados o definitivamente eliminados si se tuviera una idea más real de los efectos que en cuanto a volumen se refiere, se presentan durante la solidificación.

Se tienen datos sobre la contracción basados en experiencias que aunque no son muy exactos, nos pueden dar una idea aproximada de la realidad; sin embargo generalmente reportan el fenómeno de la contracción de una manera global, es decir, sin enfatizar sobre la existencia de las tres etapas distintas de ésta, provocando defectos y fallas en los procesos de fundición tales como : moldes fracturados, fundiciones sin llenar, defectos dimensionales en las piezas, etc. a los cuales se dedica un capítulo completo de esta tesis, ya que en la industria de la fundición, esto genera grandes retrabajos, desperdicios y en general muchos gastos.

A nivel teórico existen pocos datos reportados sobre el valor de la contracción en metales y es más difícil aún encontrar valores específicos sobre cada una de las tres etapas de la contracción como son la líquida, interfásial y sólida.

Considerando lo anterior esta tesis presenta un estudio sobre lo que es la contracción en metales puros o aleaciones, enfocándose a la contracción efectuada durante la fase líquida, así como el desarrollo de un método confiable y práctico para poder evaluarla.

Para dicho objetivo, se presenta una serie de técnicas para la evaluación de dicha contracción, seleccionando la técnica más adecuada, desarrollándola experimentalmente más adelante.

El método debió ajustarse a la situación promedio de cualquier industria o instituto de investigaciones en México, en función del equipo y material disponibles.

Para iniciar este trabajo de tesis se reunió toda la literatura posible sobre el tema "Contracción en fase líquida" dedicando cierto interés a los métodos de evaluación experimentales, sin contemplar el aspecto teórico, atómico de la misma.

De todas las técnicas revisadas se seleccionó una la cual se procedió a reproducir en el laboratorio. De acuerdo a nuestras posibilidades se hicieron ciertas correcciones y modificaciones al método original para hacer más apreciables las determinaciones.

Sin embargo dicha técnica puede generalizarse para cualquier aleación y evaluar así su contracción.

Independientemente de la ayuda que pueda implicar el conocimiento de este fenómeno en el área industrial, desde el punto de vista científico el método podría aportar datos muy interesantes, generando de esta manera material didáctico para carreras relacionadas con la Química, Física, y Metalurgia, contribuyendo así a más largo plazo al desarrollo de tecnología propia.

Es difícil que un estudio completo sobre contracción en fase líquida así como el diseño de un procedimiento para su evaluación, puedan presentarse en un trabajo de tesis de licenciatura, por lo extenso que puede llegar a ser el tema.

Sin embargo con las bases técnicas expuestas aquí, así como los resultados de estas primeras experiencias en el desarrollo de esta ' nueva técnica, podrían generarse estudios más profundos al respecto.

CAPITULO 1

LA CONTRACCION DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE METALES PUROS O EUTECTICOS Y ALEACIONES.

Durante la fabricación de piezas por moldeo de la mayoría de las aleaciones comerciales, así como de metales puros, ocurren cambios significativos de volumen.

Estos cambios pueden ser tan importantes que su no prevención puede provocar fallas irremediables en la fabricación de las piezas.

Dichos cambios de volumen se presentan durante el enfriamiento y solidificación y se dividen en tres tipos de contracción en función de la etapa del enfriamiento con la cual están asociadas y son las siguientes:

- a) Contracción durante el enfriamiento del metal líquido desde su temperatura de colada hasta la temperatura de líquido, esta etapa de la contracción se verifica totalmente en fase líquida llamada por eso "CONTRACCION LIQUIDA".*
- b) Contracción efectuada durante el cambio de fase de líquido a sólido llamada "CONTRACCION DE SOLIDIFICACION".*
- c) Contracción verificada durante el enfriamiento en fase sólida, desde la temperatura de solidificación hasta la temperatura ambiente llamada así "CONTRACCION EN FASE SOLIDA".*

Esta clasificación está en función de la temperatura en la cual ocurre cada contracción y tiene límites y comportamientos bien definidos.

Esta parte estará enfocada a la contracción líquida; sin embargo, de una manera general, se evaluarán los tres tipos de contracción.

En la tabla 1.1 se muestran los porcentajes de volumen contraído con respecto al volumen del metal o aleación a temperatura ambiente, para cada una de las tres contracciones, en metales como Cobre, Aluminio, Magnesio, Plomo, Zinc y algunas de sus aleaciones.

Como podemos apreciar en dicha tabla, para este tipo de metales y en general, casi para cualquier metal la contracción de volumen durante el enfriamiento va desde un 5 o 10 % hasta un 15 % dependiendo del tipo de aleación. Se puede observar también que en la mayoría de los casos la contracción llevada a cabo durante el cambio de fase es la más significativa siendo en muchos casos el 50 % o más del total de la contracción.

En el último lugar en importancia numérica tenemos la contracción en fase líquida. Aunque para muchas de las aleaciones no se tienen datos del valor numérico de la contracción líquida, un pequeño análisis de los pocos datos disponibles nos indica que no debe despreciarse ya que, como podemos observar en el caso de las aleaciones Cobre-Estaño, dicha contracción representa un 16 % de la contracción total. Sin embargo, por el poco conocimiento al respecto, en la mayoría de los casos no se toma en cuenta esa contracción, lo cual provoca defectos graves en piezas de fundición.

La contracción de volumen específico en las tres etapas en las cuales se lleva a cabo, es ocasionada por ciertos fenómenos que se verifican durante el enfriamiento, como es el hecho de que las vibraciones de los átomos constituyentes del material disminuyan, reagrupándose entre sí.

Lo anterior ocurre en todos los metales excepto en algunas fundiciones de hierro gris y bismuto en las cuales intervienen otros factores más complicados, como es el de la precipitación de grafito fuera

de la red cristalina, ocupando mayor volumen.

A continuación trataremos de encontrar alguna relación entre los datos de contracción reportados en la literatura y la temperatura de fusión.

En la tabla 1.2 se muestran datos de temperatura de fusión de algunos metales puros y su porcentaje de contracción global.

ALEACION O METAL PURO	CONTRACCION LIQUIDA	CONTRACCION DE SOLIDIFICACION	CONTRACCION SOLIDA
Cobre	2.1	4.5	7.3
Aluminio	1.4	6.5	5.7
Magnesio	1.4	4.4	5.8
Zinc	-	4.9	4.1
Plomo	-	3.5	3.1
Cu/AL 93/7	1.3	4.8	5.8
Cu/AL 90/10	-	4.6	8.0
Cu/Sn 92/8	1.5	5.8	6.3
Cu/Sn 82/18	1.4	4.9	5.5
Cu/Zn 60/40	2.3	5.0	6.8
Cu/Zn 80/20	2.2	4.8	6.0
Cu/Ni 67/32	-	7.3	8.8
AL/Cu 92/8	-	8.7	4.9
AL/Mg 90/10	1.3	7.5	4.4
AL/Mg 75/25	1.2	6.8	3.8
Mg/AL 91/9	1.3	5.6	4.0

TABLA 1.1

Porcentaje en volumen de las contracciones verificadas durante el enfriamiento en algunas aleaciones no ferrosas. Ref. "Volumen Changes during Freezing of ductile Iron" (1).

Aparentemente mientras mayor sea la temperatura de fusión del material mayor es el porcentaje de contracción, como se puede ver en la siguiente tabla (1.2), sin embargo esto no sucede en todos los casos.

METAL	TEMPERATURA DE FUSION °C	% CONTRACCION GLOBAL
Cu	1083	13.9
Al	660	13.6
Mg	650	11.6
Zn	419	9.0
Pb	327	6.6
Bi	271	3.4
Sn	232	4.5

Tabla 1.2 Temperaturas de fusión y porcentaje de contracción global en algunos metales. Ref. "Volumen Changes during Freezing of Ductil Iron". (1)

Cuando se alean metales, intervienen otro tipo de fenómenos más complicados relacionados con el tipo de enlace de los elementos aleantes lo cual dificulta la tarea de obtener alguna relación matemática entre estas dos variables.

Para mostrar de una forma más clara lo anterior se analizará el caso específico del comportamiento de estas dos variables para el Cobre y Aluminio y algunas de sus aleaciones, estos datos se muestran en la tabla 1.3

METAL O ALEACION	% CONTRACCION GLOBAL
Cu	13.9
AL	13.6
Cu/AL 85/15	12.4
Cu/AL 87.5/12.5	13.1
Cu/AL 90/10	12.6
Cu/AL 93/7	11.9

Tabla 1.3 % de contracción global para algunos metales y aleaciones.
 Ref. "Volumen Changes during freezing of Ductil Iron" (1).

En la figura 1.1 se puede apreciar la relación que existe entre el volumen específico del acero y su temperatura, durante el enfriamiento.

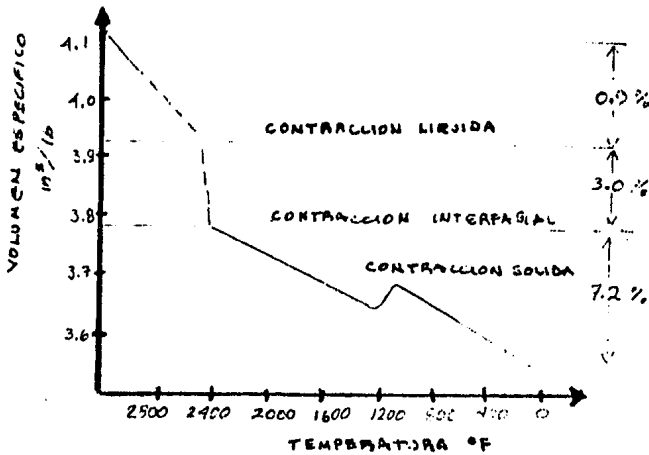


Figura 1.1 Cambio de volumen específico durante la solidificación de un acero. Ref. "Volumen Changes during freezing of Ductil Iron" (1).

A partir de la figura anterior y por medio de unos cálculos sencillos podemos tener una idea de la variación de volumen con respecto al cambio de temperatura para cada zona.

La zona en la cual el metal se encuentra en fase líquida está limitada en la parte superior por una temperatura de 100 °F de sobre-calentamiento y por la parte inferior está limitada por la temperatura a la cual inicia la solidificación, esta zona abarca aproximadamente 0.9 % con respecto al volumen inicial y aproximadamente el 28 % con respecto a la contracción total considerándola desde $1.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{Kg}$ hasta $1.28 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{Kg}$. A la contracción que ocurre en esta zona dedicaremos toda nuestra atención en los siguientes capítulos.

Considerando que la variación de volumen específico con respecto a la temperatura es directamente proporcional podríamos evaluar la rapidez con la que cambia el volumen específico respecto a la temperatura. De acuerdo a la pendiente que tenga la recta que se encuentra dentro de la zona líquida.

La rapidez obtenida es de alrededor de $1.44 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg} \text{ } ^\circ\text{F}$ que nos indica que por cada °F que disminuamos la temperatura a partir de 100 °F de sobre-calentamiento el volumen específico disminuirá $1.44 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{Kg}$.

Efectuando un análisis parecido para las dos zonas siguientes que son la zona comprendida dentro del rango de temperaturas en el cual se efectúa la solidificación y la zona comprendida desde la temperatura en que finaliza la solidificación hasta 400 °F aproximadamente, se obtuvieron los datos de la tabla 1.4 en la cual podemos comparar las distintas velocidades de contracción en cada zona.

TIPO DE CONTRACCION	VELOCIDAD DE CONTRACCION $\text{m}^3 / \text{Kg} \text{ } ^\circ\text{F}$	% RESPECTO AL VOLUMEN INICIAL
En fase líquida	1.44×10^{-8}	0.9
En el cambio de fase	3.97×10^{-8}	3.0
En fase líquida	$.361 \times 10^{-8}$	7.0

Tabla 1.4 Comparativos de velocidad de contracción y porcentajes.

Para interpretar más claramente las diferencias entre los tres tipos de contracción podríamos imaginar un molde en el cual se tiene contenido un metal fundido a una temperatura 100 °F por encima de su temperatura de fusión, y suponiendo que de alguna manera se pueda en friar el molde lenta y homogéneamente de tal forma que la extracción de calor sea la misma en cualquier parte de su superficie se obtendría lo siguiente:

Originalmente el nivel del metal en el molde estará situado en L_0 , conforme enfriemos y nos acerquemos al punto de solidificación del metal el volumen disminuirá hasta L_1 , cuando llegemos a la temperatura de solidificación. Inmediatamente después continuará la contracción durante el cambio de fase y el metal bajará al nivel L_2 , si continuamos el enfriamiento la disminución de volumen será sobre toda superficie hasta llegar a un nivel L_3 . Haciendo un pequeño cálculo para cuantificar el porcentaje de contracción líquida se tiene lo siguiente:

$$\frac{L_0 - L_1}{L_0 - L_3} \times 100 = 0.9$$

de la misma manera se puede evaluar el porcentaje de contracción en solidificación y sólida obteniendo así :

$$\frac{L_1 - L_2}{L_0 - L_3} \times 100 = 3 \quad \text{y} \quad \frac{L_2 - L_3}{L_0 - L_3} \times 100 = 6$$

La representación esquemática de lo anterior se muestra en la figura 1.2. Aparentemente podría pensarse que la contracción en fase sólida es la más importante puesto que es la única que no depende de la forma del m olde, sin embargo el porcentaje que representa tanto la contracción en fase líquida como la contracción durante el cambio de fase nos confirma que no debemos menospreciarlas de ninguna manera.

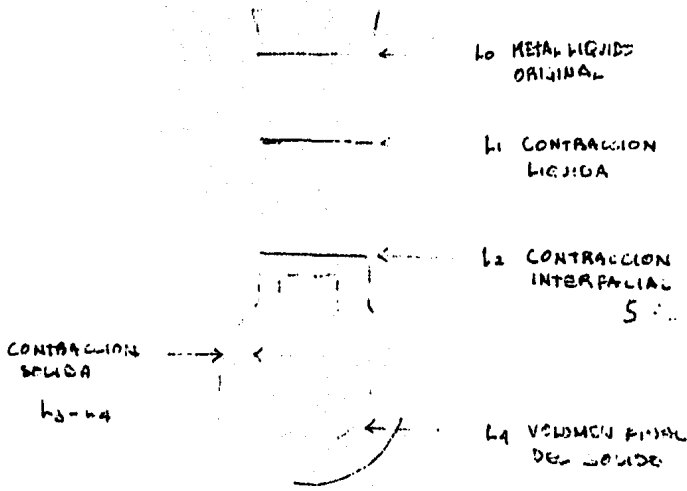


Figura 1.2 Representación esquemática de la contracción.
 Ref. "Volumetric Changes During the Freezing of
 Hypereutectic Ductile Irons" (2).

Las diferencias más significativas entre los metales puros y eutéticos con respecto a las aleaciones metálicas no eutéticas y que por ende son las más relacionadas con el efecto de contracción son las siguientes:

La temperatura de solidificación en un metal puro o en un eutético tienen una fusión completa esto significa que a una presión constante tiene una temperatura y sólo una a la cual solidifica o se funde, dependiendo si se calienta o se enfría. De tal forma que al enfriar un metal puro o eutético desde el estado líquido hasta un pequeño gradiente por debajo de su temperatura de solidificación lo tendremos completamente sólido y por encima de ese gradiente continuará en fase líquida.

En cambio para una aleación existe un rango de temperatura en el cual hay una mezcla de cristales sólidos nadando en el líquido, a medida que se reduce la temperatura la cantidad de cristales aumenta, el líquido disminuye y la mezcla se espesa, es decir se hace pastosa hasta que se solidifica, se dice entonces que tiene una solidificación pastosa.

Existe cierto tipo de aleaciones que presentan un amplio rango de solidificación que llega a ser de varios centenares de grados.

Otra diferencia muy importante es el hecho de que aunque en ambos casos existe durante el proceso de solidificación los tres tipos de contracción (líquida, solidificación y sólida) existe una diferencia en la contracción por solidificación. Esto puede observarse en las figuras 1.3 y 1.4, en las cuales se grafica el volumen de una masa M en función de la temperatura durante el enfriamiento de un metal puro ó eutéctico y una aleación respectivamente.

Como podemos observar mientras que en los metales puros ó eutécticos la contracción durante solidificación ocurre a una temperatura constante en las aleaciones ocurre en un rango muy amplio de temperaturas y aunque esto no tiene ninguna relación con la magnitud de esta contracción, si implica que se efectúa con mayor rapidez en el primer caso que en una aleación.

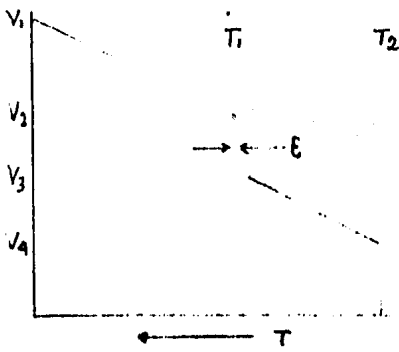


Fig. 1.3 Metal puro o eutéctico

Donde :

V_1 = Volumen de la masa M con sobre calentamiento.

V_2 = Volumen de la masa M en la temperatura de solidificación.

V_3 = Volumen de la masa M en una temperatura igual a la temperatura de solidificación menos un pequeño gradiente de temperatura.

V_4 = Volumen de la masa M a temperatura ambiente.

T_1 = Temperatura de solidificación.

T_2 = Temperatura ambiente

ϵ = Pequeño gradiente de temperatura.

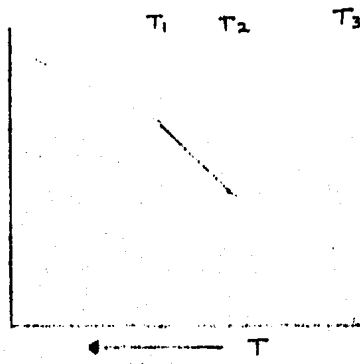


Fig. 1.4 Aleación

Donde :

V_1 = Volumen de la masa M con sobre calentamiento.

V_2 = Volumen de la masa M en la temperatura de solidificación.

V_3 = Volumen de la masa M al final de la solidificación.

V_4 = Volumen de masa M a temperatura ambiente.

T_1 = Temperatura de inicio de la solidificación.

T_2 = Temperatura de fin de la solidificación.

T_3 = Temperatura ambiente.

Es importante aclarar que algunas aleaciones presentan durante el intervalo de solidificación no una contracción, si no una expansión, sin embargo, estos son casos muy especiales como podría ser el de algunas aleaciones de Bismuto-Estaño con más de 55% de Bismuto,

Existen más diferencias no menos importantes, por ejemplo en el cambio de las estructuras cristalinas, pero por no ser objeto de este estudio no se tratarán aquí.

De esta manera se desea mostrar un panorama general de lo que es la contracción durante el enfriamiento de metales puros y aleaciones y las tres etapas que presenta.

CAPITULO 2

DEFECTOS EN LAS PIEZAS DE FUNDICION DEBIDOS A LA CONTRACCION

El objeto principal de incluir este capítulo en esta tesis es realizar la importancia que tiene poder evaluar y así predecir de una forma cuantitativa la contracción durante el enfriamiento de piezas de colada, mostrando una panorámica general de los defectos más importantes que se presentan durante la fabricación de piezas de colada debidos a la contracción.

Dividiremos nuestro estudio de defectos en aquellos que se generan unicamente por efecto de la contracción líquida y la de solidificación en conjunto.

La contracción líquida por sí sola genera un defecto que comunmente se llama "Falta" (de material) y consiste en lo siguiente: Consideremos un molde el cual tiene una cavidad, cuyo volumen es V_c y un bebedero con volumen V_b cuando agreguemos nuestro metal líquido. Si la contracción líquida es mayor que el volumen del bebedero, la aleación líquida no llenará el volumen de la cavidad, generando así una falta de material en la pieza; esto se muestra en las figuras 2.1 y 2.2.

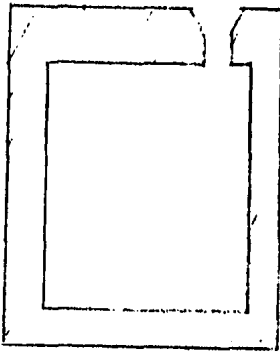


Fig. 2.1 Metal Líquido.

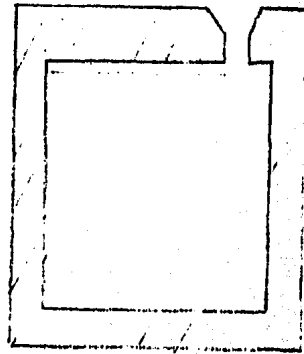


Fig. 2.2 Metal Sólido.

Existen formas con las cuales el técnico fundidor ha tratado de solucionar este defecto empíricamente, como puede ser el hecho de agregar un poco más de metal líquido en el bebedero con el propósito de mantener el nivel adecuadamente, a esta operación se le llama comúnmente "acompañar la contracción."

Otra forma es fabricar bebederos suficientemente grandes como para garantizar que su volumen sea mayor que la contracción líquida, sin embargo de esta manera se ocasionan grandes desperdicios de material.

Si se pudiera cuantificar la contracción, podrían diseñarse bebederos de tamaño exacto para garantizar que no se presente el defecto de falta y tampoco desperdiciar material.

La contracción líquida actuando conjuntamente con la contracción por solidificación provocan varios defectos que por todos ellos tener el mismo origen se denominan de la misma manera: rechupes.

La definición más clara de lo que es un rechupe es la que usa Le Breton en su libro "Defectos en las Piezas de Fundición" y es la siguiente:

Los rechupes son cavidades que se forman en el interior ó exterior de las piezas moldeadas y que tienen por causa la disminución de volumen que experimente el metal ó aleación durante el enfriamiento desde el estado líquido.

Existen varios tipos de rechupe y una clasificación es la siguiente:

- RECHUPE PRIMARIO : Es aquel que forma una sola cavidad ya sea interna ó externa.
- RECHUPE SECUNDARIO : Es aquél que da lugar a muchas cavidades internas.

- MACRORECHUPE* : Es una forma de rechupe secundario apreciable a simple vista.
- MICRORECHUPE* : Es otra forma de rechupe secundario pero en el cual las cavidades sólo se pueden observar al microscopio.

Es conveniente aclarar que una misma pieza puede presentar uno o varios tipos de rechupe y aunque tienen por causa la misma, no tienen el mismo mecanismo de formación. Por mencionar algunos mecanismos de formación de rechupes explicaré los casos más generales como son el de los moldes en forma de cilindros rectos colados al descubierto en sus dos variantes, metal puro o eutéctico ó una aleación.

Considerando el grupo de las figuras 2.3 a la 2.9, cuando recién es vaciado el metal líquido en el molde a una temperatura por encima de su temperatura de solidificación, el líquido llena completamente el molde a un nivel constante (Fig 2.3).

Conforme pasa el tiempo el metal líquido pierde calor por radiación en toda la superficie superior, la cual está en contacto con el medio ambiente. Además pierde calor por conducción con todas las paredes del molde. Dependiendo de las características del molde y del medio ambiente en cuestión, la pérdida de calor es más rápida por efecto de la transmisión de calor a las paredes del molde. Al cabo de algún tiempo se forma una capa de metal sólido la cual forma una especie de recipiente que contiene al resto del material que se encuentra en forma líquida, durante ese tiempo el metal líquido ha disminuido su volumen por efecto de la contracción líquida sufrida.

Por otra parte la capa de material sólido ha disminuido su volumen por efecto de la contracción líquida, y por la solidificación lo que genera un desnivel debido a la disminución de volumen del líquido restante. (Fig 2.4).

Ampliando este mismo razonamiento para periodos de tiempo cada vez mayores, podríamos imaginar lo que sucede al observar las figuras 2.5, 2.6, 2.7 y 2.8. Esto sería posible si se pudiese evaluar el avance de la capa solidificada en periodos de tiempo finitos, por el contrario, si se consideran diferenciales de tiempo el efecto final podría ser similar a la figura 2.9.

La depresión superior es provocada por la presión atmosférica. Dependiendo de las características y propiedades del metal en cuestión, así como del molde y medio ambiente, este defecto puede tomar dimensiones muy importantes según sea el caso.

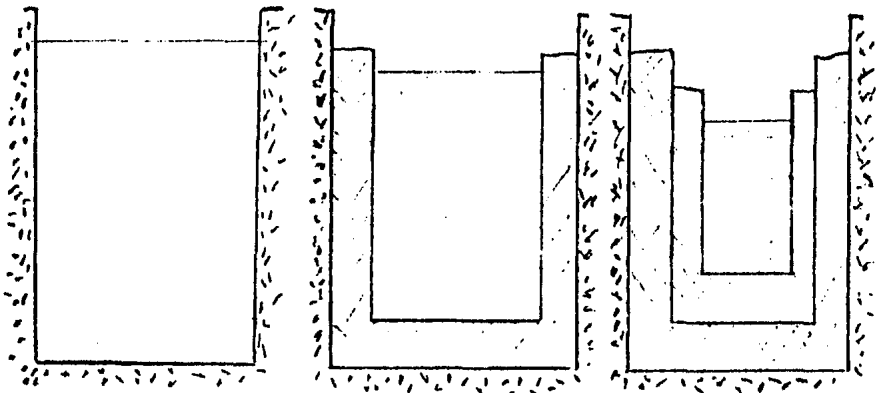


Fig. 2.3

Fig. 2.4

Fig. 2.5

El análisis anterior puede funcionar para aleaciones pero hay que tomar en cuenta que durante el periodo de solidificación se pasa por un estado pastoso y que si el intervalo de temperaturas dentro de las cuales ocurre la solidificación es muy grande, este defecto, puede tomar dimensiones muy críticas, llegando a romperse el material sólido que existe entre el rechupe externo y el interno provocando algo así como lo mostrado en las figuras 2.10 y 2.11.

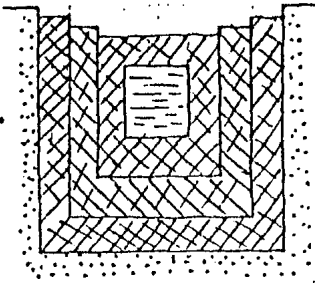


FIG. 2.6

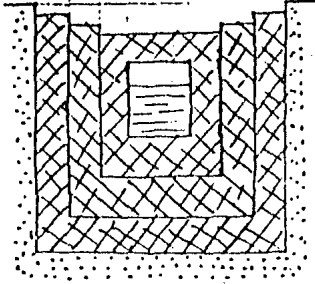


FIG. 2.7

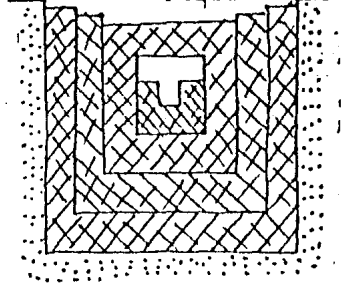


FIG. 2.8

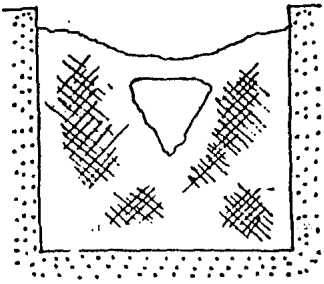


FIG. 2.9

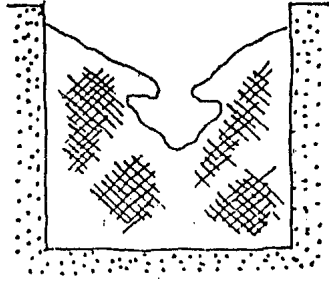


FIG. 2.10

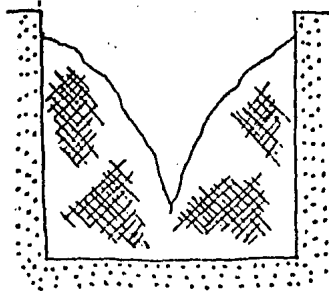


FIG. 2.11

Cuando el molde en cuestión no es un cilindro recto descubierto, sino cerrado, el análisis podría ser el siguiente: Consideremos que el molde está fabricado en su totalidad por el mismo material, entonces la pérdida de calor ocurrirá por conducción, con la misma velocidad en todas las paredes del molde, generando así una capa de material sólida al igual que en el caso anterior; pero en este caso, cubre completamente al metal líquido. (Fig 2.12). El espesor de la capa aumenta conforme la temperatura disminuye, hasta que llega un momento en el cual la cantidad de líquido encerrado en la coraza, ya no llena completamente la cavidad y en este momento, se pueden suceder las dos situaciones siguientes: Una de ellas, en caso de que la resistencia del material no sea lo suficiente como para permanecer adherido al molde, ceda frente a la presión atmosférica y tiende a continuar en contacto con el líquido; generando así que se deformen todas las paredes. Por otro lado si tiene la resistencia suficiente como para permanecer adherido al molde se generará una cavidad exterior similar a la mostrada en la figura 2.13.

Es importante considerar que si la pared superior de la capa del material solidificado, se aparta del molde, la extracción de calor será más lenta y por tal motivo, el espesor de la capa superior será menor. Además la presión atmosférica tiende a provocar una depresión en la parte superior de la pieza, este efecto será un tanto más grande conforme la resistencia del material disminuya.

Si consideramos que en una aleación el metal durante su solidificación pasa por un estado pastoso en el cual tiene muy poca resistencia y esto ocurre dentro de un rango grande de temperaturas, el efecto será desastroso.

Los efectos de velocidad de enfriamiento y la magnitud de la contracción en solidificación líquida, son muy significativos con respecto a la magnitud total de los resultados.

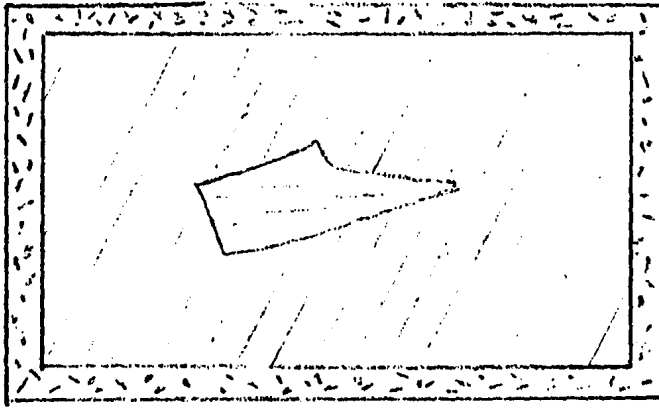


Figura 2.12

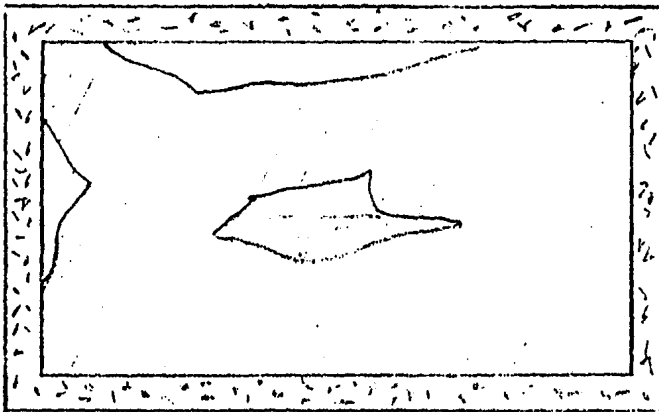


Figura 2.13

Generalmente a nivel industrial se trabaja con aleaciones, las cuales presentan estado pastoso durante su solidificación y no con metales puros o eutécticos.

La generación de rechupes tiene un comportamiento especial en todas aquellas secciones del molde que formen un ángulo y a su vez, está en función del tipo de ángulo que forme.

Para aclarar un poco el efecto de ángulos en moldes se analizará uno de los ángulos formados por la pared y la base de un molde cuadrado. Considerense secciones de volumen a lo largo de la pared y sobre la base con las mismas características dimensionales como lo muestra la figura 2.14.

Si el molde está fabricado completamente del mismo material, se puede suponer que la velocidad de enfriamiento del metal líquido dentro del molde, estará en función de la velocidad con que las paredes absorban y desprendan calor de las partes de aleación en contacto. Sin embargo por pura disposición geométrica, en el dibujo se puede intuir que la cantidad de calor disipada por los volúmenes 1, 2, 3 y 4 será menor que con respecto a los volúmenes 5, ya que en el área de contacto con el exterior es mayor en estos últimos, provocando que la isoterma de transformación tenga una forma curva.

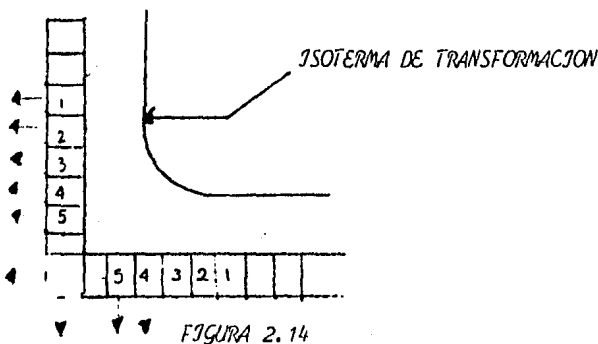
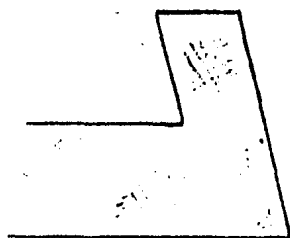


FIGURA 2.14

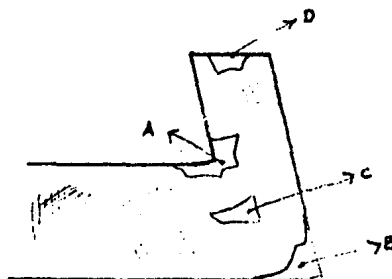
En caso de que el ángulo sea más agudo, el efecto será mayor, provocando en base a lo analizado anteriormente, la generación de rechupes.

Las siguientes figuras, muestran los rechupes generados por efecto de distintos ángulos formados por el molde donde:

- A = Rechupe generado en ángulo entrante
- B = Rechupe generado en ángulo saliente
- C = Rechupe interno
- D = Rechupe externo



Metal líquido



Metal Solidificado

Como se puede apreciar el resultado de esta combinación de rechupes es muy significativo.

Existen formas o procedimientos mediante los cuales se ha tratado de optimizar al máximo el proceso de fabricación de piezas por moldeo, evitando los defectos debidos a la contracción, pero de hecho no existe nada estandarizado hasta la fecha, sin embargo como principios básicos para este objetivo, se podrían mencionar los siguientes:

- a) Conseguir que durante el enfriamiento la pieza permanezca a la misma temperatura, en todo su volumen.
- b) Obtener una solidificación a lo largo de isoterma paralelas infinitamente delgadas.

Cualquiera de los principios básicos mencionados, son muy ambiciosos y casi imposibles de obtener, por lo tanto, resultaría más práctico tener una idea de la magnitud de la contracción para diseñar nuestro molde en base a eso, atacando así el problema desde su raíz.

CAPITULO 3

TECNICAS EXPERIMENTALES YA DESARROLLADAS PARA LA EVALUACION DE LA CONTRACCION LIQUIDA Y LA SELECCION DE UNA DE ELLAS.

Para el desarrollo de este capítulo se recurrió al banco de información de una institución universitaria afiliada a la UNAM que cuenta con publicaciones realizadas a nivel internacional con respecto a un tema específico, en este caso, métodos para la evaluación de la contracción en metales, dicha institución proporcionó una serie de métodos experimentales, los cuales resultaron muy interesantes en su mayoría, pero se describen solamente tres.

Más adelante se procederá a seleccionar en base a una serie de características uno de ellos y desarrollarlo a nivel experimental.

Una de las tendencias más fuertes a este respecto es la de usar sistemas de simulación, con ayuda de una computadora, prediciendo así la contracción, aunque esta técnica resulta aún muy sofisticada y su uso ha sido limitado debido al poco margen de confiabilidad y dificultad de uso, actualmente se han hecho muchos estudios al respecto.

De las publicaciones más recientes basadas en la simulación por computadora, se encontró la publicada por : E. Niyama, T. Uchida, M. Morikawa; en su artículo llamado : "A Method of Shrinkage Prediction and its Application to Steel Casting Practice". Los autores muestran que el gradiente de temperaturas puede ser un simple y efectivo parámetro de predicción de contracción y aunque no se puede hacer una predicción lógica, ya que la temperatura crítica tiene que ser determinada empíricamente para cada molde, los resultados son satisfactorios, siempre y cuando se tome en cuenta el ajuste necesario para absolver los errores provocados por el hecho de que la temperatura crítica y el tamaño del molde guardan una relación entre sí.

En este método se usa una serie de cilindros de acero con diámetro de acero con diámetros diferentes y se determina la temperatura crítica en cada caso, encontrando así, que el gradiente de temperatura crítica es inversamente proporcional al diámetro, este principio sirvió como base para la selección de un nuevo parámetro.

El parámetro mencionado, relaciona al gradiente de temperaturas, con la raíz cuadrada de la velocidad de enfriamiento, para cada punto dentro del molde. Usar este parámetro facilita cuantificar la contracción y su valor crítico resulta independiente de la aleación y la forma o diseño del molde, dentro del rango estudiado.

Aún cuando el método no represente un modelo físico de la formación de la contracción, es muy útil para un diseño correcto en un trabajo de rutina en fundición.

Otro método que resultó ser muy interesante fue el publicado por Hubert Devoux, Michel Guiny y Michel Jean Colas, en su artículo "Experiences en Vue de L'Alimentation des Pièces Moulées en Fonte à Graphite Sphéroidal". 16'.

Los autores por medio de un dilatómetro estudian en función del tiempo las variaciones volumétricas de una muestra entre el estado líquido y el fin de la solidificación.

Los resultados obtenidos permiten distinguir claramente el comportamiento de las fundiciones de grafito laminar con respecto a las de grafito esferoidal, esto da una idea de la precisión de los resultados.

El funcionamiento así como el dispositivo usado por los autores para las determinaciones se muestran en el diagrama de la figura 3.1.

El dispositivo consiste en un pequeño cilindro de aproximadamente 80 mm de diámetro y 120 mm de altura, que cuenta en su parte superior con un tubo medidor y todo esto envuelto en un molde de material cerámico.

Este dispositivo está montado en un bastidor metálico el cual puede moverse conforme se agregue aleación para evitar corrientes perjudiciales.

Un horno de resistencias alimentado por un grupo de transformadores mantiene una velocidad de enfriamiento uniforme.

Termopares termoelectrónicos colocados en el interior y exterior del recipiente, controlan el funcionamiento del horno, todos los termopares cuentan con un registrador.

Un flotador de grafito cuyo destino es seguir las variaciones de nivel de la aleación en el tubo medidor, es seguido por una cámara especialmente equipada para funcionar a intervalos de dos segundos aproximadamente. Estas variaciones del nivel del flotador son traducidas a variaciones en el tubo medidor.

Los resultados según reportan los autores tienen un error máximo del 5%.

Sin embargo este dispositivo completo, junto con todo el sistema que lo forma resulta muy sofisticado y oneroso.

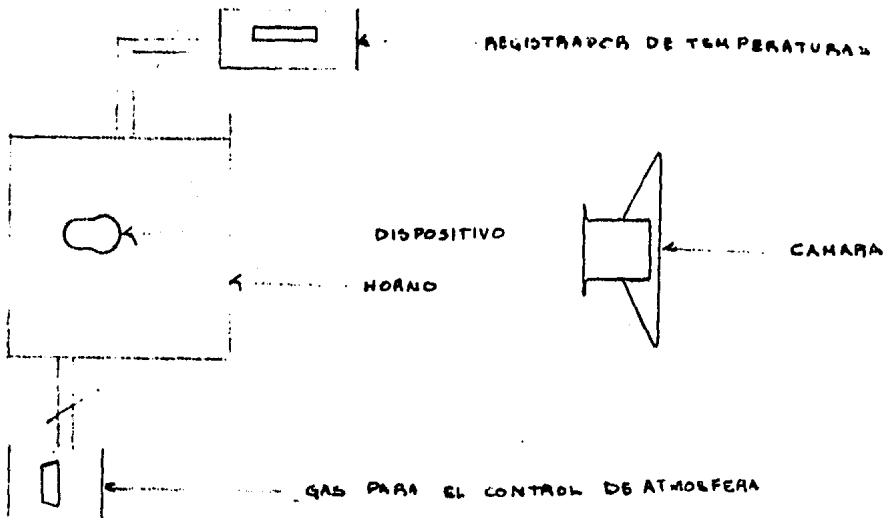


Figura 3.1 Esquema del dispositivo "Hubert Deveraux"
 Ref. "Experiences en vue de L'alimentation", (6).

Un tercer método a considerar fué el propuesto por C. E. Bates' y B. Paterson (2), el cual consiste en una técnica desarrollada para evaluar la contracción o expansión que ocurre durante la solidificación eutéctica de un hierro dúctil, técnica que plantea el enfriamiento a velocidad controlada para identificar con claridad las contracciones con respecto a la temperatura, minimizar los gradientes técnicos y poder distinguir entre los efectos de contracción y expansión' del espécimen y los mismos efectos relacionados al material con que ' se fabrica el dispositivo.

La muestra o espécimen del cual se evalúa su cambio de volumen ' consiste en un volumen determinado de hierro dúctil, contenido en un ' dispositivo que consta de tres partes: un crisol que funciona como ' contenedor, una tapa que cierra herméticamente por medio de un rosca- ' do y cuenta con un barrero en el centro el cual permite el desliza- ' miento de un pistón que descansa sobre la superficie del espécimen, ' este pistón cuenta con graduaciones en su extremo superior, facilitan- ' do así, la determinación de los desplazamientos por medio de una cáma- ' ra fotográfica colocada frente al horno en el cual se encuentra el ' dispositivo.

El autor propone controlar la atmósfera en el interior del horno, para evitar que se oxiden tanto la muestra como el dispositivo.

El horno cuenta con una mirilla en la puerta, mediante la cual se registran las imágenes, las cuales nos sirven para determinar el desplazamiento del pistón y así los cambios de volumen como una función de la temperatura, la cual se determina por medio de un termopar colocado en un orificio del crisol y directamente en contacto con la muestra del metal.

Se cuenta con otro termopar fuera del crisol pero muy cerca del mismo, para tener un registro del gradiente de temperatura entre un punto y otro del sistema.

El autor hace notar que ocurren interacciones metal-molde es decir, la expansión o contracción de volumen de la muestra van acompañadas con una contracción o expansión del dispositivo, de modo que los resultados deben corregirse en función del coeficiente de expansión del material con que está hecho el dispositivo.

Este método ha proporcionado datos confiables respecto a contracción de metales, pero existen detalles que lo hacen poco reproducible.

Un diagrama del dispositivo y otro del sistema completo se muestran en las figuras 3.2 y 3.3.

Analizando los tres métodos expuestos anteriormente se decidió que el tercer método expuesto por C.E. Bates y B. Paterson fuera el que se desarrollara pues brinda las siguientes ventajas frente a los otros dos métodos expuestos.

Este método presenta la facilidad de que los dispositivos pueden fabricarse sin problemas y la muestra maquinarse de tal forma que cumpla con las dimensiones del dispositivo y de esta manera estandarizar la determinación.

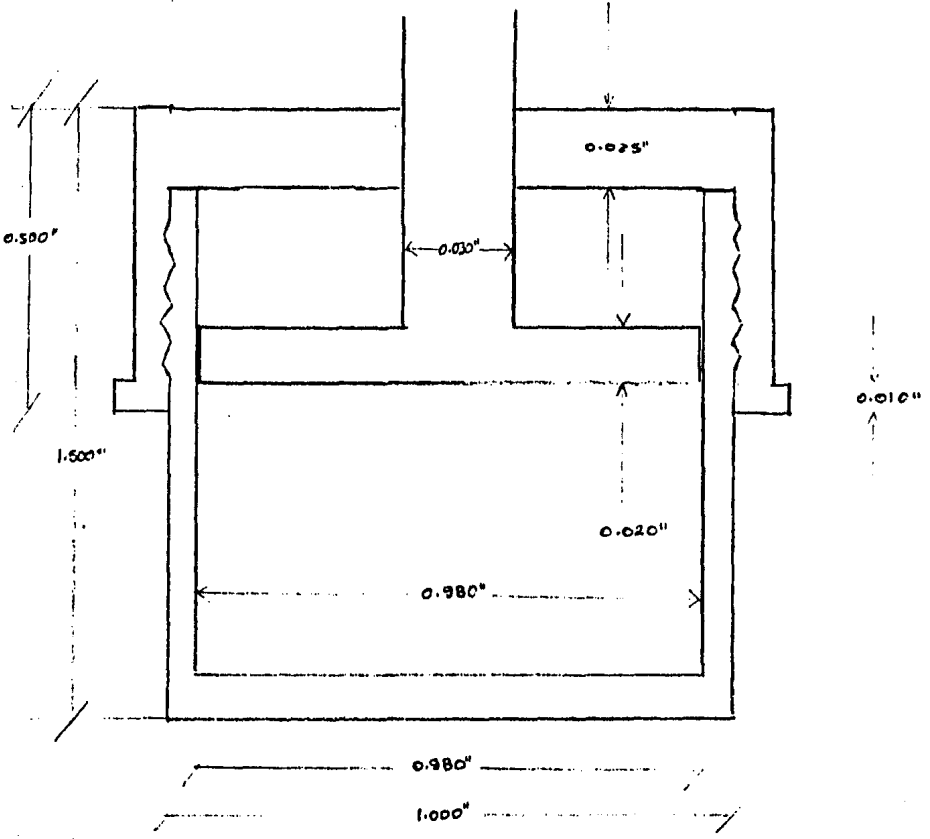


Figure 3.2

Por otro lado el equipo necesario es solamente una pequeña mufla que tenga la capacidad como para poder fundir la muestra, una cámara de precisión y un indicador de temperaturas .

El procedimiento es sencillo y el control de la atmósfera puede no ser necesario dependiendo del espécimen que debe medirse y del tipo de material usado en la fabricación del dispositivo.

La inversión necesaria para cada nueva evaluación es muy pequeña, sólo material y maquinado del dispositivo así como un rollo de película. La instalación, almacenaje o traslado de este equipo no presenta problema ya que es fácil de montar y manejar.

Por otro lado los autores garantizan que el método brinda resultados confiables y reproducibles.

Sin embargo existe un detalle que es importante tomar en cuenta y es relacionado con el equipo fotográfico que se utilice, ya que de no ser un equipo preciso existe el problema que al revelar las impresiones sea difícil detectar los contornos del dispositivo y así poder medir o evaluar los deslizamientos del pistón.

Pero en caso de tener las imágenes claras podemos precisar los resultados con una mirilla graduada o un microscopio.

Para evitar problemas de nitidez se puede recurrir a un telefoto.

Analizando estas ventajas tenemos que se ajustan a los lineamientos fijados para la selección del método y que son los siguientes:

- a) Debe ser accesible desde el punto de vista económico, esto es que no comprenda gastos onerosos en equipo muy especializado.

- b) *Facilidad de aplicación, es decir que la obtención de resultados mediante el método no fuera complicada, de tal forma que estuviera al alcance de obreros o técnicos, evitando así recurrir a las asesorías externas.*
- c) *Facilidad de reproducción en cualquier aleación.*
- d) *Precisión y exactitud en los resultados obtenidos.*

El desarrollo de este método es mostrado en el siguiente capítulo y al cual se le hicieron ciertas modificaciones para ajustarse a nuestras posibilidades.

CAPITULO 4

DESARROLLO DE LA TÉCNICA SELECCIONADA

Una vez estudiadas las ventajas de la técnica seleccionada se procedió a modificarla o ajustarla de acuerdo a los medios con los que se contaban para su desarrollo, por otro lado, se consideraron las condiciones normales de equipo con las que cuenta un laboratorio a nivel industrial en México; ya que es importante adaptarse al nivel promedio de posibilidades en la industria nacional.

Las modificaciones con respecto al método original fueron las siguientes;

a) Inicialmente se consideró buscar alternativas que ofrecieran más ventajas en cuanto al material seleccionado como muestra de estudio; este metal a escoger debería reunir los siguientes requisitos:

- 1.- Bajo punto de fusión : Este punto es importante ya que mientras menor sea la temperatura de trabajo, mayor será la facilidad de manejo y menor el riesgo a dañar el equipo fotográfico, el cual por este hecho podría ser menos sofisticado.
- 2.- Que su porcentaje de contracción líquida sea lo más grande posible, ya que de esta manera podríamos detectar con mayor facilidad el cambio de volumen en la etapa de enfriamiento y así más fácil cuantificarlo.
- 3.- Dicho metal debe obtenerse lo más puro posible de tal forma que los resultados puedan compararse con datos que se encuentran en la literatura y que generalmente se reportan para metales puros.
- 4.- Por último debe ser un metal del cual existan datos sobre su contracción líquida.

Dentro de una serie de metales que se contemplaron, se escogió como el más indicado al Aluminio, para tal objetivo, trabajamos con un espécimen de Aluminio obtenido por un proceso basado en el desarrollo de un monocristal el cual garantiza una pureza de 99.99%.

Esta muestra de material se maquinaria posteriormente para que se ajustara a las dimensiones del dispositivo.

Para familiarizarse un poco con este metal a continuación se mencionan algunas de las propiedades físicas y químicas del Aluminio puro:

Número Atómico	13
Masa Atómica	26.98
Estructura	c.c.c.
Constante de red	4.0413
Densidad a 20 °C	2.6989 Kg/m ³
Punto de fusión	660.4 °C
Calor de fusión	92 Cal/gr
Resistencia a la tracción	de 4 a 5 Kg/mm ²
% de alargamiento	de 60 a 70
Contracción total durante el enfriamiento	13.6%
Contracción líquida	1.4%
Contracción de solidificación	6.5%
Contracción sólida	5.7%

Ref. "Volumetric Changes occurring during the Freezing of Hypereutectic Ductile Irons" (12)
"Aluminium Alloys Structure and Properties" (11)

Una vez que se resolvió sobre el material que debería ser usado en la muestra se procedió a considerar el material con el cual sería fabricado el dispositivo. Primeramente se partió del material propio en el método original, el cual era una especie de carbón grafito, este material tenía la particularidad de que sus propiedades físicas tales como expansión, contracción, dureza, cohesión, etc. no cambiaban significativamente con la temperatura, así mismo su estructura y estado de agregación, tampoco serían afectadas.

Este material cuenta además, con un alto índice de maquinabilidad y es lo suficientemente ligero como para que los cambios de volumen puedan desplazar al pistón. De esta forma se considera que el carbón grafito ayudará a obtener mejores resultados en las determinaciones.

Se observó que la gran cantidad de poros que presenta el carbón grafito, funciona como escape para los gases generados en el interior del dispositivo, aliviando así, la presión interna.

Con todas estas ventajas se descartaba el uso de materiales propuestos por otros autores, como algunos metales o cerámicos.

El autor del método original, reporta, un grafito del tipo (ATG) dicha clasificación, no se encontró en el mercado nacional por lo tanto, procedimos a hacer pruebas con distintos grafitos, para seleccionar el que cumpliera con las cualidades deseadas. Después de una serie de pruebas, en las cuales, los dispositivos se desmontaron por efecto de la temperatura, encontramos un grafito especial, basado en ' la fabricación de electrodos para fundición, comúnmente conocido con ' el nombre de electrografito.

La fabricación del dispositivo, fue hecha, por un tornero especializado, ya que, aunque dicho grafito resultó bastante maquinable, ' se requirió de una persona con basta experiencia para llevar a cabo ' el trabajo, del cual se muestra un croquis con la figura 4.1.

Para establecer la forma mediante la cual, deberíamos llevar a ' cabo la determinación cuantitativa de la variación de volumen, se contemplaron las tres posibilidades siguientes: registrar desplazamientos del pistón, por medio de películas fotográficas durante el desarrollo del enfriamiento.

Una vez tomadas las fotografías, sobre las placas impresas, efectuar la medición física del desplazamiento.

Otra opción sería la de adaptar un brazo mecánico al pistón, que estuviera conectado a un detector de longitudes de alta precisión.

O también adaptar al pistón una serie de resistencias, de tal manera que se mandaran estímulos eléctricos, los cuales podrían ser registrados digitalmente.

De las tres alternativas comentadas anteriormente, se contempló, que tener imágenes plasmadas reduciría la posibilidad de error en la medición, por otra parte, hubo muchas dificultades para seleccionar el material adecuado para la fabricación del brazo mecánico que conectaría al pistón con el detector, de tal manera que no sufriera ninguna alteración por efecto de la temperatura y además fuera lo suficientemente ligero. Por último, una cotización del dispositivo digital para el registro de longitudes descartó esta posibilidad.

En base a esto, por exclusión, se determinó, que el sistema que se usaría en los experimentos, debía ser el originalmente propuesto por los autores en base a placas fotográficas.

Lo último a definir, era el sistema mediante el cual evaluaría la temperatura del dispositivo durante el experimento, para determinar los tiempos exactos para la impresión de las imágenes.

Para este efecto, se adaptaron dos termopares, uno digital, el cual atraviesa la pared del dispositivo y hace contacto con el metal, el otro, con impresor gráfico, colocado muy cerca del dispositivo pero sin hacer contacto con él.

La mufla con la que se efectuaron los siguientes experimentos es de resistencias eléctricas, completamente sin marca con capacidad de 1200 ° C y un calentador Phillips.

El termopar digital marca Omega, del tipo Cromel Alumel letra K con rango de operación de -20 a 999 ° C y el registrador marca Hewlett Packard.

En base a estas modificaciones hechas sobre el método original se procedió a efectuar una serie de experimentos describiendo a continuación aquellos más significativos.

ENSAYO 1

En este ensayo se registró la temperatura por medio de un sólo termopar digital de chromel alumel tipo K colocado muy cerca del dispositivo. Considerando que la temperatura registrada por el termopar en la proximidad del dispositivo, sería prácticamente igual a la temperatura de la muestra, se puede prescindir del otro termopar.

Debido a que la mufla no tenía control de temperatura nos guiamos en la temperatura registrada por el termopar digital.

El dispositivo fue fabricado en base al diseño de la figura 4.1, la muestra de aluminio se maquinó en base a las medidas interiores del dispositivo, con cierta holgura, para evitar que durante la expansión se fracturase el dispositivo; la pureza del aluminio empleado fue de 99.99%, se verificó el libre recorrido del pistón, fue colocado el termopar en base a lo establecido, se colocó todo el sistema dentro de la mufla y se sellaron todas las posibles fugas de calor de la misma para acelerar el proceso de calentamiento.

A una distancia de un metro aproximadamente frente a ella, se colocó fija en un trípode la cámara fotográfica, que en este caso fue una Nikon Mod. M5 con un lente de 50 mm, automática, el rollo usado para las impresiones, fue un ASA - 125 blanco y negro, con el objeto de resaltar los contrastes y visualizar de una forma más clara los contornos del pistón.

Una vez colocado el dispositivo dentro de la mufla, se elevó la temperatura hasta 800 °C, lo cual requirió de 4 horas aproximadamente.

Para entonces, el dispositivo había perdido material en toda la superficie y comenzaba a desintegrarse, por lo que se procedió a tomar la primera impresión, suponiendo que la muestra se encontraba totalmente líquida. En ese momento, se desconectó la mufia y comenzó el enfriamiento, a partir de entonces se tomó una impresión cada 15 °C. Para cuando la temperatura disminuyó a 300 °C se dio por concluido el experimento, se presentó el problema de que el dispositivo estaba muy desintegrado por efecto de la oxidación, esto mismo provocó que el pistón se anclara a las paredes del molde, impidiendo su libre deslizamiento. Lo que era importante determinar, era si se había anclado después de efectuada la contracción o si había permanecido así durante todo el enfriamiento, esto se descubriría al revelar las impresiones fotográficas.

En la impresión de las fotografías se intentó fijar la zona de mayor importancia y amplificar estas imágenes, modificando el tiempo de exposición de 5 a 10 segundos dependiendo de la claridad de las fotografías, todo esto con una intensidad de luz constante.

Se contó con 18 impresiones, tomadas entre los 800 y 300 °C. Las mediciones se hicieron con una mirilla graduada en un microscopio metalográfico, tomando en cuenta los aumentos del microscopio y del lente de la cámara. Estas mediciones fueron poco confiables, ya que los contornos del pistón no se podían determinar por lo irregular de la superficie, de tal forma que las medidas no seguían un parámetro lógico. Si se registro un desplazamiento del pistón entre las fotografías tomadas sobre los 700 °C y las fotografías tomadas por debajo de 400 °C, efectuando los cálculos para relacionar ese desplazamiento del pistón con una variación del volumen del metal, en base a las dimensiones de la cavidad del dispositivo y del mismo pistón, encontramos que el resultado obtenido no mostraba una relación lógica.

Tomando en cuenta todas las experiencias y resultados obtenidos en este primer ensayo, se procedió a efectuar las correcciones necesarias, llevando a cabo otro ensayo el cual se describe a continuación.

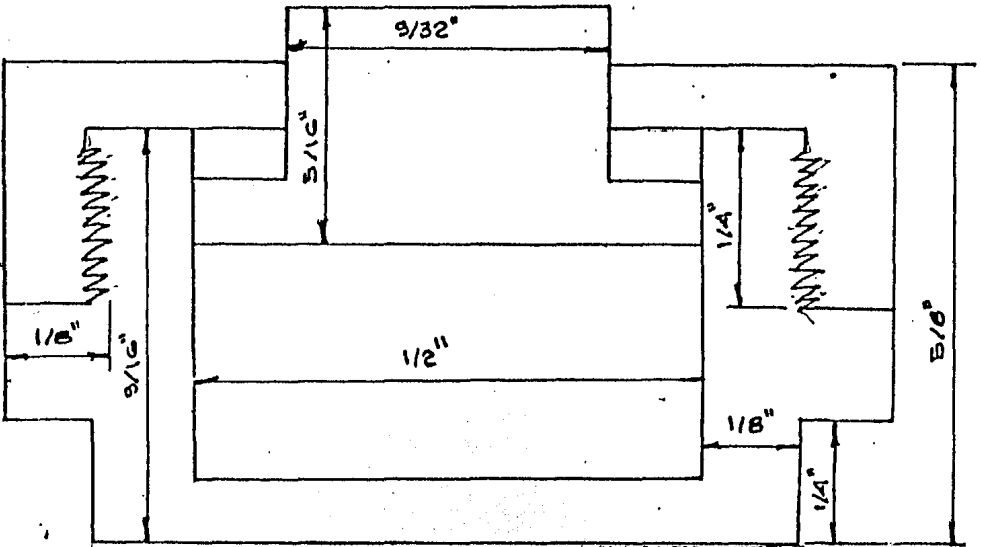


Figura 4.2

ENSAYO 2

Esta segunda prueba se llevó a cabo con un grafito distinto, usado en la industria de la fundición, cuyo distribuidor en México es la Compañía Carbonite Caribe, las dimensiones del dispositivo fabricado fueron las mismas, la muestra de aluminio fue igual, las condiciones de fotografía fueron similares, sólo que esta vez se utilizó una cámara más sensible, además se conectó un segundo termopar en contacto con la muestra de metal y a su vez conectado a un registrador gráfico.

Para introducir el dispositivo dentro de la mufla, se esperó a elevar la temperatura a 500 °C, con el motivo de evitar largas exposiciones a altas temperaturas para el pistón.

Cuando el termopar registró 780 °C se desactivó la mufla y se tomaron fotografías cada 15 °C, hasta llegar a los 350 °C, el dispositivo no sufrió deterioro alguno, el gráfico de la temperatura, correspondía a los datos proporcionados por el termopar digital,

Al imprimir las fotografías se observó, que tenían mayor nitidez que las anteriores, se apreciaba más claramente el contorno del pistón.

Al llevar a cabo las mediciones del desplazamiento del pistón, se pudieron apreciar tres rangos de temperaturas, durante los cuales se presentaron estos desplazamientos, que aparentemente correspondían a cada una de las contracciones; esto puede apreciarse más claramente en la tabla 4.1

TEMPERATURA °C	Nº DE FOTOGRAFIA	ALTURA DEL PISTON (mm)	VOLUMEN (mm ³)
754	1	1.764	893.83
740	2	1.764	893.83
730	3	1.764	893.83
710	4	1.764	893.83
690	5	1.647	834.54
680	6	1.529	774.75
690	7	1.529	774.75
640	8	1.529	774.75
620	9	1.529	774.75
600	10	1.529	774.75
580	11	1.529	774.75
560	12	1.411	714.96
550	13	1.411	714.96
350	14	1.411	714.96

Tabla 4.1 Temperatura a la que fué tomada cada fotografía altura del pistón medida y volumen en relación a la altura.

Como se puede observar, la correspondencia de temperatura con respecto a los deslizamientos del pistón no es muy clara y al efectuar algunos cálculos para relacionar estos desplazamientos con gradientes de volumen, los resultados no corresponden a la realidad, de tal forma que se procedió a efectuar una tercera prueba, modificando ciertos parámetros en base a las experiencias anteriores.

ENSAYO 3

Una de las modificaciones más significativas fue sobre las dimensiones del dispositivo, dejando una cavidad más larga con un diámetro menor, de tal forma que fueran más apreciables los desplazamientos del pistón; se colocó también un contra peso en la superficie superior del pistón para asegurar que la base del pistón estuviera realmente haciendo contacto con el metal líquido.

Se colocaron dos lámparas para que las condiciones de iluminación fueran las mismas durante todo el experimento, se prescindió del termopar con registrador gráfico, pues el termopar digital era suficiente para obtener un buen control de la temperatura.

A la mufla se le dió un mantenimiento correctivo, colocándole más resistencias, haciendo así más efectivo el calentamiento, el rango de temperaturas entre el cual se iba tomando cada fotografía se redujo, con lo que respecta a las demás condiciones del sistema permanecieron según lo establecido anteriormente.

Tomando en cuenta que estos resultados fueron mejores en el siguiente capítulo se presenta un análisis detallado de los mismos así como algunas de las fotografías efectuadas durante el experimento.

CAPITULO 5

En este capítulo se tratará de mostrar los resultados obtenidos en el tercer experimento; ya que estos fueron los más satisfactorios. Los resultados obtenidos durante los experimentos número 1 y 2 fueron un tanto incongruentes según lo que se esperaba, en base a los pocos datos publicados respecto a la contracción.

Para ejemplificar más claramente los resultados se exponen algunas de las fotografías obtenidas dentro de las 32 que fueron en total. Las fotografías expuestas son aquellas en las cuales se registró un desplazamiento, debido a la pérdida de nitidez por efecto de las reimpresiones y fotocopias, resulta inútil tratar de evaluar sobre estas fotografías los desplazamientos, por tal motivo no se señalarán.

En estas fotografías se observa en un fondo negro, de un tono poco menos oscuro el crisol con su tapa y sobre estos, de un tono claro se observa el pistón y el contrapeso. En estas fotografías se hace notar la longitud considerada para los cálculos.



Foto N° 1 $L = A 6.5 \text{ mm}$

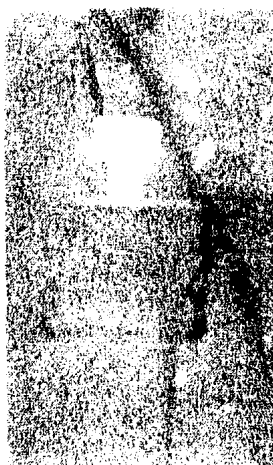


Foto N° 3 $L = A 6.2 \text{ mm}$



Foto N^o 7 L = 6.15 mm



Foto N^o 11 L = 6.10 mm



Foto N^o 14 L = 6.00 mm



Foto N^o 18 L = 5.9 mm

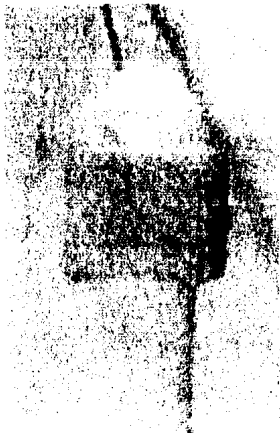


Foto Nº 21 L = 5.6 mm



Foto Nº 23 L = 5.5 mm



Foto Nº 26 L = 5.45 mm

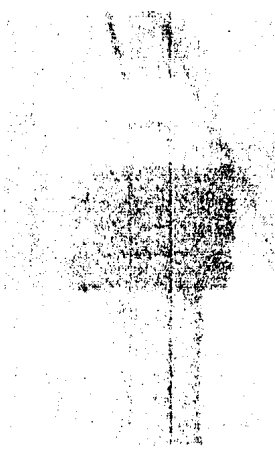


Foto Nº 28 L = 5.4 mm

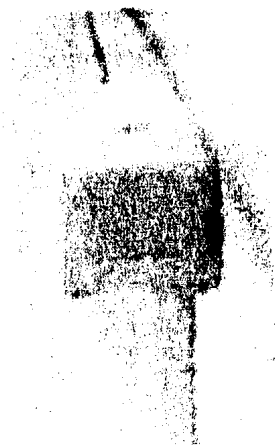


Foto N^o 31 L = 5.10 mm

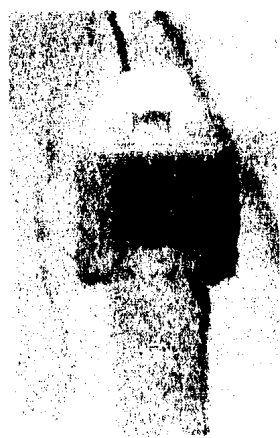


Foto N^o 32 L = 5.10 mm

TEMP. (°C)	FOTO #	MEDIDA EN (mm) EN LA FOTOGRAFIA	MEDIDA EN (mm) CON LA CORRECCION
750	1	6.5	5.5556
735	2	6.5	5.5556
720	3	6.2	5.2991
705	4	6.2	5.2991
690	5	6.2	5.2991
675	6	6.2	5.2991
660	7	6.3	5.3846
645	8	6.15	5.2564
630	9	6.15	5.2564
615	10	6.15	5.2564
600	11	6.10	5.2137
585	12	6.10	5.2137
570	13	6.10	5.2137
555	14	6.00	5.1282
540	15	6.00	5.1282
525	16	6.00	5.1282
510	17	6.00	5.1282
495	18	5.90	5.0427
480	19	5.90	5.0427
465	20	5.90	5.0427
450	21	5.60	4.7863
435	22	5.60	4.7863
420	23	5.50	4.7009
405	24	5.50	4.7009
390	25	5.55	4.7436
375	26	5.45	4.6581
360	27	5.45	4.6581
345	28	5.40	4.6154
330	29	5.40	4.6154
315	30	5.40	4.6154
300	31	5.40	4.6154
285	32	5.40	4.6154

Las temperaturas a las que fueron tomadas las fotografías, corresponden a cada 15 °C debajo de 750 °C a partir de la fotografía número 1 y hacia abajo. De tal forma que al rededor de la fotografía 7 y 8, comienza la solidificación y termina así la contracción líquida y la última fotografía se verifica a 300 °C.

Para encontrar la longitud real de desplazamiento fué necesario hacer la corrección por efecto del lente fotografico, en base a la relación que existía entre el diámetro real del contra peso y el diámetro que se medía en la fotografía la cual fué de la 0.8547. Estos datos se encuentran también en la tabla 5.1 los cálculos para la determinación del volumen contraído son los siguientes:

CALCULOS TEORICOS

$$D_{AL_{750}} = 2.345 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Masa muestra} = 1.3929 \text{ gr}$$

$$D_{AL_{300}} = 2.660 \text{ gr/cm}^3$$

$$D = \text{Densidad}$$

$$V_{750} = \frac{M}{D_{750}} = 0.594 \text{ cm}^3$$

$$V_{300} = \frac{M}{D_{300}} = 0.5236 \text{ cm}^3$$

$$\Delta V = 0.0704 \text{ cm}^3$$

Corresponde a un porcentaje de 11.85 que implica en base a la cavidad del dispositivo un desplazamiento del pistón de 3.5 mm

$$\Delta V_{tot} = 0.0704 \text{ cm}^3$$

$$D' = \text{diámetro de la cavidad} = 0.506 \text{ cm}$$

$$\Delta h = \text{desplazamiento del pistón}$$

$$\Delta v = \text{variación de volumen}$$

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

$$\Delta h = \frac{4 \Delta v}{\pi D'^2} = \frac{4(0.0704 \text{ cm}^3)}{\pi (0.506 \text{ cm})^2} = 0.350 \text{ cm}$$

$$h = 0.350 \text{ cm desplazamiento esperado}$$

CALCULOS EFECTUADOS A PARTIR DE LOS DATOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO

$$h_{750} = 5.5556 \text{ mm}$$

$$h_{300} = 4.3590 \text{ mm}$$

$$h_{750} - h_{300} = \Delta h = 1.19 \text{ mm}$$

Desplazamiento total = 1.19 mm

$$h_{750} = 5.5556 \text{ mm}$$

$$h_{660^*} = 5.2564 \text{ mm}$$

$$h_{750} - h_{660} = \Delta h' = 0.2992$$

Desplazamiento del pistón en fase líquida = 0.2992 mm

En base a lo anterior tenemos los siguientes valores de contracción total y líquida, considerando que el diámetro es igual a 0.506 cm.

a) Contracción total :

$$v = \frac{\pi}{4} D^2 h = 23.92 \text{ mm}^3$$

$$\Delta v = .0239 \text{ cm}^3$$

Esta sería la variación de volumen relacionada con el desplazamiento del pistón desde 750 °C a 300 °C que implica un porcentaje de contracción respecto al volumen inicial de material de 4.0236 %. La referencia número 2 reporta un 13.6 % de contracción a partir de 100 °C de sobre-calentamiento hasta temperatura ambiente. Se evaluó únicamente en este caso hasta 300°C esto podría ser la causa de la diferencia.

b) Contracción líquida :

$$v = \frac{\pi}{4} D^2 h = 6.01 \text{ mm}^3 = 0.00601 \text{ cm}^3$$

$$\Delta v = 0.00601 \text{ cm}^3$$

Esta sería la variación de volumen en fase líquida a partir de una temperatura de 750 °C a 660 °C lo que corresponde a un porcentaje de contracción respecto al volumen original de 1.01 %. La referencia N° 2 reporta un 1.4 % de contracción para Al puro.

NOTA :

La diferencia del 4.0236 a 1.01 en los porcentajes obtenidos, correspondería al porcentaje de contracción interfásial y sólido hasta 300 °C.

La referencia N° 2 reporta un 6.5 % para la contracción en solidificación y un 5.7 % para la contracción sólida.

* Se consideró el valor siguiente ya que el correspondiente a 660 °C resultaba incongruente, pudiendo ser un error de apreciación.

CAPITULO 6

DISCUSION Y CONCLUSIONES GENERALES

En base a los resultados obtenidos durante el último experimento podemos presumir que este método experimental para la evaluación de la contracción en fase líquida podría dar una idea aproximada de la magnitud de la contracción.

Por otra parte es importante hacer notar que en función de lo sofisticado que sea el sistema fotográfico para la toma de impresiones se podrán mejorar los resultados en las lecturas, además existen muchos detalles que podrían afinarse aún más obteniendo así mejores resultados, como son el sistema de registro de temperaturas, iluminación, diseño del dispositivo, etc.

La diferencia tan apreciable que se hace notar de la contracción global experimental con respecto a la reportada en la literatura, puede ser efecto de que la evaluación contempla la evaluación solamente hasta 300 °C y no hasta la temperatura ambiente como son reportados los resultados, sin embargo en la contracción líquida se cubre durante el experimento casi todo el rango de 100°C de sobre-calentamiento como marcan los reportes de la literatura, ya que se evaluaron 90°C de sobre-calentamiento, esta pequeña diferencia en el sobre-calentamiento puede ser la razón del 0,39% de diferencia.

De cualquier manera este método aunque no de una forma muy precisa, puede ser la base de métodos más sofisticados y complejos que sigan estos principios básicos y puedan arrojar resultados más reales y precisos.

Por el momento y considerando la limitación en cuanto a formas prácticas, económicas y/o precisas para la evaluación de la contracción el método presentado en este estudio de tesis puede ser una buena alternativa.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- BATES, C.E., G.L. Oliver y R.H. Mc Swain, "Volumetric Changes During Freezing of Ductil Iron", en *AFS Transactions*, vol. Staff, Pittsburgh 86, 1977, pp. 289-298.
- 2.- BATES, C.E., y B PATTERSON? "Volumetric Changes Occurring During the Freezing of Hypereutectic Ductil Irons", en *AFS Transactions*, vol. 79, Staff Pittsburgh, 1964, pp. 323 - 333.
- 3.- BEELEY, P. R. *Foundry Technology*, Butterworth, Southampton ' 1972.
- 4.- DAVIES, J.L., y V. Kondic, "Mechanism of Formation of Shrinkage Cavities in Castings", en *The British Foundryman*, febrero de 1976, vol. 69, pp. 39 - 43.
- 5.- ADAMS, C.M., Jr. *Theoretical Approach to Dimensioning of Risers* en *Fundamentals of Risering Steel Casting*, Steel Founders' Society, Cleveland, 1960, pp. 1 - 7.
- 6.- DEVAUX, Hubert, Mighel Guiny y Michel Jean Colas, "Experiences en vue de l'alimentation dès pièces moulées en fonte à ' graphite spheroidal", en *fondrie 331*, febrero de 1974, pp. 59 - 69.
- 7.- HARIJATH, U., K.L. Narayana y H. Md. Roshan, "Studies on volume Deficit of LM - 6 Alloy in Shell Molds", en *AFS Transactions*, vol, 79, Staff, Pittsburgh, 1974, pp. 231 - 236.
- 8.- KOTSCHJ, R.M., C.R. Loper Jr., R.E. Frankenberg y L. Janowski, "Elimination of Shrinkage defects through Casting Redesign", en *AFS Transactions*, Staff, Pittsburgh, 1977, pp. 571 - 576.

- 9.- NJYAMA, E., T. UCHIDA y M. Morikawa, "A Method of Shrinkage Prediction and Its Application to Steel Casting Practice", en *AFS international Cast Metals Journal*, Septiembre de 1982, pp. 52 - 63.
- 10.- LE BRETON defectos de las piezas de fundición tomo 1 URMO S.A. de ediciones Espartero 10 Bilbao - 9. 1975.
- 11.- L.F. MONDOLFO , Butterworth & Co. (Publishers).
- 12.- RIDDLE, R.W., *The Running and Gating of Sand Castings. A Review of the Literature*, The Institute of Metals, Londres, 1956, Apéndices 1 y 2, pp. 146 - 171.