



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**INFLUENCIA DEL AREA DE NO TRANSFERENCIA DE  
CALOR SOBRE EL TIEMPO DE SOLDIFICACION**

**TESIS MANCOMUNADA**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

**P R E S E N T A N**

**SALVADOR CHECA FLORES  
CLAUDIO FLAVIO FERNANDEZ CORNEJO**



**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**MEXICO, D. F.**

**1989**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## INDICE

	RESUMEN .....	1
CAPITULO 1	INTRODUCCION .....	2
CAPITULO 2	REVISION BIBLIOGRAFICA .....	4
	2.1 MODULO DE SOLIDIFICACION Y BALANCE DE FLUJO DE CALOR.....	4
	2.2 MODULO DE SOLIDIFICACION.....	10
	2.3 CALCULO DE ALIMENTADORES. APLICACION DEL MODULO DE SOLIDIFICACION.....	11
CAPITULO 3	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	14
	3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.....	14
	3.1.1 SELECCION DEL METAL EMPLEADO.....	14
	3.1.2 DISEÑO DEL MODELO.....	15
	3.2 MOLDEO.....	17
	3.3 TECNICA DE FUSION.....	18
CAPITULO 4	RESULTADOS .....	20
	4.1 RESULTADOS GENERALES.....	20
	4.2 TABLAS DE RESULTADOS.....	21
	4.3 ANALISIS DE RESULTADOS.....	27
	4.4 DISCUSION DE RESULTADOS.....	32
	4.5 APLICACION DE RESULTADOS.....	33
CAPITULO 5	CONCLUSIONES .....	36
CAPITULO 6	RECOMENDACIONES .....	37
ANEXO I	.....	40
ANEXO II	.....	42
APENDICE A	.....	43
APENDICE B	.....	45

APENDICE C	.....	47
BIBLIOGRAFIA	.....	49

## RESUMEN

La finalidad del presente trabajo, como su nombre lo indica, es encontrar la influencia que tiene el área de no transferencia de calor sobre el tiempo de solidificación.

Esta área es la que se presenta cuando dos figuras se encuentran unidas por una de sus caras, o bien cuando se tiene una figura geométrica compleja y que para determinar su tiempo total de solidificación, necesita dividirse en figuras geométricas sencillas, dando lugar a lo anterior. Para encontrar esta influencia, todo se basa en el método de Chvorinov, sus ecuaciones y algunas otras consideraciones matemáticas.

Se usó un método experimental complementario al teórico. Este método forzó el uso de cuatro modelos o moldes con diferentes dimensiones. La única restricción de este trabajo, es que sólo es válido para figuras con superficies planas y con aristas, esto debido a los modelos usados.

## CAPITULO 1: INTRODUCCION

Uno de los mayores problemas de la industria de la fundición es obtener piezas coladas sanas y libres de rechupes; para poder obtener lo anterior es necesario hacer el cálculo correcto de los alimentadores.

Todos los métodos se basan para su cálculo, en el uso del módulo de solidificación ( $M_s$ ), definido como la relación entre el volumen de una pieza y el área de transferencia de calor. Al calcular el módulo de solidificación de esta manera, se puede determinar el tiempo de solidificación involucrando las propiedades térmicas tanto del metal como del material de moldeado por medio de la siguiente expresión:

$$t_{SOL} = K (M_s)^2$$

El estudio se hizo basandose principalmente en el modelo matemático de Chvorinov; en este modelo, que incluye por un lado el tiempo de solidificación y por el otro el módulo de solidificación, se pueden hacer estudios sobre como influye el área de no transferencia de calor sobre el tiempo de solidificación, refiriéndose como área de no transferencia de calor (ANTC), como el área de contacto entre dos piezas; dentro de estas áreas se pueden incluir a los alimentadores. Por otro lado, también podrían considerarse ANTC a las uniones que pueden presentar piezas complejas cuando ésta se divide en figuras geométricas sencillas.

Primero se observó si teórica y experimentalmente el

modelo matemático servía para ambas figuras: figuras sencillas y figuras complejas, ambas conteniendo dos cubos, uno pequeño y uno grande. Se observa que solamente sirve para el caso de figuras sencillas, ya que para el modelo de figuras complejas, el tiempo de solidificación es mayor al real. Esta diferencia es un porcentaje determinado para el cubo pequeño y otro porcentaje diferente para el cubo grande. Lo que se trata de obtener, es la relación de este mismo porcentaje teóricamente; es decir, para que en un supuesto caso de investigación o simplemente para obtener un resultado cuando se quiera hacer una pieza en la industria, no se tengan que hacer experimentos, sino que con la aplicación de estos resultados teóricos se pueda predecir de que manera se va a ver afectado el tiempo de solidificación cuando se tenga calculado o se varíe el módulo de solidificación.

Por esto el objetivo del presente trabajo es obtener la relación que existe entre el módulo de solidificación y el tiempo de solidificación. Con esta relación, obtener el porcentaje de variación del tiempo de solidificación dependiendo directamente del módulo y hacer un estándar para cuando se quiera trabajar con el mismo en todos los casos y también con este estándar poder diseñar los alimentadores de las piezas.

## CAPITULO 2: REVISION BIBLIOGRAFICA

### 2.1 MODULO DE SOLIDIFICACION Y BALANCE DE FLUJO DE CALOR

Para calcular los tiempos de solidificación se han desarrollado varios métodos que estudian los fenómenos que se presentan durante la solidificación de piezas fundidas, y hacen los resultados aplicables a la práctica. Todos estos métodos tienen por origen los estudios de Chvorinov, quien fue el primero en encarar el problema de conocer cuanto tarda una pieza en solidificarse.

Chvorinov introdujo el parámetro de la relación entre el volumen del metal líquido y su área de disipación de calor en los cálculos del tiempo de solidificación.

También consideró un balance de flujo de calor, es decir, desde este punto de vista, la característica importante del proceso de solidificación de un metal, es que el metal es mucho mejor conductor de calor que el molde, por lo que la solidificación depende primordialmente de las propiedades térmicas del molde.

Es por esto que el problema de flujo de calor, es muy simple, especialmente si se asume que el metal es vaciado no con un sobrecalentamiento, sino que es vaciado exactamente a su temperatura de fusión  $T_m^1$ .

#### NOTAS:

<sup>1</sup>Ver libro 3 de bibliografía.



Considerese un flujo de calor unidireccional. El metal es vaciado a temperatura de fusión a un molde con temperatura ambiente. Esto es la superficie del molde en contacto con el metal es calentada súbitamente a  $T_M$  a un tiempo  $t = 0$ . Para expresar lo anterior se tiene la siguiente ecuación

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_M \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.1)$$

en donde  $T_M$  = temperatura de fusión = melting temperature ( $^{\circ}C$ )  
 $\alpha_M$  = difusividad térmica ( $cm^2/seg$ )  
 $t$  = tiempo (seg)  
 $x$  = distancia desde la pared (cm)

La ecuación anterior considera un flujo de calor en una sola dimensión. La solución a esta ecuación con las condiciones de frontera dadas anteriormente, causa una temperatura  $T$  en el molde como una función del tiempo a una distancia  $x$  desde la pared del molde:

$$\frac{T - T_M}{T_0 - T_M} = \text{erf} \frac{x}{2 \sqrt{\alpha_M t}} \quad (2.2)$$

donde erf es la función error. Esta función error para cero es cero y para infinito es igual a la unidad. Luego, la velocidad del flujo de calor hacia el molde en la interfase molde-metal está dada por

$$\left[ \frac{q}{A} \right]_{x=0} = -K_M \left[ \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} \quad (2.3)$$

donde  $K_M$  = conductividad térmica del molde ( $cm^2/seg$ )  
 $q$  = velocidad del flujo de calor (cal/seg)  
 $A$  = Área de la interfase molde-metal ( $cm^2$ )

Por diferenciación parcial de la ec. (2.2) con respecto

a  $x$ , cuando  $x = 0$  y combinando los resultados con la ec. (2.3), la cantidad del flujo de calor a través de la interfase molde-metal es

$$-\left[\frac{q}{A}\right]_{x=0} = -\sqrt{\frac{T_M \rho_M C_M}{\pi t}} (T_M - T_0) \quad (2.4)$$

donde  $C_M$  es el calor específico del molde en cal/g °C y  $\rho_M$  es la densidad del molde en g/cm<sup>3</sup>. Ahora el calor que entra al molde proviene sólo del calor de fusión del metal que se está solidificando, ya que el sólido así como el metal líquido está exactamente a  $T_M$ . de aquí que:

$$\left[\frac{q}{A}\right]_{x=0} = -\rho_L H \frac{dS}{dt} \quad (2.5)$$

donde  $S$  es el espesor solidificado,  $\rho_L$  es la densidad del metal líquido en g/cm<sup>3</sup> y  $H$  es el calor latente de solidificación en cal/g y combinando (2.4) y (2.5) e integrando desde  $S = 0$  en un  $t = 0$ , queda

$$S = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \underbrace{\left[\frac{T_M - T_0}{\rho_L H}\right]}_{\text{METAL}} \underbrace{\sqrt{K_M \rho_M C_M}}_{\text{MOLDE}} \sqrt{t} \quad (2.6)$$

En la ecuación (2.6) se puede ver que el término izquierdo relaciona las propiedades térmicas del metal y el término derecho involucra las del molde.

La ecuación (2.6) indica la manera en la cual las propiedades térmicas del metal y del molde se combinan. En el tiempo de enfriamiento de un metal colado en un molde relativamente aislante esta relación es más correcta o verdadera para coladas en arena de metales de alta conductividad, como son metales no ferrosos (Cu-, Al-, y aleaciones de base de Mg) más que

para fierro o acero.

El problema de enfriamiento en una dimensión sirve para ilustrar muchos de los aspectos más importantes de solidificación, pero para algunos propósitos es importante evaluar tiempos de enfriamiento y tipos de formas complejas. Considerese otra vez la cuestión de flujo de calor; por ejemplo la geometría de este flujo hacia un molde con contornos en forma cóncava o convexa puede compararse con un molde de pared plana. El flujo de calor en una superficie cóncava será divergente y por tanto más rápida mientras que en una superficie convexa será menos rápida que en una pared plana. Para figuras simples, como quiera que sea las diferencias no serían grandes, por lo que una aproximación usable es asumir que un  $\text{cm}^2$  de una superficie de un molde tiene una habilidad de absorber el calor a pesar de su contorno o su localización en la colada. Con esta suposición, ahora se puede sustituir  $S$  en la ecuación (2.6) por  $V_s/A$ , donde  $V_s$  es el volumen solidificado en un tiempo  $t$  y  $A$  es el área de transferencia de calor o lo que es lo mismo, la interfase molde-metal. Pudiendo considerar  $t = t_f$ , donde  $t_f$  es el tiempo total de solidificación de una colada de volumen  $V$ , se tiene

$$\frac{V}{A} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{T_M - T_0}{\rho_s H} \right] \sqrt{k_M \rho_M C_M} \sqrt{t_f} \quad (2.7)$$

y ya que este método involucra propiedades constantes del metal y del molde, se llega a

$$\frac{V}{A} = K_1^2 \sqrt{t_r} \quad (2.8)$$

y reorganizando

$$t_r = K_2 \left( \frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.9)$$

donde  $K_2$  es una constante del sistema metal-molde dado considerando temperatura ambiente en las paredes del molde.

La ecuación (2.9) es mejor conocida como la regla de Chvorinov usada para comparar tiempos de solidificación en coladas de figuras simples. Esta ecuación dice que el tiempo total de solidificación de dichas coladas es proporcional al cuadrado del módulo de solidificación.

La confirmación experimental de estos resultados son vistas en los experimentos del propio Chvorinov en coladas de acero, variando figuras y formas desde 10mm de ancho hasta coladas de 65 ton. Los tiempos de solidificación completa se obtienen colocando el termopar en el centro de la colada.

La discusión anterior, como se mencionó, es válida únicamente cuando el metal se vacía a temperatura de

NOTAS:

2

$$K_1 = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_M - T_0}{\rho S H} \right) \sqrt{K_M \rho_M C_M}$$

$$K_2 = \left( \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{T_M - T_0}{\rho S H} \right) \sqrt{K_M \rho_M C_M}} \right)^2 = \left( \frac{1}{K_1} \right)^2$$

$$K_3 = \left( \frac{1}{K_2} \right)^{1/2} = \frac{1}{K_1}$$

solidificación, esto de manera práctica es imposible, por lo que la ecuación (2.7) tendrá que modificarse, para simular condiciones reales de temperatura de vaciado, es decir con sobrecalentamientos.

Como se vacía a una temperatura superior a la de solidificación, hay que considerar 3 variables más que son  $T_v$  que es la temperatura de vaciado,  $\rho_L$  que es la densidad del metal pero en estado líquido y  $C_L$  que es el calor específico del metal líquido, e incluyendo  $T_o$  como temperatura del molde, por lo que la ecuación queda:

$$\frac{V}{A} = M_s = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{T_v - T_o}{\rho_S H + (\rho_L C_L (T_v - T_M))} \right] \sqrt{K_M \rho_M C_M} \sqrt{t_f}$$

La ecuación anterior es válida para superficies planas, pero para figuras tales como esferas o cilindros es posible derivar una expresión más exacta de la ecuación (2.7) relacionando  $t_f$  a  $V/A$  sin retener la suposición de no divergencia en el flujo de calor. En este caso la ecuación diferencial aplicada para el flujo de calor en el molde es

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_M \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (2.11)$$

donde  $r$  es el radio de la pieza y  $n$  es un coeficiente el cual vale 1 para cilindros y 2 para esferas. Luego, con el mismo procedimiento que se usó para derivar la ecuación (2.7), se obtiene una expresión equivalente que es

$$\frac{V}{A} = \frac{T_M - T_o}{\rho_S H} \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{K_M \rho_M C_M} \sqrt{t_f} + \frac{n K_M t_f}{2r} \right]$$

Esta ecuación es más válida para cilindros que para

esferas; esta ecuación (2.12) dice que la esfera solidifica más rápido que el cilindro y este a su vez más rápido que una placa<sup>3</sup>.

## 2.2 MÓDULO DE SOLIDIFICACION

El módulo de solidificación se define como el cociente del volumen entre el área de transferencia de calor

$$M_s = \frac{V}{A} \quad (2.13)$$

Por ejemplo en un cubo el  $M_s$  está descrito por la longitud de las aristas, es decir, suponiendo que  $a$  es la longitud de la arista

$$M_s = \frac{V}{A} = \frac{a^3}{6a^2} = \frac{a}{6} \text{ cm} \quad (2.14)$$

para un cilindro

$$M_s = \frac{r l}{2(1+r)} \text{ cm} \quad (2.15)$$

y ahora para una esfera

$$M_s = \frac{r}{3} \text{ cm} \quad (2.16)$$

Con esto se ve que cada figura geométrica tiene su módulo de solidificación específico. Aunque el módulo de solidificación esté descrito así, se sabe que siempre va a haber otra área que contenga metal que esté en contacto directo con la pieza, y por lo tanto ésta área de no transferencia de calor, va a influir lo suficiente como para que se hagan algunas consideraciones, las cuales se verán posteriormente. Aunque se

### NOTAS:

<sup>3</sup>Ver apéndice B para valores de variables.

puede decir, por ejemplo, que teniendo un cubo de 10cm de arista su módulo de solidificación según la ecuación (2.13) va a ser de 1.666. Ahora suponiendo una K de 200, da un tiempo de solidificación de 553.111 seg. Pero si se tiene que el área de no transferencia de calor es una cara del cubo, entonces el tiempo de solidificación se incrementa debido a que el Ms también se incrementa y por tanto el tiempo de solidificación es según la ec. (2.9) igual a 800 seg., por lo que se ve que el tiempo aumenta considerablemente, o lo que es más un 40%. Pero posteriormente se verá, como ya se dijo que no es de esta manera como aumenta el tiempo de solidificación.

### 2.3 CALCULO DE ALIMENTADORES. APLICACION DEL MODULO DE SOLIDIFICACION.

El alimentador es un accesorio cuyo fin es compensar la contracción por solidificación que sufre la pieza. Es requisito indispensable para que el alimentador realice su función, que su tiempo de solidificación sea mayor que el de la pieza o sección de la pieza alimentada. De la ecuación (2.9) se tiene

$$t_f = K_2 \left( \frac{V}{A} \right)^2 \quad (2.16)$$

y luego reorganizando

$$t_a = K_2 (M_s)^2 \quad (2.17)$$

donde  $t_a$  es el tiempo de solidificación,  $K_2$  es una constante que involucra las propiedades térmicas tanto del metal como del molde

y  $M_s$  es el módulo de solidificación.

Según Chvorinov el alimentador debe de ser 1.25 veces la pieza, es decir

$$t_{s_A} = 1.25 t_{s_P} \quad (2.18)$$

y por tanto

$$K_A M_{s_A}^2 = 1.25 K_P M_{s_P}^2 \quad (2.19)$$

\*  $A$  = alimentador y  $P$  = pieza

luego sacando cuadrados queda

$$M_{s_A} K_{s_A} = 1.12 M_{s_P} K_{s_P}$$

$$V/A = K \sqrt{t_f} \quad ; \quad t_f = \left( \frac{V}{A} \frac{1}{K} \right)^2$$

luego de la ecuación (2.18) se tiene

$$t_{f_A} = 1.25 t_{f_P}$$

$$\left( \frac{V_A}{A_A} \frac{1}{K_A} \right)^2 = 1.25 \left( \frac{V_P}{A_P} \frac{1}{K_P} \right)^2$$

$$M_{s_A} = 1.12 M_{s_P} \frac{K_A}{K_P}$$

Cuando  $K_{sP} = K_{sA}$  se considera que el medio que rodea a la pieza es el mismo que rodea al alimentador, por lo tanto

$$M_{s_A} = 1.12 M_{s_P}$$

Como se desprende de la última ecuación, es definitivo conocer con precisión los módulos de solidificación para realizar un buen cálculo de alimentadores, y saber que tanto se desvía de este modelo ideal el considerar áreas de transferencia de calor, las que no lo son.

Todo lo anterior se puede decir que es en cuanto a una



pieza sencilla, sin embargo las piezas reales son más complejas. A estas piezas se les puede descomponer en piezas sencillas, por ejemplo:

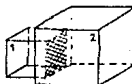


figura 2.1

A esta pieza se le puede descomponer en 2 cubos simples. El problema que surge ahora es determinar el tiempo correcto de solidificación de cada cubo, por medio de la ecuación (2.9). Como primer paso se calcularía el módulo de solidificación. Este sería considerado para el cubo 1 las 6 caras de transferencia de calor, pero la cara de unión al cubo 2, sería una cara menos de transferencia de calor, y por lo tanto el  $t_s$  del cubo 1 se incrementaría y lo mismo pasaría con el cubo 2, pero su tiempo aumentaría en menor proporción o porcentaje, debido a que del cubo 2 sólo una parte de una de sus caras es la que no sufre esa transferencia de calor. Todas estas hipótesis se comprueban posteriormente con los resultados teóricos y experimentales en la parte de análisis de resultados, y en donde se ve que el  $t_s$  del cubo pequeño aumenta casi el doble que el del cubo grande.

## CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

Como lo que se quería ver es como afectaba el Área de no transferencia de calor al tiempo de solidificación, se observó que con cuatro modelos con diferentes dimensiones serian suficientes. Para esto lo que se tomó en cuenta fue que dos de los modelos tendrían que ser de dos figuras separadas entre si, para evitar el Área de no transferencia de calor y los los otros dos modelos tendrían que ser de figuras unidas por una de sus caras, en las cuales existiera Área de no transferencia de calor. Estos cuatro modelos varían en las dimensiones de las figuras, y esto se hizo para ver su influencia en el módulo de solidificación.

#### 3.1.1 SELECCION DEL METAL EMPLEADO

Se utilizó aluminio con el siguiente análisis químico:

Cu - 0.06%  
Fe - 0.72%  
Zn - 0.12%  
Si - 0.73%  
P - 0.01%  
Ti - 0.00%  
B - 0.00%  
Al - resto

La determinación de este análisis químico se hizo por vía húmeda: Se requirió aluminio puro o con una pureza considerable, debido que en el metal puro hay únicamente calor latente de solidificación, evitando así resultados erróneos debido a

calores latentes de otros metales que pudieran haber estado en grandes cantidades.

### 3.1.2 DISEÑO DEL MODELO

Se trabajó con cuatro modelos distintos: a, b, c, y d. El modelo a) formado por dos cubos de diferente arista separados entre sí por el sistema de colada y con el Área de entrada del canal hacia el cubo en proporciones iguales a ambos cubos. El modelo b) que está formado por los mismos dos cubos que el anterior, pero ahora unidos por una de sus caras. El modelo c) es como el modelo a), sólo que la longitud de las aristas de ambos cubos es más pequeña. Y el modelo d) son los cubos del modelo c), pero ahora unidos por una de sus caras.

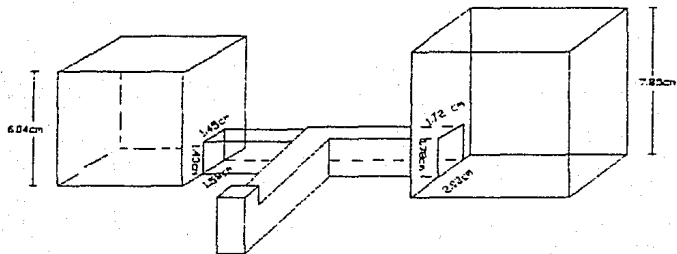


Fig. (3.1) Modelo A

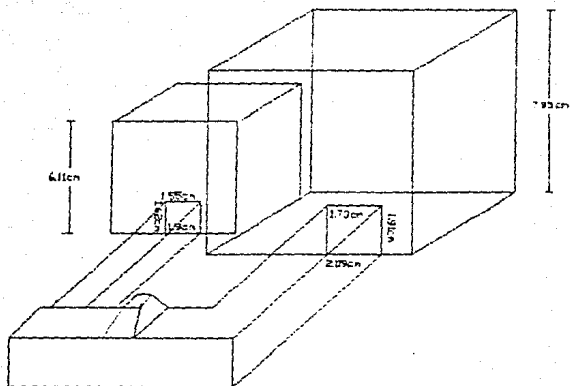


Fig. (8.2) Modelo B

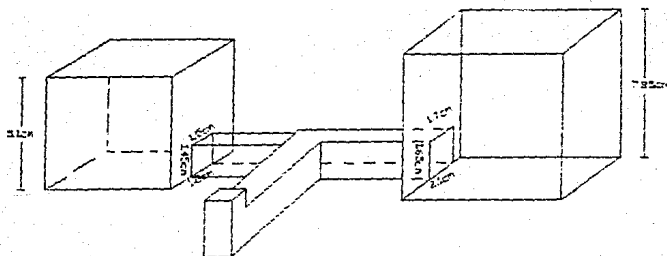


Fig. (8.3) Modelo C

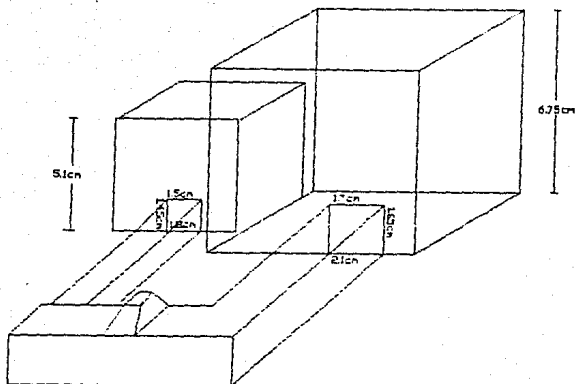


Fig. (3.4) Modelo D

Todos los modelos fueron acondicionados para un trabajo óptimo, es decir la madera fue pulida, las fisuras o separaciones entre las caras fueron selladas con cera y sellador y posteriormente barnizados, evitando así que pedazos de las paredes del molde de arena se pegaran o arrancaran durante la sacada del modelo.

### 3.2 MOLDEO

Para moldear, se coloca el modelo entre el cope y el drag. El plano de los cubos hacia el drag y la bajada hacia el cope. Se voltea la caja y se talquean los cubos, cuidando de no

exceder el mismo. Se coloca la arena de careo alrededor de los cubos y del sistema de colada, aproximadamente con un espesor de 1 pulgada. Esto se hace cribando previamente la arena para evitar aglomerados y que queden espacios sin compactar. Se compacta a mano lo mejor que se pueda hacia los cubos y luego se agrega la arena de relleno, recomendando cribar sólo la arena de relleno que va pegada a la de careo. Luego el resto de la arena se compacta con la pizoneta neumática. Acabando esto, se voltea la caja y se procede igualmente, tratando de que el plano del piso tenga arena de careo para que ésta esté pegada a los cubos y tengan el mismo medio por todos lados. Hecho esto se procede a desmoldear.

### 3.3 TECNICA DE FUSION.

Durante el proceso de fusión del metal se realizaron los siguientes pasos:

- 1.-Se precalienta el horno con el crisol vacío adentro hasta unos  $500^{\circ}\text{C}$ .
- 2.-Luego colocando el metal sobre la boca del horno hasta alcanzar una temperatura de  $200^{\circ}\text{C}$ , se procede a introducirlo en el crisol.
- 3.- Se espera a que cuando menos se haga una masa pastosa y se adiciona fundente que contiene 50% de KCl y 50% de NaCl y que actúa como atmosfera protectora.
- 4.- Posteriormente ya que el metal esta bien fundido, o sea a una temperatura de  $730^{\circ}\text{C}$ , se procede a desgasificar con hexacloroetano que se agrega en cantidades de 2g por cada Kg de aluminio. Esta desgasificación se efectúa colocando  $\text{C}_2\text{Cl}_6$  en papel aluminio y

éste se mete en la campana de inmersión para luego introducirla al baño líquido, y agitando ligeramente se le da un tiempo aproximado de 3 minutos. Este tiempo se cuenta desde que se introduce la campana. Esta desgasificación está dada por la siguiente reacción:



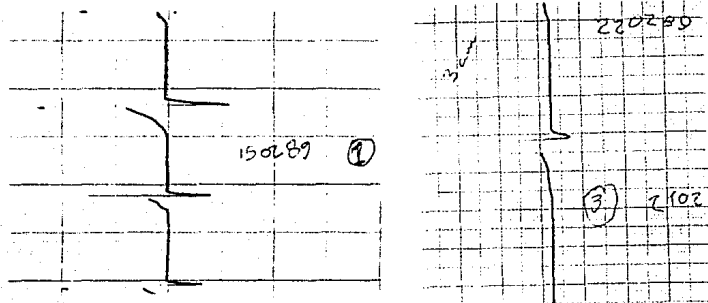
donde los productos gaseosos arrastran al hidrógeno hacia afuera.

5.- Inmediatamente después de desgasificar, se saca el crisol del horno, se descorifica y se toma la temperatura para proceder a vaciar.

## CAPITULO 4: RESULTADOS.

### 4.1 RESULTADOS GENERALES.

Los resultados obtenidos en el experimento fueron recopilados por medio de dos registradores de temperatura, los cuales nos dan a conocer unos gráficos, que tienen en las abscisas la diferencia de potencial (mV) y en las ordenadas la distancia (cm o pulgadas). A estos mV se les transforma en  $^{\circ}\text{C}$  y a la distancia se le transforma en tiempo. Ver figura 4.1.



(fig. 4.1)

Las transformaciones se hacen de la manera siguiente:

Supongase que se tiene una escala de  $5\text{mV/cm}$  y lo que mide la línea en la gráfica son  $9\text{ cm}$ ; por una sencilla regla de tres se sacan los mV resultantes que en este caso sería  $45\text{mV}$ . Luego se ve que la otra escala es de  $1\text{cm}/30\text{ seg}$  y viendo que  $5\text{mV}$  equivalen a  $30\text{ seg}$ , cuantos equivaldrían a  $45\text{ mV}$ . Con otra regla de tres se saca el



resultado final que sería de 270 seg. Se sigue el mismo método para el registrador que trabaja con escala de pulgadas.

Para estas curvas lo importante es que se vacie a una misma temperatura, en este caso de 31.0mV hasta 31.3 mV. Esto se hace con el fin de obtener una gráfica a una misma temperatura aproximadamente.

Estos resultados experimentales fueron comparados con los resultados obtenidos por medio de un programa para calcular tiempos de solidificación para piezas en forma de cubos con el método de Chvorinov. (Ver apéndice A)

#### 4.2 TABLAS DE RESULTADOS.

Se puede decir que hay 2 grupos de resultados, ya que como se indicó anteriormente hay dos tipos de modelos: uno que es de 2 cubos separados y otro que consta de 2 cubos juntos. Ahora bien, cada una de las columnas de las tablas siguientes se obtiene como sigue:

$M_s$  = Módulo de solidificación =  $V/A$

$M_s^2$  = Módulo de solidificación al cuadrado =  $(V/A)^2$

\* El módulo de solidificación se saca aquí restandole al área de transferencia de calor, el área de no transferencia de calor.

$T_{vac}$  = Temperatura de vaciado en °C

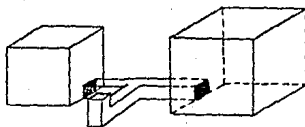
$t_{sol}$  (experimental) = es el tiempo de solidificación experimental en segundos sacado de las gráficas hechas por el registrador.

$K$  (experimental) = constante experimental proveniente de la ecuación (2.9) de Chvorinov.

$t_{sol}$  (teórico) = tiempo de solidificación teórico en segundos, sin tomar en cuenta el área sombreada, es decir el área de no transferencia de calor.

$t_{sol}^*$  (teórico) = tiempo de solidificación teórico en segundos, tomando en cuenta el Área de no transferencia de calor.

Tabla 4.1 Tiempos y módulos de solidificación para el modelo indicado en el dibujo.



datos experimentales					datos teóricos			
$M_s$ (cm)	$M_s^2$ (cm <sup>2</sup> )	$T_{vac}$ (°C)	$t_{sol}$ (seg)	$K_{exp}$ (s/cm <sup>2</sup> )	$T_{vac}$ (°C)	$t_{sol}$ (seg)	$t_{sol}^*$ (seg)	$k^*$ (s/cm <sup>2</sup> )
(cubo pequeño)								
1.0183	1.0369	745	262	252.67	745	257.955	263.422	253.994
1.0193	1.0369	750	264	254.60	750	259.243	265.610	256.157
1.0183	1.0369	769	270	260.39	769	260.052	273.131	263.586
1.0183	1.0369	766	270	260.39	766	266.815	272.470	262.773
(cubo grande)								
1.3202	1.7429	745	436	250.15	745	434.722	442.707	254.006
1.3202	1.7429	750	438	251.30	750	438.382	446.383	256.103
1.3202	1.7429	769	450	258.19	769	451.789	460.035	263.936

Los datos para la tabla anterior son:

Area de no transferencia de calor del cubo pequeño: 2.2884 cm<sup>2</sup>

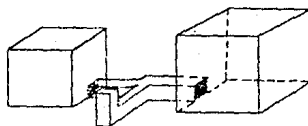
Area de no transferencia de calor del cubo grande: 3.3286 cm<sup>2</sup>

Longitud de la arista del cubo pequeño: 6.0466 cm

Longitud de la arista del cubo grande: 7.8500 cm

Volumen del cubo pequeño: 221.071; Volumen del cubo grande: 483.73

**Tabla 4.2** Tiempos y módulos de solidificación para el modelo indicado en el dibujo.



datos experimentales			datos teóricos					
Ms (cm)	Ms <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	Tvac (°C)	tsol (seg)	KEXP (s/cm <sup>2</sup> )	Tvac (°C)	tsol (seg)	tsol <sup>*</sup> (seg)	K <sup>*</sup> (s/cm <sup>2</sup> )
(cubo pequeño)								
0.8632	0.7451	748	186	249.63	748	184.427	190.214	255.262
0.8632	0.7451	752	192	257.68	752	185.640	191.466	256.941
0.8632	0.7451	752	192	257.68	752	185.640	191.466	256.941
0.8632	0.7451	752	192	257.68	752	185.640	191.466	256.941
(cubo grande)								
1.1380	1.2950	748	330	254.82	748	323.066	330.605	255.262
1.1380	1.2950	752	330	254.82	752	325.191	332.780	256.941
1.1380	1.2950	752	330	254.82	752	325.191	332.780	256.941
1.1380	1.2950	752	330	254.82	752	325.191	332.780	256.941

Los datos correspondientes a la tabla anterior son:

Area de no transferencia de calor del cubo pequeño: 2.3925 cm<sup>2</sup>

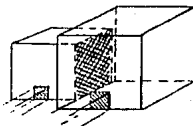
Area de no transferencia de calor del cubo grande: 3.1350 cm<sup>2</sup>

Longitud de la arista del cubo pequeño: 5.10 cm

Longitud de la arista del cubo grande: 6.750 cm

Volumen del cubo pequeño: 132.651 ; Volumen del cubo grande: 307.54

**Tabla 4.3** Tiempos y módulos de solidificación para el modelo indicado en el dibujo.



datos experimentales				datos teóricos				
$M_s$ (cm)	$M_s^2$ (cm <sup>2</sup> )	$T_{vac}$ (°C)	$t_{sol}$	$K_{exp}$	$T_{vac}$	$t_{sol}$	$t_{sol}^*$	$K^*$
			(seg)	(s/cm <sup>2</sup> )	(°C)	(seg)	(seg)	(s/cm <sup>2</sup> )
(cubo pequeño)								
1.2461	1.5527	748	300	192.211	748	265.280	396.874	255.262
1.2461	1.5527	750	315	202.870	750	266.154	398.181	256.183
1.2461	1.5527	750	315	202.870	750	266.154	398.181	256.183
1.2461	1.5527	753	315	202.870	753	266.154	400.134	257.359
(cubo grande)								
1.4893	2.2180	745	479	215.960	745	446.289	566.412	254.018
1.4893	2.2180	750	509	229.486	750	449.995	568.278	256.103
1.4893	2.2180	750	509	229.486	750	449.995	568.278	256.103
1.4893	2.2180	753	509	229.486	753	452.202	571.064	257.359

Los datos correspondientes a la tabla anterior son:

Area de no transferencia de calor del cubo pequeño: 40.9508 cm<sup>2</sup>

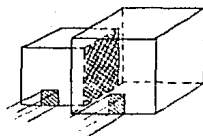
Area de no transferencia de calor del cubo grande: 41.8000 cm<sup>2</sup>

Longitud de la arista del cubo pequeño: 6.1166 cm

Longitud de la arista del cubo grande: 7.9533 cm

Volumen del cubo pequeño: 228.839; Volumen del cubo grande: 503.085

Tabla 4.4 Tiempos y módulos de solidificación para el modelo indicado en el dibujo.



datos experimentales					datos teóricos			
Ms (cm)	M <sub>S</sub> <sup>2</sup> (cm <sup>2</sup> )	T <sub>VAC</sub> (°C)	t <sub>SOL</sub> (seg)	K <sub>EXP</sub> (s/cm <sup>2</sup> )	T <sub>VAC</sub> (°C)	t <sub>SOL</sub> (seg)	t <sub>SOL</sub> <sup>te</sup> (seg)	K <sub>EXP</sub> <sup>te</sup> (s/cm <sup>2</sup> )
(cubo pequeño)								
1.0430	1.0880	745	210	193.01	745	183.611	276.371	254.008
1.0430	1.0880	748	225	206.80	748	184.427	277.751	255.262
1.0430	1.0880	748	225	206.80	748	184.427	277.751	255.262
1.0430	1.0880	748	225	206.80	748	184.427	277.751	255.262
(cubo grande)								
1.2617	1.5918	745	360	226.15	745	321.462	404.383	254.018
1.2617	1.5918	748	360	226.15	748	323.066	406.402	255.309
1.2617	1.5918	748	360	226.15	748	323.066	406.402	255.309
1.2617	1.5918	748	360	226.15	748	323.066	406.402	255.309

Los datos correspondientes a la tabla anterior son:

Area de no transferencia de calor del cubo pequeño: 28.8925 cm<sup>2</sup>

Area de no transferencia de calor del cubo grande: 29.6350 cm<sup>2</sup>

Longitud de la arista del cubo pequeño: 5.10 cm

Longitud de la arista del cubo grande: 6.750 cm

Volumen del cubo pequeño: 132.651; Volumen del cubo grande: 127.167

El área sombreada en las figuras es el área de no transferencia de calor que se maneja en cada caso.

Los resultados aquí expuestos, como se puede apreciar, son aquellos en los que la colada se hizo aproximadamente a la misma temperatura; en todos hay  $748^{\circ}\text{C}$  de temperatura de vaciado; aunque en algunas coladas hay otras temperaturas de colada como  $745^{\circ}\text{C}$  o  $750^{\circ}\text{C}$ , la finalidad es tener un estándar de temperaturas, y así poder sacar las diferencias entre la K teórica y la K experimental, para poder hacer una curva.

#### 4.3 ANALISIS DE RESULTADOS.

De todos los resultados obtenidos anteriormente de las tablas, se analizan los resultados de 2 maneras diferentes: una es por medio de la comparación en porcentajes de cuánto aumenta el tiempo de solidificación en relación con el módulo de solidificación, y la otra es por medio de la utilización de las ecuaciones y el método de Chvorinov haciendo una relación y viendo qué tanto se le tiene que aumentar al módulo de solidificación para balancear o compensar el tiempo de solidificación.

En el primer caso se van a tomar en cuenta los dos cubos con sus 6 caras de transferencia de calor, así como cuando se anula una cara.

Tómense los resultados de la tabla 4.2 y 4.4: se tiene que el Ms del cubo pequeño tomando en cuenta las 6 caras de área de transferencia de calor es de 0.8632. Ahora si se toman sólo 5

caras como Área de no transferencia de calor se ve que el Ms da un resultado de 1.043.

Luego se tiene que el porcentaje de diferencia entre los dos módulos de solidificación es:

$$\begin{array}{r} 0.8632 \text{ ————— } 100\% \\ 1.043 \text{ ————— } X \end{array}$$

Este resultado da un 20.82% de diferencia.

Ahora tómesese en cuenta el tiempo de solidificación con las 6 caras. Este es de 186 seg y el ts con sólo 5 caras es de 225 por lo que haciendo la relación queda:

$$\begin{array}{r} 186 \text{ ————— } 100\% \\ 225 \text{ ————— } X \end{array}$$

Se ve que el porcentaje de diferencia es de 20.96%.

Ahora bien, si se toman los resultados de la tabla 4.1 y 4.3 correspondientes al cubo pequeño se tiene que el Ms con 6 caras es de 1.0183 y el Ms con 5 caras es de 1.2461.

Haciendo la relación al 100% el resultado da una diferencia de 22.37%.

Ahora se hace lo mismo, sólo que tomando los datos de los tiempos de solidificación. Primero el tiempo de solidificación con 6 caras es de 264 seg y el tiempo de solidificación con 5 caras es de 315. Haciendo la relación al 100% el resultado es de 19.81%.

Analizando ahora los dos cubos grandes y haciendo los cálculos de la misma manera que para el cubo pequeño tanto para el Ms como para el ts, los resultados totales se tabulan como sigue:



Tabla 4.1b y 4.3b Comparación del por ciento de incremento del módulo de solidificación y del tiempo de solidificación. (Dimensiones correspondientes a las tablas 4.1 y 4.3)

TVAC	Ms (dcargas)	Ms (ANTC)	%INCR.	tSEXP (dcargas)	tSEXP (ANTC)	%INCR.
(cubo pequeño)						
750	1.0183	1.2461	22.37	264	315	19.81
(cubo grande)						
745	1.3202	1.4893	12.80	436	479	9.86
750	1.3202	1.4893	12.80	438	509	16.21*

Tabla 4.2b y 4.4b Comparación del por ciento de incremento del módulo de solidificación y del tiempo de solidificación. (Dimensiones correspondientes a las tablas 4.2 y 4.4)

TVAC	Ms (dcargas)	Ms (ANTC)	%INCR.	tSEXP (dcargas)	tSEXP (ANTC)	%INCR.
(cubo pequeño)						
748	0.8632	1.043	20.82	186	225	20.96
(cubo grande)						
748	1.1380	1.2617	10.86	330	360	9.09

Los datos anteriores se obtuvieron para ver qué relación existe entre el  $M_s$  y el  $t_s$ . Respecto a estos resultados, el que tiene asterisco (\*) no cuenta, ya que este varía demasiado con respecto a los anteriores debido a que la lectura del tiempo de solidificación leída en el papel del registrador no tiene una exactitud como la que se desearía. La similitud de los valores restantes, se trata de confirmar de la siguiente manera.

Considérese la ecuación de Chvorinov ya que esta comparación así lo requiere. Primero tomando en cuenta la relación

$$t_{sol} = K_T (V/A)^2 \quad (4.2)$$

y como ejemplo se toman los datos del cubo pequeño de la tabla 4.3, y sustituyendo en la ecuación (4.2) se tiene

$$398.181 = 256.183 * (1.5527)$$

y con esta otra ecuación

$$(V/A)^2 = t_{sol} / K_T \quad (4.3)$$

de la cual se despeja el  $M_s$ , se obtiene:

$$315 / 256.183 = 1.2299$$

y ahora haciendo una relación al 100% se obtiene

$$1.5527 \text{ ————— } 100\%$$

$$1.5527 - 1.2299 \text{ ————— } x$$

El valor obtenido es de 20.65%. Esta diferencia obtenida es con respecto al módulo de solidificación, el cual sabiendo que dependiendo de sus dimensiones va a ser el tiempo de solidificación; por lo que con esto se sabe que hay que aumentar un 20.65% las dimensiones del alimentador (en este caso del cubo) para que no solidifique antes de tiempo.

La relación de V/A da un manejo de dimensiones del cubo o alimentador, en la cual fijando el valor del módulo se puede variar el volumen y/o el Área, y darle las dimensiones requeridas.

Ahora veáse el caso del otro cubo pequeño. Tomando los valores de la otras tablas y realizando los cálculos de la misma manera como se hizo anteriormente, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 4.6 Relación en % del ts y del Ms usando la ecuación de Chvorinov.

No. caras de transferencia de calor	Ms <sup>2</sup>	Dif. de módulos	Relación en %
(cubos pequeños)			
5	1.2299	0.3228	20.65%
5	0.8814	0.2066	18.99%
(cubos grandes)			
5	1.9874	0.2306	10.39%
5	1.4100	0.1818	11.40%

Analizando estos resultados, y sacando medias se reducen a dos; con esto se tiene que el dato para el pequeño es de 19.85% y el que se usaría en el cubo grande sería de 10.90%.

Teniendo estos dos resultados y comparándolos con los otros obtenidos al principio, se puede decir que son equivalentes, o sea que se pueden usar indistintamente los dos resultados, con la condición de hacer un resultado definitivo. Si se ve que en los

segundos resultados hay una aplicación de las ecuaciones, este se podría considerar más exacto, pero el error que se va a incluir en estos resultados es el de la lectura directa en el papel del registrador, la cual no tiene una exactitud muy grande. Así, sacando medias de los dos métodos, el resultado del cubo pequeño da un valor de 20.57% y el resultado para el cubo grande es de 10.77%.

#### 4.4 DISCUSION DE RESULTADOS

Si se calcula la K teórica, la cual incluye el Area de no transferencia de calor, tal como se realizó experimentalmente, se ve que la K experimental sólo tiene un 0.52% de diferencia o quizá un 0.6% en lo que respecta al cubo pequeño; y por el otro lado, respecto al cubo grande esta es de 1.8% y 1.9%. De estas diferencias, las cuales teóricamente deberían de ser constantes, independientemente de la temperatura de vaciado, se podría decir que es porque la escala de medición en el papel del registrador no es tan exacta como se desearía.

Luego, se puede ver que el uso del otro modelo experimental, el de los cubos juntos, haría las veces de una colada con alimentador.

Los datos de las tablas 4.3 y 4.4 que corresponden al modelo dibujado, no sólo reportan el área de no transferencia de calor de los canales, sino que también existe un área de no transferencia de calor debida al contacto existente entre las dos

figuras, ya que estas están juntas; con esto se puede simular que el cubo grande tiene un alimentador pequeño y que el cubo pequeño tiene un alimentador grande.

Esto quiere decir que va a haber una diferencia que se tiene que incluir en los cálculos obtenidos de la ecuación de Chvorinov debido al aumento en el tiempo de solidificación. Ahora bien, en función de las dos maneras de obtener los resultados anteriores, lo que se ve es que el porcentaje en el aumento del módulo de solidificación es igual al porcentaje de aumento en el tiempo de solidificación. Hay un diferente porcentaje de aumento para el cubo pequeño y para el cubo grande, pero tanto para unas dimensiones como para otras, los porcentajes son iguales.

#### 4.5 APLICACION DE RESULTADOS

Con los resultados anteriores ya se puede predecir lo que se tiene que hacer con el módulo de solidificación del alimentador.

Si la pieza es grande, por ejemplo, y el alimentador no ocupa el total de la cara, es decir que la superficie de contacto del alimentador con la pieza es menor que una cara de la pieza, se va a tener que aumentar un 10.77% en cantidad al módulo de solidificación.

Este aumento se tiene que hacer para evitar una solidificación del alimentador antes de tiempo. Por ejemplo, si se tiene el programa y con este se calculan tiempos de

solidificación, y de estos se saca el tiempo que interese, sería un determinado tiempo teórico, por ejemplo 398.1818, con un módulo de solidificación y con una K teórica calculada. Teniendo este dato, se puede decir sin lugar a dudas que el alimentador con ese módulo de solidificación, efectivamente va a dar el tiempo necesario para que no solidifique, pero ahora con el presente trabajo ya se sabe que el alimentador va a solidificar mucho antes de 398.1818 seg., por lo que hay que aumentar en un 10.77% el módulo de solidificación, es decir, que para obtener la corrección, en lugar de que el módulo de solidificación sea 1.5527, tiene que ser de 1.8612, para ocasionar que el alimentador solidifique después, y de esta manera evitar el rechupe.

Esta corrección se aplica tanto al alimentador (o cubo) pequeño como al grande, lógicamente aplicando el porcentaje de corrección correspondiente a cada caso.

Después de sacar estos datos se buscó la manera de hacer un estándar o gráfica que relacionara el tiempo de solidificación teórico con un módulo de solidificación. Esto se logró haciendo una gráfica de tiempo de solidificación en segundos contra el módulo de solidificación, pero este módulo se tiene que tomar al cuadrado para poder linealizar la curva y que los modelos y ecuaciones sean válidos; el tiempo va en las abscisas y el módulo en las ordenadas, y en donde las pendientes son la K teórica y la K experimental (Ver gráfica 2 del apéndice C).

Si se observa la figura del apéndice C (gráfica 1) se puede hacer el cálculo fácilmente; si el cálculo con la ecuación

sale un tiempo de 398.1819 y se usa la pendiente de la  $F$  teórica, resulta un módulo de solidificación de 1.5527, pero como ya se vió y se comprobó que este módulo tiene un aumento, entonces se usa la pendiente de la  $K$  experimental, y ahora ya se ve que el módulo de solidificación efectivamente, aumentó a 1.8612.

## CAPITULO 5: CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas son las siguientes:

1.- Para los cubos separados, o sea aquellos que tienen 6 caras de transferencia de calor, el modelo matemático de Chvorinov es totalmente válido.

2.- Para los cubos juntos, el tiempo que marca el cálculo por medio de la ecuación es mayor al tiempo real en aproximadamente 11% para un cubo en el que su área de no transferencia de calor no sea mayor o igual a una de sus caras, y aproximadamente 21% para aquel que su área de no transferencia de calor sea mayor a una de sus caras. (ver datos exactos en cap.4)

3.-El porcentaje de aumento en el módulo de solidificación es igual al porcentaje de aumento en el tiempo de solidificación, individualmente para cada cubo.



## CAPITULO 6: RECOMENDACIONES

En este capítulo se debe de entender por recomendaciones aquellas que pueden servir o se deben seguir para trabajos posteriores.

Se puede recomendar, que cuando se usen los registradores, previamente calibrados, se va a obtener una curva la cuál va a marcar la temperatura de vaciado, pero ésta va a resultar diferente a la que realmente se tome justo un momento antes de vaciar. Es decir, esta última va a ser un poco más alta. Se recomienda no hacer correcciones; hay que tomar siempre sólo una como referencia.

En cuanto a otro tipo de trabajos, es recomendable hacer otros experimentos, pero con aleaciones de aluminio y posteriormente con otros metales puros y las aleaciones de estos metales. Esto sería para tener standares para todo tipo de metales, o en su caso, para ver si son iguales éstos o cuanto difieren en sus resultados debido a sus propiedades térmicas y así poder comparar para unirlos por grupos o como mejor convenga.

También para otros trabajos, sería conveniente que se hicieran cálculos para superficies curvas, es decir, cilíndricas, esféricas, cónicas, etc. Esto se debe a que en estas figuras la transferencia o el flujo de calor se lleva a cabo de diferente manera, debido a la geometría de la figura y es por esto que los resultados podrían ser muy distintos a los que se dan usando superficies planas. En esto, se tendrían que analizar los otros

modelos de Chvorinov e incluir los factores de  $n$  de los que se habló anteriormente.

También se necesitaría hacerle unas correcciones al programa, para ver de que manera se hacen los cambios en las ecuaciones y que los cálculos salgan correctamente.

Otro caso sería el hacer uso de los resultados del presente trabajo para diseñar un método de cálculo de alimentadores teniendo en cuenta las ecuaciones y las consideraciones teóricas y matemáticas que se usaron en el mismo. Esto se podría lograr introduciendo los cálculos y resultados completos que ya hubieran salido de trabajos con otro tipo de figuras y metales, para así poder generalizar un método o en alguna forma exponer para cada caso un procedimiento.

Otro trabajo que sería conveniente hacer, son estudios sobre el incremento o modificaciones del  $t_s$  sobre las uniones que con más frecuencia se encuentran en las piezas utilizadas industrialmente como son los modelos de en CRUZ, ELE, TE, o cualquier otro que se use incluyendo discos, "donas", piezas en forma de "U", etc., y así ir formando una tabla del cálculo del  $t_s$  correspondiente a varios tipos de molde y para tener un método independiente para cada una de sus variaciones y que éste sea confiable.

En general, se recomendaría hacer experimentos o cualquier estudio que involucre el  $t_s$  de cualquier forma; esto también se refiere a corregir gráficas, hacer las tablas por grupos; o sea, dividiendo metales que puede ser por ferrosos, no

ferrosos, por familias o como más convenga.

Todo lo anterior teniendo en cuenta el modelo de Chvorinov, o suponiendo otro modelo siempre y cuando éste pueda ser comprobado.

En último caso se podría ver si una esfera o determinada pieza o piezas realmente necesitan un alimentador o si por ellas mismas se alimentan, todo esto usando todos los modelos y ecuaciones ya comprobadas.

## ANEXO 1

### TERMOPARES

Para este experimento se llevó a cabo la fabricación de termopares desnudos. Estos termopares son llamados así, debido a que el par metálico o en sí todo el termopar está en contacto directo con el metal fundido, a diferencia de los termopares con carcasa (Fig. A.1B), los cuales tienen una especie de "cápsula" envoltoria de algún metal.

Estos termopares aparte de ser desnudos, son del tipo K, los cuales son de Chromel-Alumel, es decir dos alambres delgados, los cuales son introducidos en un tubo bifilar de unos 8cm de longitud de material cerámico. Posteriormente se unen las puntas de uno de sus lados y se funden con oxiacetileno de tal manera que quede una "bolita" (Fig. A. 8), y luego se jala el alambre ya fundido de tal manera que sobresalga la "bolita".

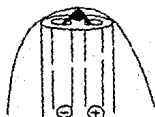


Fig. (A. 1)

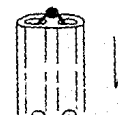


Fig. (A. 2)

Posteriormente estos termopares se introducen en la arena tratando de que la punta del termopar quede en el centro geométrico de los cubos, ya que se considera que la última parte en solidificar es ésta. (Fig. (A. 3))

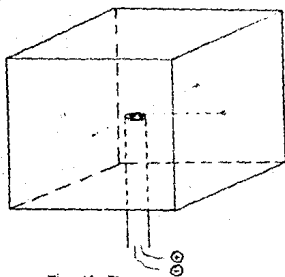


Fig. (A. 3)

Para marcar un centro en estas figuras, se logra con un clavo que es introducido al modelo exactamente en el centro; esto se hace cuando se fabrican, dejando como unos 3 ó 4 cm del clavo afuera y posteriormente se le corta la cabeza al clavo, de tal manera que quede una especie de "palillo", el cual también da facilidad de introducir los termopares una vez acabado el moldeo. Luego se marca, en el tubo bifilar, la mitad de la altura del cubo y ahí se atora el termopar.

Luego estos termopares se conectan a registradores de temperatura, de los que se obtienen unos graficos del comportamiento térmico del metal durante el tiempo transcurrido desde que se vacía hasta su solidificación.

## ANEXO 2

### PREPARACION DE LA ARENA DE CAREO.

Para tener idénticos resultados en todas las pruebas, se prepara siempre la misma cantidad de arena con la misma cantidad de componentes y también cuidando siempre en hacer 3 kg de arena por carga y conteniendo lo siguiente:

	<u>% en peso</u>
a) Arena de granulometría 80-90	85%
b) Agua	5%
c) Bentonita sódica	5%
d) Bentonita cálcica	5%

Primero se mezcla la arena con el agua durante 3 minutos en el molino chileno; posteriormente se agrega la bentonita sódica y la bentonita cálcica y se procede a mezclar durante 5 minutos más en el molino chileno, de tal manera que se mezclen bien los componentes. Después se saca la arena y se mete en recipientes perfectamente cerrados para evitar así la pérdida de la humedad y la variación de las propiedades.

## APENDICE A

Programa utilizado para los cálculos del presente trabajo.

```

REM:PROGRAMA PARA CALCULAR TIEMPOS DE SOLIDIFICACION
REM:(SOLAMENTE PIEZAS EN FORMA DE CUBOS)
REM:METODO DE CHVORINOV
CLS:DEFDBL A-Z
ss="####.#####"
GOSUB 3
5 GOSUB 60
GOSUB 300
PRINT
INPUT "( OTRO CALCULO (S/N) ";OTRO$
IF OTRO$="S" OR OTRO$="s" THEN 5
END
3 CLS:?"SIMULACION DE VACIADO DE ALUMINIO EN CUBOS"
?
input "( Esta conectada la impresora (s/n) ";opcion$
IMPRESORA = ((opcion$="s") or (opcion$="S"))
RETURN
60 CLS
? "SIMULACION DE VACIADO DE ALUMINIO EN CUBOS"
? "C SALVADOR CHECA (1989). "
?
65 INPUT "Cual es la temperatura de solidificacion ( C)? ",TM
70 INPUT "Cual es la temperatura del molde ( C)? ",TA
80 INPUT "Cual es la temperatura de vaciado ( C)? ",TV
90 INPUT "Cual es la densidad del metal liquido (g/cc)? ",DL
100 INPUT "Cual es la densidad del metal solido (g/cc)? ",DS
110 INPUT "Cual es el calor especifico del metal liquido (cal/g
C)? ",CM
120 INPUT "Cual es el calor especifico de la arena (cal/g C)? ",CA
130 INPUT "Cual es el calor latente de solidificacion del metal
(cal/g)? ",CS
140 INPUT "Cual es la conductividad termica de la arena o molde
(cal/cm s C)? ",K
150 INPUT "Cual es la densidad de la arena o molde (g/cc)? ",DA
160 INPUT "Cual es la longitud de la arista del cubo (cm)? ",L
170 INPUT "Cual es el area de no transf. de calor (cm^2)? ",F
?:input "( Es correcto (s/n) ";opcion$
if opcion$="n" or opcion$="N" then goto 65
A=6*L^2;V=L^3
P=(6*L^2)-F
M=V/A;MM=M^2
H=V/P;HH=H^2
PRINT TAB(30) "RESULTADOS"
PRINT "Area del cubo=";A;"cm^2"
PRINT "Volumen del cubo=";V;"cc"
PRINT "Modulo de solidificacion=";M;"cm"

```

```

? "Módulo de solidificación (ANTC) = ";H;" cm"
PRINT "T VACIADO","t SOLIDIF. ","t SOL (ANTC)","K'S"
If impresora then
LPRINT TAB(30) "RESULTADOS"
LPRINT "Area del cubo=";A;"cm 2"
LPRINT "Volumen del cubo=";V;"cc"
LPRINT "Modulo de solidificacion=";M;"cm"
LPRINT "Módulo de solidificación (ANTC) = ";H;" cm"
LPRINT "T VACIADO","t SOLIDIF. ","t SOL (ANTC)","K'S"
End if
FOR I=745 TO TV STEP 1
230 C=(1.1283791#*((1-TA)/(DS*CS)+(DL*CM*(1-TM))))*SQRT(K*DA*CA)
240 TS=(M/C)^2;K2=TS/MM
250 US=(H/C)^2;K3=US/HH
? using s#;I,TS,US,C,K2,K3
if impresora then lprint Using s#;I,TS,US,C,K2,K3
NEXT
RETURN
300 ? "datos finales: "
if impresora then lprint "datos finales : "
? I,TS,US,C
if impresora then lprint I,TS,US,C
RETURN

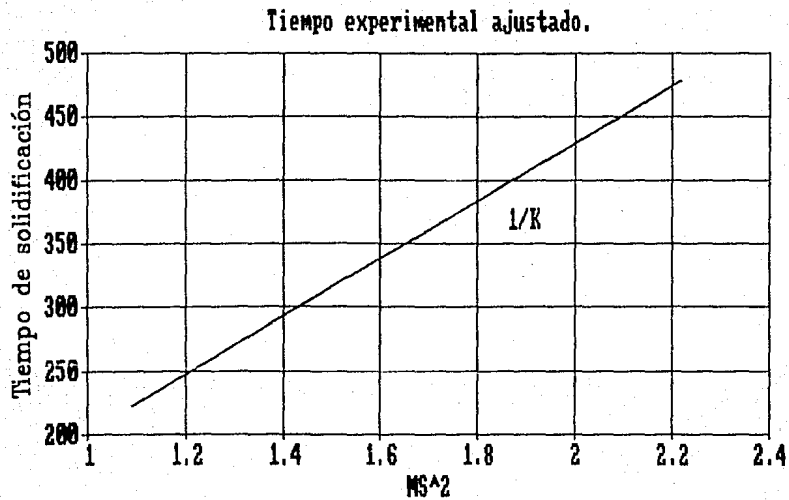
```

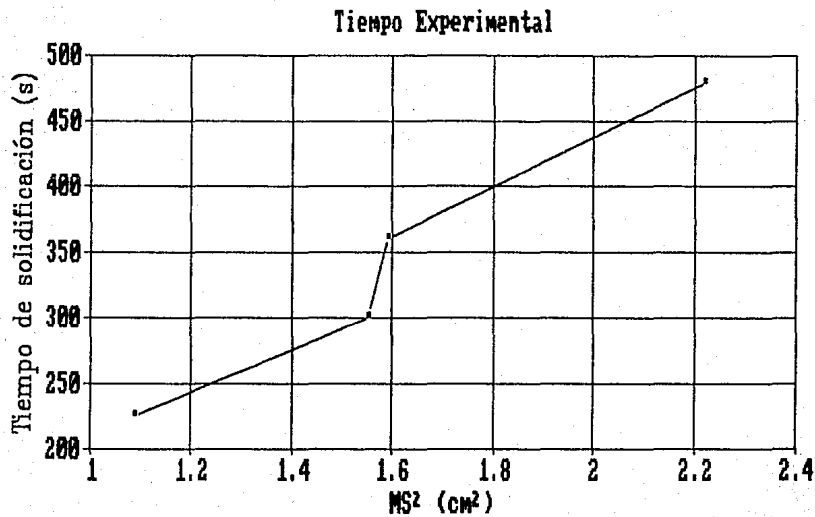


## APENDICE B

TABLA DE DE VALORES DE DATOS TERMICOS APROXIMADOS  
(PARA ALUMINIO Y HOLDE DE ARENA)

Temperatura de solidificación = .....	660 °C
Densidad del metal líquido ( $\rho_L$ ) = .....	2.67 g / cm <sup>3</sup>
Densidad del metal sólido ( $\rho_S$ ) = .....	2.70 g / cm <sup>3</sup>
Calor específico del metal líquido (CL) = .....	0.26 cal / g °C
Calor específico de la arena o molde (CM) = ...	0.27 cal / g °C
Calor latente de solidificación (H) = .....	95 cal / g
Conductividad térmica de la arena (KM) = .....	0.00145cal/cm s °C
Densidad de la arena ( $\rho_M$ ) = .....	1.5 g / cm <sup>3</sup>





## BIBLIOGRAFIA

BARRAND, Pierre y Gadeau, Robert  
Enciclopedia del Aluminio  
Ediciones URMO 1983 Bilbao

BEELEY, P.R.  
Foundry technology  
Butter-Worths 1972 London

FLEMINGS, Merton C.  
Solidification Processing  
McGraw-Hill 1974 New York

FLEMINGS, Merton C Taylor, Howard F and Wulff, John  
Foundry engineering  
Wiley 1969 New York  
Chapters 2, 3, 5 and 10

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TWO-PHASES SYSTEMS, Haifa 1971  
Proceedings, ed. by G.Hetsroni and others  
Pergamon 1972 Oxford

KONDIC, Vaya  
Metallurgical principles of founding  
Edward Arnold. 1968 London

METALS HANDBOOK, ASM  
Vol.1, Properties and selection of metals  
8th edition

MONDOLFO, L.F.  
Aluminum alloys; structure and properties  
Butter-Worths 1978 London

SMALER, Amos Taylor, Howard and Muliff, John  
Metallurgy for engineers; casting, welding and working  
Wiley & Sons 1952 New York  
Chapters 19 and 20

SHARP, John  
Casting pit practice  
Iliffe 1968 London