

13
267

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO



FACULTAD DE QUIMICA

DETERMINACION DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACION
EN PIEZAS CILINDRICAS DE ALUMINIO

TESIS MANCOMUNADA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A N:
GONZALO RAFAEL MENDOZA LOPEZ
FERNANDO MARCELINO GARDUÑO LUNA



MEXICO, D.F.

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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.



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

JURADO ASIGNADO SEGUN EL TEMA:


Presidente: *Ing. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco*
Vocal: *Ing. Marcelino Madrigal Duarte*
Secretario: *Ing. Guillermo Fausto Salas Banuet*
1^{er} Suplente: *Ing. Miguel Martínez Madrid*
2^{do} Suplente: *Ing. José Alejandro García Hinojosa*

Sitio donde se desarrollo el tema:

*Laboratorio de Fundición, Edificio D, Facultad de Química,
Ciudad Universitaria, U. N. A. M.*

SUSTENTANTES :


Fernando Marcelino Garduño Luna


Gonzalo Rafael Mendoza López

ASESOR :


Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco

MARCELINO:

A MIS PADRES

**POR SU AYUDA, COMPRENSION
Y CARIÑO.**

A MIS HERMANOS.

A TODOS MIS FAMILIARES, AMIGOS Y PROFESORES.

GONZALO:

**GRACIAS A DIOS POR TODAS LAS BENDICIONES QUE HA DERRAMADO
SOBRE MI.**

**GRACIAS A MIS PADRES POR TODO EL APOYO Y AMOR QUE ME HAN
DADO PARA LOGRAR TODAS MIS METAS.**

GRACIAS A MI HERMANO POR SU COMPRESION.

**GRACIAS A CONCHITA POR TODO EL APOYO Y AMOR QUE ME
BRINDA.**

GRACIAS A MIS ABUELITOS, A MIS TIOS Y A MIS PRIMOS.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos hacer un reconocimiento a nuestro asesor I.Q.M. Cándido Atlenco Tlapanco por su ayuda y orientación que siempre nos brindo, así como también a Arturo y al M.C. Alejandro García por sus atenciones.

INDICE

	<i>Pag.</i>
RESUMEN	1
 CAPITULO 1	
 INTRODUCCION	2
 CAPITULO 2	
 FUNDAMENTOS TEORICOS	
2.1 Modulo de solidificación y ecuación de Chvorinov	3
2.2 Calculo del Modulo de Solidificación	13
 CAPITULO 3	
 DESARROLLO EXPERIMENTAL	
3.1 Planteamiento del experimento	19
3.1.1 Diseño del modelo	19
3.1.2 Selección del metal empleado	32

	<i>Pag.</i>
<i>3.2 Construcción de termopares</i>	<i>33</i>
<i>3.3 Calibración de registradores</i>	<i>36</i>
<i>3.4 Preparación de las arenas de moldeo</i>	<i>36</i>
<i>3.5 Moldeo</i>	<i>38</i>
<i>3.6 Descripción de colocación de termopares</i>	<i>39</i>
<i>3.7 Técnica de fusión y vaciado de moldes</i>	<i>41</i>

CAPITULO 4

RESULTADOS

<i>4.1 Resultados Generales</i>	<i>45</i>
<i>4.2 Tablas de resultados</i>	<i>47</i>
<i>4.3 Análisis de resultados</i>	<i>54</i>

CAPITULO 5

CONCLUSIONES	57
---------------------	-----------

	<i>Pag.</i>
CAPITULO 6	
BIBLIOGRAFIA	62
APENDICE A	64
APENDICE B	66
APENDICE C	76

RESUMEN

El objetivo primordial de este trabajo fue el determinar la influencia que tiene el área de no transferencia de calor (para piezas cilíndricas de fundición de aluminio) sobre el tiempo de solidificación.

El área de no transferencia de calor es aquella en la cual no existe un gradiente de temperatura en ambos lados inmediatos y opuestos en dicha área, es decir como su nombre lo indica no hay transferencia de calor.

Esta área se presenta cuando se unen dos figuras por una de sus caras formando una figura única, en donde el área de unión de ambas figuras es la llamada área de no transferencia de calor (ANTC). También puede presentarse cuando se tienen figuras geométricas complejas que se tienen que dividir en figuras geométricas sencillas para poder determinar su tiempo total de solidificación, dando lugar dichas divisiones a áreas internas en la pieza que se consideran de no transferencia de calor. Para encontrar la influencia de dicha(s) área(s), el trabajo se basó en el método de Chvorinov, sus ecuaciones y algunas otras consideraciones.

Se diseñó un método experimental complementario al método teórico de Chvorinov. Tal método experimental necesita cuatro modelos cilíndricos de diferentes dimensiones y los mismos cuatro modelos pero rediseñados. La única restricción de este trabajo es que solo es válido para figuras cilíndricas.

CAPITULO 1: INTRODUCCION

En el proceso de solidificación de los metales estos tienden a contraerse. En piezas coladas es muy frecuente que esta contracción origine cavidades internas o superficiales, conocidas como rechupes, los cuales provocan que las piezas salgan defectuosas. Para eliminar tales rechupes en las piezas se coloca un alimentador, que es una extensión geométrica particular, en el modelo de la pieza original para que el rechupe se quede en dicha extensión, obteniendo así una pieza sana.

Tomando como base la necesidad de obtener piezas coladas sin problemas de rechupes, ya a la vez buscar el aprovechamiento del metal y los energeticos utilizados en la manufactura de piezas coladas, para poder competir en el mercado de las fundiciones ofreciendo un producto de alta calidad y bajo costo para satisfacer así las necesidades de nuestros clientes, se pretende ver la influencia que ejercen las áreas de no transferencia de calor en los tiempos de solidificación para un mejor cálculo de los alimentadores (específicamente cilíndricos).

En muchas fundiciones en donde se producen diferentes piezas coladas, se tienen problemas de rechupe frecuentes, a pesar de que se utilizan alimentadores para eliminarlos, se encuentra que el alimentador fue muy pequeño y el rechupe paso a la pieza, o al contrario, que el alimentador fue muy grande para el pequeño rechupe, obteniendo un gasto mayor de energía y material que no es aprovechado. Todo esto porque no se planea o diseña adecuadamente el alimentador al no tomar en cuenta las áreas de no transferencia de calor, en el calculo de los alimentadores.

CAPITULO 2: FUNDAMENTOS TEORICOS

2.1 MODULO DE SOLIDIFICACION Y ECUACION DE CHVORINOV

El modulo de solidificación (Ms) se define como el cociente del volumen del metal líquido entre el área de transferencia de calor.

$$2.1 \quad M_s = \frac{V}{A}$$

Chvorinov fue el primero en introducir el modulo de solidificación en el calculo del tiempo de solidificación. Posteriormente surgieron otros métodos para calcular el tiempo de solidificación pero todos basados en los estudios de Chvorinov, él considero un balance de flujo de calor para derivar sus ecuaciones con las cuales se calcula el tiempo de solidificación en piezas con geometría plana, cilíndrica y esférica. En dicho balance asumió lo siguiente:

- i) *El flujo de calor es unidireccional.*
- ii) *El metal es vaciado a su temperatura de fusión T_s , y no con un sobrecalentamiento.*

¹FLEMINGS, Merton C. *Solidification Processing* 1974 pp 67

- iii) El metal es colado a un molde con temperatura ambiente T_o .
- iv) La superficie del molde en contacto con el metal es calentada súbitamente a T_M a un tiempo $t=0$.

Lo anterior se puede expresar con la ecuación siguiente:

$$2.2 \quad \frac{dT}{dt} = \beta_M \frac{d^2T}{dx^2}$$

en donde:

T_M = Temperatura de fusión del metal en °C.

β_M = Difusividad térmica en cm /seg.

t = Tiempo en seg.

x = Distancia desde la pared en cm.

La solución a esta ecuación diferencial con las condiciones a la frontera dadas anteriormente

es:

$$2.3 \quad \frac{T-T_M}{T_o-T_M} = \text{erf} \frac{-x}{2\sqrt{\beta_M t}}$$

Esta ecuación nos dice que la temperatura del metal líquido causa una temperatura T en el molde como una función del tiempo a una distancia x desde la pared del molde y en donde erf es la función error.

Entonces, la velocidad del flujo de calor hacia el molde en la interfase molde-metal esta dada por:

$$2.4 \quad \left[\frac{q}{a} \right]_{x=0} = -K_M \left[\frac{dT}{dx} \right]_{x=0}$$

Donde:

K_M = Conductividad térmica del molde en $cm / seg.$

q = Velocidad del flujo de calor en $cal/seg.$

a = Area de la interfase molde-metal en $cm .$

Derivando parcialmente la ecuación (2.3) con respecto a x , cuando $x=0$ y combinando los resultados con la ecuación (2.4), la cantidad del flujo de calor a través de la interfase molde-metal es:

$$2.5 \quad \left[\frac{q}{a} \right]_{x=0} = -\sqrt{\frac{K_M \rho C}{\pi t}} (T_M - T_0)$$

¹J.P. HOLMAN, *Transferencia de Calor* 1989 pp 18-22

donde:

C_M = Calor específico del molde en cal/g °C .

μ_M = Densidad del molde en g/cm .

La cantidad de calor que fluye dentro del molde es igual al calor que se extrae para que el metal líquido solidifique. Ya que el sólido, así como el metal líquido están exactamente a T_M , de aquí que:

$$2.6 \quad \left[\frac{Q}{a} \right]_{x=0} = -\mu_L H \frac{dS}{dT}$$

donde:

S = Espesor solidificado en cm.

μ_L = Densidad del metal líquido en g/cm .

H = Calor latente de solidificación en cal/g .

Ahora combinando las ecuaciones (2.5) y (2.6) e integrando desde $S=0$ a un tiempo $t=0$, tenemos:

$$2.7 \quad S = \frac{2}{\sqrt{P}} \frac{[T_M - T_o]}{[\mu_L H]} \sqrt{K_M \mu_M C_M / E}$$

En la ecuación (2.7), se ve como en la parte derecha de la igualdad el término izquierdo relaciona las propiedades térmicas del metal, y el término derecho, involucra las del molde. Por lo tanto esta ecuación nos indica como se combinan las propiedades térmicas tanto del metal como las del molde.

Si asumimos que S (el espesor solidificado) tiene las mismas dimensiones que la relación del volumen solidificado en un tiempo t (es decir V_s) y el área de transferencia de calor A ó lo que es igual la interfase molde-metal, donde S esta en cm. y V_s/A también en cm.

Entonces con esta suposición podemos sustituir S en la ecuación (2.7) por V_s/A . Ahora si consideramos $t=t_f$, donde t_f es el tiempo total de solidificación de una colada de volumen V se obtiene:

$$2.8 \quad \frac{V}{A} = \frac{2}{\sqrt{D}} \frac{[T_N - T_0]}{\rho_s H} \sqrt{K_M \rho_M C_M} \sqrt{t_f}$$

Si agrupamos las constantes del metal y del molde en una sola constante global, la ecuación (2.8) se transforma en:

$$2.9 \quad \frac{V}{A} = k_1 \sqrt{t_f}$$

y despejando el tiempo total de solidificación se tiene

$$2.10 \quad t_r = (k_1)^2 \left[\frac{V}{A} \right]^2$$

donde k_1 , es una constante del sistema metal-molde dado, considerando temperatura ambiente en las paredes del molde.

Esta ecuación (2.10) es la ecuación de Chvorinov usada para comparar tiempos de solidificación en coladas de figuras simples con geometría plana, en ella se ve que el tiempo total de solidificación de dichas coladas es proporcional al cuadrado del modulo de solidificación.

Como en la vida real se cuela a una temperatura superior a la de solidificación, entonces hay que considerar 4 variables mas que son la temperatura de vaciado (T_v), la densidad del metal en estado liquido (μ_l) y el calor específico del metal liquido (C_l), así también hay que considerar la temperatura del molde (T_o), con esto la ecuación 2.8 queda:

$$2.11 \quad \frac{V}{A} = M_s = \frac{T_v - T_o}{\mu_s H + [\mu_L C_L (T_v - T_M)]} \left[\frac{2}{\sqrt{D}} \sqrt{K_M \mu_M C_M t_r} \right]$$

Esta ecuación (2.11) es válida para superficies planas, pero para figuras donde se presentan superficies curvas tales como esferas o cilindros es posible derivar una expresión más exacta de la ecuación (2.8) relacionando t_r con V/A .

Para el caso de superficies curvas la ecuación diferencial aplicada para el flujo de calor en el molde es la misma, pero se toma en cuenta el factor de forma para las coordenadas específicas de cada problema. En nuestro caso las coordenadas que se utilizarían serían cilíndricas; Pero al aplicar el factor de forma podemos trabajar en coordenadas rectangulares, la ecuación de transferencia de calor obteniendo el mismo resultado, ya que si comparamos la ecuación 2.2 y la ecuación 2.12 podemos ver que son iguales, pero la ecuación 2.12 tiene incorporado el factor de forma, como se ve a continuación:

$$2.12 \quad \frac{dT}{dt} = B_{\mu} \left[\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{n}{r} \frac{dT}{dr} \right]$$

donde r es el radio de la pieza y ya que hablamos de longitudes podemos decir que nuestras ecuaciones son iguales pudiendo intercambiar a x que es una longitud, por r que es una longitud también, ya que la solución de la ecuación diferencial solo se ve afectada por el factor de forma el cual fue asignado por Chvorinov para cada tipo de geometría el cual tiene incluido una constante, que varía según la geometría de la pieza que se este tratando tomando esta un valor de: 0 para superficies planas, 1 para cilindros y 2 para esferas. Siendo esta la

¹CARSLAW H.S. & JARGER J.C., *Conduction of Heat in Solids* 1959 pp 75

razón de que la ecuación diferencial se resuelva en dos partes, la primera parte es la que resolvimos anteriormente teniendo que resolverse esta siempre, no importando la geometría que estemos manejando. La solución de la segunda parte (para cilindros) se muestra a continuación:

$$2.12a \quad \frac{dT}{dt} = \frac{n}{r} \frac{dt}{dr}$$

Separando variables, y agrupando las diferenciales de temperatura para así poder eliminarlas tenemos:

$$2.12b \quad \frac{dT}{dT} \frac{dt}{dr} = \frac{r}{n}$$

$$2.12c \quad ndt = r dr$$

$$2.12d \quad nt_r + c_1 = \frac{(r^2)}{2} + c_2$$

Las constantes de integración c_1 y c_2 se agrupan en la constante del molde k_M , ya que al hacer una integración sin límites debemos de contar con constantes de integración de nuestro volumen de control.

La solución completa de la ecuación (2.12) en el caso de un cilindro se da a continuación:

$$\frac{2nt_f k_M}{r^2}$$

Y lo único que cambia es la adición del factor de forma, y que como se mencionó anteriormente la constante n toma el valor de 1 ya que estamos trabajando con cilindros.

$$2.13 \quad \frac{V}{A} = \frac{T_M - T_0}{\mu_S H} \left[\frac{2}{\sqrt{B}} \sqrt{K_M \mu_M C_M} \sqrt{t_f} + \frac{2nK_M t_f}{r^2} \right]$$

Como también se vacía a una temperatura superior a la de solidificación, consideramos 4 variables más que son la temperatura de vaciado (T_V), la densidad del metal en estado líquido (μ_L) y el calor específico del metal líquido (C_L), así como también la temperatura del molde (T_M), quedando la ecuación 2.13 como sigue:

$$2.14 \quad \frac{V}{A} = M_S = \frac{T_V - T_0}{\mu_S H [\mu_L C_L (T_V - T_M)]} \left[\frac{2}{\sqrt{B}} \sqrt{K_M \mu_M C_M} \sqrt{t_f} + \frac{2nK_M t_f}{r^2} \right]$$

Agrupando en la ecuación (2.14) todas las propiedades constantes, tanto del metal como las del molde, en dos constantes globales (k_1 y k_2) se tiene:

$$2.15 \quad \frac{V}{A} = k_1 \sqrt{t_f} + k_2 t_f$$

Nota: Ver los valores de las variables en el apéndice A donde:

$$2.16 \quad k_1 = \frac{T_V - T_0}{\mu_S H + [\mu_L C_L (T_V - T_H)]} \left[\frac{2}{\sqrt{B}} \sqrt{K_H \mu_H C_H} \right] \sqrt{t_f}$$

Y

$$2.17 \quad k_2 = \frac{T_V - T_0}{\mu_S H + [\mu_L C_L (T_V - T_H)]} \left[\frac{2nK_H t_f}{r^2} \right]$$

considerando, en dichas constantes globales del sistema metal-molde, que la temperatura en las paredes del molde es la temperatura ambiente.

Para despejar el tiempo total de solidificación (para piezas con superficies curvas) de la ecuación (2.15), se tienen los siguientes pasos:

i) **Primero elevamos al cuadrado todos los términos de la ecuación.**

$$2.18 \quad \left[\frac{V}{A} \right]^2 = M_S^2 = K_1^2 t_f + K_2^2 t_f^2$$

- ii) Después pasamos todos los términos del lado derecho de la igualdad y ordenamos los términos como una ecuación de segundo grado de la forma $ax^2 + bx + c = 0$.

$$k_1^2 t_f^2 + k_1^2 t_f + (-M_S^2) = 0$$

- iii) Se aplica la fórmula general de resolución de este tipo de ecuación.

$$t_f = \frac{-k_1^2 \pm \sqrt{k_1^4 - 4k_1^2(-M_S^2)}}{2k_1^2}$$

- iv) Por último se toma la raíz positiva, pues con la negativa se obtienen tiempos negativos e incoherentes con lo esperado, quedando la ecuación:

$$2.19 \quad t_f = \frac{-k_1^2 + \sqrt{k_1^4 + 4k_1^2 M_S^2}}{2k_1^2}$$

Esta ecuación (2.19) es la ecuación de Chvorinov usada para comparar los tiempos de solidificación en coladas de figuras con superficies curvas como cilindros o esferas.

2.2 CALCULO DEL MODULO DE SOLIDIFICACION

Como ya se dijo anteriormente, y lo expresa la ecuación (2.1), el modulo de solidificación se

define como la relación del volumen entre el área de transferencia de calor:

$$2.1 \quad M_s = \frac{V}{A}$$

Para calcular el módulo de solidificación, por ejemplo de un cubo, este está descrito por la longitud de las aristas.

Suponiendo que a es la longitud de la arista, entonces:

$$2.20 \quad M_s = \frac{V}{A} = \frac{a^3}{6a^2} = \frac{a}{6} \text{ CM.}$$

Ahora para un cilindro de radio r y altura h el área total del cilindro es igual a la suma de su área lateral más el área de sus dos bases. Así como lo muestra la figura 2.1, el área lateral la podemos desenrollar imaginariamente del cilindro formando un rectángulo con lo cual:

$$A_L = 2\pi r h$$

Si el área de una base (A_B) del cilindro es

$$A_B = \pi r^2$$

entonces, el área total del cilindro ATC es igual a

$$A_{TC} = A_L + 2A_B$$

$$A_{TC} = 2Prh + 2Pr^2$$

y factorizando se tiene

$$A_{TC} = 2Pr(h+r)$$

Ahora si el volumen del cilindro V_C es igual a:

$$V_C = Pr^2h$$

el modulo de solidificación será por lo tanto:

$$M_S = \frac{Pr^2h}{2Pr(h+r)}$$

simplificando se tiene que el modulo de solidificación para un cilindro es:

$$2.21 \quad M_S = \frac{rh}{2(h+r)} \text{ cm.}$$

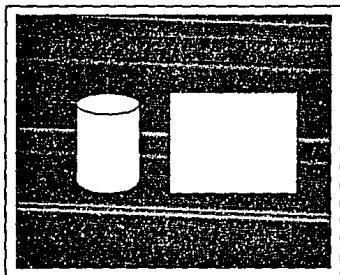


Fig. 2.1 . Area de un cilindro.

Y ahora para una esfera de radio r , sabiendo que el volumen V_E de una esfera es igual a:

$$V_E = \frac{4}{3} (Pr^3)$$

y su área A_E es:

$$A_E = 4Pr^2$$

el modulo de solidificación será:

$$M_s = \frac{\left(\frac{4}{3}\right) (\rho r^3)}{4 \rho r^2}$$

simplificando se obtiene el modulo de solidificación para una esfera, que es:

$$2.22 \quad M_s = \frac{r}{3} \text{ cm.}$$

Todo esto quiere decir que para cada figura geométrica se debe determinar su modulo de solidificación específico. Aunque el modulo de solidificación este descrito así, en piezas industriales siempre habrá una área que contenga metal que este en contacto directo con la pieza, dicha área de contacto es una área de no transferencia de calor, que va a influir lo suficiente como para que se hagan algunas consideraciones que se verán posteriormente. Por ejemplo, si se tiene un cilindro de altura h igual a su diámetro $D=5$ cm., su modulo de solidificación según la ecuación (2.21) es de $M_s=.8333$ cm. Ahora, si suponemos una $k_1 = 6.367 \times 10^4$ y una $k_2 = 7.502 \times 10^4$, utilizando la ecuación (2.19) se obtiene un tiempo de solidificación de $T_{s1}=167.41$ seg. Pero si existiera una área de no transferencia de calor en el cilindro, por ejemplo una base, entonces el tiempo de solidificación se incrementaría, así como también el modulo de solidificación, debido a que el área de disipación de calor disminuye y el cilindro tarda mas en solidificar, por lo que el tiempo de solidificación sería

de $T_{s2}=238.76$ seg. Con lo cual se observa que el tiempo de solidificación aumenta considerablemente, en este caso un 42.61 % . Como ya se menciona, después se vera que esta no es la manera como aumenta realmente el tiempo de solidificación.

CAPITULO 3: DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 PLANTEAMIENTO DEL EXPERIMENTO

Para poder ver la influencia del área de no transferencia de calor en el tiempo de solidificación para piezas cilíndricas, se requirió construir cilindros con diferentes dimensiones y rediseñar los mismos agregando un cilindro mas grande a cada modelo original, de manera que se unieran los cilindros en su base y se pudiera presentar el área de no transferencia de calor, todo esto para poder comparar los resultados de los tiempos de solidificación en una pieza cilíndrica con transferencia de calor en todos sus lados, con los resultados de los tiempos de solidificación de la misma pieza cilíndrica pero sin una área de transferencia de calor, y ver la influencia de dicha área.

3.1.1 DISEÑO DEL MODELO

Se construyeron ocho modelos distintos: A, B, C, D, E, F, G y H (Figuras; 3.1A, 3.1B, 3.1C, 3.1D, 3.1E, 3.1F, 3.1G y 3.1H respectivamente), y en todos ellos se tomaron las dimensiones descritas en las tablas 4.1, 4.2, 4.3, y 4.4. A continuación se presentan los dibujos dimensionales de los modelos con que se trabajo.

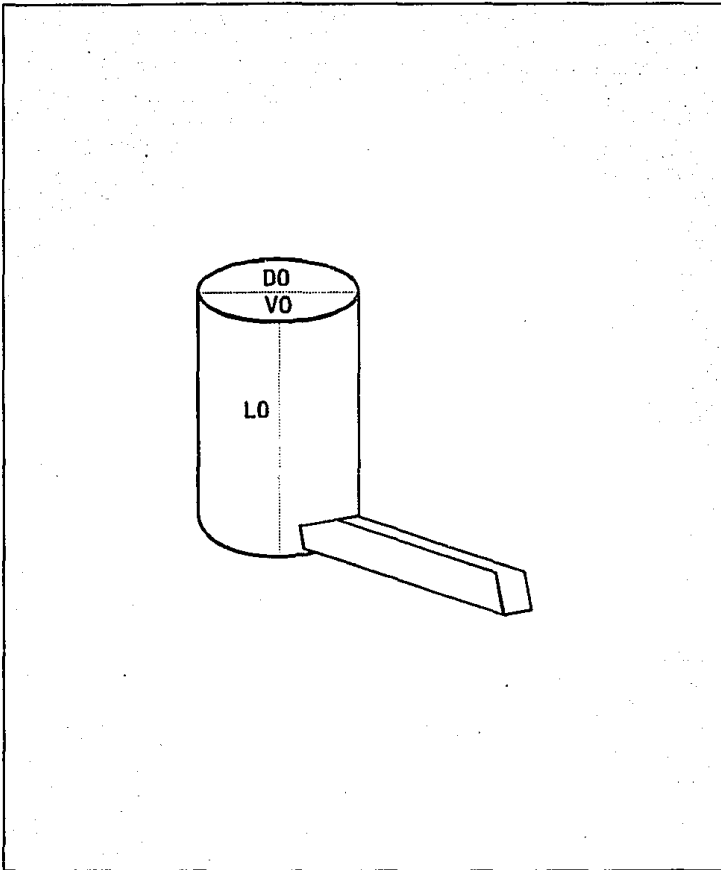


Fig. 3.1A Modelo Cilindrico A

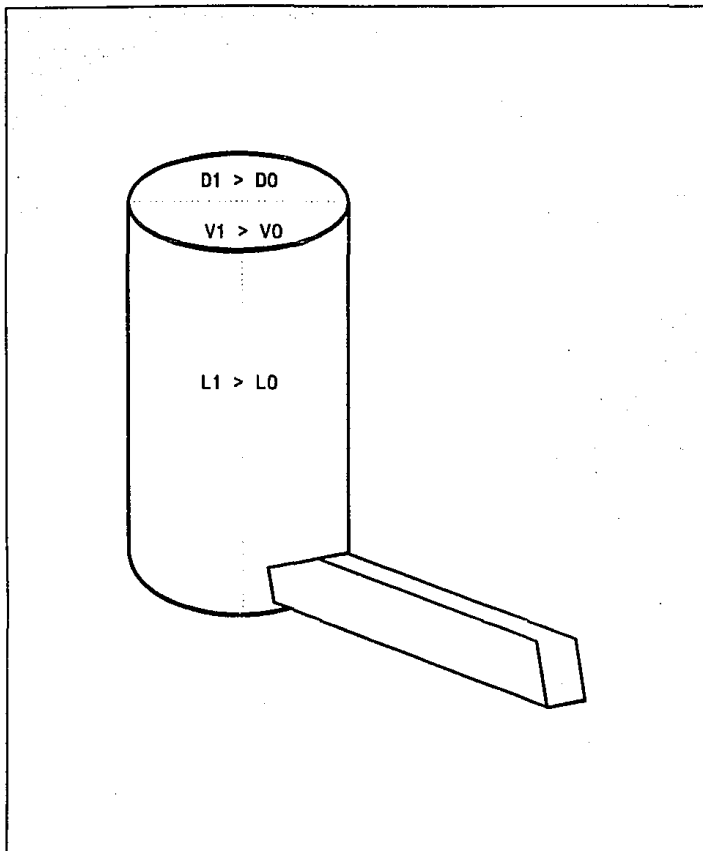


Fig. 3.1B Modelo Cilindrico B

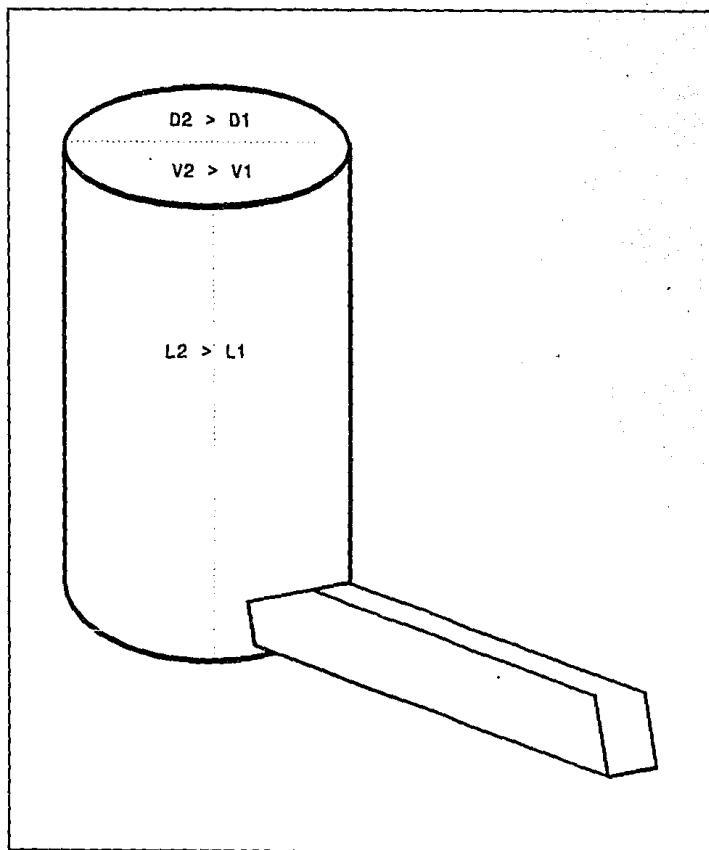


Fig. 3.1C Modelo cilíndrico C

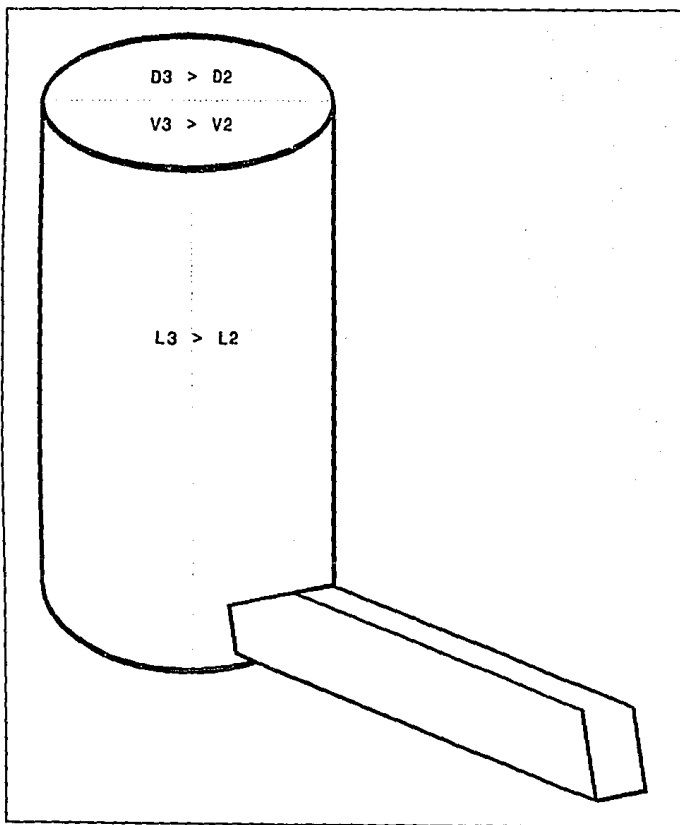


Fig. 3.1D Modelo cilíndrico D

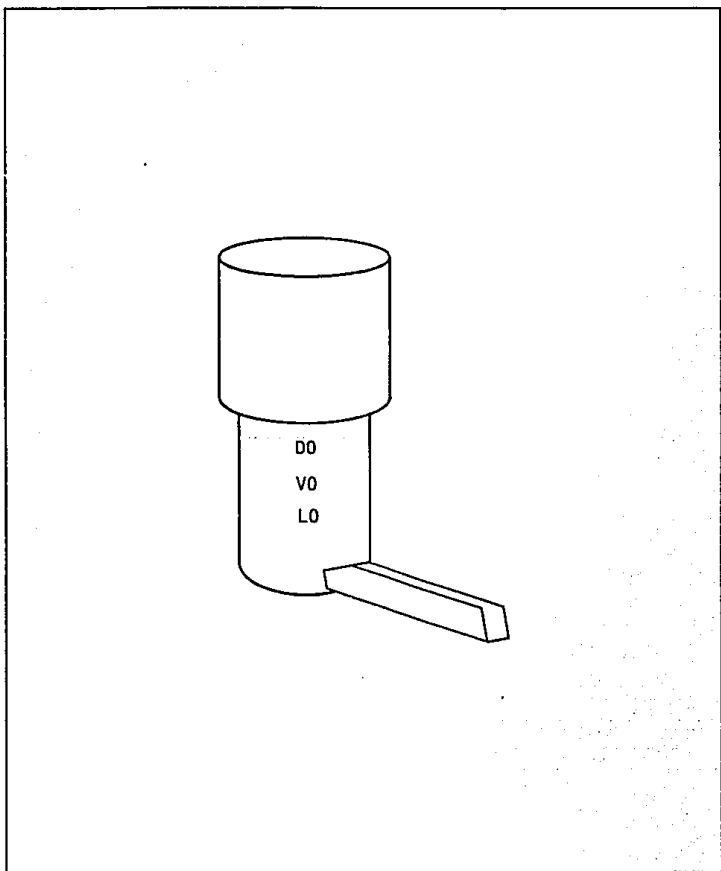


Fig. 3.1E Modelo cilndrico E

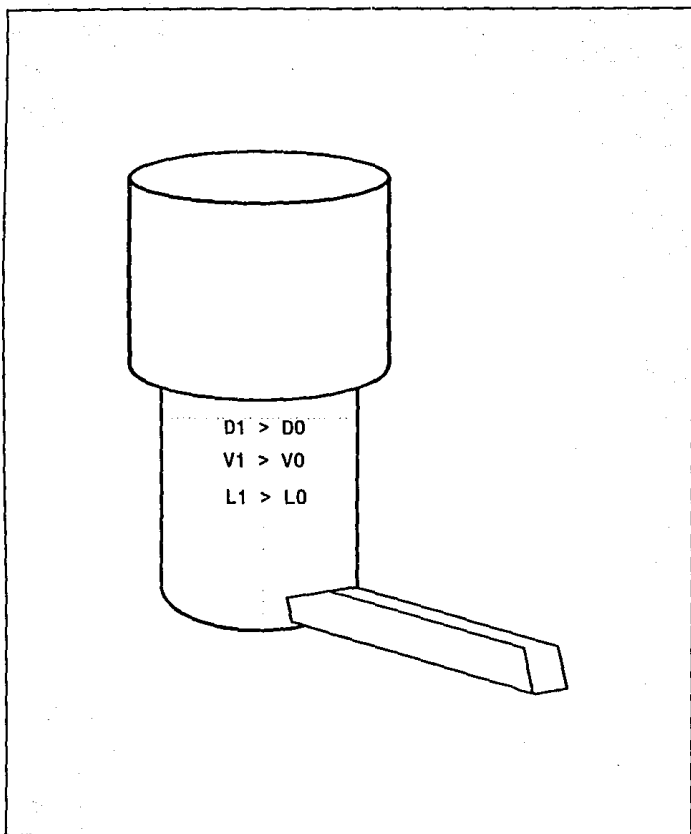


Fig. 3.1F Modelo cilíndrico F

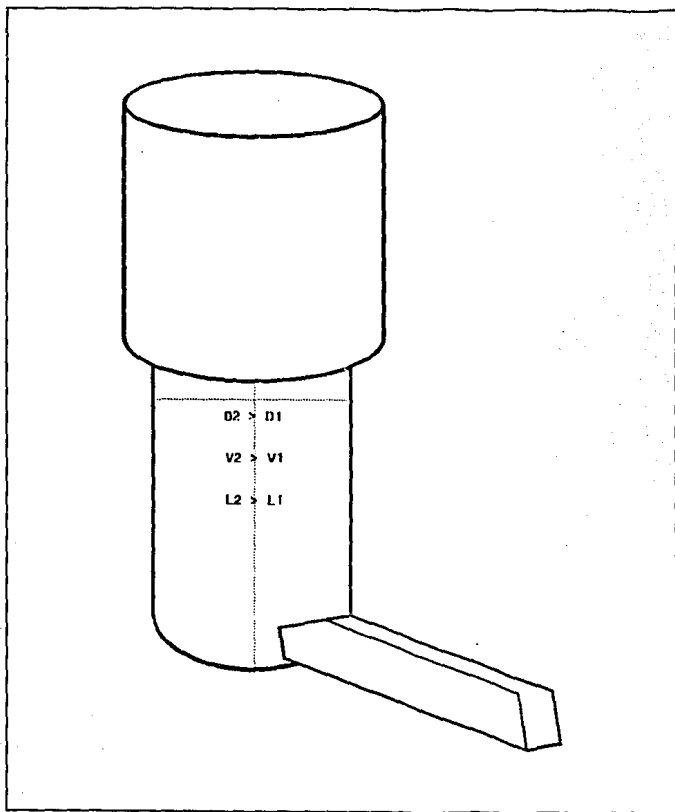


Fig. 3.1G Modelo cilíndrico G

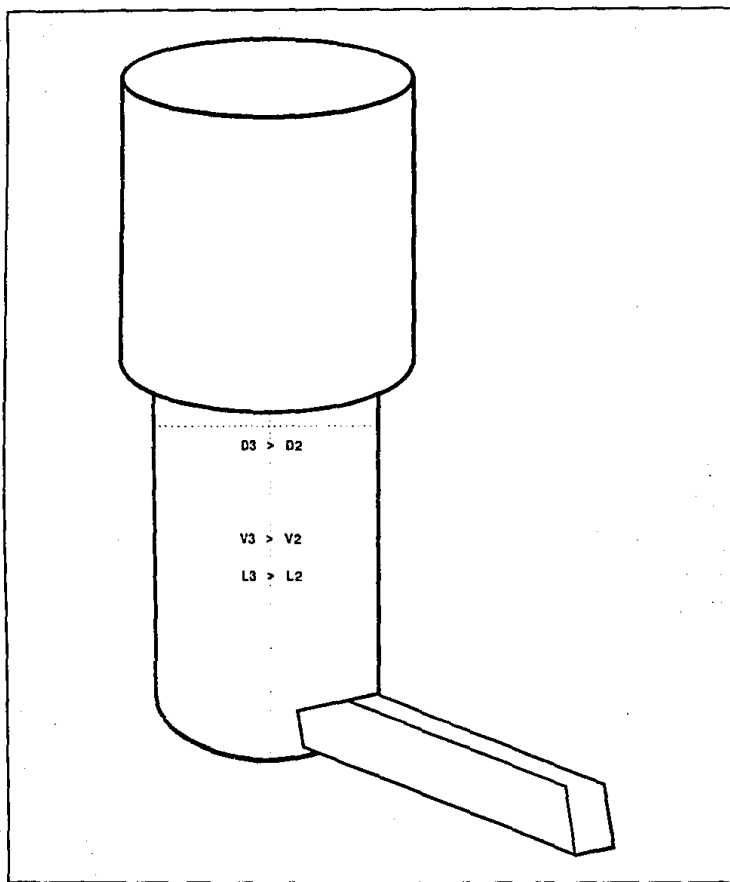


Fig. 3.1H Modelo cilíndrico II

Como se ve, los modelos A, B, C y D están formados por un cilindro de diferentes dimensiones para cada modelo, pero conservando en todos el diámetro igual a la altura y variando las dimensiones de la entrada que deben de ser un 5% del área de la base del cilindro. La longitud de la entrada desde el amortiguador al inicio de la pieza, es en todos los modelos la misma distancia donde $L = 5 \text{ cm}$.

Los modelos restantes E, F, G y H son exactamente iguales a los respectivos A, B, C y D solo que se agregó un cilindro extra en la parte superior de los cilindros originales a fin de lograr el área de no transferencia de calor.

También se hicieron pruebas de moldeo e inclusive de vaciado de metal al molde para ver si los modelos no presentaban problemas de cualquier índole principalmente en los ángulos de salida al desmoldear la pieza y en el llenado de metal, afortunadamente resultaron satisfactorios y no hubo que corregir el diseño de los modelos.

Las consideraciones que se tomaron para el diseño de todos los modelos son:

- i) Que el diámetro para cada cilindro fuera igual a su altura, es decir: relación

$$\frac{L}{D} = 1$$

- ii) *Que en el sistema de colada, los ataques fueran de sección transversal cuadrada y quedaran impresos en la parte inferior del cilindro, siendo esta la base circular del cilindro, lo que implica que el molde se llenara por abajo para tener un mínimo de turbulencia y evitar el atrapamiento de gases.*

- iii) *Que la longitud de los ataques fuera la misma para todos los modelos, iniciando en el amortiguador y terminando al iniciar la pieza cilíndrica, variando solo la longitud restante perteneciente a la área de entrada del metal a la pieza.*

- iv) *Que el área del ataque al entrar a la pieza cilíndrica fuera de un 5% del área correspondiente a la base de cada cilindro. Esto para que el área de entrada del metal sea la menor posible y no tengamos que considerarla como un área de no transferencia de calor que afecte nuestros resultados.*

- v) *En los modelos rediseñados el cilindro extra, que se coloca en la parte superior del cilindro original, debe tener un diámetro superior aproximadamente de 10% mayor al del cilindro original, y se debe centrar bien para asegurar el área de no transferencia de calor, considerando también su diámetro igual a su altura.*

- vi) *Se utilizaron en todos los modelos el mismo diseño de descenso de colada y amortiguador los cuales fueron diseñados para procurar la mínima turbulencia.*

Todas estas consideraciones son importantes para que todas las piezas así como los resultados tengan reproducibilidad, eliminando con esto la influencia del tiempo de llenado de la pieza el cual es muy importante para nosotros como variable ya que puede afectar el proceso.

La figura 3.2, muestra el ensamble y características de uno de los modelos con una área de no transferencia de calor.

En donde:

- 1) Cilindro original impreso en el cope.*
- 2) Cilindro extra impreso en el cope, a partir de una línea de partición extra.*
- 3) Ataque impreso en el drag ($L = 5 \text{ cm}$).*
- 4) Entrada de metal a la pieza, la cual es el 5% del área de la base del cilindro original.*
- 5) Amortiguador.*
- 6) Descenso de Colada.*
- 7) Tina de colada.*

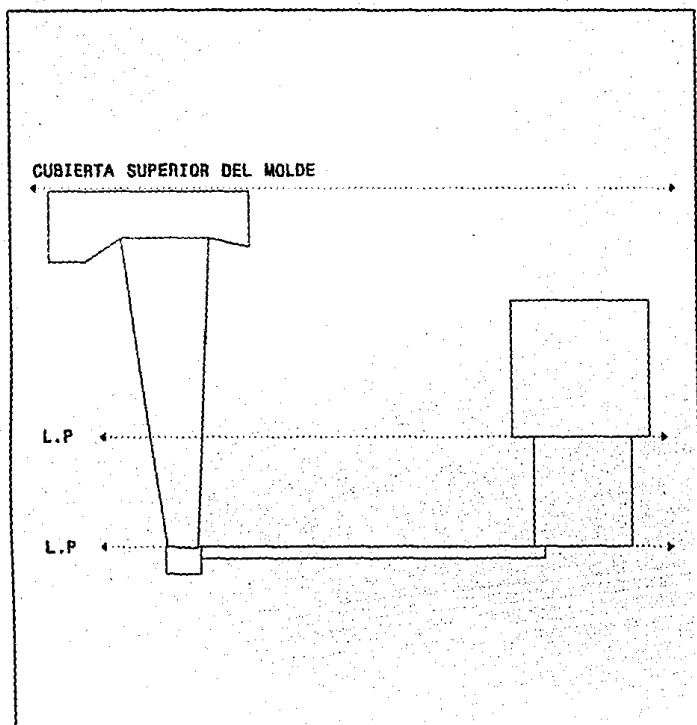


Fig. 3.2

Ensamble y características de un modelo cilíndrico sin una área de transferencia de calor

3.1.2 SELECCION DEL METAL EMPLEADO

Se utilizó aluminio puro comercial el cual contenía ciertas impurezas. Dicho aluminio presentó rangos cortos de solidificación.

Se realizó la fusión de 8 Kg. de aluminio en un horno de crisol para homogeneizar la composición química del metal que se utilizaría, para asegurar así el manejo de una misma aleación en todos los experimentos; colando en lingoteras pequeñas el metal previamente desgasificado.

Se obtuvo la composición química de el aluminio utilizado por el método de absorción atómica, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 3.1.

ELEMENTO	PORCENTAJE
Al	97.1544
Cu	0.4777
Fe	0.7157
Mn	0.0106
Ni	0.0016
Si	0.0000
Zn	1.6400

Tabla 3.1

3.2 CONSTRUCCION DE TERMOPARES

Para poder medir la temperatura del metal fundido, y posteriormente el tiempo de solidificación de la pieza, se utilizaron termopares desnudos del tipo K, los cuales son de Chromel-Alumel, seleccionando estos porque se adaptaban bien a las necesidades de nuestro experimento.

El procedimiento de construcción de los termopares es el siguiente:

- i) Se cortan trozos de alambre de Chromel y Alumel de aproximadamente un metro y medio.*

- ii) Se introducen ambos alambres a través de tubos aisladores bifilares de material cerámico de aproximadamente 20 centímetros. Estos tubos aisladores servirán para que en la medición de la temperatura en el centro de la pieza no se presente un cambio de posición del termopar o un corto circuito al juntarse los alambres, y nos den mediciones falsas. En esta parte del termopar se formará lo que se conoce como Junta Caliente.*

- iii) El resto del alambre es cubierto con espaguete de plástico, para evitar el contacto de los alambres que pueden provocar falsas*

mediciones, dejando un centímetro de ambos alambres descubiertos para formar lo que se conoce como la Junta Fría del termopar.

- iv) *Para formar la Junta Caliente del termopar se hace sobresalir del aislador bifilar tres o cuatro milímetros de ambos alambres, los cuales se enroscaran y se funden con oxiacetileno de tal manera que se forme una esfera de unión de dichos alambres, posteriormente se jalen los alambres del otro extremo del termopar de manera que solo sobresalga la bolita del aislador bifilar.*

- v) *Después se conectan los polos de la Junta Fría del termopar a un registrador y se le aplica calor a la Junta Caliente para identificar cual es el polo positivo y cual el polo negativo en el termopar, marcándolos con cinta adhesiva para no tener problemas al conectarlos cuando se realicen las mediciones.*

- vi) *Para mayor seguridad de que no se presente un corto circuito entre los alambres, se sellan los orificios del aislador bifilar con barro refractario, secando perfectamente el barro con calor, haciendo esto un día antes de su uso para que el barro se cure.*

La figura 3.3 muestra un termopar completamente construido.

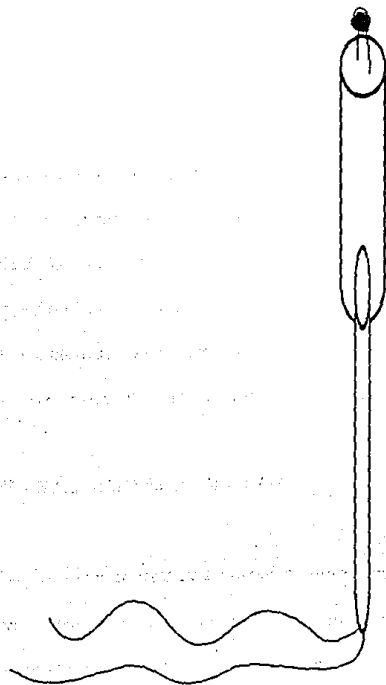


fig. 3.3

Partes de un termopar utilizado para la medición de temperaturas.

3.3 CALIBRACION DE REGISTRADORES

Se utilizó un registrador de temperaturas conectado al termopar para poder graficar la curva de enfriamiento que indica los cambios de pendiente pertenecientes al inicio y final de la solidificación.

El registrador se calibro con un potenciómetro, esto se hizo aplicando ciertos voltajes conocidos al registrador de acuerdo con la escala que se fuera a manejar, en nuestro caso utilizamos una escala de 50 mV.

Para verificar que el registrador estuviera funcionando en las mismas condiciones, se calibro antes de cada corrida y también se comprobaba que la velocidad de recorrido de la carta fuera la misma, esto para no tener variables que pudieran afectar los resultados.

3.4 PREPARACION DE LAS ARENAS DE MOLDEO

Se utilizaron dos tipos de arena de moldeo: La arena de careo, que es aquella que esta en contacto con la pieza, y arena de relleno, que como su nombre lo indica es la que se utiliza para rellenar por completo la caja de moldeo después de haber cubierto la pieza con arena de careo.

La preparación de la arena de relleno es muy sencilla y consiste en mezclar arena de relleno y una cierta cantidad de agua, siempre constante a la cantidad de arena utilizada, para obtener una misma humedad de trabajo.

En lo que a la arena de careo se refiere, se realizaron pruebas con varias de ellas de diferente granulometría, para encontrar la mas adecuada al proyecto, resultando la mejor una arena de careo con AFS 80-90.

Para la preparación de la arena de careo se mezclaron los siguientes materiales en los porcentajes que se indican en la tabla 3.2 .

MATERIAL	% EN PESO
ARENA SILICA NUEVA	85
BENTONITA SODICA	5
BENTONITA CALCICA	5
AGUA	5
TOTAL	100

Tabla 3.2.

Porcentaje en peso de los materiales utilizados para la preparación de la arena de careo.

Así por ejemplo para preparar 3 kg. de arena de careo se pesan 2.580 kg. de arena silica, 150g. de bentonita calcica, 150 g. de bentonita sódica y 120 ml. de agua.

El procedimiento de preparación es el siguiente:

Una vez pesada la arena silica se coloca en un molino chileno con ruedas verticales, adicionándole las dos bentonitas y mezclándose durante dos minutos, después de transcurrido este tiempo se agrega el agua y se deja mezclando tres minutos mas, para obtener un tiempo

total de mezclado de cinco minutos.

Al termino del tiempo de mezclado se cierne la arena y se guarda en un recipiente hermético de plástico, para evitar que pierda humedad.

Los resultados de las pruebas que se realizaron a la arena de careo, y que son las características de la arena de careo que se utilizo, son los siguientes:

<i>Densidad de la arena</i>	<i>1.5 g/cm³</i>
<i>Permeabilidad</i>	<i>85 Unidades Dietert</i>
<i>Resistencia a la compresión en verde</i>	<i>2.4 kg/cm²</i>
<i>Dureza</i>	<i>84 Unidades Dietert</i>

3.5 MOLDEO

Una vez que se tienen las arenas de moldeo preparadas, se procede a moldear colocando el modelo entre las cajas de moldeo, de tal manera que la bajada y el (los) cilindro(s) queden en el cope, y el colchón-ataques en el drag.

Para moldear, primero se empieza por el drag y al último se moldca el cope. Se espolvorea el separador antes que nada al modelo, a manera que solo quede una delgada capa de polvo separador, esto es para evitar que se pegue arena al modelo.

Después se cubre en todas sus partes la pieza cilíndrica y el sistema de colada con una pulgada

de arena de careo ya cernida, compactándola a mano y viendo que quede bien cubierta la pieza, posteriormente se cierra encima de la arena de careo una capa de arena de relleno del mismo espesor y se compacta de igual manera. Estas dos primeras capas de arena deben ir cernidas para evitar aglomerados que nos producirían una mala compactación y arena no homogénea. El siguiente paso es agregar capas de arena de relleno y compactarlas con una pisoneta neumática alternadamente hasta llenar la caja y rasarla para que quede una superficie plana, teniendo en cuenta el número de golpes e intensidad de los mismos para tener una uniformidad de dureza lo más constante posible en todas nuestras corridas. Hecho todo lo anterior se procede a desmoldear.

3.6 DESCRIPCIÓN DE COLOCACIÓN DE TERMOPARES

Teniendo hecho el molde de la pieza en cuestión se hace una perforación a este en su base inferior a manera que dicho orificio quede exactamente en el centro de la base circular del cilindro en el molde. Dicho orificio debe ser lo más recto posible pues es por donde entrará el termopar, cuya punta esférica deberá estar precisamente en el centro geométrico del cilindro para obtener siempre las mediciones de temperatura basadas en un lugar estándar como lo es dicho centro, pues se considera que este sitio es el último en solidificar.

La figura 3.4 muestra como debe de quedar colocado el termopar en el molde.

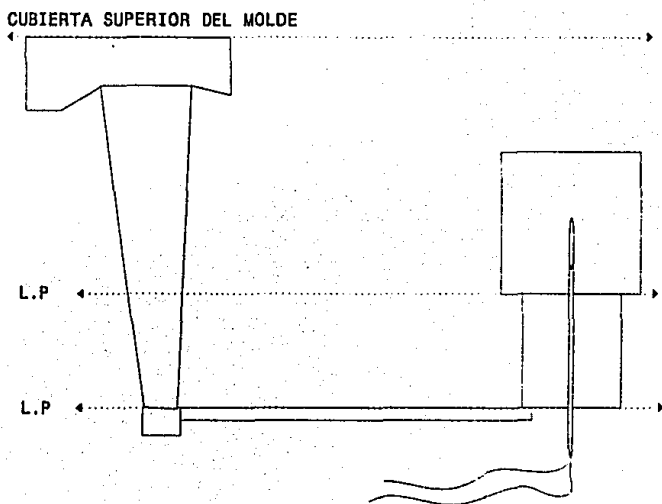


Fig 3.4.

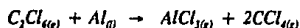
Forma de colocación del termopar en el molde.

3.7 TECNICA DE FUSION Y VACIADO A MOLDES

La fusión del metal se llevo a cabo en un horno de crisol fijo, utilizando un crisol de carburo de silicio de 3 Kg. de capacidad. La técnica de fusión y el vaciado a moldes consistió en los siguientes pasos:

- 1.- Pre calentamiento del horno y el crisol vacío hasta aproximadamente 600 °C.*
- 2.- Pre calentamiento del metal en la boca del horno hasta alcanzar aproximadamente 200 °C.*
- 3.- Introducción de la carga de metal al horno.*
- 4.- Posteriormente se agrega el fundente, consistente en una mezcla de 50% de KCl y 50% de NaCl libres de humedad, agregándolo cuando el metal está pastoso. Este fundente nos sirve como una barrera para evitar la introducción de gases al baño líquido y la formación de óxidos de aluminio.*
- 5.- Se toman diferencias de potencial en el metal fundido con un multímetro que se convierten a la equivalencia en °C y al llegar*

a 34 mV (818 °C) se desgasifica con hexacloroetano (C₂Cl₆) en cantidades de dos gramos por cada Kg. de aluminio, envolviendo dicha cantidad en papel aluminio e introduciéndola con una campana de inmersión al baño líquido, agiándola suavemente hasta que se realice por completo la reacción. Se debe dar un tiempo de desgasificación de 6 minutos como mínimo y 8 minutos como máximo, desde el momento de introducir la campana al metal líquido hasta el colado del metal al molde, para asegurar una buena desgasificación. La reacción ocurrida en este proceso de desgasificación es la siguiente:



En la cual los productos gaseosos, de esta reacción, arrastraran al hidrógeno fuera del baño líquido.

- 6.- A los 6 minutos transcurridos de la desgasificación se saca el crisol del horno, se desescorifica y se checa constantemente la temperatura del baño metálico con el multímetro hasta llegar a los 30.4 mV (730 °C), en ese momento se vacía el metal al molde para que los tiempos de solidificación medidos sean a una misma temperatura de colado.

- 7.- *Previamente se prepara el molde con la figura de alguno de los cilindros, colocando la punta esférica del termopar en el centro del cilindro y conectando los polos de la junta fría en los respectivos polos del registrador.*
- 8.- *Segundos antes de alcanzar la temperatura de colado se hace funcionar el registrador.*
- 9.- *Cuando se llega a la temperatura ideal se procede a colar el metal al molde, y al momento de entrar en contacto el metal con la punta del termopar, el registrador gráfica la curva de enfriamiento a una cierta velocidad de la carta.*
- 10.- *La carta se deja que corra lo suficiente, hasta notar los cambios de pendiente de la curva de enfriamiento que nos indique el final de la solidificación.*
- 11.- *Se hacen dos repeticiones de este proceso para la obtención del tiempo de solidificación, para cada uno de los ocho modelos cilíndricos, esto para tomarlo como verificación de resultados, tal como lo muestra la tabla 3.3.*

MODELO	# DE EXPERIMENTO
A	Experimento A1 Experimento A2
B	Experimento B1 Experimento B2
C	Experimento C1 Experimento C2
	Etc.

Tabla 3.3.

CAPITULO 4: RESULTADOS

4.1 RESULTADOS GENERALES

Con ayuda de un registrador de temperatura se recabaron los resultados obtenidos en los experimentos, por medio de gráficos de curvas de enfriamiento que exhibe dicho aparato, tales gráficas (ver fig. 4.1) muestran en las abscisas la diferencia de potencial (mV) y en las ordenadas la distancia (cm. o pulgadas).

Escala: 1 cm/30 seg.

Datos:

$T_v = 721 \text{ } ^\circ\text{C}$ (30 mV) 7.3 cm

$T = 776 \text{ } ^\circ\text{C}$ (32.3 mV)

$t_s = 219 \text{ seg.}$

Vel. de la carta = 1 cm./30 seg.

5.6 c.m.

Fig. 4.1

Gráfica y datos de la curva de enfriamiento del modelo de la figura 3.1C.

Como se ve en la figura 4.1 la curva de enfriamiento presenta un punto máximo, que es la temperatura del metal líquido dentro del molde (cilindro), y luego va decreciendo presentando cambios de pendiente.

El primer cambio de pendiente representa el final de la fase líquida, y el segundo cambio de pendiente el inicio de la fase sólida, en donde la distancia desde este segundo cambio de pendiente hasta el punto máximo de la curva, es la longitud equivalente al tiempo de solidificación.

A los milivoltios (mV) resultantes se les transforma en $^{\circ}\text{C}$ (usando tablas de equivalencias referidas al tipo de termopar empleado), y la distancia se transforma en tiempo.

En todos los experimentos se uso siempre una escala de 5 mV/cm y una velocidad de recorrido de la carta de 1 cm/30seg. Para obtener los mV resultantes del gráfico se hace lo siguiente:

Por ejemplo la figura 4.1 nos da una longitud en las abscisas de 5.6 cm., y si la escala utilizada en el aparato es de 5 mV/cm., entonces:

$$5.6 \text{ cm.} \cdot \left[\frac{5 \text{ mV}}{1 \text{ cm.}} \right] = 28 \text{ mV}$$

que transformados a $^{\circ}\text{C}$ son 674°C .

Esta es la temperatura del metal cuando entra en contacto con el termopar, por eso es mas baja que la temperatura de colado pues en el trayecto pierde calor.

Para obtener el tiempo de solidificación resultante se hace lo siguiente: considerando también la figura 4.1 y en donde la distancia entre los dos puntos que nos interesa en las ordenadas es de 7.3 cm. y la velocidad de recorrido de la carta es de 1 cm./30 seg., entonces:

$$7.3 \text{ cm.} \left[\frac{30 \text{ seg.}}{1 \text{ cm.}} \right] = 219 \text{ seg.}$$

Como ya se había mencionado en el capítulo anterior, se coló el metal a una misma temperatura de 728 °C (30.3 mV), con el fin de obtener las gráficas de las curvas de enfriamiento a una misma temperatura de referencia.

Los resultados experimentales fueron comparados con los resultados obtenidos por el método de Chvorinov referido al calculo de los tiempos de solidificación en piezas cilíndricas (ver apéndice B y apéndice C).

4.2 TABLAS DE RESULTADOS

Cada tabla que a continuación se presenta maneja dos grupos de resultados: el primer grupo pertenece al modelo cilíndrico sencillo con transferencia de calor en todas sus caras, y el segundo grupo pertenece al modelo cilíndrico análogo al primero pero sin una área de transferencia de calor, es decir al modelo modificado.

Las tablas contienen columnas que especifican lo siguiente:

M_s = Modulo de solidificación = V/A (en cm.).

T_v = Temperatura de vaciado (en $^{\circ}C$).

t_{s_e} = Tiempo de solidificación experimental (en seg.).

t_{s_T} = Tiempo de solidificación teórico (en seg.).

k_1 y k_2 = Constantes teóricas provenientes de la ecuación (2.15) de Chvorinov.

En donde:

(SATC) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro sin una área de transferencia de calor.

(TCTL) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro con transferencia de calor en todos sus lados.

V = Volumen del cilindro (en cm).

AT = Area total del cilindro (en cm).

AB = Area de una base del cilindro (en cm).

FORMULAS UTILIZADAS:

$$M_S = \frac{V}{A_T}$$

$$M_{S(\text{SAT})} = \frac{V}{A_T - A_B}$$

$$c_s = \frac{-k_1^2 + \sqrt{k_1^4 + 4k_2^2 M_S^2}}{2(k_2)^2}$$

$$k_1 = \frac{2}{\sqrt{B}} \left[\frac{(T_V - T_0)}{\mu_S H + [\mu_L C_L (T_V - T_H)]} \right] \sqrt{K_M \mu_H C_M}$$

$$k_2 = \left[\frac{2nK_M \epsilon_f}{x^2} \right] \left[\frac{(T_V - T_0)}{\mu_S H + [\mu_L C_L (T_V - T_H)]} \right]$$

$n = 1$ para cilindros

Los valores de K_M , μ_S , μ_L , μ_H , C_L , H , T_M , y T_0 , se encuentran en el apéndice A.

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1A (TCTL)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Me (Cm)	Me ² (Cm ²)	Tv (C)	ts _e (seg)	Tv (C)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻⁴)	k2 (10 ⁻⁴)
0.75	0.562	728	120	728	138.1	6.37	7.50
0.75	0.562	721	118	721	134.5	6.41	7.55

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1E (SATC)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Me (Cm)	Me ² (Cm ²)	Tv (C)	ts _e (seg)	Tv (C)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻⁴)	k2 (10 ⁻⁴)
0.90	0.810	728	211	728	194.5	6.37	7.50
0.90	0.810	728	214	728	194.5	6.37	7.50

Tabla 4.1

Tiempos y módulos de solidificación para los modelos cilíndrico fig. 3.1A y 3.1E.

Los datos para la tabla anterior son los siguientes:

Altura del cilindro = 4.5 cm.

Diámetro del cilindro = 4.5 cm.

Volumen del cilindro = 71.56 cm³.

Area total del cilindro con (TCTL) = 95.42 cm².

Area del cilindro (SATC) = 79.52 cm².

(TCTL) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro con transferencia de calor en todos sus lados.

(SATC) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro sin un área de transferencia de calor.

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1B (TCTL)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
M ₀ (Ca)	M ₀ ² (Ca ²)	T _v (C)	l ₀₀ (mm)	T _v (C)	l _{0T} (mm)	k1 (10 ⁻³)	k2 (10 ⁻³)
0.87	0.761	728	175.5	728	158.1	6.37	6.50
0.87	0.761	728	188	728	168.1	6.37	6.50

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1F (SATC)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
M ₀ (Ca)	M ₀ ² (Ca ²)	T _v (C)	l ₀₀ (mm)	T _v (C)	l _{0T} (mm)	k1 (10 ⁻³)	k2 (10 ⁻³)
1.04	1.081	728	333	728	259.7	6.37	6.50
1.04	1.081	728	321	728	259.7	6.37	6.50

Tabla 4.2

Tiempos y módulos de solidificación para los modelos cilindricos fig. 3.1B y 3.1F.

Los datos para la tabla anterior son los siguientes:

Altura del cilindro = 5.2 cm.

Diámetro del cilindro = 5.2 cm.

Volumen del cilindro = 110.43 cm³.

Area total del cilindro con (TCTL) = 127.42 cm².

Area del cilindro (SATC) = 106.18 cm².

(TCTL) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro con transferencia de calor en todos sus lados.

(SATC) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro sin un área de transferencia de calor.

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1C (TCTL)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Me (cm)	Me ² (cm ²)	Tv (s)	tsb (seg)	Tv (s)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻⁴)	k2 (10 ⁻⁴)
1,00	1,000	728	231	728	242,1	6,37	6,83
1,00	1,000	721	219	721	239,1	6,41	6,88

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1G (SATC)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Me (cm)	Me ² (cm ²)	Tv (s)	tsb (seg)	Tv (s)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻⁴)	k2 (10 ⁻⁴)
1,20	1,440	728	399	728	346,6	6,37	6,83
1,20	1,440	728	411	728	346,6	6,37	6,83

Tabla 4.3

Tiempos y módulos de solidificación para los modelos cilindricos fig. 3.1C y 3.1G.

Los datos para la tabla anterior son los siguientes:

Altura del cilindro = 6.0 cm.

Diámetro del cilindro = 6.0 cm.

Volumen del cilindro = 169.64 cm³.

Area total del cilindro con (TCTL) = 159.64 cm².

Area del cilindro (SATC) = 141.37 cm².

(TCTL) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro con transferencia de calor en todos sus lados.

(SATC) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro sin una área de transferencia de calor.

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1D (TCTL)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Mo (Cm)	Ma*2 (Cm*2)	Tv (C)	ts# (seg)	Tv (C)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻³ -s)	k2 (10 ⁻⁴ -s)
1.30	1.890	728	426	728	409.1	6.37	4.33
1.30	1.890	721	408	728	409.1	6.37	4.33

RESULTADOS DEL MODELO DE LA FIG. 3.1H (SATC)							
DATOS EXPERIMENTALES				DATOS TEORICOS			
Mo (Cm)	Ma*2 (Cm*2)	Tv (C)	ts# (seg)	Tv (C)	tsT (seg)	k1 (10 ⁻³ -s)	k2 (10 ⁻⁴ -s)
1.58	2.430	728	768	728	584.5	6.37	4.33
1.58	2.430	728	744	728	584.5	6.37	4.33

Tabla 4.4

Tiempos y módulos de solidificación para los modelos cilindricos fig. 3.1D y 3.1H.

Los datos para la tabla anterior son los siguientes:

Altura del cilindro = 7.8 cm.

Diámetro del cilindro = 7.8 cm.

Volumen del cilindro = 372.7 cm³.

Area total del cilindro con (TCTL) = 286.70 cm².

Area del cilindro (SATC) = 238.91 cm².

(TCTL) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro con transferencia de calor en todos sus lados.

(SATC) = Esta abreviatura significa que los datos se refieren al cilindro sin una área de transferencia de calor.

4.3 ANALISIS DE RESULTADOS

Para analizar los resultados en forma de comparación de porcentaje (%) de cuanto aumenta el tiempo de solidificación experimental en relación con el modulo de solidificación, se toman en cuenta los resultados del cilindro sencillo (es decir, el cilindro con Transferencia de Calor en Todos sus Lados, TCTL) y su análogo modificado (el mismo cilindro pero Sin una Área de transferencia de Calor, SATC). Por lo tanto se analizarán las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 por separado, pues cada tabla contiene dichos resultados para cada diferente dimensión de cilindro, después se podrá hacer una comparación en tablas.

Analizando los resultados de la tabla 4.1, se tiene que el modulo de solidificación (Ms) del cilindro sencillo mas pequeño (con TCTL) es de 0.75 cm. Tomando ahora el mismo cilindro pero modificado (es decir, SATC), el modulo de solidificación es de 0.90 cm. Por consiguiente se tiene que el porcentaje de diferencia entre los dos módulos de solidificación es :

$$0.75 \rightarrow 100 \%$$

$$0.90 \rightarrow X$$

Obteniendo como resultado un 20% de diferencia .

Notas:

Ver gráfica 9 del apéndice B que muestra la relación entre los módulos de solidificación de las piezas con TCTL y SATC. Haciendo la misma relación pero ahora respecto al tiempo de solidificación experimental, en donde la media aritmética del tiempo de solidificación experimental del cilindro sencillo (con TCTL) es de 119 segundos y la media del tiempo de solidificación experimental del cilindro modificado (SATC) es de 212.5 seg., se tiene entonces que:

119	→	100 %
212.5	→	X

Por lo que el porcentaje de diferencia es de 78.57% .

Tomando ahora los resultados de la tabla 4.2, se ve que el Ms del cilindro sencillo (TCTL) es de 0.866 cm. y el del cilindro modificado (SATC) de 1.04 cm.

Si se hace la relación al 100% el resultado da una diferencia de 20.93% .

Ahora haciendo la relación respecto al tiempo de solidificación experimental, el cilindro sencillo (TCTL) tiene una media del tsE de 180.7 seg., y el cilindro modificado (SATC) de 327 seg.

El resultado de la relación al 100% nos da una diferencia de 80.96% . Haciendo las mismas relaciones (tanto para el Ms como para el tsE) para los resultados de las tablas 4.3 y 4.4 se obtienen los resultados totales que se muestran en la tabla 4.5 .

Ver gráficas 1 y 2 del apéndice B que muestran la relación entre los tiempos de solidificación con TCTL y SATC.

La tabla 4.5 muestra la relación entre el modulo de solidificación y el tiempo de solidificación.

TABLA	T _v (TCTL)	T _v (SATC)	M _s (TCTL)	M _s (SATC)	% (INCR)	I _{SE} (TCTL)	I _{SE} (SATC)	% (INCR)
4.1	724.5	728.0	0.750	0.900	20.00	119.0	212.5	78.57
4.2	723.0	728.0	0.880	1.040	20.93	180.7	327.0	80.98
4.3	724.8	728.0	1.000	1.200	20.00	225.0	405.0	80.00
4.4	728.0	728.0	1.300	1.660	20.00	417.5	749.9	79.51

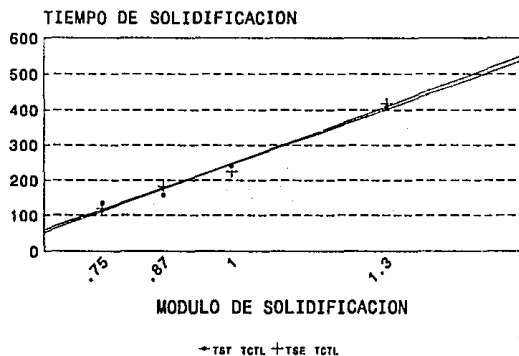
Nota:

* Ver gráficas 5, 6, 7, 8, del apéndice B que presentan la relación entre el modulo de solidificación y el tiempo de solidificación para las piezas con TCTL y SATC; Tanto para resultados teóricos, como para experimentales.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

ANALISIS DE COORELACION

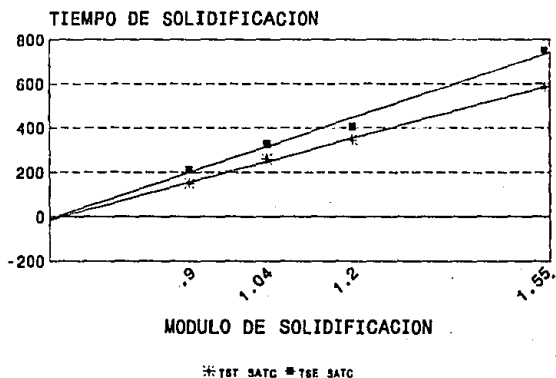
PARA DATOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES



FIGURAS CON TRANSFERENCIA DE CALOR EN TUBOS SIN CARROS

ANALISIS DE COORELACION

PARA DATOS TEORICOS Y EXPERIMENTALES



FIGURAS SIN AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Para los modelos SATC el modelo de Chvorinov esta subestimado en un 24% para los modelos con:

$$0.70 \leq \frac{L}{D} \leq 1.55$$

Por lo cual podemos asumir que cuando se necesite calcular el tiempo de solidificación para piezas coladas con las características que se emplearon en esta tesis, el modelo no es confiable. Por lo cual a continuación se presentan las ecuaciones lineales para el modelo teórico de Chvorinov, y el modelo experimental:

$$5.2 \quad TS_{\text{exp}} = -526.5378 + 808.6279X \quad r = 0.99370$$

$$5.3 \quad TS_{\text{teo}} = -427.6671 + 648.9719X \quad r = 0.99887$$

Como se observa el factor de correlación para estos modelos es muy bueno para valores entre $0.7 < L/D < 1.55$ ya que estamos en un valor muy cercano a "1" pero cuando la dimensión de L/D es menor a 0.7 nuestras ecuaciones no aplican ya que los tiempos de solidificación obtenidos son negativos, pero para los fines de obtener un tiempo de solidificación confiable en el rango indicado anteriormente podemos tomar la ecuación encontrada con los valores experimentales.

Para los modelos TCTL el modelo de Chvorinov esta sobrevaluado en un 5% por lo cual podemos decir que si aplica para la practica, "pero no con mucha exactitud" siempre y cuando

trabajemos con aluminio y arena de las mismas características que en este experimento, y con dimensiones de:

$$5.4 \quad 0.60 \leq \frac{L}{D} \leq 1.55$$

Con los datos teóricos y experimentales se obtuvieron los siguientes modelos de ecuaciones lineales aplicables a este rango:

$$5.5 \quad TS_{\text{exp}} = -526.5378 + 808.6279X \quad r=0.99370$$

$$5.6 \quad TS_{\text{teo}} = -269.9487 + 517.3644X \quad r=0.99271$$

Como podemos observar las ecuaciones son muy parecidas, pero al comparar el factor de correlación vemos que la ecuación con datos experimentales es mejor que la calculada con los datos teóricos, ya que el valor de "r" es más cercano a "1" por lo cual si se quieren calcular los valores para cilindros con TCTL es mejor utilizar el modelo calculado con valores experimentales.

Para fines prácticos de cálculo de tiempos de solidificación es conveniente utilizar las ecuaciones que a continuación se presentan, tomando en cuenta las siguientes restricciones:

$$SATC \quad 0.70 \leq \frac{L}{D} \leq 1.55 \quad Tse = -526.5378 + 808.6279X$$

$$TLTC \quad 0.60 \leq \frac{L}{D} \leq 1.55 \quad Tse = -289.7769 + 537.4188X$$

CAPITULO 6: BIBLIOGRAFIA

BARRAND, Pierre y Gadeau, Robert

Enciclopedia del aluminio

Ediciones URMO 1983 Bilbao, España

FLEMINGS, Merton C.

Solidification Processing

Mc Graw-Hill 1974 New York

Flemings, Merton C. Taylor, Howard F. & Wulff, John

Foundry Engineering

Wiley 1969 New York

Chapters 2, 3, 5, and 10

CARSLAW H.S. & JAEGER J.C.

Conduction of heat in solids

Clarendon press 1959 Second edition Oxford

BEELEY, P.R.

Foundry technology

Butter-Worths 1972 London

KONDIC, Voya

Metallurgical principles of founding

Edward Arnold 1968 London

Metals Handbook, ASM

Vol. 1, Properties and selection of metals

8th edition

MANDOLFO, L.F.

Aluminium alloys; structure and properties

Butter-Worts 1978 London

SHALER, Amos Taylor, Howard and Wulf, John

Metallurgy for engineers; casting, welding and working

Wiley & Sons 1952 New York

Capters 19 & 20

SHARP, John

Casting pit practice

Iliffe 1968 London

APENDICE A

CONSTANTES DEL PROCESO

Referidas al metal (aluminio):

$$T^M = \text{Temperatura de solidificación del metal} = 660^\circ\text{C}$$

$$H = \text{Calor latente de solidificación} = 95 \text{ cal/g}$$

$$C^L = \text{Calor específico del metal líquido} = 0.26 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\mu^S = \text{Densidad del metal sólido} = 2.7 \text{ g/cm}$$

$$\mu^L = \text{Densidad del metal líquido} = 2.69 \text{ g/cm}$$

Referidas al molde de arena:

$$T_o = \text{Temperatura del molde (temp. ambiente)} = 20^\circ\text{C}$$

$$\mu^M = \text{Densidad de la arena} = 1.5 \text{ g/cm}$$

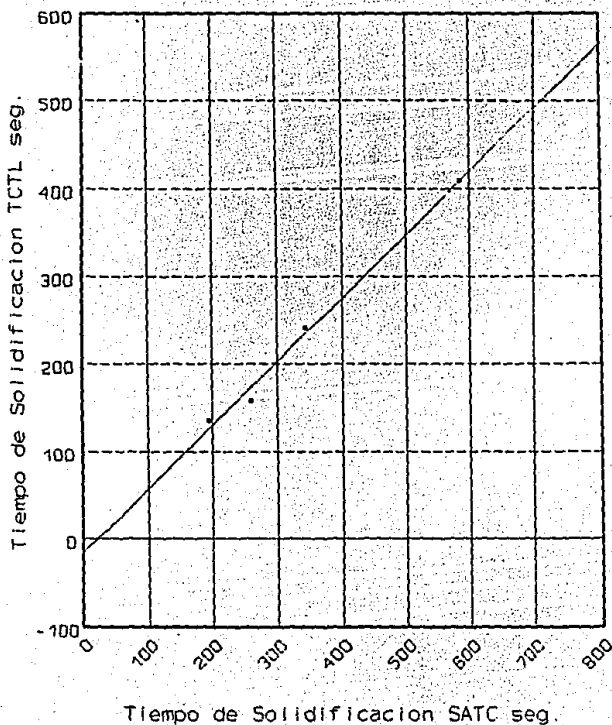
$$K^M = \text{Conductividad térmica de la arena} = 0.00145 \text{ cal/cm }^\circ\text{C}$$

$$C^M = \text{Calor específico de la arena o molde} = 0.27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

APENDICE B

RELACION DE TIEMPOS DE SOLIDIFICACION TEORICOS

GRAFICA 1



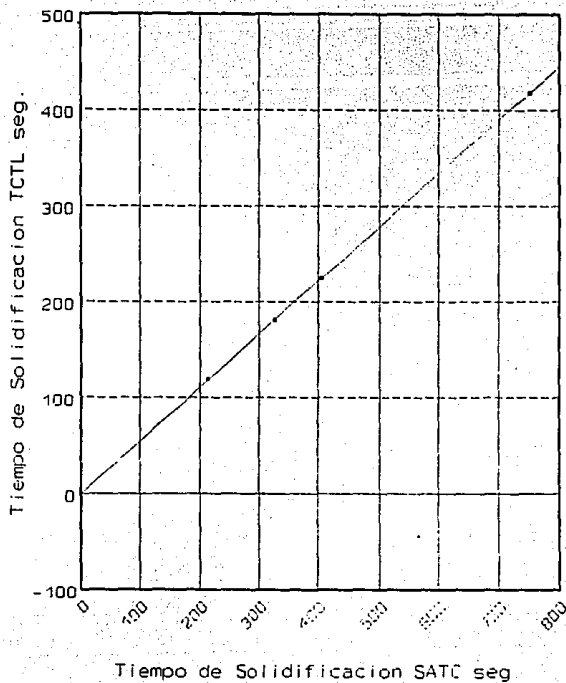
$$tsT (TCTL) = a + b (SATC)$$

$$a = -15.47$$

$$b = 0.72$$

RELACION DE TIEMPOS DE SOLIDIFICACION EXPERIMENTALES

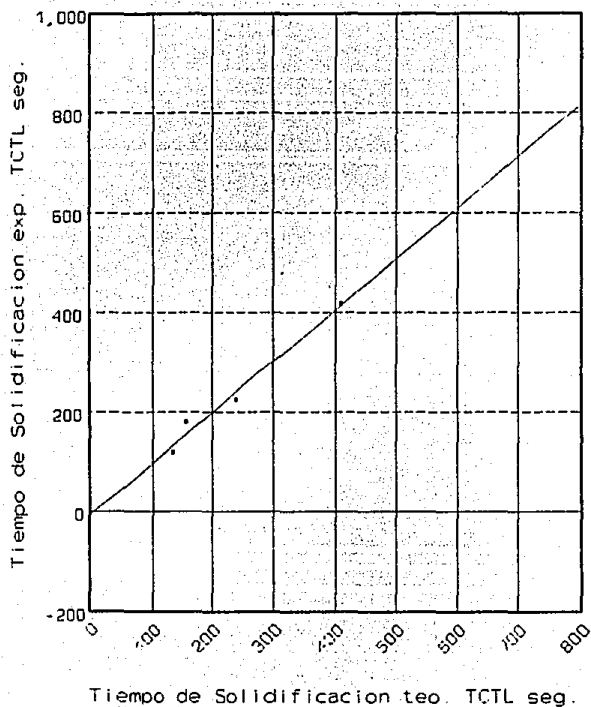
GRAFICA 2



$$tsE (TCTL) = a + b tsE (SATC)$$

$$a = -0.61$$

$$b = 0.56$$



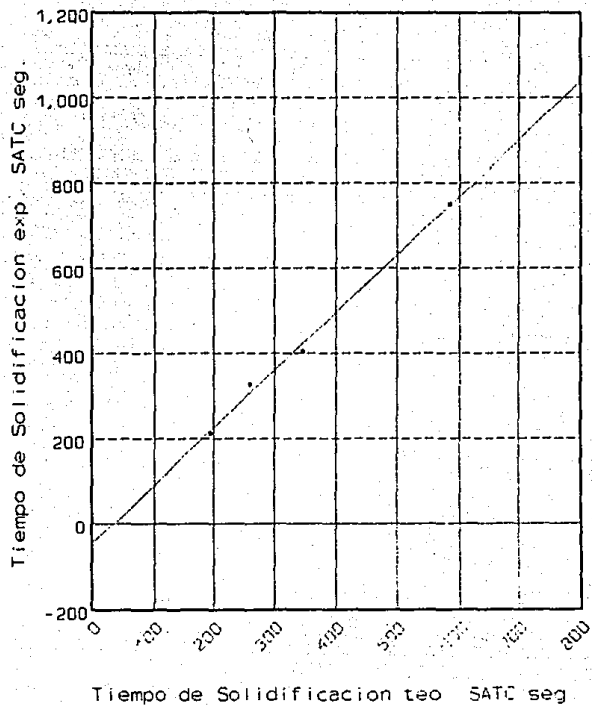
$$tsE (TCTL) = a + b tsT (TCTL)$$

$$a = -6.62$$

$$b = 1.03$$

TIEMPO DE SOL. EXP. SATC vs TIEMPO DE SOL. TEO. SATC

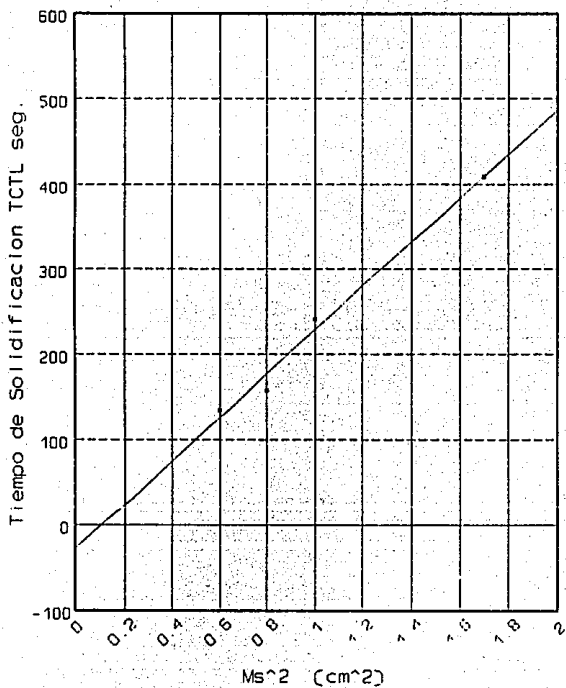
GRAFICA 4



$$tsE \text{ (SATC)} = a + b \text{ tsT (SATC)}$$

$$a = -44 \text{ g}$$

$$b = 1.35$$



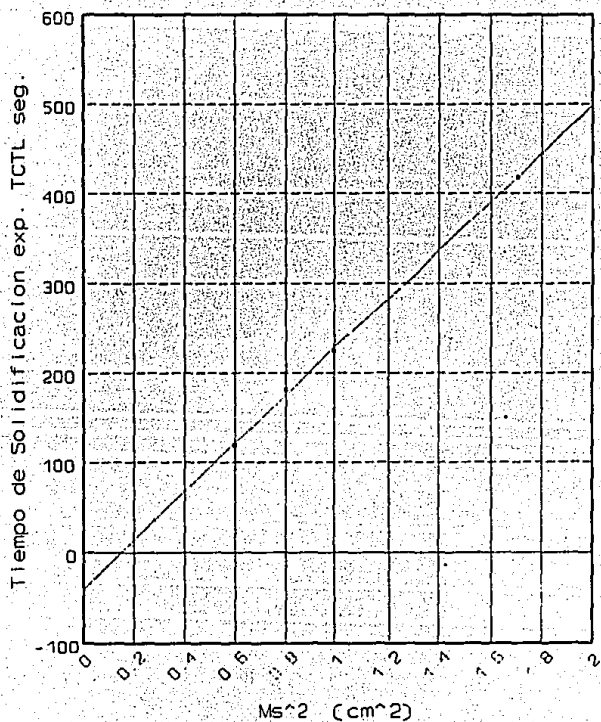
$$ts = a + b Ms^2$$

$$a = -28.3$$

$$b = 257.6$$

TIEMPO DE SOL. EXP. TCTL vs MODULO DE SOL. AL CUADRADO TCTL

GRAFICA 6



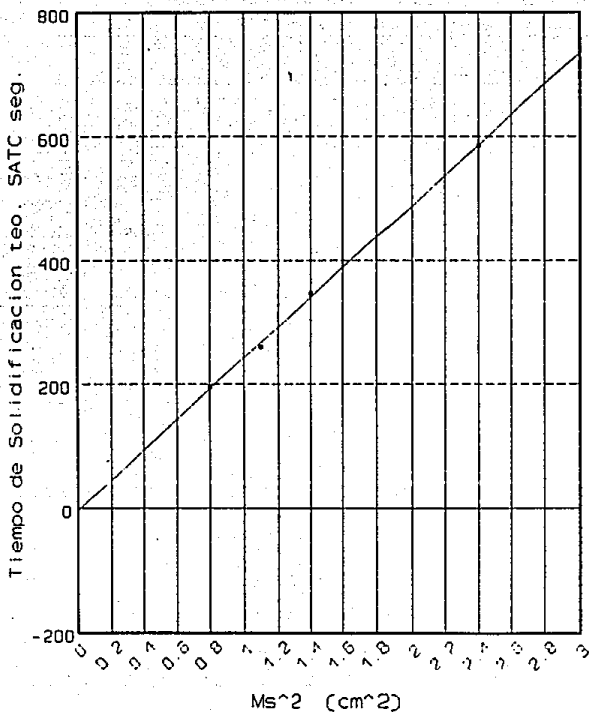
$$ts = a + b Ms^2$$

$$a = -40.4$$

$$b = 269.4$$

TIEMPO DE SOL. TEO. SATC vs MODULO DE SOL. AL CUADRADO SATC

GRAFICA 7

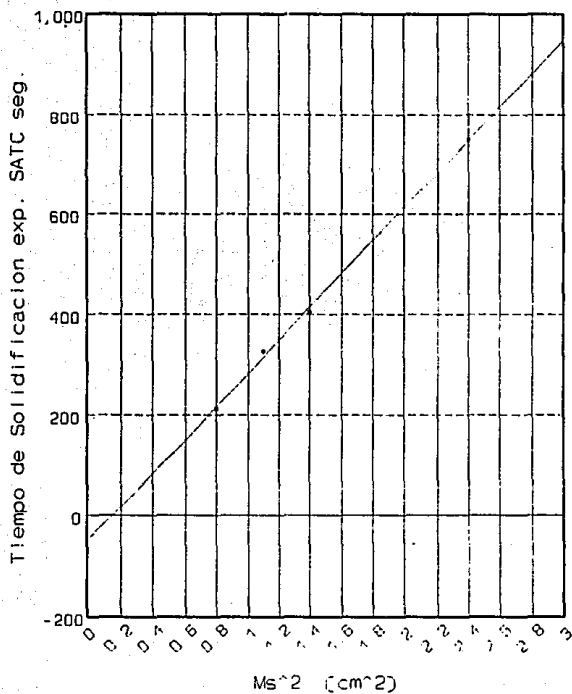


$$ts = a + b Ms^2$$

$$a = -3.3$$

$$b = 245.5$$

TIEMPO DE SOL. EXP. SATC vs MODULO DE SOL AL CUADRADO SATC
GRAFICA 8



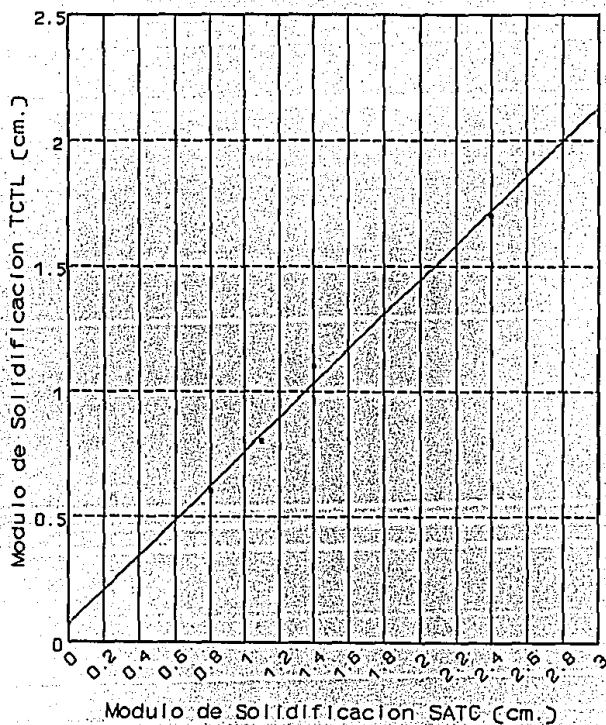
$$ts = a + b Ms^2$$

$$a = -50.5$$

$$b = 332.8$$

MODULO DE SOL. TCTL vs MODULO DE SOL. SATC

GRAFICA 9



$$Ms (TCTL) = a + b Ms (SATC)$$

$$a = 0.07$$

$$b = 0.69$$

APENDICE C

PROGRAMA PARA CALCULAR TIEMPOS DE SOLIDIFICACION PARA PIEZAS CILINDRICAS Y ESFERICAS.

```
10 REM: Programa para calcular tiempos de solidificación.
20 REM: Sólo para piezas cilíndricas y esféricas.
30 CLS
40 PRINT "PROGRAMA PARA CALCULAR TIEMPOS DE SOLIDIFICACION EN PIEZAS
CILINDRICAS"
50 PRINT "Y PIEZAS CILINDRICAS DE ALUMINIO"
60 PRINT : PRINT: PRINT: PRINT: PRINT "PARA CONTINUAR PRESIONE
CUALQUIER TECLA"
70 C$=INPUT $(1):K=0
80 CLS
90 INPUT "Para calcular su tiempo de solidificación, considerará el área total de transferencia de
calor (s/n);E$
100 IF E$="s" OR E$="S" THEN 130
110 IF E$="n" OR E$="N" THEN 130
120 GOTO 80
130 INPUT "Es esfera o cilindro (e/c)";A$
140 IF A$="c" OR A$="C" THEN 170
150 IF A$="e" OR A$="E" THEN 190
160 GOTO 130
170 N=1
180 INPUT "Cuál es su altura (cm)?";H:GOTO 200
190 N=2
200 INPUT "Cuál es su diámetro (cm)?,D:IF A$="c" OR A$="C" THEN 230
210 IF E$="S" OR E$="s" THEN 230
220 INPUT "Cuál es la altura del casquete esférico a eliminar (cm)?";HCE
230 R=D/2
240 INPUT "Cuál es su temperatura de vaciación (C)?";TV
250 INPUT "Cuál es la temperatura de solidificación del metal (C)";TSM
260 INPUT "Cuál es el calor latente de solidificación (cal/g)?";HLS
270 INPUT "Cuál es el calor específico del metal líquido (cal/gC)?";CL
280 INPUT "Cuál es la densidad del metal sólido (g/cc)?";DS
290 INPUT "Cuál es la densidad del metal líquido (g/cc)?";DL
300 INPUT "Cuál es la temperatura del molde (C)?";TM
310 INPUT "Cuál es la densidad de la arena (g/cc)?";DM
320 INPUT "Cuál es la conductividad térmica de la arena (cal/cmsC)?";KM
330 INPUT "Cuál es el calor específico de la arena o molde (cal/gC)?";CM
```

```

340 DT=TV-TSM
350 PRINT: INPUT "Estén correctos los datos (s/n)"; BS
360 IF BS="n" OR BS="N" THEN 80
370 IF BS="s" OR BS="S" THEN 390
380 GOTO 350
390 IF AS="e" OR AS="E" THEN 460
400 REM      RUTINA PARA CALCULO DE CILINDROS
410 AL=      3.1416*D*H
420 AT=      (3.1416/4)*D^2
430 ATOT=    AL + (2*AT)
440 V=       AT*H
450 GOTO 530
460 REM      RUTINA PARA CALCULO DE ESFERAS
470 ATOTE=   4*3.1416*R^2
480 ACE=     2*3.1416*R*HCE
490 VE=      (4/3)*3.1416*R^3
500 MS1=     VE/ATOTE
510 MS2=     VE/(ATOTE-ACE)
520 GOTO 550
530 MS1=     V/ATOT
540 MS2=     V/(ATOT-AT)
550 K1=      (2/(3.1416*.5)) * ((TV-TM) / (DS*HS + (DL*CL*DT))) * ((KM*DM*CM)^.5)
560 K2=      ((TV-TM) / (DS*HS + (DL*CL*DT))) * ((N*KM) / (2*R))
570 A=K2^2
580 B=K1^2
590 C1=-MS1^2
600 C2=-MS2^2
610 IF ES="n" OR ES="N" THEN C1=C2
620 TF1=(-B + (((B^2) - (4*A*C1))^.5))/(2*A)
630 IF AS="e" OR AS="E" THEN 1040
640 CLS
650 PRINT   TAB (30) "RESULTADOS":PRINT
660 PRINT   "Diámetro del cilindro = ";D;"cm"
670 PRINT   "Altura del cilindro = ";H;"cm"
680 PRINT   "Área total del cilindro = ";ATOT;"cm^2"
690 PRINT   "El volumen del cilindro = ";V;"cm^3"
700 PRINT   "La temperatura de vaciado = ";TV;"C"
710 IF ES="n" OR ES="N" THEN 760
720 PRINT   "El módulo de solidificación = ";MS1;"cm"

```

```

730 PRINT "El módulo de solidificación al cuadrado = ";MS1^2;"cm^2"
740 PRINT "El tiempo de solidificación del cilindro = ";TF1;"s"
750 IF E$="s" OR E$="S" THEN 800
760 PRINT "Area del cilindro sin una área de transferencia de calor = "ATOT-AT;"cm^2"
770 PRINT "El módulo de solidificación corregido = ";MS2;"cm"
780 PRINT "El módulo de solidificación al cuadrado corregido = ";MS2^2;"cm^2"
790 PRINT "El tiempo corregido de solidificación del cilindro = ";TF1;"s"
800 PRINT "K1 = ";K1;"cm^2/s"
810 PRINT "K2 = ";K2;"cm^2/s^2"
820 INPUT "(Desea imprimir sus resultados? (S/N));D$"
830 IF D$="N" OR D$="n" THEN 1410
840 IF D$="S" OR D$="s" THEN 860
850 GOTO 820
860 LPRINT TAB (30) "RESULTADOS":PRINT
870 LPRINT "Diámetro del cilindro = ";D;"cm"
880 LPRINT "Altura del cilindro = ";H;"cm"
890 LPRINT "Area total del cilindro = ";ATOT;"cm^2"
900 LPRINT "El volumen del cilindro = ";V;"cm^3"
910 LPRINT "La temperatura de vaciado = ";TV;"C"
920 IF E$="n" OR E$="N" THEN 970
930 LPRINT "El módulo de solidificación = ";MS1;"cm"
940 LPRINT "El módulo de solidificación al cuadrado = ";MS1^2;"cm^2"
950 LPRINT "El tiempo de solidificación del cilindro = ";TF1;"s"
960 IF E$="s" OR E$="S" THEN 1010
970 LPRINT "Area del cilindro sin unaárea de transferencia de calor = "ATOT-AT;"cm^2"
980 LPRINT "El módulo de solidificación corregido = ";MS2;"cm"
990 LPRINT "El módulo de solidificación al cuadrado corregido = ";MS2^2;"cm^2"
1000 LPRINT "El tiempo corregido de solidificación del cilindro = ";TF1;"s"
1010 LPRINT "K1 = ";K1;"cm^2/s"
1020 LPRINT "K2 = ";K2;"cm^2/s^2"
1030 GOTO 1410
1040 CLS
1050 PRINT TAB (30) "RESULTADOS":PRINT
1060 PRINT "Diámetro de la esfera = ";D;"cm"
1070 PRINT "Area total de la esfera = ";ATOTE;"cm^2"
1080 PRINT "Volumen de la esfera = ";VE;"cm^3"
1090 PRINT "Temperatura de vaciado = ";TV;"C"
1100 IF E$="n" OR E$="N" THEN 1150
1110 PRINT "El módulo de solidificación = ";MS1;"cm"

```



```

1120 PRINT "El módulo de solidificación al cuadrado = ";MS1^2;"cm^2"
1130 PRINT "Tiempo de solidificación de la esfera = ";TF1;"s"
1140 IF E$="S" OR E$="s" THEN 1190
1150 PRINT "Area de la esfera sin una área de transferencia de calor = "ATOTE-ACE;"cm^2"
1160 PRINT "El módulo de solidificación corregido = ";MS2;"cm"
1170 PRINT "El módulo de solidificación al cuadrado corregido = ";MS2^2;"cm^2"
1180 PRINT "Tiempo corregido de solidificación de la esfera = ";TF1;"s"
1190 PRINT "K1 = ";K1;"cm^2/s"
1200 PRINT "K2 = ";K2;"cm^2/s^2"
1210 INPUT "(Desea imprimir sus resultados? (S/N));F$
1220 IF P$="N" OR P$="n" THEN 1410
1230 IF P$="S" OR P$="s" THEN 1250
1240 GOTO 1210
1250 LPRINT TAB (30) "RESULTADOS":PRINT
1260 LPRINT "Diámetro de la esfera = ";D;"cm"
1270 LPRINT "Area total de la esfera = ";ATOTE;"cm^2"
1280 LPRINT "Volumen de la esfera = ";VE;"cm^3"
1290 LPRINT "Temperatura de vaciado = ";TV;"C"
1300 IF E$="n" OR E$="N" THEN 1350
1310 LPRINT "Módulo de solidificación = ";MS1;"cm"
1320 LPRINT "Módulo de solidificación al cuadrado = ";MS1^2;"cm^2"
1330 LPRINT "Tiempo de solidificación de la esfera = ";TF1;"s"
1340 IF E$="S" OR E$="s" THEN 1390
1350 LPRINT "Area de la esfera sin una área de transferencia de calor = "ATOTE-ACE;"cm^2"
1360 LPRINT "Módulo de solidificación corregido = ";MS2;"cm"
1370 LPRINT "Módulo de solidificación al cuadrado corregido = ";MS2^2;"cm^2"
1380 LPRINT "Tiempo corregido de solidificación de la esfera = ";TF1;"s"
1390 LPRINT "K1 = ";K1;"cm^2/s"
1400 LPRINT "K2 = ";K2;"cm^2/s^2"
1410 CLS
1420 INPUT "(Desea efectuar otro cálculo? (S/N));F$
1430 IF F$="N" OR F$="n" THEN 1460
1440 IF F$="S" OR F$="s" THEN 80
1450 GOTO 1420
1460 PRINT "Fin del programa"
1470 END

```