



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Química

72

DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES  
TERMICAS DE ARENAS DE MOLDEO  
MEDIANTE UN NUEVO METODO  
"CILINDRO FINITO"

Rosendo García Rivas

Ingeniero Químico Metalúrgico

1980

M-17990



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	PROFR.	FERNANDO MALDONADO MENDOZA
VOCAL	PROFRA.	MARIA EUGENIA NOGUEZ AMAYA
SECRETARIO	PROFR.	HECTOR ENRIQUE CURIEL REYNA
1er. SUPLENTE	PROFR.	JOSE GABRIEL DE LEON ROA
2º. SUPLENTE	PROFR.	MARCELINO MADRIGAL DUARTE

Sitio donde se desarrolló el tema:

Laboratorio de Metalurgia Facultad de Química U. N. A. M.

Nombre completo y firma del sustentante:

Rosendo García Rivas

*Rosendo García Rivas.*

Nombre completo y firma del asesor del tema:

M. en C. María Eugenia Noguez Amaya

*Ma Eugenia Noguez Amaya*

A MIS PADRES

J. CLOTILDE GARCIA CASTRO

DOLORES RIVAS DE GARCIA

A MIS HERMANOS

JUANA

CIRILO

ROBERTO

MARIA LUCINA

LUIS

MARIA DEL SOCORRO

A LA MAESTRA

MARIA EUGENIA NOGUEZ AMAYA

## I N D I C E

- I .        **INTRODUCCION**
- I ~~II~~ ~~III~~ .        **ANTECEDENTES**
1. Propiedades térmicas y métodos de determinación.
  2. Consideraciones que dieron origen a un nuevo método.
  3. Flujo térmico en estado no estacionario de cuerpos sólidos con formas geométricas sencillas.
- III .        **NUEVO METODO**
1. Descripción del diseño experimental del método.
  2. Fundamento del método.
  3. Desarrollo del método.
- III IV .        **EXPERIMENTACION**
1. Descripción del equipo y materiales.
  2. Planeación del experimento.
  3. Desarrollo experimental.
- IV V .        **RESULTADOS Y DISCUSION**
1. Resultados.
  2. Discusión.
- VI VI .        **CONCLUSIONES**
- V VII .        **APENDICES**
- BIBLIOGRAFIA**

## I

### INTRODUCCION

Este estudio se realizó como parte de un proyecto del laboratorio de arenas del área de Metalurgia, cuyo objetivo principal es estudiar las propiedades térmicas de las arenas de moldeo. Los métodos que se han desarrollado hasta ahora para medir estas propiedades, son demasiado largos en su elaboración, por esta razón fué que se diseñó un nuevo método en ese laboratorio.

El objetivo de este trabajo es estudiar éste nuevo método, el cual es sencillo, corto y reproducible fácilmente en su desarrollo práctico. Se estudiará principalmente su fundamento teórico y la confiabilidad de sus resultados.

Para esto se utilizaron mezclas de arena en verde cuyas propiedades térmicas se conocen y que han sido medidas por diversos métodos. Adicionalmente se harán comparaciones de la difusividad térmica y la resistencia a la compresión de las arenas con el objeto de aportar datos para el estudio de la relación que pueda existir entre ambas.

## II

### ANTECEDENTES

#### 1. Propiedades térmicas y métodos de determinación.

Existen varios coeficientes que miden las propiedades térmicas de una arena de moldeo, estos son:

##### a) Difusividad Calórica.

Se denomina generalmente con la letra "b" y es una medida de la rapidez, a la cual, el molde absorbe calor y a - grupa a dos coeficientes térmicos importantes que son: La Conductividad Térmica (K) y el Calor Específico (Cp).

La difusividad calórica se expresa de la siguiente manera:

$$b = \frac{K}{e \cdot Cp}$$

Donde:

e = Densidad.

##### b) Difusividad Térmica.

La difusividad térmica es numéricamente igual al cambio de temperatura producido en la unidad de tiempo en un cubo unitario de material por el calor, el cual es conducido a través de una unidad de área por un gradiente de temperatura unitaria, asumiendo que el calor conducido se distribuye homogéneamente en el cubo. Se expresa de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{K}{e \cdot Cp}$$

Donde:

$\alpha$  = Difusividad térmica.

##### c) Calor Específico.

Este ha sido reportado en la literatura (1) y dada la pequeña variación entre los diferentes tipos de mezclas de

arenas de moldeo, no es necesario determinarlo, sino consultarlo directamente de la literatura.

d) Densidad.

Por lo que respecta a la densidad de un molde de arena apisonada, ésta se puede determinar fácilmente para cada tipo de mezcla.

Queda entonces, la necesidad de determinar, ya sea, la conductividad térmica o la difusividad térmica. Ambas propiedades están muy relacionadas entre sí y se expresan en sus ecuaciones respectivas.

Hay una gran variedad de métodos para determinar estas propiedades, pero tomando en cuenta, la importancia que tienen por su antecedente directo con respecto a este trabajo, solo consideraremos dos de los trabajos para determinar la difusividad térmica, estos métodos son los descritos por: M. C. Adams y H. F. Taylor (2), y el de R. D. Pehlke y M. Kirt (1).

El método para determinar la difusividad térmica de Adams y Taylor, es el que desarrolla Anselmo Llanos Rivera (3). Se fundamenta en la conducción de calor en estado no estacionario para fusión-solidificación, considerando que, el molde de arena en extensión, es semi-infinito.

Consiste en medir el aumento de temperatura con respecto al tiempo, justamente después de la colada del metal, sin que exista un sobrecalentamiento.

Se determina la difusividad con la siguiente ecuación:

$$\sqrt{\alpha} = \text{Fer} \frac{x}{2 \sqrt{t}} \frac{T_i - T_B}{T - T_B}$$

Donde:

- $T$  = Temperatura inicial del molde.  
 $T_s$  = Temperatura de la interfase metal/molde.  
 $T_i$  = Temperatura en la arena de moldeo a una distancia  $X$  desde la interfase metal/molde a un tiempo  $t$  después de la colada.  
 $\alpha$  = Difusividad térmica.  
 $t$  = Tiempo.  
 $X$  = Distancia.

De esta ecuación se determina la conductividad térmica ( $K$ ).

$$K = \alpha \rho C_p$$

Donde:

- $\rho$  = Densidad.  
 $C_p$  = Calor específico.

El otro método, el de Pehlke y Kirt, fué usado por: Carlos Marotto Cabrera (4), Anastacio Jorge Juárez Cacique (5) y Alejandro Cariño Colín (6).

Se fundamenta en la conducción de calor en estado no estacionario para un cilindro infinito. Esto es, que para determinar la difusividad se hace en función de la temperatura con respecto al tiempo y la posición.

Determinando la difusividad térmica de la siguiente manera:

$$\alpha(t_i) = \frac{\frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{1}{r} \left[ \left( \frac{\partial}{\partial r} \right) \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]}$$

Donde:

$\frac{\partial T}{\partial t}$  = Variación de la temperatura con respecto al tiempo.

$\frac{\partial T}{\partial r}$  = Variación de la temperatura con respecto a la posición.

$t_i$  = Tiempo.

$r$  = Posición.

Estos datos se miden experimentalmente en forma simultánea durante el calentamiento de una probeta de arena y se alimentan a un programa para calcular  $\alpha(t_i)$ .

## 2. Consideraciones que dieron origen a un nuevo método.

Basándose en la experiencia práctica de los autores Marotto C. C., Juárez C. A. J., y Llanos R. A., se determinaron varias limitaciones en los métodos. Estas fueron señaladas por los autores en sus respectivos trabajos, tratando de corregirlas, se tuvieron en mente varias consideraciones al idear este método. Estas pueden resumirse de la siguiente manera:

a) Con respecto al suministro de calor, usando un horno de resistencias se tiene muchas veces el problema de una distribución no homogénea de temperatura y de una velocidad de calentamiento impuesta por el fabricante.

Usando el calor desprendido durante la solidificación de un metal, la distribución de temperatura es mejor, siempre y cuando se mantenga en un recipiente cerrado, o sea, que el calor no se pierde a la atmósfera sino sólo a la arena.

b) En cuanto al tiempo, el método computacional da un

rango muy amplio de datos, además, no todos son necesarios y el tiempo invertido es larguísimo. El método a una sola temperatura puede resultar suficiente.

c) La preparación de la probeta debe estandarizarse, una probeta grande y un molde, ambos apisonados a mano, no garantizan un comportamiento uniforme.

d) La preparación total del experimento debe ser sencilla, la colocación de varios termopares o de grandes contenidos de arena dificultan la manipulación.

Tomando en cuenta lo anterior, el método se discutió en el laboratorio llegando a diseñarse con estos rasgos:

1. La probeta de arena sería la preparada en forma estándar.

2. Con el objeto de asegurar una longitud finita se aislaría en la parte superior e inferior.

3. La fuente de calor sería un metal fundido y se usaría dentro de un recipiente cerrado.

4. La solución teórica al problema de transferencia de calor se consultó en la literatura. Las bases de ésta se describen a continuación.

### 3. Flujo térmico en estado no estacionario de cuerpos sólidos con formas geométricas sencillas.

Los principios básicos del flujo térmico en estado no estacionario para objetos sólidos homogéneos de formas geométricas sencillas se basan en la consideración que la trayectoria del flujo térmico se puede dividir de dos maneras:

a) Conducción dentro del sólido y

b) Transferencia térmica entre la superficie del sólido y los alrededores por convección y radiación.

Una u otra de estas dos formas de la trayectoria puede aportar la mayor parte de la resistencia térmica y de esta manera controlar el proceso, pero bajo muchas condiciones es necesario considerar los efectos mancomunados de ambas partes de la trayectoria del flujo calorífico.

En vista de las simplificaciones necesarias para obtener un tratamiento teórico cuantitativo, será evidente que no es posible la predicción rigurosa y precisa del comportamiento de la temperatura en el calentamiento y el enfriamiento para muchos sistemas reales. Sin embargo, las relaciones halladas servirán bien para propósitos de estimación y posiblemente de mayor importancia, revelarán las variables importantes en el flujo térmico en estado no estacionario y sus interrelaciones más importantes.

Ecuación de Fourier sobre conducción de calor en estado no estacionario.

Mientras que en sistemas de flujo calorífico estacionario, la temperatura es función de la posición únicamente, en sistemas no estacionarios la temperatura es función de dos variables, posición y tiempo.

Si se consideran objetos sólidos con cierto grado de simetría, la posición puede ser medida por una sola variable  $X$  que representa, por ejemplo; una distancia desde el centro de una esfera o desde el eje de un cilindro. Para estos casos la ley de Fourier sobre conducción calorífica puede ser escrita como una ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \dots A$$

Donde:

T = Temperatura.

t = Tiempo.

$\alpha$  = Difusividad Térmica.

X,Y,Z = Direcciones axiales.

Los cálculos sobre el comportamiento térmico de un objeto en calentamiento o enfriamiento, cuando el proceso es dominado por la resistencia al flujo calorífico dentro del objeto, requiere una solución de la ecuación A, para las condiciones de límite ( $t_1$ ,  $t_2$ ), y la geometría involucrada.

En el caso más común, en donde se debe considerar la resistencia al flujo calorífico. Tanto de superficie como del interior, debe resolverse la ecuación A usando la siguiente ecuación:  $q = h A (T_1 - T_2)$ , como una de las condiciones límite.

Los detalles para resolver la ecuación A para varias formas de objetos y de condiciones límite pertenecen a cursos avanzados de matemáticas. Sin embargo, se han publicado soluciones numéricas en forma de tablas y gráficas que se usan fácilmente en la solución de problemas prácticos de ingeniería. Estas soluciones se presentan como relaciones entre variables adimensionales.

Variables adimensionales de flujo térmico  
en estado no estacionario.

Las principales variables físicas del flujo térmico no estacionario incluyen: temperatura  $T$ , tiempo  $t$ , posición  $X$ , área  $A$  y volumen  $V$  del objeto, calor específico  $C_p$ , densidad  $\rho$ , coeficiente de transferencia calorífica  $h$  y conductividad térmica  $k$ . Sin embargo, cuando estas variables se disponen en grupos adimensionales, se encuentra que solo se necesita de ordinario cuatro variables adimensionales para describir el flujo calorífico no estacionario. Estos grupos son:

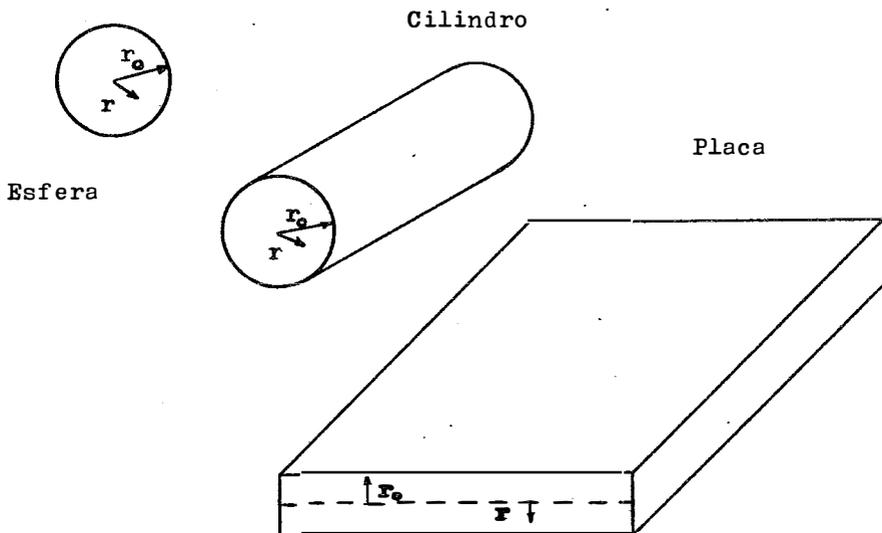
Temperatura Relativa:  $C\theta$   
Posición Relativa:  $n$   
Tiempo Relativo:  $\theta$   
Resistencia de Superficie Relativa:  $m$

Las siguientes figuras muestran las tres formas geométricas más comunes de sólidos que son importantes en problemas de calentamiento y enfriamiento. El comportamiento de estas formas simples sirve como una buena aproximación del comportamiento de muchas otras formas prácticas.

Así, la esfera representa el comportamiento de cuerpos con aproximadamente las mismas dimensiones en todas direcciones; el cilindro infinito representa cuerpos con una dimensión larga y la placa infinita representa cuerpos con dos dimensiones largas y una corta.

En cada caso el tamaño es dado por la distancia  $r_0$  desde el centro a la superficie. Para una placa  $r_0$  es la mitad del espesor y para un cilindro o esfera  $r_0$  es el radio. Si-

milarmente debido a la simetría de estas formas, la posición es dada por la distancia  $r$  desde el centro, ya que todos los puntos a una distancia dada desde el centro tendrán el mismo comportamiento durante el calentamiento o el enfriamiento.



La variable adimensional de la posición relativa  $n$ , es dada por la relación:  $r/r_0 = n$ .

Así, la posición relativa varía siempre desde 0 en el centro de la pieza hasta 1 en la superficie exterior.

La variable adimensional tiempo relativo  $\theta$ , se define en términos de la difusividad térmica, el tiempo real  $t$ , el radio o mitad del espesor  $r_0$  y es igual a:  $\theta = \alpha t/r_0^2$ . Así para un valor dado de tiempo relativo; el tiempo real es

proporcional al cuadrado del tamaño del objeto e inversamente proporcional a la difusividad térmica. Esta definición del tiempo relativo implica, así, que el tiempo real en horas para lograr un cambio de temperatura determinado, varía directamente con el cuadrado del tamaño del objeto e inversamente según la difusividad térmica, si la forma y otros factores se mantienen constantes.

Otra variable adimensional es la temperatura relativa:  $C_e = \frac{T - T_2}{T_1 - T_2}$ . Donde  $T$  es la temperatura media real en un tiempo dado del objeto,  $T_1$  es la temperatura inicial del objeto a  $t=0$  y  $T_2$  es la temperatura del medio o temperatura final cuando  $t = \infty$ .

En cualquier proceso de calentamiento o enfriamiento completo  $C_e$  disminuye desde 1 en un tiempo cero hasta acercarse a 0, según se acerca la temperatura del objeto a la temperatura del medio ambiente.

Podría definirse también la temperatura relativa, como la relación del cambio de temperatura a realizar para el equilibrio, al cambio de temperatura total en el proceso completo, desde el comienzo hasta el equilibrio.

Debe observarse que  $C_e$  es adimensional, y por lo tanto, su valor es independiente de la elección de unidades de temperatura para  $T$ ,  $T_1$  y  $T_2$ , siempre y cuando las tres estén en las mismas unidades.

El último de los criterios adimensionales es la resistencia de superficie relativa  $m$  y esta dada por la expresión:  $m = k / h r_0$ . Este número permite una comparación directa de la resistencia al flujo calorífico desde la su -

perficie al medio ambiente ( $l/h$ ), con la resistencia al flujo térmico dentro del objeto ( $r_o/h$ ), para las condiciones bajo las cuales, la resistencia al flujo dentro del objeto es pequeña comparada con la resistencia al flujo calorífico.

### III

#### NUEVO METODO

##### 1. Descripción del diseño experimental del método.

Como se anotó anteriormente uno de los objetivos de este trabajo es estudiar un nuevo método que es totalmente diferente a los que han sido realizados hasta ahora, el cual, reduce considerablemente el tiempo de determinación de la difusividad térmica, ya que, los métodos anteriores son muy largos en su desarrollo.

En el diseño del método se ideó usar un cilindro de arena en verde hecho con la norma AFS, lo cual dará siempre probetas homogéneas en apisonamiento y dimensiones, la probeta norma obtenida es de 50.8 mm.,  $\pm$  0.025 mm., de diámetro y 50.8 mm.,  $\pm$  0.0793 mm., de altura.

Se pensó en un recipiente cerrado para aprovechar al máximo el calor de solidificación de un metal como fuente de calor para la probeta de arena. Para esto se creó una caja de madera con recubrimiento aislante en el interior, tanto en las paredes como en la base y la parte superior.

La altura de la caja debía ser la de la probeta y ésta debía colocarse exactamente en el centro de la caja, de tal manera, que quedaran aisladas la parte superior e inferior del cilindro, a esto se debe el nombre del método, o sea, es un cilindro finito en dimensiones pero su comportamiento térmico corresponde a un sistema infinito como queda comprobado posteriormente con las pruebas que se realizan tomando la temperatura a diferentes posiciones.

El baño del metal fundido deberá cubrir totalmente al cilindro y la dirección del flujo de calor es sólo en la dirección radial.

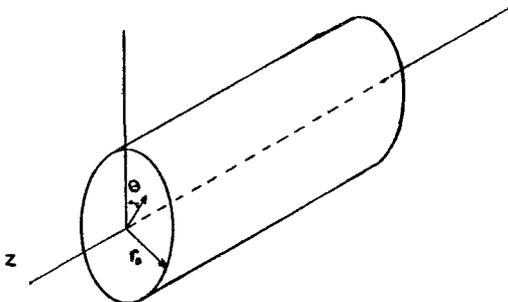
El metal que se escogió como baño para este experimento fué el aluminio por su bajo punto de fusión y su baja emisividad.

Las dimensiones que finalmente se usaron para la caja fueron de 15 cm., de longitud por 5 cm., de altura. Se determinaron prácticamente de acuerdo con las posibilidades de fusión en el laboratorio.

Las lecturas del cambio de temperatura con respecto al tiempo en la probeta, se realizan exclusivamente durante el intervalo en que la temperatura del baño permanece constante, es decir, durante la solidificación del metal.

## 2. Fundamento del método.

El método se basa en considerar el cilindro como un cilindro infinito circular en estado no estacionario. El desarrollo de una ecuación que permita desarrollar un experimento e interpretar los resultados, se hace considerando un cilindro como el que se muestra en la figura con longitud sobre el eje  $Z$ . Las variables importantes son:  $r$ ,  $\theta$  y  $t$ .



Asumiendo una simetría en  $\theta$ , el problema se reduce a una conducción radial en estado no estacionario. La ecuación apropiada de conducción de calor se obtiene a partir de la ecuación general en coordenadas cilíndricas sin generación de calor ( ver el desarrollo de esta ecuación en el apéndice No 3 ).

Siguiendo el desarrollo de E. R. G. Eckert (7):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots 1$$

Considerando por el momento que existe una distribución inicial de temperatura en el cilindro y que es función solamente de  $r$ . Esta condición se puede escribir de la siguiente manera:

$$T = f(r) \quad 0 \leq r \leq r_0 \quad t \leq 0 \dots 2$$

Si el cilindro transfiere calor por convección a los alrededores a una temperatura  $T_f$ , las condiciones límites en la superficie  $r = r_0$  se pueden expresar:

$$\left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0} = - \frac{h}{K} T(r_0, t) \quad r = r_0 ; r > 0 \dots 3$$

La solución se puede obtener haciendo una separación de variables:

$$T(r, t) = F(t) G(r) \dots 4$$

Usando las ecuaciones 1 y 4 tenemos:

$$F'(t) G(r) = \alpha \left[ G''(r) F(t) + \frac{1}{r} G'(r) F(t) \right] \dots 5$$

Donde como antes, se hace una separación de variables y se iguala la expresión a una constante:

$$\frac{G''}{G} + \frac{1}{r} \frac{G'}{G} = \frac{1}{\alpha} \frac{F'}{F} = \pm \lambda^2 \dots 6$$

la ecuación 6 tomando el valor negativo de  $\lambda^2$  para hacer

la temperatura finita a valores infinitos de  $t$ , tenemos dos ecuaciones:

$$F'(t) + \alpha \lambda^2 F(t) = 0 \quad \dots 7$$

$$r^2 G'' + r G'(r) + \lambda^2 r^2 G(r) = 0 \quad \dots 8$$

La solución de la ecuación 7 es:

$$F(t) = c_1 e^{-\alpha \lambda^2 t} \quad \dots 9$$

En la ecuación 8 hacemos  $u = \lambda r$  y resulta:

$$u^2 \frac{d^2 G}{du^2} + u \frac{dG}{du} + u^2 G = 0$$

La cual se identifica como la ecuación de Bessel con una solución:

$$G(u) = c_2 J_0(u) + c_3 Y_0(u)$$

Donde  $J_0(u)$  y  $Y_0(u)$ , son funciones de Bessel de primera y segunda clase de orden cero.

En términos de las variables originales, como  $u = \lambda r$ :

$$G(\lambda r) = c_2 J_0(\lambda r) + c_3 Y_0(\lambda r) \quad \dots 10$$

Así, de las ecuaciones 9 y 10, tenemos la solución de la ecuación 1. Si tomamos las posibles soluciones y las sumamos, tenemos:

$$T(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\alpha \lambda_n^2 t} A_n J_0(\lambda_n r) + B_n Y_0(\lambda_n r)$$

Como en el centro del cilindro  $r = 0$ , la temperatura debe ser finita.

Además  $Y_0(0) \longrightarrow -\infty$ ,  $B_n \equiv 0$

La ecuación resultante es:

$$T(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-\alpha \lambda_n^2 t} J_0(\lambda_n r)$$

Esta es la ecuación para cilindro infinito en estado no estacionario.

### 3. Desarrollo del método.

El problema para determinar la difusividad térmica se simplifica con el uso de las variables adimensionales, la temperatura relativa y el tiempo relativo, ya que sólo es necesario medir con precisión el intervalo de tiempo y el cambio de temperatura.

Se consideran los valores de la temperatura relativa de la siguiente manera:

$$C_{\theta} = \frac{T_1 - T_2}{T - T_2}$$

Donde:

$T$  = Temperatura media real en un tiempo dado del cilindro de arena.

$T_1$  = Temperatura inicial del objeto a  $t=0$ .

$T_2$  = Temperatura de solidificación del aluminio.

Y para el tiempo relativo:

$$\theta = \frac{\alpha t}{r_0^2}$$

Donde:

$t$  = Tiempo real, es el tiempo final menos el tiempo inicial durante el calentamiento del cilindro de arena.

$r_0^2$  = Radio del cilindro de arena en verde.

$\alpha$  = Difusividad Térmica.

Con los valores que se obtienen para  $C_{\theta}$  se determina directamente  $\theta$ . Estos valores se encuentran tabulados en

las cartas de F. C. W. OLSON y O. T. SCHULTZ (8); cuyos valores más usados en este trabajo se encuentran en el apéndice No 2 .

Con los valores de  $C_{\theta}$  y  $\theta$  podemos determinar fácilmente  $\alpha$  .

Tomando por ejemplo los valores de la gráfica No 1, que corresponde a la muestra con 8 % de bentonita cálcica y 2 % de humedad:

DATOS:

$$\begin{aligned} T &= 3.4 & Mv &= 83 & ^{\circ}\text{C} \\ T_1 &= 8.8 & Mv &= 429 & ^{\circ}\text{C} \\ T_2 &= 25.8 & Mv &= 621 & ^{\circ}\text{C} \\ t &= 9.4 & \text{min} &= 564 & \text{seg.} \end{aligned}$$

Substituyendo en la ecuación de temperatura relativa:

$$C_{\theta} = \frac{429 - 621}{83 - 621} = \frac{-192}{-538} = 0.3568773$$

Para  $C_{\theta} = 0.356$

De las tablas de Olson y Schultz

$$\theta = 0.259$$

Con el valor de  $\theta$  y la relación del tiempo adimensional se determina la difusividad térmica:

$$\theta = \frac{\alpha t}{r_0^2}$$

Datos:

$$r_0^2 = (2.5)^2 = 6.25 \text{ cm}^2$$

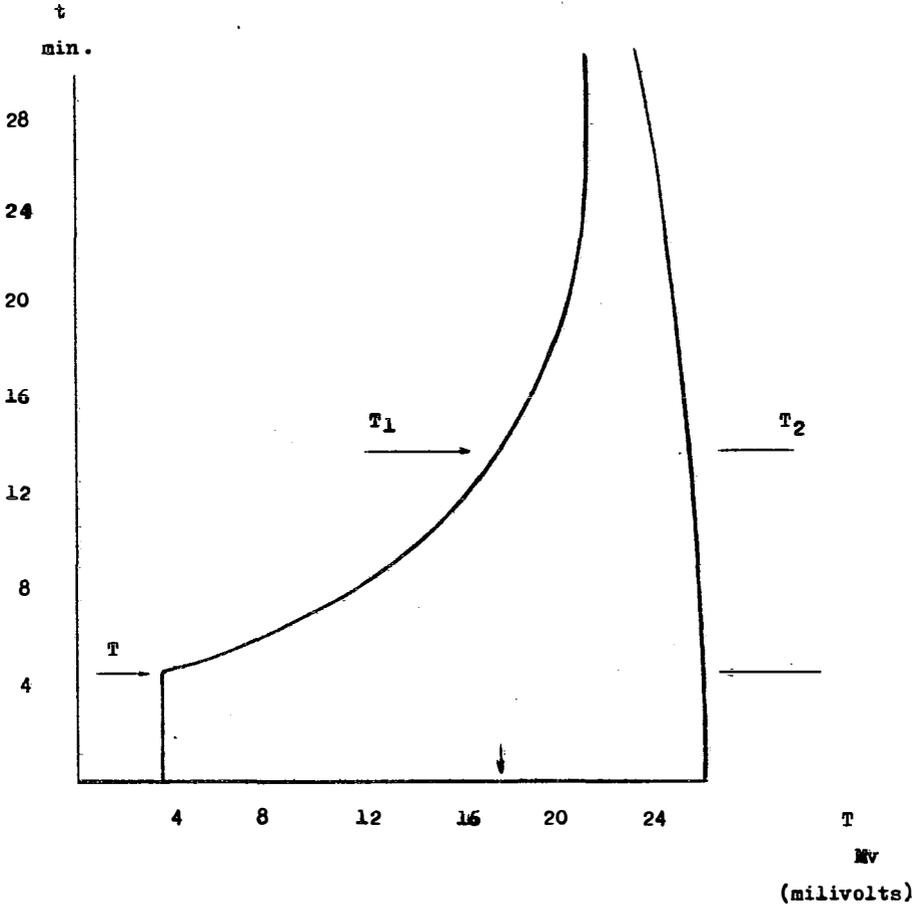
Finalmente despejando  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{6.25 \text{ cm}^2 \times 0.259}{564 \text{ seg.}} = \frac{1.61875 \text{ cm}^2}{564 \text{ seg}}$$

$$\alpha = 0.0028701 \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}}$$

$$\alpha = 2.870 \times 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{seg}}$$

G R A F I C A   N o   1



## IV EXPERIMENTACION

### 1. Descripción del equipo y materiales.

**Arena:** Arena Sílica 40-50 de Básicos Siderúrgicos S. A.

**Aglutinante:** Bentonita Sódica y Bentonita Cálcica de Básicos Siderúrgicos S. A.

**Molde:** El molde es un cilindro de arena en verde con las siguientes dimensiones: 5 cm., de diámetro por 5 cm., de longitud hecho con norma AFS en el apisonador ( ver apéndice No 4 ).

**Molino Simpson:** El molino mezclador tiene un diámetro de 45 cm., por 35 cm., de altura con una capacidad nominal de 6 Kg.

El mezclado se realiza mediante dos poleas giratorias excéntricas las cuales son accionadas por un motor trifásico con una potencia de 1 HP y 40 rpm.

**Arena de moldeo:** Preparada tanto con bentonita sódica como con bentonita cálcica y la humedad respectiva ( ver tablas 1 y 2 ).

**Apisonador:** El instrumento para apisonar la probeta cilíndrica de norma AFS es un apisonador No 315-C1 de DIETERT CO., y nos da una presión constante en los tres golpes de  $10 \text{ Kg/cm}^2$ .

**Máquina de Tracción Universal No 400-1:** El ensayo de resistencia a la compresión se hace aplicando una carga uniforme a lo largo del eje de la probeta de ensayo norma.

La máquina es impulsada por un motor con una potencia de 1 HP y 43 rpm.

Modelo: El modelo es una caja de madera con las siguientes dimensiones: 20 x 20 cm., de lado por 12 cm., de altura y en el interior de la caja se coloca una placa aislante en la base y las paredes, selladas con cemento refractario de tal manera que se obtengan finalmente las siguientes dimensiones interiores: 15 x 15 cm., de lado por 5 cm., de altura.

La placa aislante esta compuesta básicamente de materiales refractarios molidos, fibras orgánicas y cerámicas aglutinadas con resinas orgánicas. La placa es de color beige y tiene aproximadamente la siguiente composición:

$\text{SiO}_2$	83	-	85	%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1	-	2	%
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	1.00			%
$\text{MgO}$	1.00			%
Alcalis	0.30			%
Orgánicos	11	-	12	%

Con una densidad de 0.95 - 1.05  $\text{g/cm}^3$ .

La tapa de la caja es del mismo material de la placa aislante la cual esta unida a una base de madera con cemento refractario, la tapa tiene dos orificios pequeños, uno en el centro y el otro a una distancia media sobre la diagonal entre el centro de la tapa y el extremo de la misma, de tal modo que quede entre el centro del cilindro de arena y una esquina de la pared interior de la caja. Tiene otros dos orificios más grandes a los anteriores, que son por donde se va a vaciar el metal y además sirven como desgasificadores para evitar la formación de poros y obtener resultados erróneos.

Estos dos orificios tienen un diámetro de 2.5 cm., y los otros orificios son de diámetro necesario para insertar los termopares ( ver apéndice 1 ).

Horno: Para la fusión del metal se emplea un horno del tipo de resistencias marca LINDBERG con un recubrimiento interior aislante, con un control de temperatura de  $\pm 1^{\circ}\text{C}.$ , y un rango de calentamiento de 200 - 1200 $^{\circ}\text{C}.$

Crisol: Se usó un crisol de acero inoxidable 304 con las siguientes dimensiones: 30 cm., de longitud por 12 cm., de diámetro para la fusión del aluminio.

Termopares: Se usaron termopares Cromel-Alumel calibre 28 con recubrimiento de acero inoxidable de Industrial Monclova S. A.

Registrador: Se utilizó un registrador HEWLETT-PACKARD 7100 BM de dos plumas.

## 2. Planeación del experimento.

Para la implantación de este método fué necesario hacer determinaciones de difusividad que pudieran demostrar la validez del método. Esto se hizo mediante dos tipos de experimentos, uno preliminar y sencillo y otro más extenso que aporte datos comparativos con otros métodos.

1) Obteniendo valores de difusividad a una preparación arbitraria de arena variando la posición del termopar central a diferentes posiciones en el sentido de la longitud. Esto se hizo con el fin de demostrar que la transferencia de calor en este sentido era despreciable, o sea, que la probeta funcionaba como cilindro infinito.

2) Obteniendo valores de difusividad de una serie de

preparaciones de arena sílica-bentonita-agua de los cuales se conocieran datos ya obtenidos por otros métodos.

La serie de preparaciones escogidas fué también ensayada en cuanto a su resistencia mecánica, la razón de éstos últimos ensayos fué de que los datos obtenidos por otros métodos, han sido reportados junto con los de resistencia mecánica y se ha intentado hacer una correlación de ellos.

La serie de preparaciones de arena ensayada se encuentra en las tablas 1 y 2.

Los valores de humedad escogidos pertenecen a una serie de comparaciones alrededor de un punto óptimo de resistencia a la compresión denominado "Temper" que se ha usado como base para el control de las arenas de moldeo.

### 3. Desarrollo experimental.

Preparación de la arena: Se pesa la cantidad de arena sílica y bentonita correspondiente al % en peso que se desea de cada una de ellas en la mezcla ( ver tablas 1 y 2 ) y se colocan en un recipiente hermético, al mismo tiempo con una probeta graduada se toma un volumen de agua equivalente al % en peso de la misma necesario para completar el 100 % de la mezcla.

Se mezcla la bentonita con la arena para darle cierta homogeneidad y se colocan en el interior del molino Simpson distribuyendo la carga uniformemente entre las ruedas del mismo. Se cierra el molino para evitar pérdidas por polvos y se pone a funcionar durante 1.5 minutos para homogenizar completamente la mezcla.

Finalmente se abre la compuerta de desalojo del apar-

to y la arena ya preparada se pasa a través de una malla No 5 y se guarda en un recipiente hermético.

De esta arena ya preparada se toma una parte para las pruebas mecánicas y otra para la probeta de experimentación, la probeta que se usa para determinar las propiedades mecánicas es de las mismas características que la usada para experimentación. Se prepara pesando de 150-160 g., para obtener las dimensiones norma: 5 cm., de radio por 5 cm., de longitud.

Se coloca en la máquina de tracción y se toma automáticamente la determinación de la resistencia a la compresión, leyéndose en la escala de compresión en verde.

El cilindro de arena se coloca en el interior de la caja procurando que quede bien centrado, una vez puesto el cilindro se tapa la caja, después se colocan los termopares cuidadosamente, uno en el centro del cilindro hasta 2.5 cm. de profundidad y es el que determina la temperatura de calentamiento de la arena, el otro termopar se inserta a la misma profundidad pero en el baño de aluminio, esta protegido por un tubo pyrex de 3 mm., de diámetro y es el que mide la temperatura de solidificación, estos termopares se conectan al registrador.

El registrador se mantuvo en las siguientes condiciones:

Canal Rojo	Arena	50 Mv.
Canal Azul	Baño Metálico	50 Mv.
Vel. del Registrador		30 cm/hr.

Una vez preparada la caja con los termopares se proce-

de al vaciado del metal sobrecalentado por  $50^{\circ}\text{C}$  a la hora de ser vaciado.

El experimento termina una vez que la curva que corresponde a la solidificación del aluminio deja de ser constante, una vez que solidificó el aluminio.

Con la curva se obtienen los datos necesarios para la determinación de la difusividad térmica.

Una vez que se terminó el experimento se sacaron los termopares con mucho cuidado para usarlos posteriormente.

El tiempo que dura la experimentación completa es de 2.5 horas, desde la fusión del aluminio hasta la obtención de la gráfica específica.

Datos para la preparación de la arena de moldeo.

Humedad	Volumen	Bentonita		Peso	Arena	Peso
%	ml.	Na	%	g	%	g
1.5	45		6	180	92.5	2 775
2.0	60		6	180	92.0	2 760
3.0	90		6	180	91.0	2 730
4.0	120		6	180	90.0	2 700
1.5	45		8	240	90.5	2 715
2.0	60		8	240	90.0	2 700
3.0	90		8	240	89.0	2 670
4.0	120		8	240	88.0	2 640
1.5	45		10	300	88.5	2 655
2.0	60		10	300	88.0	2 640
3.0	90		10	300	87.0	2 610
4.0	120		10	300	86.0	2 580
1.5	45		12	360	86.5	2 595
2.0	60		12	360	86.0	2 580
3.0	90		12	360	85.0	2 550
4.0	120		12	360	84.0	2 520
1.5	45		14	420	84.5	2 535
2.0	60		14	420	84.0	2 520
3.0	90		14	420	83.0	2 490
4.0	120		14	420	82.0	2 460

Tabla 1

Datos para la preparación de la arena de moldeo.

Humedad %	Volumen ml.	Bentonita		Peso g	Arena %	Peso g
		Ca	%			
1.5	45	6		180	92.5	2 775
2.0	60	6		180	92.0	2 760
3.0	90	6		180	91.0	2 730
4.0	120	6		180	90.0	2 700
1.5	45	8		240	90.5	2 715
2.0	60	8		240	90.0	2 700
3.0	90	8		240	89.0	2 670
4.0	120	8		240	88.0	2 640
1.5	45	10		300	88.5	2 655
2.0	60	10		300	88.0	2 640
3.0	90	10		300	87.0	2 610
4.0	120	10		300	86.0	2 580
1.5	45	12		360	86.5	2 595
2.0	60	12		360	86.0	2 580
3.0	90	12		360	85.0	2 550
4.0	120	12		360	84.0	2 520
1.5	45	14		420	84.5	2 535
2.0	60	14		420	84.0	2 520
3.0	90	14		420	83.0	2 490
4.0	120	14		420	82.0	2 460

Tabla 2

## V

### RESULTADOS Y DISCUSION

#### 1. Resultados.

A continuación se presentan los valores obtenidos durante la experimentación.

Inicialmente tenemos los resultados preliminares para las muestras con 3.5 cm., y 1.5 cm., de profundidad para mezclas de 4 % de humedad con 10 % y 12 % de bentonita sódica y cálcica respectivamente Tabla V-1.

Las gráficas 2 y 3 corresponden a los resultados preliminares, no se muestran las que se obtienen para las tablas V-2 a V-11 debido a que tienen el mismo comportamiento como se aprecia en las gráficas 1, 2 y 3.

Posteriormente se reportan los valores de difusividad que se obtienen para la arena de moldeo con las temperaturas y tiempos leídos en las gráficas conforme a los diferentes porcentajes de bentonita sódica, cálcica y humedad, Tablas V-2 a V-11, en donde:

T = Temperatura inicial del cilindro.

T<sub>1</sub> = Temperatura final del cilindro.

T<sub>2</sub> = Temperatura de solidificación del aluminio.

H = % de humedad usado en la mezcla.

t = Tiempo real, tiempo considerado durante la solidificación del aluminio.

$x 10^{-3}$  = Difusividad Térmica.

Enseguida se presentan las gráficas de los valores medios de Resistencia a la Compresión-Humedad-Difusividad térmica, para las diferentes mezclas de arena y los valores medios de las Tablas V-12 y V-13. ( Gráficas A a J )

Tabla V-1

Con 12 % de Bentonita Sódica.

Para 1.5 cm., de profundidad. ( ver gráfica No 2

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
76	508	621	744	2. 850	4

Para 3.5 cm., de profundidad.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	478	616	624	3. 185	4

Con 10 % de Bentonita Cálctica.

Para 1.5 cm., de profundidad.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	408	621	696	2. 200	4

Para 3.5 cm., de profundidad. ver gráfica No 3

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
76	480	619	720	2. 751	

Tabla V-2 Con 6 % de Bentonita Sódica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	490	609	792	2.690	1.5
71	485	621	660	2.900	1.5
74	431	621	456	3.618	2.0
69	513	612	924	2.543	2.0
79	459	621	684	2.658	3.0
50	448	621	732	2.459	3.0
74	504	621	828	2.634	4.0
74	457	626	612	2.920	4.0

Tabla V-3 Con 8 % de Bentonita Sódica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
79	480	616	594	3.345	1.5
79	504	619	876	2.490	1.5
79	504	619	780	2.796	2.0
71	462	619	780	2.387	2.0
81	485	619	864	2.365	3.0
79	485	619	912	2.205	3.0
79	497	619	708	2.992	4.0
76	480	619	600	3.312	4.0

Tabla V-4 Con 10 % de Bentonita Sódica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
69	436	609	684	2.540	1.5
54	452	616	840	2.194	1.5
74	499	612	720	3.046	2.0
33	443	614	696	2.631	2.0
35	317	492	612	2.951	3.0
50	376	513	456	3.837	3.0
50	443	609	420	3.005	4.0
98	414	609	516	3.003	4.0

Tabla V-5 Con 12 % de Bentonita Sódica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
79	476	628	780	2.435	1.5
74	426	628	624	2.564	1.5
74	478	623	804	2.425	2.0
98	471	633	576	3.125	2.0
74	490	619	738	2.803	3.0
79	438	614	615	2.784	3.0
74	455	616	612	2.971	4.0
76	466	619	714	2.634	4.0

Tabla V-6 Con 14 % de Bentonita Sódica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
81	485	628	624	3.028	1.5
74	485	630	660	2.973	1.5
74	431	623	504	3.291	2.0
74	508	623	960	3.261	2.0
79	433	623	492	3.340	3.0
74	508	623	876	2.518	3.0
71	419	616	540	2.962	4.0
74	412	616	576	2.788	4.0

Tabla V-7 Con 6 % de Bentonita Cálctica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	480	621	720	2.751	1.5
81	492	619	828	2.498	1.5
79	478	621	667	2.920	2.0
64	471	612	828	2.385	2.0
74	490	607	804	2.674	3.0
83	480	621	720	2.717	3.0
74	436	612	540	3.182	4.0
79	497	619	708	2.992	4.0

Tabla V-8 Con 8 % de Bentonita Cálctica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	492	619	787	2.618	1.5
69	478	623	726	2.703	1.5
86	429	621	564	2.870	2.0
83	499	619	840	2.537	2.0
74	445	619	744	2.343	3.0
91	457	623	667	2.648	3.0
71	452	619	660	2.717	4.0
74	438	616	600	2.854	4.0

Tabla V-9 Con 10 % de Bentonita Cálctica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
74	499	612	864	2.539	1.5
88	537	626	912	2.693	1.5
79	433	616	444	3.772	2.0
81	476	598	600	3.458	2.0
98	504	649	576	3.385	3.0
74	448	612	540	3.206	3.0
64	490	607	804	2.581	4.0
74	513	626	828	2.687	4.0

Tabla V-10 Con 12 % de Bentonita Cálctica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
79	438	621	480	2.409	1.5
74	485	623	804	2.487	1.5
74	459	623	756	2.141	2.0
79	469	614	540	3.135	2.0
83	462	619	492	3.714	3.0
81	480	614	624	3.210	3.0
69	448	626	576	3.027	4.0
79	487	614	624	3.305	4.0

Tabla V-11 Con 14 % de Bentonita Cálctica.

T	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	t	$\alpha \times 10^{-3}$	H
°C	°C	°C	seg.	cm <sup>2</sup> /seg.	%
79	362	626	372	3.477	1.5
74	414	626	456	2.788	1.5
88	513	616	888	2.561	2.0
74	476	616	648	3.047	2.0
74	473	623	720	2.656	3.0
74	414	621	384	4.060	3.0
74	480	602	708	2.957	4.0
76	485	619	684	2.960	4.0

Tabla V-12

Humedad	Bentonita Sódica.	Resistencia a la Compresión.		$\alpha \times 10^{-3}$ . cm <sup>2</sup> /seg.
		lb/pulg <sup>2</sup> .	MPa	
1.5	6	8.67	0.0577706	2.900
1.5	6	8.81	0.0587023	2.690
2.0	6	8.85	0.0589670	2.543
2.0	6	9.17	0.0611049	3.618
3.0	6	6.26	0.0417074	2.658
3.0	6	6.53	0.0435118	2.459
4.0	6	5.50	0.0366472	2.634
1.5	8	7.09	0.0472383	2.490
1.5	8	8.15	0.0542991	3.345
2.0	8	12.85	0.0856214	2.387
2.0	8	13.22	0.0880828	2.796
3.0	8	11.85	0.0789627	2.365
3.0	8	12.12	0.0807573	2.205
4.0	8	8.87	0.0591043	3.312
4.0	8	9.00	0.0599673	2.992
1.5	10	10.05	0.0767660	2.194
1.5	10	11.05	0.0776279	2.540
2.0	10	11.20	0.0746282	3.046
2.0	10	12.88	0.0858175	2.631
3.0	10	15.62	0.1040774	3.837
3.0	10	15.98	0.1064800	2.951

Humedad	Bentonita Sódica.	Resistencia a la Compresión.		$\alpha \times 10^{-3}$ .
%	%	lb/pulg <sup>2</sup> .	MPa	cm <sup>2</sup> /seg.
4.0	10	10.56	0.0703623	3.003
4.0	10	10.58	0.0704996	3.005
1.5	12	11.85	0.0789627	2.564
1.5	12	12.73	0.0848270	2.435
2.0	12	21.00	0.1007039	2.425
2.0	12	21.56	0.1436666	3.125
3.0	12	18.10	0.1206015	2.784
3.0	12	18.36	0.1223373	2.803
4.0	12	16.05	0.1069409	2.634
4.0	12	17.00	0.1132760	2.971
1.5	14	14.85	0.0989485	3.028
1.5	14	15.08	0.1009784	2.973
2.0	14	15.76	0.1085669	3.291
2.0	14	16.88	0.1124809	3.261
3.0	14	24.40	0.1625836	2.518
3.0	14	25.65	0.1709192	3.340
4.0	14	19.33	0.1287799	2.788
4.0	14	19.40	0.1292706	2.962

Tabla V\_13

Humedad	Bentonita Cálcica.	Resistencia a la Compresión.		$\alpha \times 10^{-3}$ .
		lb/pulg <sup>2</sup> .	MPa	
1.5	6	12.45	0.0830520	2.498
1.5	6	12.96	0.0863569	2.751
2.0	6	11.30	0.0752905	2.385
2.0	6	11.55	0.0769621	2.920
3.0	6	7.25	0.0483073	2.674
3.0	6	7.48	0.0498371	2.717
4.0	6	5.70	0.0379809	3.182
4.0	6	6.23	0.0415113	2.992
1.5	8	18.13	0.1208075	2.618
1.5	8	18.35	0.1226860	2.703
2.0	8	16.44	0.1095397	2.870
2.0	8	17.10	0.1139428	2.537
3.0	8	12.30	0.0843810	2.343
3.0	8	13.47	0.0897500	2.648
4.0	8	10.15	0.0676263	2.854
4.0	8	10.46	0.0697935	2.717
1.5	10	18.70	0.1246026	2.693
1.5	10	19.60	0.1306042	2.539
2.0	10	21.50	0.1432646	3.772
2.0	10	21.73	0.1447993	3.459
3.0	10	19.80	0.1319379	3.206
3.0	10	20.23	0.1348015	3.385

Humedad	Bentonita Cálcica.	Resistencia a la Compresión.		$\alpha \times 10^{-3}$ .
%	%	lb/pulg <sup>2</sup> .	MPa	cm <sup>2</sup> /seg.
4.0	10	15.13	0.1008118	2.687
4.0	10	15.30	0.1019494	2.581
1.5	12	14.90	0.0894754	2.487
1.5	12	15.66	0.1043422	2.409
2.0	12	20.65	0.1375964	2.141
2.0	12	21.42	0.1427252	3.135
3.0	12	23.00	0.1532575	3.210
3.0	12	23.40	0.1559249	3.714
4.0	12	19.00	0.1364098	3.027
4.0	12	19.20	0.1279369	3.305
1.5	14	15.38	0.1024789	3.477
1.5	14	15.43	0.1028123	2.788
2.0	14	20.50	0.1365961	2.561
2.0	14	21.66	0.1443237	3.047
3.0	14	24.00	0.1599260	2.656
3.0	14	23.60	0.1572645	4.060
4.0	14	21.50	0.1432646	2.957
4.0	14	22.08	0.1471284	2.960

Valores Medios.

Para 6 % de Bentonita Sódica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0582364	2. 895	1.5
0.0600035	3. 080	2.0
0.0426146	2. 558	3.0
0.0371473	2. 777	4.0

Para 8 % de Bentonita Sódica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0507687	2. 917	1.5
0.0868521	2. 591	2.0
0.0798600	2. 285	3.0
0.0595358	3. 152	4.0

Para 10 % de Bentonita Sódica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0771969	2. 367	1.5
0.0802228	2. 838	2.0
0.1052787	3. 394	3.0
0.0704309	3. 004	4.0

Valores medios.

Para 12 % de Bentonita Sódica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0818948	2. 499	1.5
0.1221852	2. 775	2.0
0.1214694	2. 793	3.0
0.1101084	2. 802	4.0

Para 14 % de Bentonita Sódica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0997134	3. 000	1.5
0.0110528	3. 276	2.0
0.1667514	2. 929	3.0
0.1290252	2. 875	4.0

Para 6 % de Bentonita Cálctica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0847044	2. 624	1.5
0.0761285	2. 652	2.0
0.0490722	2. 695	3.0
0.0397461	3. 087	4.0

Valores Medios.

Para 8 % de Bentonita Cálctica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.1217467	2. 660	1.5
0.1117412	2. 703	2.0
0.0870655	2. 495	3.0
0.0687099	2. 785	4.0

Para 10 % de Bentonita Cálctica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.1276034	2. 616	1.5
0.1440319	3. 615	2.0
0.1383697	3. 295	3.0
0.1013806	2. 634	4.0

Para 12 % de Bentonita Cálctica:

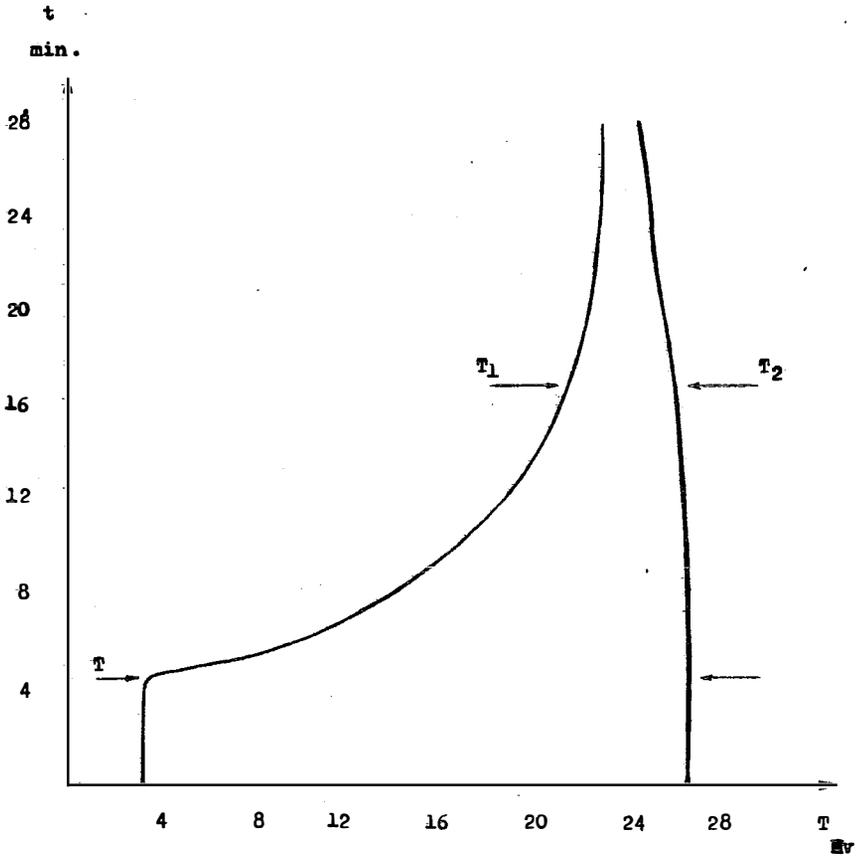
Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.0969088	2. 448	1.5
0.1401608	2. 638	2.0
0.1545912	3. 462	3.0
0.1321733	3. 166	4.0

Valores Medios.

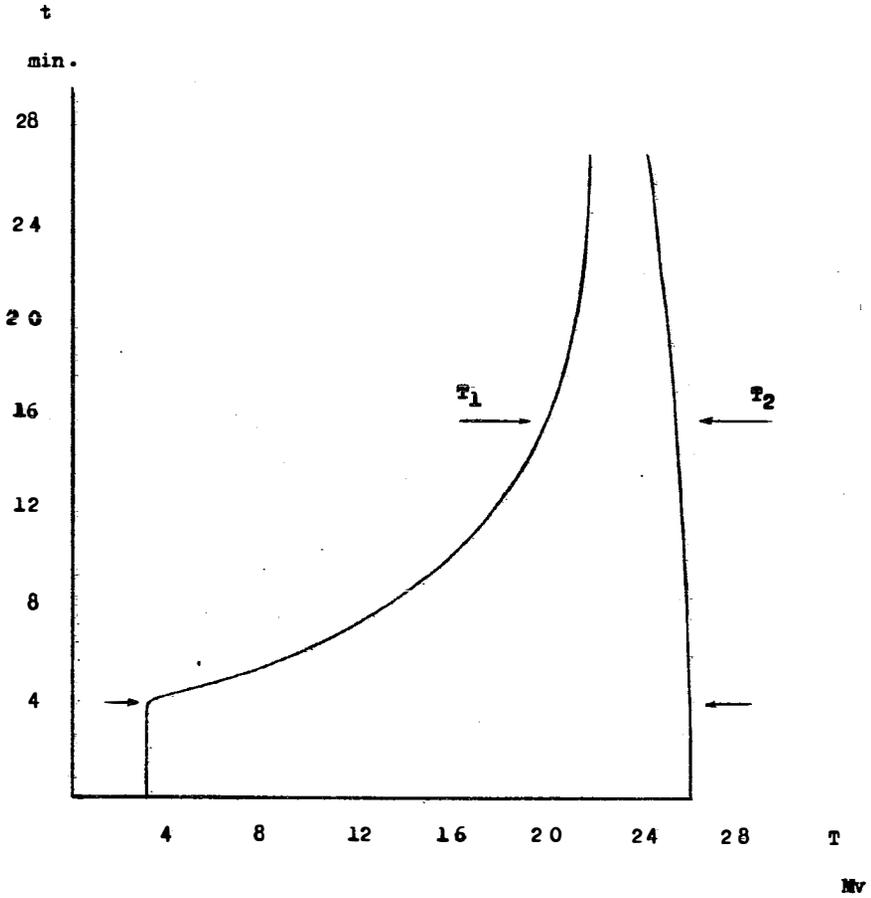
Para 14 % de Bentonita Cálctica:

Resistencia a la Compresión.	$\alpha \times 10^{-3}$ .	H
MPa	cm <sup>2</sup> /seg	%
0.1026456	3.132	1.5
0.1404599	2.804	2.0
0.1586952	3.358	3.0
0.1451965	2.958	4.0

G R A F I C A    N o    2

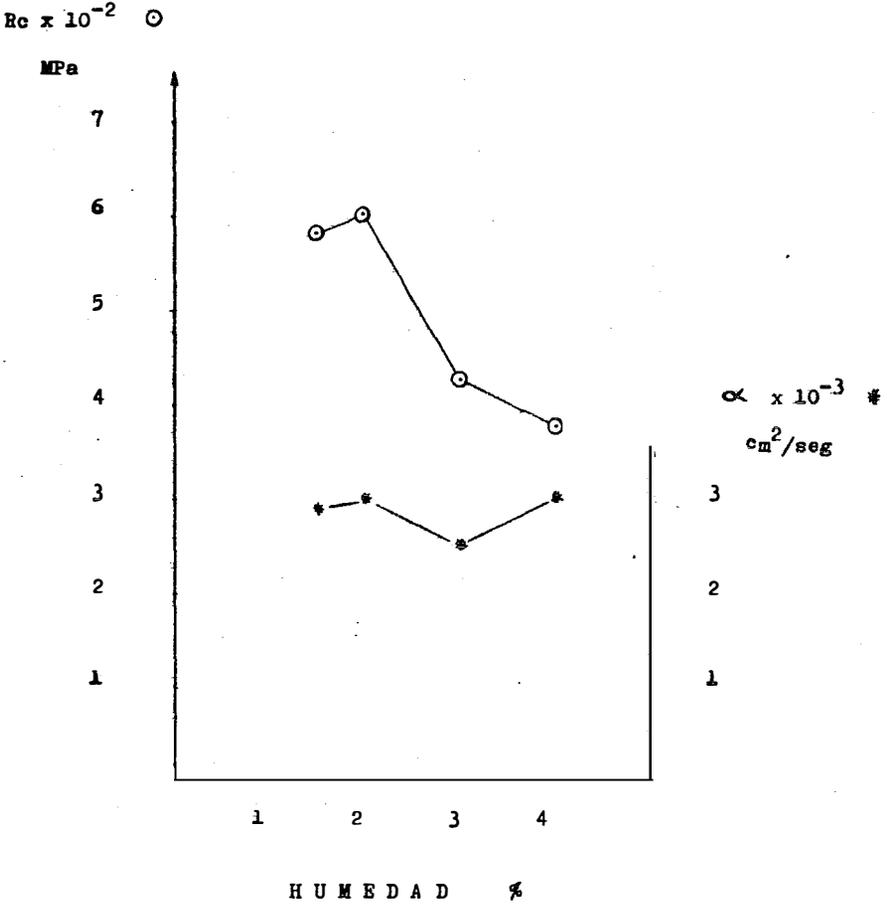


GRAFICA No 3



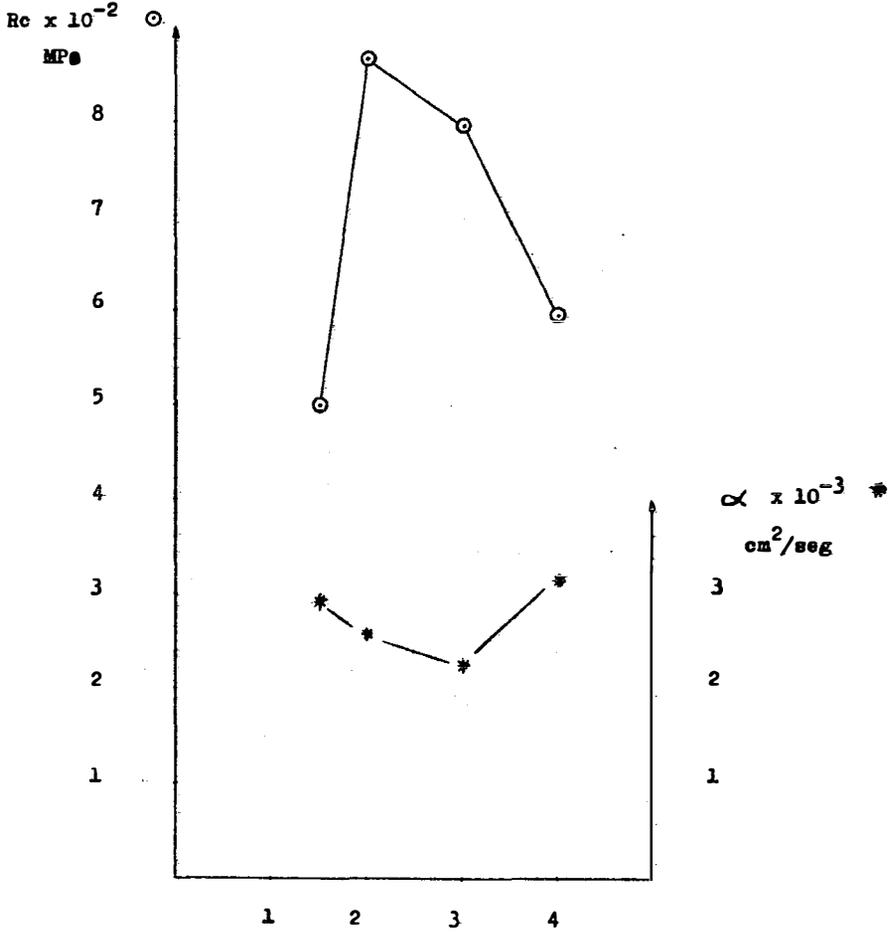
GRAFICA A

6 % Bentonita Sódica



■ G R A F I C A B

8 % Bentonita Sódica



H U M E D A D %

GRAFICA C

10 % Bentonita Sódica

$Re \times 10^{-2}$

MPa

14

12

10

8

6

4

2

$\alpha \times 10^{-3}$

cm<sup>2</sup>/seg

3

2

1

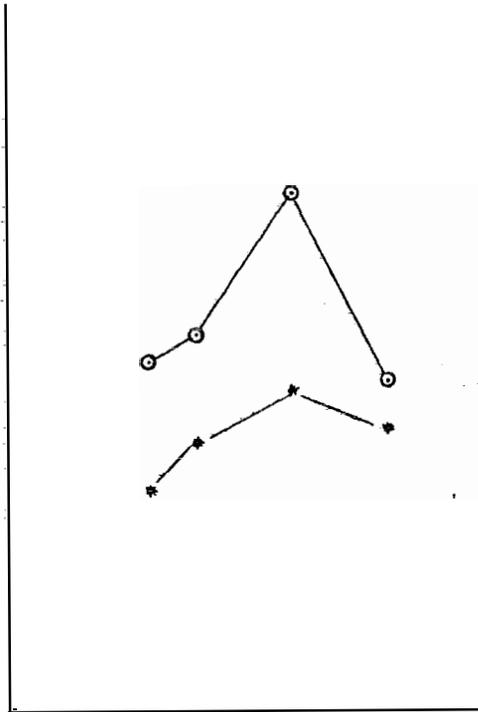
1

2

3

4

HUMEDAD %



GRAFICA D

12 % Bentonita Sódica

$Re \times 10^{-2}$

MPa

14

12

10

8

6

4

2

$\alpha \times 10^{-3}$  \*

$cm^2/seg$

3

2

1

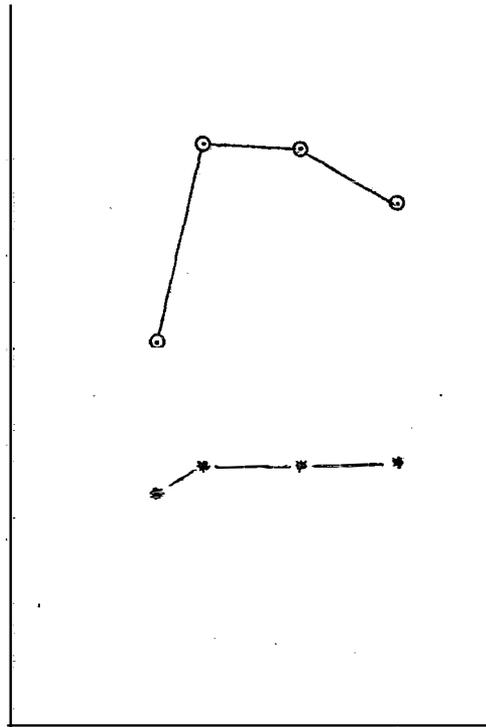
1

2

3

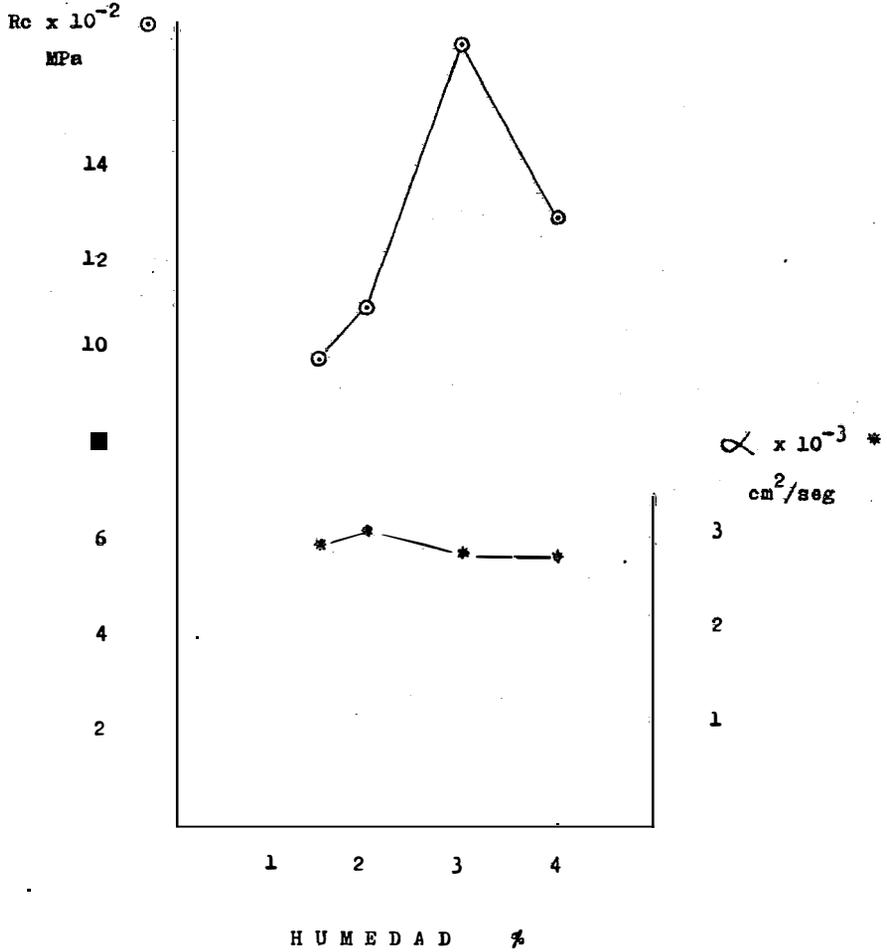
4

HUMEDAD %



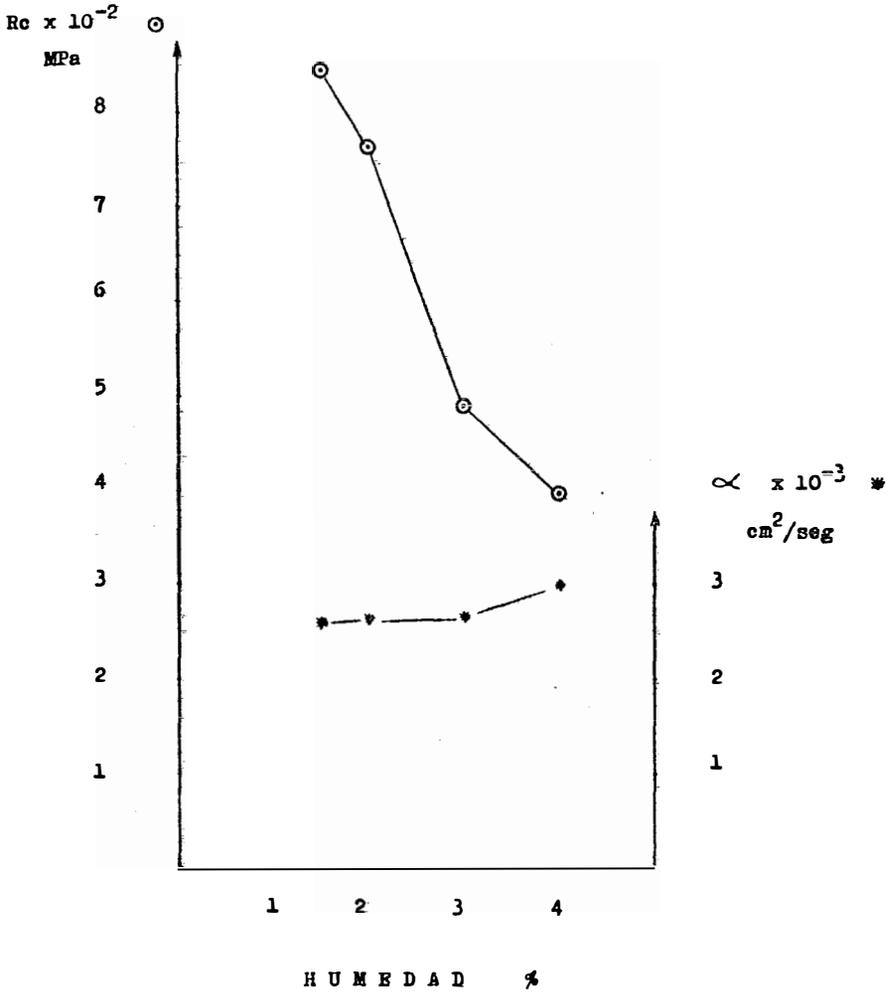
G R A F I C A E

14 % Bentonita Sódica



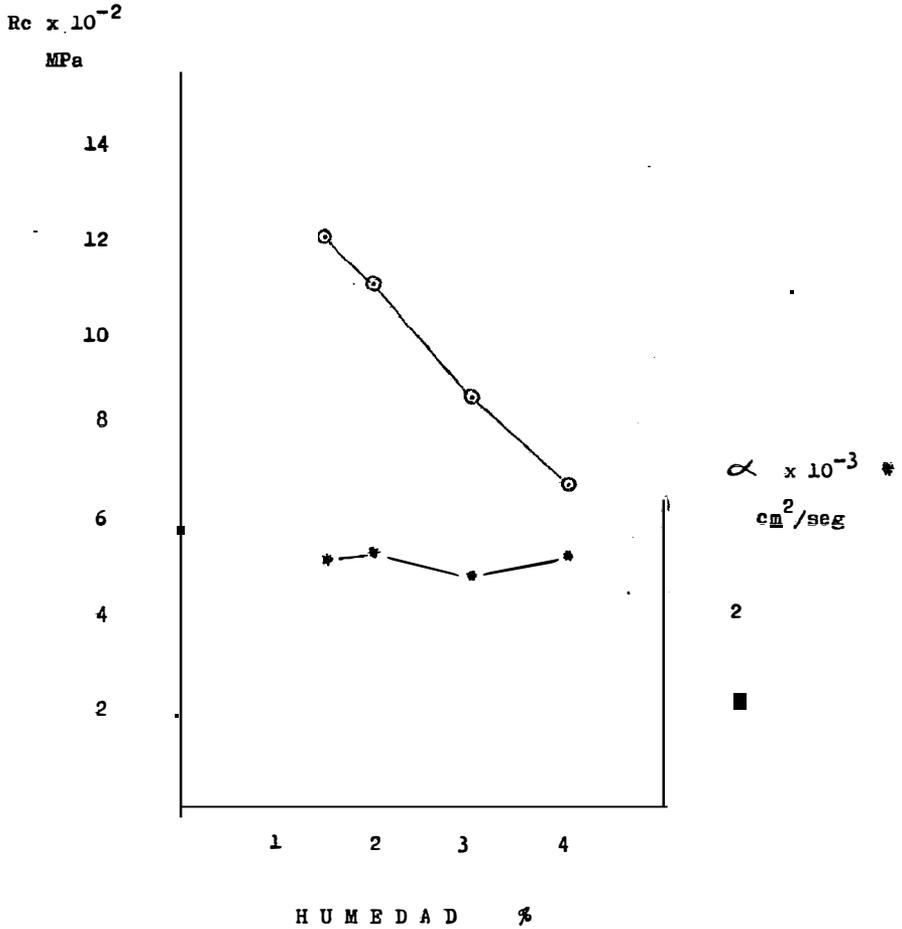
GRAFICA P

6 % Bentonita Cálceica



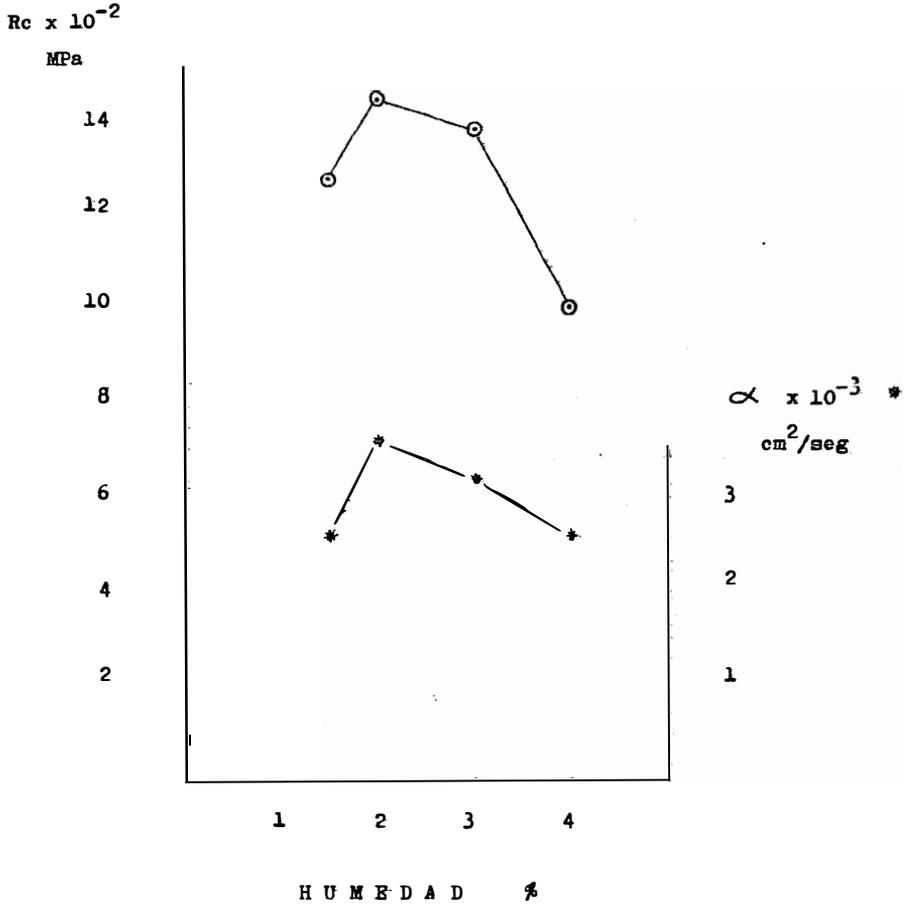
G R A F I C A G

8 % Bentonita Cálctica



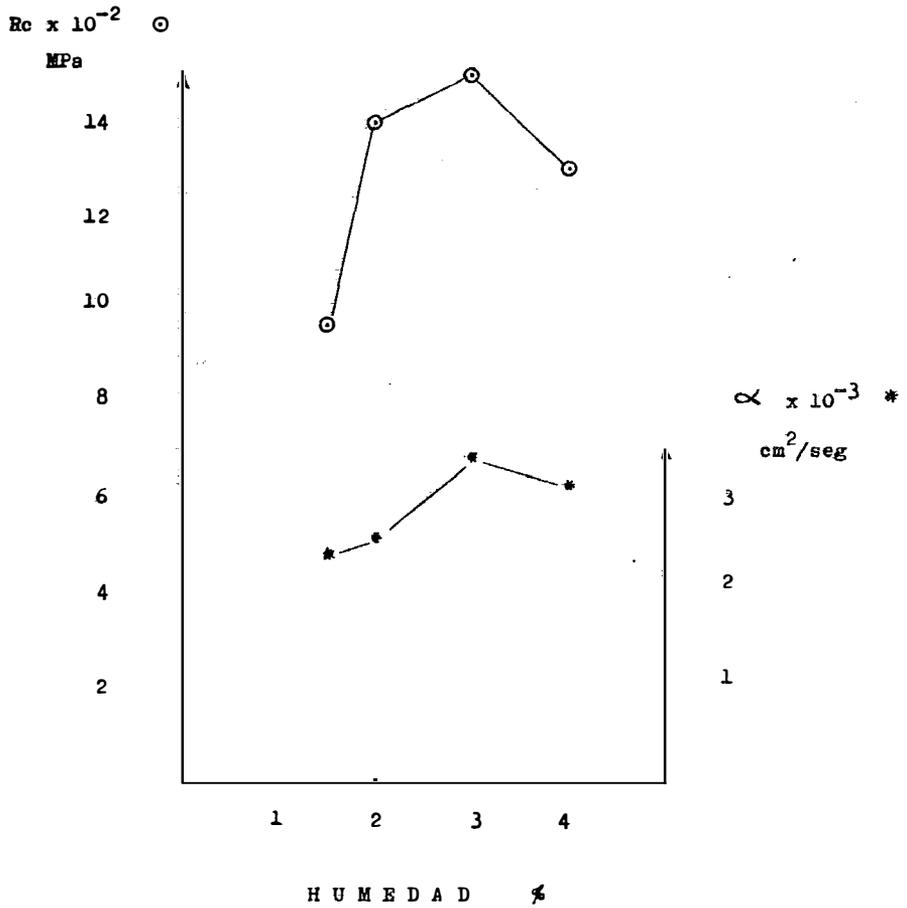
G R A F I C A    H

10 % Bentonita Cálctica



GRAFICA I

12 % Bentonita Cálctica



GRAFICA J

14 % Bentonita Cálctica

$R_c \times 10^{-2}$  ○

MPa

16

14

12

10

8

6

4

2

$\alpha \times 10^{-3}$  \*

$\text{cm}^2/\text{seg}$

3

2

1

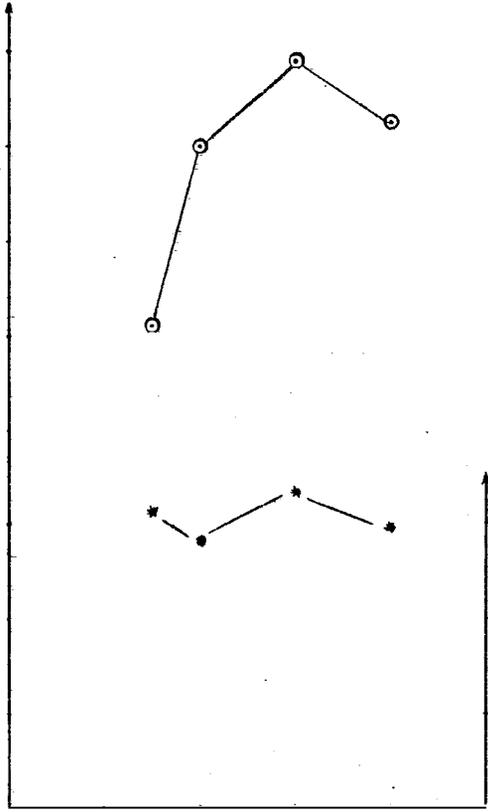
1

2

3

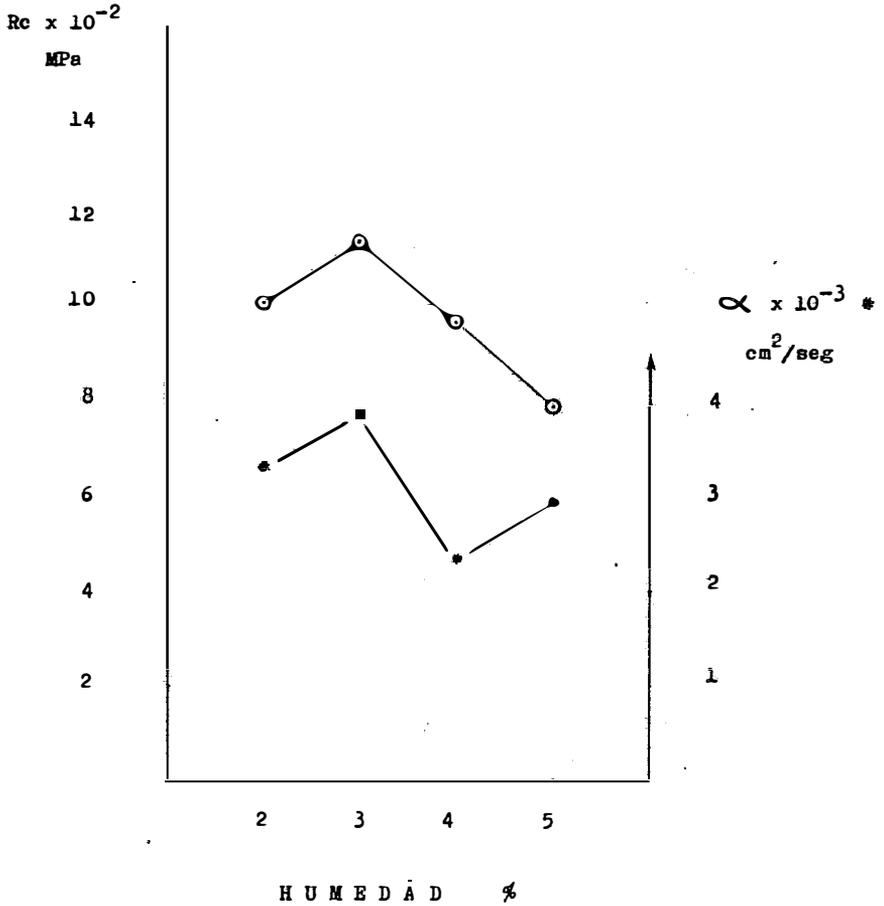
4

HUMEDAD %



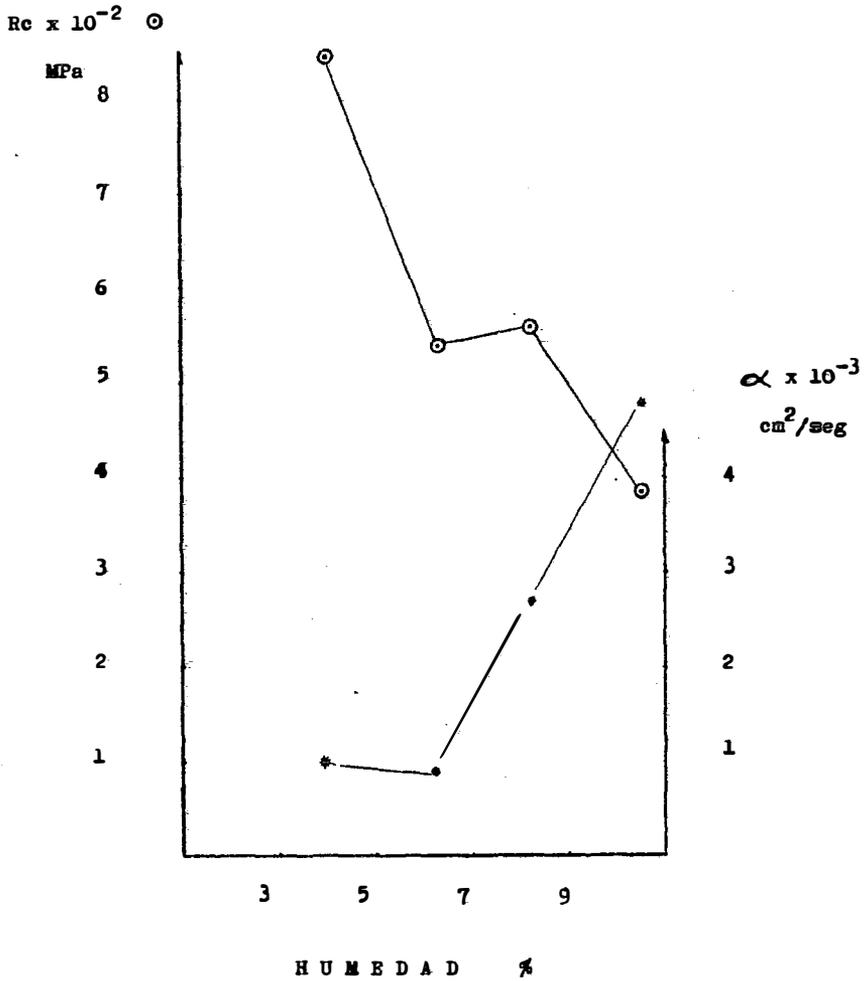
GRÁFICA K

10 % Bentonita Sódica



GRAFICA L

10 % Bentonita Sódica



## 2. Discusión.

a) Como se puede apreciar de los valores en las posiciones 1.5 cm., y 3.5 cm., en la tabla V-1, éstos son iguales a los que resultan posteriormente en el centro de la probeta.

Tomando en cuenta que los valores de  $\alpha$  que se obtienen en posiciones diferentes son iguales, se demuestra que la resistencia térmica en cualquier punto del cilindro en dirección longitudinal es constante, ésta se puede despre- ciar y considerar al cilindro en extensión como un cilindro infinito, lo cual nos demuestra que la suposición usada en el fundamento del método es correcta.

b) En las tablas V-2 a V-11, las temperaturas  $T$  corresponden a la pérdida de humedad en el cilindro de arena, se encuentra en ellas una cierta similitud como se puede apreciar en las tablas de datos, teniendo para los valores de  $T$  una diferencia entre los valores máximo y mínimo de  $17^{\circ}\text{C}$ , donde los valores considerados son los que se agrupan en mayoría, encontrando un mínimo de valores muy fuera de ese rango.

Para los valores de  $T_1$  se ve que la diferencia entre los valores máximo y mínimo es mayor que en  $T$ , siendo de  $19^{\circ}\text{C}$ . Tomando en cuenta que los valores para determinar la di fusividad de  $T$  y  $T_1$  se toman arbitrariamente con respecto a  $T_2$ , no interesa que no sean uniformes.

Los valores deben ser más similares en  $T_2$ , y se aprecia en las tablas V-2 a V-11 que la diferencia entre los va lores máximo y mínimo de la mayoría de los valores es de  $14^{\circ}\text{C}$

con un mínimo de valores fuera de este rango.

En los tiempos de duración en la solidificación existe una marcada diferencia. Estas diferencias se pueden deber a varias causas como son: pérdidas de calor al vaciar en la caja ya que el refractario esta sellado con cemento refractario con cierto contenido de humedad y además existe el contenido de humedad del cilindro; otra causa puede ser que el termopar al no estar en contacto directo con el metal y estar protegido por un tubo pyrex, además del blindaje, puede perder sensibilidad y no registre exactamente.

Todas estas causas se deben considerar al apreciar la diferencia en los tiempos leídos durante la solidificación del aluminio, pero como no afectan a la determinación de la difusividad térmica como lo demuestran los datos, se pueden despreciar.

c) Al analizar la diferencia entre los valores de difusividad, de los valores máximos y los valores mínimos obtenidos con la misma muestra y haciendo una comparación a todas las muestras se observa que esas diferencias se distribuyen de la siguiente manera:

Diferencias máximos - mínimos	Número de Determinaciones	% de Determinaciones
0.002 - 0.490	30	75.00 %
0.491 - 0.999	7	17.50 %
1.000 - 1.404	3	7.50 %

Tabla A

Como se ve en la mayoría de las determinaciones, las diferencias tienden a valores despreciables. Esto demuestra

la repetibilidad del método.

Ahora haciendo un análisis entre los valores máximos y mínimos de los valores medi [REDACTED] la difusividad obtenidos en los rangos de 1.5 % a 4 % de humedad para cada porcentaje de bentonita, sódica y cálcica, se aprecia que la diferencia entre el valor máximo y mínimo es como sigue:

Bentonita Sódica.		Bentonita Cálcica.	
%	cm <sup>2</sup> /seg.	%	cm <sup>2</sup> /seg.
6	0.522	6	0.462
8	0.867	8	0.290
10	1.027	10	0.999
12	0.303	12	1.014
14	0.401	14	0.554

Hay que hacer notar que el máximo y el mínimo no siempre corresponden al mismo porcentaje de humedad.

De los valores anteriores se deduce que el rango de esta diferencia es comparable al rango de precisión del método, como se ve, comparando los valores con los de la tabla A.

Esto permite concluir que los valores de difusividad entre 1.5 % y 4 % de humedad no son significativamente diferentes.

d) Tomando en cuenta que existen una gran cantidad de variables en la determinación de la difusividad térmica con métodos diferentes, se seleccionan algunos valores que coinciden con la composición de mezclas de arena a una temperatura de aproximadamente 650°C.

Tabla Comparativa

Autor	Referencia	$x 10^{-3}$ cm <sup>2</sup> /seg.	Arena
Seshadri	(9) India	2.5	
Narayama	(10) India	1.9	
Virolle	(11) Francia	2.0	
Pehlke	(2) EUA	3.8	
Juárez	(5) UNAM	2.2	80-90 de Básicos Siderúrgicos.
Marotto	(4) UNAM	1.7	80-90 Juanita.
Llanos	(3) UNAM	1.8	40-45 Juanita.
Cariño	(6) UNAM	3.1	40-50 de Básicos Siderúrgicos.
Este trabajo	UNAM	3.0	40-50 de Básicos Siderúrgicos.

Se observa una relación muy estrecha entre los valores de difusividad de este trabajo con los autores extranjeros y los valores obtenidos por Alejandro Cariño Colín que se muestran en la gráfica K usando otro método con los mismos porcentajes de aglutinante, humedad y la misma arena. Comparando los resultados, existe una gran relación no solamente con los valores de difusividad, sino también en el comportamiento con respecto a las propiedades mecánicas, siendo esta relación muy marcada para los contenidos de 10, 12 y 14 % de bentonita con porcentajes de humedad de 1.5, 2, 3 y 4 %. Se puede apreciar como en los valores máximos de difusi-

vidad y de máxima resistencia a la compresión existe una gran relación para los contenidos anteriores de bentonita, mientras que para valores bajos en contenidos de bentonita no sucede esta relación.

Esta tendencia de la difusividad a aumentar con la resistencia es aparentemente contradictoria a los resultados de Raúl Arellano y Llanos Rivera (12), quienes concluyen que la difusividad térmica es inversamente proporcional a la resistencia y directamente proporcional a altos contenidos de bentonita ( ver gráfica L ).

Con respecto al posible aumento de la difusividad al aumentar el contenido de bentonita, se presta a discusión debido a que el comportamiento de la bentonita sódica hasta 623 °C es constante con respecto a la pérdida de humedad según la figura 13 del capítulo II correspondiente al manual de la AFS.

Sin embargo, no se puede afirmar que el comportamiento de la difusividad y la resistencia a la compresión sea correcto debido a las diferencias en % de humedad que se usan en cada trabajo.

Llanos y Arellano usan de 4 % de humedad hasta 10 % mientras que Cariño C. A. y en este trabajo se usa de 1.5 % a 4 % de humedad y ocasionalmente 5 %.

Para B. Rao y Bottorf (13), la explicación al aumento de las propiedades térmicas se justifica en base a la interacción granular de la arena, es decir, cuando la arena se encuentra seca el área de contacto entre granos es muy pequeña en comparación a cuando presenta un alto porcentaje

de humedad, ya que solo contiene aire entre los mismos como medio propagador de calor. Como la conductividad térmica del aire es muy pequeña en comparación con la de los granos sólidos y estos se encuentran en contacto en solo una pequeña área, entonces, la conductividad de la mezcla es muy baja. Cuando se adiciona el agua los granos se agrupan entre ellos por este medio, o sea, el agua aumenta el área de contacto debido al incremento de las fuerzas de adhesión agua-arena, siendo el agua más de 20 veces mayor en su conductividad térmica que la del aire, se presenta por lo tanto, un incremento de la conductividad térmica de la mezcla.

Si se analiza con más cuidado a Rao y Bottorf, el tener un mayor contenido de humedad induce a la formación de más espacios intergranulares, ya que en la fundición no se trabaja con temperaturas menores de  $100^{\circ}\text{C}$  y debe haber como consecuencia una baja en la difusividad térmica teniendo al aire como medio propagador de calor en esos espacios.

Ahora bien, viendo las gráficas con 10, 12 y 14 % de bentonita se tiene que la difusividad más alta corresponde a los puntos de mayor resistencia a la compresión (Temper y no a los contenidos de más humedad.

Esta situación puede ser válida tomando en cuenta que en el temper es donde existe una mayor compactación, por lo tanto, el área de contacto entre los granos de arena es mucho más grande que cuando se tiene una resistencia a la compresión menor.

## VI CONCLUSIONES

De los resultados que se obtienen se puede hacer las siguientes conclusiones:

1. El método que se desarrolla resulta bastante aceptable y confiable debido a que:

- a) El cilindro de arena efectivamente se comporta experimentalmente como un cilindro infinito.
- b) Se reduce el tiempo de experimentación.
- c) Los valores de difusividad son similares a los encontrados en la literatura.

2. Existe una relación de máxima resistencia a la compresión con la máxima difusividad para mezclas de arena con 10, 12 y 14 % de bentonita, sódica y cálcica, no así para valores de 6 y 8 % donde no se aprecia esta relación.

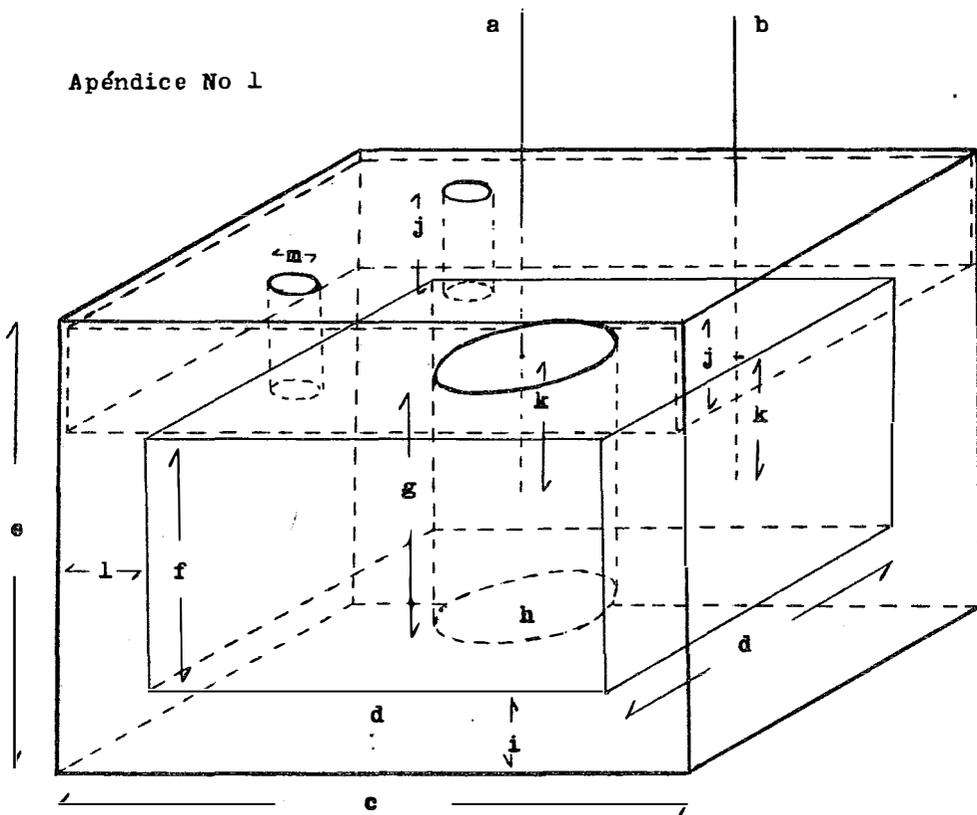
3. Estas tendencias de la difusividad a aumentar con la resistencia es aparentemente contradictoria a los resultados de Arellano y Llanos, de que la difusividad térmica es inversamente proporcional a la resistencia y directamente proporcional al aumento de bentonita.

Se anota una discusión a este respecto en el capítulo anterior.

VII

A P E N D I C E S

Apéndice No 1



**a y b = Termopares .**

**c = 20.0 cm**

**d = 15.0 cm**

**e = 12.0 cm**

**f = 5.0 cm**

**g = 5.0 cm**

**h = 5.0 cm**

**i = 4.0 cm**

**j = 3.0 cm**

**k = 2.5 cm**

**l = 2.5 cm**

**m = 2.5 cm**

Apéndice No 2

Tablas de F. C. W. Olson y O. T. Schultz.

$\theta$	$c(\theta)$	$\theta$	$c(\theta)$
0.241	0.39683	0.271	0.33393
0.242	0.39456	0.272	0.33201
0.243	0.39230	0.273	0.33010
0.244	0.39005	0.274	0.32820
0.245	0.38782	0.275	0.32632
0.246	0.38560	0.276	0.32444
0.247	0.38339	0.277	0.32258
0.248	0.38119	0.278	0.32072
0.249	0.37901	0.279	0.31888
0.250	0.37684	0.280	0.31704
0.251	0.37467	0.281	0.31522
0.252	0.37253	0.282	0.31341
0.253	0.37039	0.283	0.31120
0.254	0.36827	0.284	0.30981
0.255	0.36615	0.285	0.30803
0.256	0.36405	0.286	0.30626
0.257	0.36196	0.287	0.30450
0.258	0.35989	0.288	0.30276
0.259	0.35782	0.289	0.30100
0.260	0.35577	0.290	0.29927
0.261	0.35373	0.291	0.29755
0.262	0.35170	0.292	0.29584
0.263	0.34968	0.293	0.29244
0.264	0.34767	0.294	0.29244
0.265	0.34567	0.295	0.29976
0.266	0.34369	0.296	0.28909
0.267	0.34141	0.297	0.28742
0.268	0.33975	0.298	0.28576
0.269	0.33780	0.299	0.28412
0.270	0.33583	0.300	0.28249

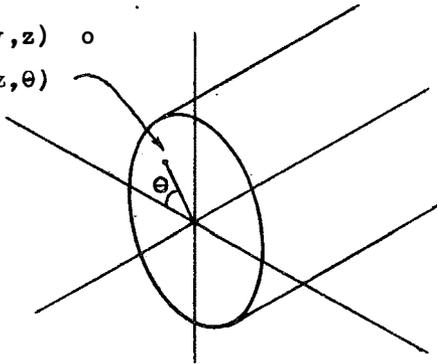
$\theta$	$c(\theta)$	$\theta$	$c(\theta)$
0.301	0.28088	0.331	0.23617
0.302	0.27924	0.332	0.23481
0.303	0.27764	0.333	0.23346
0.304	0.27604	0.334	0.23212
0.305	0.27445	0.335	0.23078
0.306	0.27287	0.336	0.22945
0.307	0.27130	0.337	0.22813
0.308	0.26973	0.338	0.22681
0.309	0.26818	0.339	0.22550
0.310	0.26664	0.340	0.22420
0.311	0.26510	0.341	0.22291
0.312	0.26358	0.342	0.22163
0.313	0.26206	0.343	0.22035
0.314	0.26055	0.344	0.21908
0.315	0.25905	0.345	0.21782
0.316	0.25765	0.346	0.21658
0.317	0.25607	0.347	0.21531
0.318	0.25460	0.348	0.21407
0.319	0.25313	0.349	0.21284
0.320	0.25167	0.350	0.21161
0.321	0.25022	0.351	0.21039
0.322	0.24878	0.352	0.20918
0.323	0.24735	0.353	0.20798
0.324	0.24591	0.354	0.20678
0.325	0.24451	0.355	0.20558
0.326	0.24310	0.356	0.20440
0.327	0.24170	0.357	0.20322
0.328	0.24030	0.358	0.20205
0.329	0.23892	0.359	0.20089
0.330	0.23754	0.360	0.19973

### Apéndice No 3

#### Ecuación de Conducción en Sistema de Cordenadas Cilíndricas.

Considerando un sistema cilíndrico como el que se muestra en la figura:

Punto  $(x,y,z)$  o  
 $(r,z,\theta)$



Las variables espaciales son: la distancia radial  $r$ , la distancia axial  $Z$  y el ángulo  $\theta$ . Como se ve en la figura estas variables están relacionadas a  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} X &= r \cos \theta \\ Y &= r \sin \theta \\ Z &= Z \end{aligned}$$

Usando esta relación y la regla de la cadena de diferenciación, la ecuación:

$$\alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q(x, y, z)}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t}$$

Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{q(r, \theta, z)}{e c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad .1$$

o bien

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q(r, \theta, z)}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad .2$$

En ausencia de conducción de calor en la dirección axial,  $\partial T / \partial z = 0$  y  $\partial^2 T / \partial z^2 = 0$ . Si, en suma el flujo de calor es uniforme en la dirección radial, las componentes que contienen  $\theta$  desaparecerán y la ecuación 2 se reduce a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q(r)}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \dots 3$$

Finalmente, en ausencia de generación de calor, la ecuación 3 quedará:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

#### Apéndice No 4

##### Apisonador y Probeta de ensayo Norma.

El apisonador consiste de una varilla de acero en cuyo extremo inferior se fija una cabeza apisonadora de acero en endurecido con un diámetro de 50.65 mm.,  $\pm$  0.05 mm., para producir un ajuste deslizante con el diámetro interior del tubo de la probeta.

Sobre la varilla se monta un peso de 6.350 Kg  $\pm$  0.022 Kg., de tal manera que pueda deslizarse libremente por la varilla hacia arriba y hacia abajo por una distancia de 50.8 mm., entre los soportes de esta.

Uno de los pasos más importantes en el empleo del equipo para apisonar probetas, es el de atender a que el pisón este montado y fijado a una base apropiada. El descuido de este detalle es con frecuencia responsable de que los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre la probeta cilíndrica de norma AFS sean erráticos e incorrectos.

Para preparar la probeta de ensayo norma se pesa de 150 a 160 g., de la mezcla de arena en verde. Se coloca la arena cuidadosamente en el recipiente tubular que descansa sobre el pedestal del tubo, se coloca el tubo de la probeta con la arena en posición bajo el pisón. Se baja suavemente la cabeza del pisón dentro del recipiente tubular de la probeta hasta que lo sostenga la arena. Se levanta lentamente el peso del pisón, a mano o por excéntrico hasta la altura completa de 50.8 mm., y entonces se deja caer, repitiendo por dos ocasiones, haciendo un total de tres golpes. Un levantamiento rápido y descuidado del peso puede ocasionar

que este golpee contra el anillo de la varilla del pisón le vantando a éste último y por tanto causando la caída del pe so por más de 50.8 mm.

Nótese si la parte superior de la varilla corresponde con la línea central del marcador de tolerancia, si no queda en la línea central se descarta y se vuelve a preparar la probeta, colocando la cantidad de arena humedecida en el recipiente de la probeta que se calcule rendirá una columna de la altura requerida repitiendo la operación del apisonado.

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

1. R. D. Pehlke y M. J. Kirt  
Determination of material thermal properties  
using computer techniques.  
Cast Metals Research Journal  
Vol. 9 No 2 Junio 1973
  
2. M. C. Adams y H. F. Taylor  
Flow of heat from sand casting by Conduction,  
Radiation and Convection.  
A. F. S. Trans. 1957
  
3. Anselmo Llanos Rivera  
Tesis 1977  
Facultad de Química U. N. A. M.
  
4. Carlos Marotto Cabrera  
Tesis 1977  
Facultad de Química U. N. A. M.
  
5. Anastacio Jorge Juárez Cacique  
Tesis 1977  
Facultad de Química U. N. A. M.
  
6. Alejandro Cariño Colín  
Tesis 1980  
Facultad de Química U. N. A. M.

7. E. R. G. Eckert  
Analysis of heat and mass transfer.  
McGraw - Hill Kogakusha Ltd.
  
8. F. C. W. Olson y O. T. Schultz  
Temperatures in solids during heating or cooling.  
Tables for the numerical solution of the heating  
equation.  
Vol. 34 No 7
  
9. M. Seshadri y R. Ramachandran  
A transient heat flow method of determining  
thermal properties of mould material.  
A. Brit. Found. 1962
  
10. K. L. Narayana y G. Ramakrishnan  
Thermal properties of bentonite bonded  
homogeneous sand mixes.  
Brit. Found. 1976
  
11. X. Virolle, R. Chevriot y M. Jeancolas  
Experimental study of the thermal diffusivity  
of molding materials.  
Cast Metals Research Journal  
Vol. 3 No 1 Marzo 1967

12. Raúl Arellano Angeles

Tesis 1977.

Facultad de Química U. N. A. M.

13. B. B. Rao y D. C. Williams

Effects of variation in rammed sand density  
and various additives on thermal conductivity  
of green sand mixtures.

Modern Casting

Vol. 49 No 3 Marzo 1966