

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**INFLUENCIAS DE LA PREPARACION DEL SISTEMA DE
MOLDEO SOBRE LAS PROPIEDADES
TERMICAS DEL MISMO**

**TESIS que para obtener el Título de
INGENIERO QUIMICO METALURGICO**

P r e s e n t a

Anastacio Jorge Juárez Cacicque

1977



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.

.. Tesis 1977
EE M-225
ECHA
PROC
S



QUÍMICA

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE M. en C. Fernando Maldonado Mendoza

VOGAL Ing. Kurt H. Nadler Gundeisheimer

SECRETARIO M. en C. Maria Eugenia Noguez Amaya

1er. SUPLENTE Ing. Humberto Malagón Romero

2do. SUPLENTE M. en C. Alejandro Espria Manrique de Lara

Sitio donde se desarrolló el tema: Laboratorio de Metalurgia Fac.
de Química U.N.A.M.

Nombre completo y firma del sustentante: Anastacio Jorge Juárez

Cacique



Nombre completo y firma del asesor del tema: M. en C. Maria Eugenia Noguez Amaya

M. en C. Eugenia Noguez A

A MIS PADRES

GREGORIO JUAREZ

MA. FELIX CACIQUE DE JUAREZ

A MIS HERMANOS

MA. ESTHER

HUGO

MA. EUGENIA

ISABEL

FRANCISCO

A MIS MAESTROS

A LA MAESTRA MA. EUGENIA NOGUEZ AMAYA
POR SU VALIOSA COOPERACION Y AYUDA.

INDICE

1.- INTRODUCCION	pag. 1
2.- CLASIFICACION DE LOS METODOS PARA OBTENER DATOS DE PROPIEDADES TERMICAS DE ARENAS DE MOLDEO	pag. 3
3.- DESCRIPCION DE LOS METODOS PARA OBTENER DATOS DE -- PROPIEDADES TERMICAS DE ARENAS DE MOLDEO	pag. 6
4.- TRABAJO EXPERIMENTAL	pag. 31
5.- RESULTADOS	
a).- Experimentales	pag. 33
b).- Computacionales	pag. 41
6.- ANALISIS DE RESULTADOS	pag. 51
7.- CONCLUSIONES	pag. 67
8.- APENDICE	pag. 69
9.- BIBLIOGRAFIA	pag. 71

INTRODUCCION

Las propiedades mecánicas, el rendimiento en el servicio y la calidad de las fundiciones dependen fundamentalmente, de las condiciones bajo las cuales se enfriaron en el molde. Estas condiciones a su vez dependen de las propiedades térmicas de los materiales de moldeo, particularmente de la arena de moldeo.

En años recientes, los problemas térmicos asociados con la solidificación de fundiciones han recibido bastante atención experimental. Para simular exactamente la solidificación de fundiciones, se deben conocer las propiedades térmicas de los materiales de moldeo en función de la temperatura, particularmente las propiedades térmicas a las que nos referimos son: a) - Conductividad térmica "K", b) - Difusividad térmica " α " y c) - Calor específico " C_p ".

Si revisamos la literatura vemos que los calores específicos son razonablemente bien conocidos, sin embargo, si observamos los datos de difusividad térmica y conductividad térmica de arenas de moldeo, estos muestran amplias diferencias y esto se debe a que la difusividad térmica y la conductividad térmica de las arenas de moldeo son función de : a) - Tipo de arena, b) - Tamaño de grano de la arena, c) - Cantidad y tipo de aglutinante, d) - Contenido de agua, e) - Método de compactación, f) - Dureza, g) - Uniformidad de dureza y h) - Temperatura.

Como se dijo anteriormente, para simular exactamente la solidificación de fundiciones se deben conocer las propiedades térmicas de las arenas de moldeo en función de la temperatura. Resulta entonces primordial obtener datos de propiedades térmicas de arenas de moldeo en función de la temperatura (preparadas con materiales nacionales). Como hay diversos métodos para obtener datos de propiedades térmicas de arenas de moldeo, se describirán los métodos más usados y con más detalle el usado en la parte experimental del presente trabajo. Además, como las formulaciones usadas en las diferentes investigaciones fueron variadas, se hará un análisis y comparación de resultados en lo que sea posible, y así tratar de asignarle un tipo de comportamiento a la arena de acuerdo a su formulación.

CLASIFICACION DE LOS METODOS PARA OBTENER PROPIEDADES TERMICAS DE ARENAS DE MOLDEO.

Un rápido desarrollo ha tenido lugar recientemente en la medición de propiedades térmicas de arenas de moldeo, y los diferentes métodos adoptados pueden ser clasificados bajo el siguiente encabezado.

1 - Métodos de estado estacionario para medir conductividad térmica "K" y difusividad térmica " α ".

2 - Métodos de estado no-estacionario.

a) Usando una fuente lineal de calor para difusividad térmica " α " y conductividad térmica "K".

b) Envolviendo fusión y solidificación para difusividad térmica " α " y difusividad calorífica "b".

3 - Métodos de calculo para conductividad térmica "K", difusividad térmica " α " y difusividad calorífica "b".

PRE-TRABAJO.- Antes de empezar a describir los métodos más usados, daremos una relación de las diferentes investigaciones hechas sobre las propiedades térmicas de arenas de moldeo. La bibliografía ha sido confinada solo para los principales trabajos consultados, clasificados por el método empleado. En esta investigación se encontró que abundan trabajos sobre conductividad térmica "K" y difusividad térmica " α " para ciertas temperaturas. Pocos han medido la difusividad calorífica "b" y sus valores absolutos.

Trabajo hecho sobre conductividad térmica "K".

Atterton (9) midió "K" bajo condiciones estacionarias de una mezcla de arena silica con bentonita, él demostró que la conductividad térmica se debía a la vez, por el fenómeno de radiación intergranular así como de simple conducción. Whitmore e Ingerson (10), Hisatune y Shimizu (11) fueron capaces de confirmar este resultado. Richter, Lippman y Arnold (12), y Dworzak (13) midieron "K" en pruebas de choque térmico sobre un número de materiales. Ingersoll y Koepf (14) determinaron la conductividad térmica de materiales de moldeo por un método basado en el flujo de calor lineal. D'Eustachio y Shreiner (15) determinaron "K" usando una fuente lineal de calor. Hooper y Chang (16), y Devries (17) determinaron la conductividad térmica de tierras usando el método de la fuente lineal de calor. Finalmente Brocard (18), Lucks, Linebring y Johnson (19), y Dietert, Hasty y Doelman (20) obtuvieron algunos valores de "K".

Trabajo hecho sobre difusividad térmica " α ".

Ruddle y Mincher (21) dedujeron algunos valores absolutos de " α " de varios materiales (mezcla de arena silica ligada con bentonita y secada, carburo de silicio, magnesita y yeso), desde temperaturas fijas sobre varios materiales durante pruebas de choque térmico. Tanasawa (22) determinó la difusividad térmica de arenas de moldeo por el método de flujo de calor periódico, él impuso una onda de calor sinusoidal sobre la superficie de un espécimen cilíndrico.

-drico y midió la fase retrasada entre las ondas, en la superficie y a una distancia definida dentro del espécimen ó en su centro, - la difusividad térmica se calculo con estos datos. Seshadri y Ramachandran (4), Kanz (23), Neumann (24), Gruneisen (25), y Chwo-rinoff (26) han trabajado sobre la misma línea.

Treabajo hecho sobre difusividad cálorica "b".

Las investigaciones de Falecki (27), Intyre (28), Fleming, Mollard y Taylor (29), y el Instituto Britanico de Fundición (42) solo fueron de un caracter cualitativo. M.C. Adams y H.F. Taylor (2) ayudaron sobre medidas cuantitativas por deducción de "b" par_a metales fundidos. Parecidas fueron las investigaciones de Igarashi y Ohira (30,31) y el Instituto Britanico de Fundición (43). Pasch-kis (32,33,34 y 35) sobre lo mismo construyó un modelo eléctrico analogo. Un número de investigadores determinaron "b" midiendo el tiempo de enfriamiento de fundiciones con termopares. Rick (36), Pell y Walpole (37), Locke, Briggs y Ashbrook (38) clasificaron - varios materiales de moldeo por medio de valores relativos. Berge y Belin (39) se apegaron a aspectos prácticos del sistema de ali-mentación y flujo, y estudiaron el efecto de forma y dimensión - de las fundiciones. Berry, Kondic y Martin (40) dieron algunos re-sultados pertinentes de valores obtenidos de la práctica directa

DESCRIPCION DE LOS METODOS MAS USADOS PARA OBTENER DATOS DE PROPIEDADES TERMICAS DE ARENAS DE MOLDEO.

Se describirán cuatro métodos de estado no-estacionario. No se describe ningún método de estado estacionario, porque las condiciones estan sujetas a rápidos enfriamientos en el molde y los tiempos de enfriamiento no pueden ser estudiados usando las simplificaciones del flujo de calor bajo condiciones estacionarias.

METODO USADO POR M.C. ADAMS Y H.F. TAYLOR (2).

Este es un método de estado no-estacionario que envuelve fusión y solidificación para el calculo de la difusividad térmica " α " y la conductividad térmica " K ".

El método de fusión y solidificación usado por Adams y Taylor, consistió en medir el aumento de temperatura con respecto al tiempo, justo despues de la colada del metal sin sobrecalentamiento. La difusividad térmica se calculó con la ecuación:

$$\frac{X}{2\sqrt{t}} = \sqrt{\alpha} \cdot \text{Erf}^{-1} \left(\frac{T_s - T_i}{T_s - T_o} \right) \quad (1)$$

Donde: T_s = Temperatura en la interfase metal/molde.

T_i = Temperatura en la arena de molde a una distancia X desde la interfase metal/molde, a un tiempo t despues de la colada.

T_o = Temperatura inicial del molde

α = Difusividad térmica

Y de aquí se obtiene "K" con la ecuación:

$$K = \alpha \rho C_p \quad (2)$$

Donde: ρ = Densidad de la arena de moldeo

C_p = Calor específico de la arena de moldeo

Detalles experimentales.- Para preparar los moldes se usó una mezcla de arena silica A.F.S. 80 ligada con bentonita sódica y agua. En todos los experimentos la arena se avisonó con la mano y con las precauciones necesarias por el mismo operador. Se usó un termopar Cromel-Alumel ó Cromel-Fierro para medir la temperatura del molde a la distancia X.

Este autor determinó tiempos de solidificación para fundiciones de cobre, aluminio y estaño producidas usando los modelos mostrados en la figura 1. La curva de calentamiento del molde durante la solidificación se notó con un registrador de temperatura electrónico de punto simple.

Una curva típica de enfriamiento para el cobre se muestra en la figura 2, y las medidas de tiempos de solidificación se reportan en la tabla 1. A partir de estos datos se determinó " α " y posteriormente "K", los resultados de "K" se reportan en la tabla 2.

Tabla 1- -Tiempos requeridos para solidificación completa

Tabla 1

arena	metal	modelo	peso en kgs.	tiempos de enfriamiento hrs.
verde	cobre	1	3.04	0.060
verde	cobre	1	3.37	0.086
verde	cobre	2	7.18	0.114
verde	cobre	2	7.42	0.129
verde	cobre	2	7.05	0.110
verde	cobre	3	13.70	0.167
verde	cobre	3	12.05	0.146
verde	cobre	7	7.44	0.106
verde	aluminio	2	2.27	0.229
verde	aluminio	2	2.27	0.215
verde	aluminio	2	2.33	0.200
verde	aluminio	7	2.21	0.200
verde	estaño	2	6.56	0.322
verde	estaño	2	6.65	0.297
verde	estaño	2	6.53	0.288
verde	estaño	7	6.13	0.258
verde	estaño	7	6.22	0.252
seca	cobre	1	0.31	0.023
seca	cobre	1	0.29	0.0215

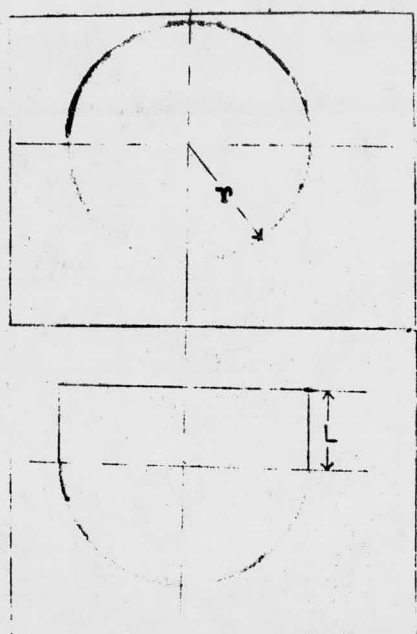
seca	cobre	5	0.77	0.030
seca	cobre	5	0.79	0.0322
seca	cobre	5	0.92	0.0342
seca	cobre	5	0.91	0.0369
seca	cobre	6	1.45	0.0945
seca	cobre	6	4.12	0.0805
seca	cobre	6	4.18	0.0860
seca	cobre	8	16.23	0.150
seca	cobre	8	16.62	0.1675

Tabla 2 - Valores de "K" determinados por este método

metal	arena	"K" en cal/cm.seg. ^{°C}
cobre	seca	1.386×10^{-3}
cobre	verde	1.596×10^{-3}
aluminio	verde	1.400×10^{-3}
estaño	verde	4.460×10^{-3}

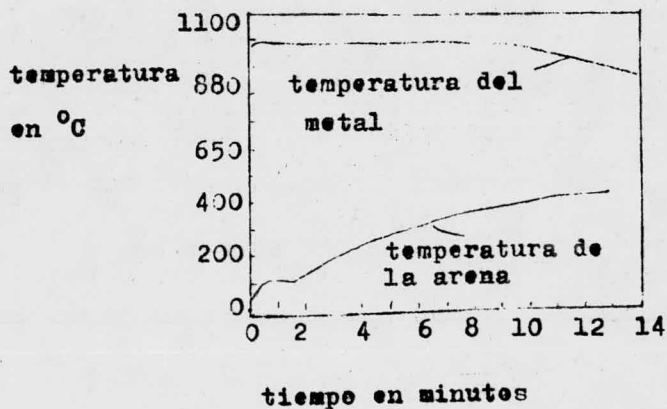
Nota.- La densidad de la arena de moldeo seca fué 1.44 grs./cm^3
y el calor específico de la misma arena en el rango de 20°
C a 650°C fué $0.27 \text{ cal/grs.}^{\circ}\text{C}$

Figura 1.- Modelos de las fundiciones producidas.



Modelo	r	L
1	1.75"	1.55"
2	2.25"	2.00"
3	2.81"	2.50"
4	1.00"	0.0
5	1.47"	0.0
6	2.49"	0.0
7	2.97"	0.0
8	3.97"	0.0

Figura 2.- Curvas temperatura vs. tiempo del metal y la arena durante la solidificación de una fundición de cobre en una arena verde.



MÉTODO USADO POR X. VIROLLE, R. CHEVRIOT Y M. JEANCOLAS (3)

Este también es un método de estado no-estacionario que envuelve fusión y solidificación para el cálculo de la difusividad calórica "b" y la difusividad térmica "α".

Los valores de "b" se determinaron a partir de medidas de tiempos de solidificación t_s sobre la línea solidus y con la ecuación de Halbart (44).

$$b = w \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{\rho_1 (C_{p1} \Delta T + L)}{(T_1 - T_0)} \cdot \frac{V}{S} \cdot \frac{1}{\sqrt{t_s}} \quad (3)$$

Con los siguientes valores de w:

Para una placa con una dimensión finita $w = 1$

Para una cilindro con $L =$ finita:

$$w = w_c = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{\pi}{4} \times \frac{\rho_1 (C_{p1} \Delta T + L)}{(T_1 - T_0) \rho C_p}}} \quad (4)$$

Para una esfera:

$$w = w_s = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{\pi}{3} \times \frac{\rho_1 (C_{p1} \Delta T + L)}{(T_1 - T_0) \rho C_p}}}$$

Donde: ρ_1 , C_p y L son propiedades de la aleación.

ΔT = sobrecalentamiento

T_1 = temperatura de la interfase metal/molde

T_0 = temperatura inicial del molde

t_s = tiempo de solidificación

Y después " α " y " K " se pueden calcular con las siguientes ecuaciones:

$$b = \sqrt{K C_p \rho} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p} \quad (2)$$

El tiempo de solidificación t_s empleado para calcular la difusividad calorífica " b " de los materiales probados se midió por un método comparativo. [Primero se llenaron las dos cavidades del molde usando la misma aleación, la misma forma de medir, el mismo cero sobre la escala, el mismo material de moldeo y la misma temperatura del metal. Se fundieron parejas de esferas una y otra vez, hasta que con la práctica estuvieron dentro del 4% de uno con respecto al otro. Los moldes se apisonaron fuertemente con arena sílica ligada con bentonita la cual se usó como arena de referencia. De esta forma, la difusividad calorífica " b " de una arena fácilmente moldeable se comparó con la difusividad calorífica b_0 de la arena de referencia y la difusividad relativa se expresa por el cociente b/b_0 .

Detalles experimentales.- Las figuras 3, 4 y 5 muestran los arreglos de moldeo y solidificación para esferas y cilindros y en la

figura 6 se muestra el arreglo de los termopares para la medición de temperaturas. Las temperaturas para cada prueba fueron medidas en un potenciómetro multipanel.

La arena empleada como arena de referencia fué una arena artificial apisonada fuertemente y secada a 250°C, y su formulación fué la siguiente:

Arena silica A.F.S. 70	100
Bentonita refractaria sezanne	15
Contenido de humedad	4.5

Los resultados obtenidos en esta investigación se reportan en la tabla 3, la tabla 4 indica el efecto del apisonamiento sobre el coeficiente b_0 de la arena de referencia y otra arena artificial.

Tabla 3 - Difusividad calorica "b" de varios materiales, en $\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{seg.}^{1/2}$.

Material	densidad	b para alea. de Cu de Al
arena silica ligada con bentonita (70) fuertemente apisonada y secada	1.72	0.027 -0.031
arena silica ligada con bentonita (70) normalmente apisonada y secada	1.54	0.025 -0.029
arena silica ligada con bentonita (70) normalmente apisonada y secada	1.54	0.027 -0.031

-tonita (70) normalmente api		
-sonada en verde		
arena silica ligada con ben-	1.47	0.025 -0.029
-tonita (70) levemente apiso		
-nada y secada		
arena silica ligada con ben-	1.63	0.027 0.031
-tonita (100) fuertemente ap		
-sonada y secada		
arena silica ligada con ben-	1.48	0.025 0.029
-tonita (100) normalmente a-		
-pisonada y secada		
arena silica ligada con ben-	1.48	0.027 0.031
-tonita (100) normalmente a-		
-pisonada en verde		
arena silica ligada con ben-	1.82	0.030 0.034
-tonita (40) fuertemente api		
-sonada y secada		
arena alto silicio con 1% de	1.50	0.026 0.030
aceite y 1% de dextrina (140)		
arena alto silicio con 1% de	1.60	0.029 0.033
de aceite y 1% de dextrina (70)		
arena alto silicio con 3% de	1.67	0.028 0.032
silicato de sodio (70)		
arena alto silicio con cemen	1.59	0.028 0.032

-to (70)

arena silica ligada con ben- 1.89 0.031 0.035

-tonita con 10% de oxido de

hierro (70)

arena silica ligada con ben- 1.72 0.034 0.039

-tonita con 10% de grafito

(70)

Nota - El número en el parentesis indica el tamaño de grano A.F.S.

Tabla A - Efecto del episonamiento sobre dos arenas silicas ligada con bentonita y secadas.

Material	episonamiento	densidad	b/b _o
arena de referencia (15% de bentonita, A.F.S. 70)	fuerte	1.72	1
misma arena	normal	1.54	0.93
misma arena	leve	1.25-1.35	0.92
arena natural (18% de bentonita, A.F.S. 40)	fuerte	1.63	0.99
misma arena	normal	1.48	0.92

Figura 3 - Cilindros de prueba

a = Alimentador

A = Aleación

M = Chill ó material exotérmico

C = Termopar

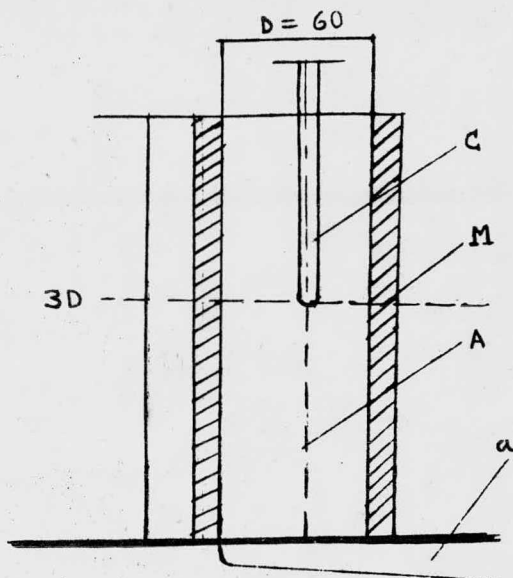


Figura 4 - Arreglo del molde para esferas.

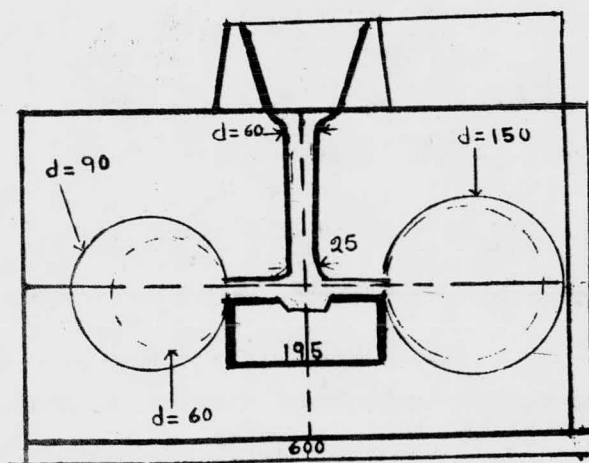


Figura 5 - Arreglo para la solidificación de 5 cilindros en el mismo molde

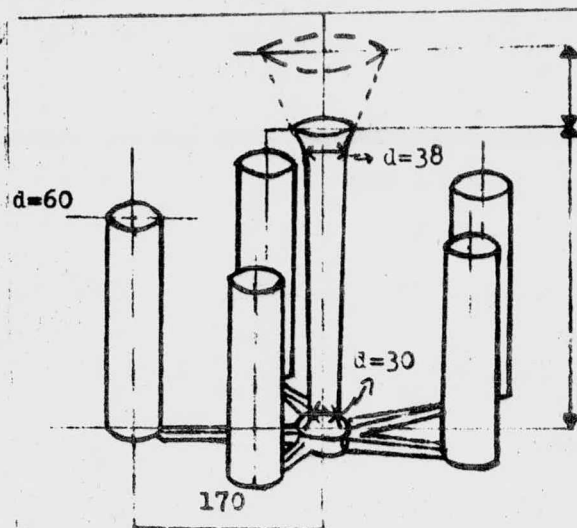


Figura 6 - Arreglo para la medición de temperaturas con termopares Pt-Pt/Rh

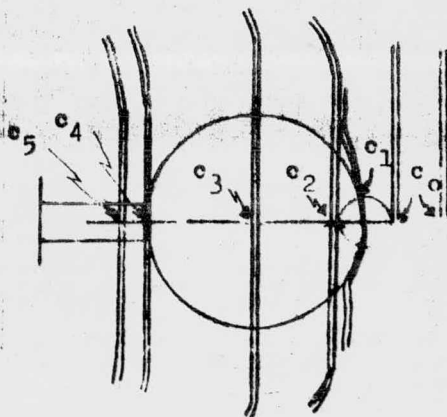
c_0 = alambre desnudo de 0.5 mm. de diámetro, aislado en la punta con alumina recristalizada.

c_1 = termopar en la interfase, junta aislada con alumina fundida

c_2 = termopar de alambre de 5 mm. de diámetro, junta simple desnuda

c_3 = termopar central de alambre de 0.5 mm. de diámetro, junta simple desnuda.

c_4 y c_5 = termopares en la alimentación, idénticos a c_2



METODO USADO POR M.R. SESHADRI Y A. RAMACHANDRAN (A)

El método usado por estos autores que cooperan con el instituto de ciencias de la India, es un método de estado no-estacionario y que usa una fuente lineal de calor.

La fuente lineal de calor consiste de un tubo largo de acero inoxidable (longitud/diámetro > 100) llamada "probeta de conductividad térmica" con un termopar insertado en el centro. La conductividad térmica de materiales de moldeo no-metálicos, se determinó notando el aumento de temperatura de la fuente lineal de calor insertada en el material de moldeo con respecto al tiempo. La conductividad térmica se calculó con la ecuación:

$$K = \frac{q'}{4\pi} \times \frac{\ln t_2/t_1}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

Donde: T_1 y T_2 son las temperaturas de la fuente a los tiempos t_1 y t_2 y q' es el calor proporcionado a la probeta por unidad de longitud.

Detalles experimentales.- La probeta de conductividad térmica que representa la fuente lineal de calor empleada en esta investigación, consistió de un tubo de acero inoxidable de 0.18 cm. de diámetro X 20.32 cm. de largo, con un termopar Ni-Ni/Gr en el centro del tubo. La probeta se calentó eléctricamente y el termopar se conectó a un registrador electrónico de punto simple. Para elevar

la temperatura de los especímenes en prueba y así habilitar la de -terminación de conductividad térmica a más altas temperaturas, - se usó un horno de tubo de silicio de 2 Kw. Los datos obtenidos - por estos autores se dan en la tabla 5.

Tabla 5

Material	T en °C	"α" en cm ² /seg.	"K" en cal/cm. seg°C
arena sintética se-	57 ^A	0.0021	0.0008
-ca (= 1.46 grs./c ³)	650	0.0024	0.00085
arena gasificada con	57 ^A	0.0031	0.0012
CO ₂ (= 1.54 grs./c ³)	650	0.0032	0.0012
Magnesita (ligada) se-	57 ^A	0.0025	0.0010
-ca(= 1.60 grs./c ³)	650	0.0024	0.0010
Magnesita gasificada	57 ^A	0.0023	0.0012
con CO ₂ (= 1.65 grs./ c ³)	650	0.00275	0.0012

METODO USADO POR R.D. PEHLKE Y M.J. KIRT (5)

Este método se expone más detalladamente porque fué el usado en la parte experimental del presente trabajo. El desarrollo del programa de computación usado en este método se trata con más detalle en la referencia (8).

TRATAMIENTO TEORICO.

Si los calores específicos de arenas de moldeo se conocen razonablemente bien en función de la temperatura, y si también se conocen las difusividades térmicas en función de la temperatura. Entonces se pueden calcular las conductividades térmicas de las arenas de moldeo en función de la temperatura.

Para el calculo de la difusividad térmica de una arena de moldeo, se necesita del conocimiento simultaneo del modo de variación de la temperatura con respecto a tiempo y espacio. Experimentalmente se puede determinar y funcionalmente aproximar la variación de la temperatura con respecto al espacio a un solo nivel de tiempo, y también se puede determinar la distribución de temperaturas en el espacio a un número de tiempos discretos. Esto provee la suficiente información para aproximar la relación necesitada tiempo-temperatura.

Es un objetivo del método la determinación de difusividad térmica de arenas de moldeo en función de la temperatura para un sistema en coordenadas cilindricas, donde la distribución de tem-

-peraturas en el espacio es aproximada por una serie de sumas de potencias.

CALCULO DE LA DIFUSIVIDAD TERMICA

Si aplicamos el principio de conservación de la energía térmica a un elemento diferencial descrito en coordenadas cilíndricas se tiene:

$$\rho C_p r \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left(K r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

Donde: r = radio

ρ = densidad

C_p = calor específico

K = conductividad térmica

T = temperature

t = tiempo

Si consideramos una posición radial conocida a cualquier tiempo especificado.

$$\rho = \rho(T_i), C_p = C_p(T_i) \text{ y } K = K(T_i)$$

Y si son aproximadamente constantes en la región de T_i , la ecuación (8) se puede escribir:

$$\frac{1}{\alpha(T_i)} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t_i, r} = \frac{1}{r} - \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \Big|_{t_i, r} \quad (9)$$

Donde: $\alpha = \frac{K}{\rho \cdot C_p}$

$$\alpha(t_i) = \frac{\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t_i, r_i}}{\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \Big|_{t_i, r_i}} \quad (10)$$

La información necesaria para resolver esta ecuación se puede obtener de la siguiente manera: se pone un cilindro largo dentro de un horno de tubo calentado por resistencias y medimos la temperatura a un número de puntos cuyas posiciones radiales son conocidas. De aquí se obtiene $T(r_1)$, $T(r_2)$, ..., $T(r_n)$ a un tiempo t_i y se les puede ajustar usando una técnica de mínimos cuadrados, se hace lo mismo un corto tiempo después a $t_i + \Delta t$. Y ahora una función aproximada a la verdadera se conoce simultáneamente a t_i y a $t_i + \Delta t$.

Si se conoce una relación funcional aproximada entre radio y temperatura se puede calcular.

$$t_i, \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \Big|_{t_i, r_i}$$

Si suponemos que la variación de temperaturas con respecto al tiempo es lineal durante el corto periodo de tiempo necesitado para medir la temperatura en las posiciones radiales conocidas,

$\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t_i, r_i}$, se puede expresar así:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t_i, r_i} = \frac{T(r_i)^{t_i + \Delta t} - T(r_i)^{t_i}}{\Delta t} \quad (11)$$

Esto se muestra gráficamente en la fig. 7 donde $\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r}$

$$\left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Big|_{t_i, r_i} \text{ es calculado en el punto (a) y } \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{t_i, r_i} = \frac{T_b - T_a}{\Delta t}$$

, así conocemos todo lo necesario para calcular $\alpha(T_i)$.

APROXIMACION A LA VERDADERA DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS.

La realidad física requiere que la función usada para aproximar la verdadera distribución de temperaturas sea simétrica a $r = 0$, y tenga una pendiente = 0 a $r = 0$. Se sugirió una serie de sumas de potencias:

$$T(r) = A + B_1 r^2 + B_2 r^4 + \dots + B_n r^{2n} \quad (12)$$

El mejor ajuste de la ecuación (12) a los datos experimentales, se define como aquel que minimiza los promedios δ_i^2 mostrado en la figura 7 donde δ_i es la diferencial entre la temperatura experimentalmente medida a cualquier posición radial conocida, y la temperatura predicha por la ecuación (12) a el mismo radio. Las ecuaciones simultaneas que producen los coeficientes ($A, B_1, B_2, \dots, B_n$) de este mejor ajuste son:

$$\begin{bmatrix}
 m & \sum_{j=1}^m r_j^2 & \dots & \sum_{j=1}^m r_j^{2n} \\
 \sum_{j=1}^m r_j^2 & \sum_{j=1}^m r_j^4 & & \sum_{j=1}^m r_j^{2(n+1)} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \sum_{j=1}^m r_j^{2n} & \sum_{j=1}^m r_j^{2(n+1)} & & \sum_{j=1}^m r_j^{2(n+n)}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 A \\
 B_1 \\
 \vdots \\
 B_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \sum_{j=1}^m T_j \\
 \sum_{j=1}^m T_j r_j^2 \\
 \vdots \\
 \sum_{j=1}^m T_j r_j^{2n}
 \end{bmatrix}
 \quad (13)$$

Donde m es el número de posiciones radiales y $2n$ es el orden de ajuste usado. Las posiciones radiales $(r_1, r_2 \dots r_n)$ son conocidas. Se pueden medir las temperaturas a un tiempo t_i y a las posiciones radiales conocidas $(T_1^{t_i}, T_2^{t_i}, \dots, T_m^{t_i})$. Usando estos valores en la ecuación (13) esta provee los coeficientes $(A^{t_i}, B_1^{t_i}, \dots, B_n^{t_i})$ del mejor ajuste de series de sumas de potencias, la aproximación a la verdadera distribución de temperaturas a t_i es:

$$T(r)^{t_i} = A^{t_i} + B_1^{t_i} r^2 + B_2^{t_i} r^4 + \dots + B_n^{t_i} r^{2n} \quad (14)$$

Si se conocen las temperaturas: $(T_1^{t_i+\Delta t}, T_2^{t_i+\Delta t}, \dots, T_m^{t_i+\Delta t})$ se provee la suficiente información para determinar:

$$T(r)^{t_i+\Delta t} = A^{t_i+\Delta t} + B_1^{t_i+\Delta t} r^2 + B_2^{t_i+\Delta t} r^4 + \dots + B_n^{t_i+\Delta t} r^{2n} \quad (15)$$

Las ecuaciones 14 y 15 reducen la ecuación 10 a:

$$\alpha(T_i) = \frac{(A^{t_i+\Delta t} - A^{t_i}) + (B_1^{t_i+\Delta t} - B_1^{t_i})r_i^2 + \dots + (B_n^{t_i+\Delta t} - B_n^{t_i})r_i^{2n}}{\Delta t (A^{t_i} + 16B_1^{t_i}r_i^2 + \dots + (2n)^2 B_n^{t_i}r_i^{2(n-1)})} \quad (16)$$

Y una vez que la función aproximada a la verdadera distribución de temperaturas a t_i se conoce, la r_i correspondiente a t_i se conoce, y la mejor ordenación de coeficientes a t_i y a $t_i + \Delta t$ se conocen también. Entonces $\alpha(T_i)$ se puede calcular usando la ecuación (16).

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Se pusieron termopares Cromel-Alumel a una profundidad de 178 mm. en la arena como se muestra esquemáticamente en la figura 8. La longitud total del tubo fué de 356 mm. . El tubo con los termopares insertados se puso dentro de un horno de tubo vertical calentado por resistencias. La fem registrada por los termopares se midió ciclicamente, ya que la temperatura se incrementa continuamente de 27 a 816°C.

Las medidas ciclicas se completaron por medio de un disco Geneva electromecánico con switch de paso entre los termopares y la carta (que nos registra los datos de fem del termopar). La unidad de interrupción dedica un segundo para cada conexión interna (0.85 de segundo en positivo y 0.15 de encendido). La unidad de switch acepta un total de 16 conexiones, cada ciclo de la unidad de switch midió la corriente de un arreglo de 3 termopares dos veces. La figura 9 muestra un típico arreglo de termopares, los termopares 7 y 8 se colocaron a una distancia radial equivalente y comparando sus fems. a una profundidad de 178 mm.. se demostró que el calor transferido a través del cilindro fué esencialmente

unidireccional, como el modelo matematico así lo estima.

REDUCCION DE DATOS.

Para la reducción de datos se escribió un programe de computación cuyo camino critico se da a continuación.

a.- Leer las posiciones radiales de los termopares.

b.- Leer los fems. correspondientes a las posiciones leídas en a, empezando a un tiempo t_i y otra vez 16 segundos más tarde a un tiempo $t_i + \Delta t$. Usando la notación previamente definida, estos fems. son:

$$\text{fem } r_1^{t_i}, \text{ fem } r_2^{t_i+1\text{seg.}}, \dots, \text{ fem } r_6^{t_i+5\text{segdos.}}$$

y

$$\text{fem } r_1^{t_i+\Delta t}, \text{ fem } r_2^{t_i+\Delta t+1\text{seg.}}, \dots, \text{ fem } r_6^{t_i+\Delta t+5\text{segdos.}}$$

c.- Asumiendo que la variación de temperaturas con respecto al tiempo es lineal sobre el corto intervalo de tiempo (16 segdos.) requerido para medir el contacto del arreglo de termopares, los fems. son convertidos a un solo nivel de tiempo.

$$\text{fem } r_j^{t_i} = \text{fem } r_j^{t_i+j-1} - \frac{j-1}{16} (\text{fem } r_j^{t_i+\Delta t+j-1} - \text{fem } r_j^{t_i+j-1})$$

y

$$\text{fem } r_j^{t_i+\Delta t} = \text{fem } r_j^{t_i+\Delta t+j-1} - \frac{j-1}{16} (\text{fem } r_j^{t_i+\Delta t+j-1} - \text{fem } r_j^{t_i+j-1})$$

d.- Convertir los fems. a temperaturas.

e.- Usar las ecuaciones simultaneas (13) para encontrar el mejor ajuste para los coeficientes, a la vez a t_i y a $t_i + \Delta t$.

f.- Usando la ecuación 16 calcular $\alpha(T_i)$ para todos los t_i

en el rango $T(r=0)^{t_1} < T_i < T(r=R)^{t_1}$

a.- Ir a b.

Figura 7 - Distribución de temperaturas a t_1 y a $t_1 + \Delta t$.

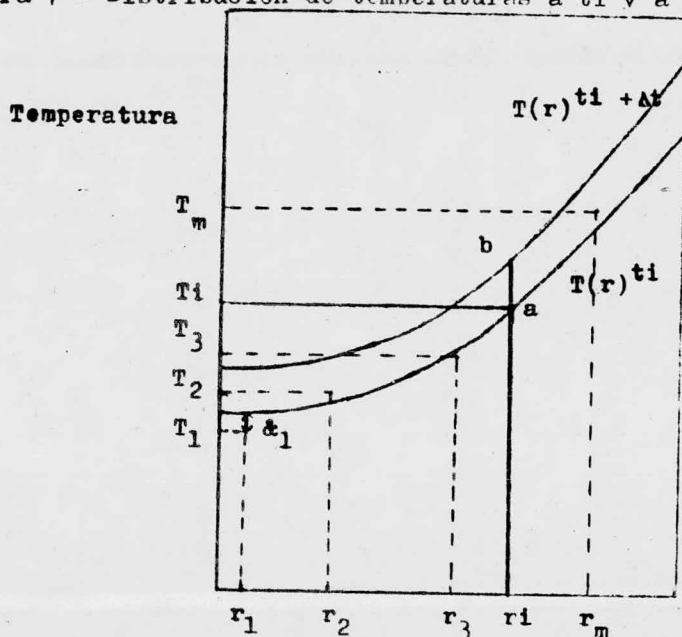


Figura 8 - Diagrama esquemático, que muestra el arreglo de termopares en el cilindro de arena

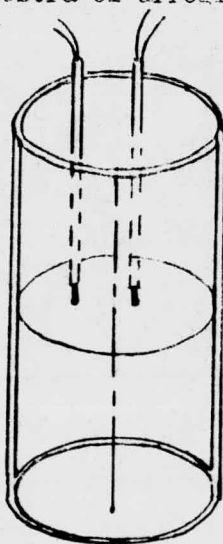
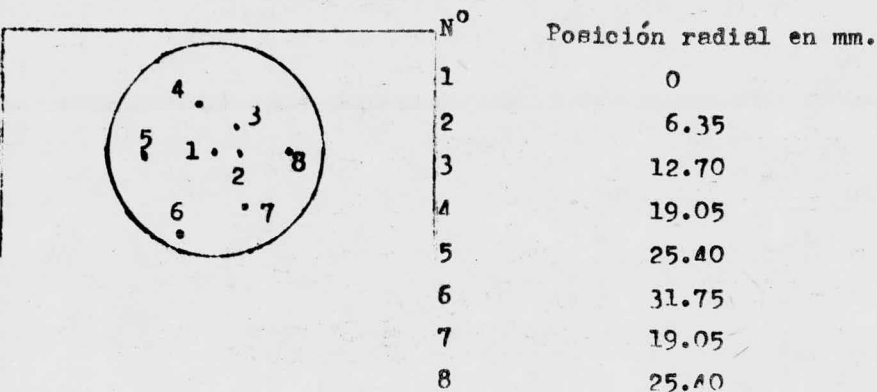


Figura 9 - Tipico arreglo de los termopares.



RESULTADOS

La figura 10 muestra la difusividad térmica promedio de arenas de moldeo en función de la temperatura de tres corridas diferentes, la desviación standart estimada de la representación funcional fué $0.00056 \text{ cm}^2/\text{seg.}$. El calor específico de la arena de moldeo se muestra como una función de la temperatura en la figura 11. Usando las representaciones funcionales de difusividad térmica y calor específico, y suponiendo que la densidad de la arena es independiente de la temperatura en este rango de temperaturas. La conductividad térmica de esta arena de moldeo particular en función de la temperatura se puede calcular usando:

$$K(T_1) = \rho C_p(T_1) \alpha(T_1)$$

La conductividad térmica de la arena, calculada en función de la temperatura se muestra en la figura 12.

Figura 10 .- Curva difusividad térmica VS temperatura.

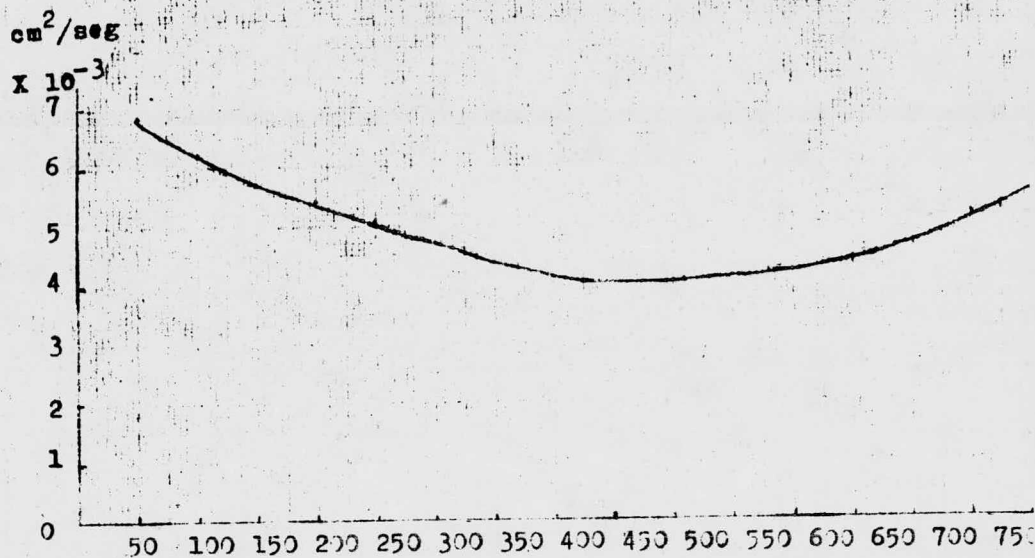


Figura 11 .- Curva temperatura VS calor específico "Cp"

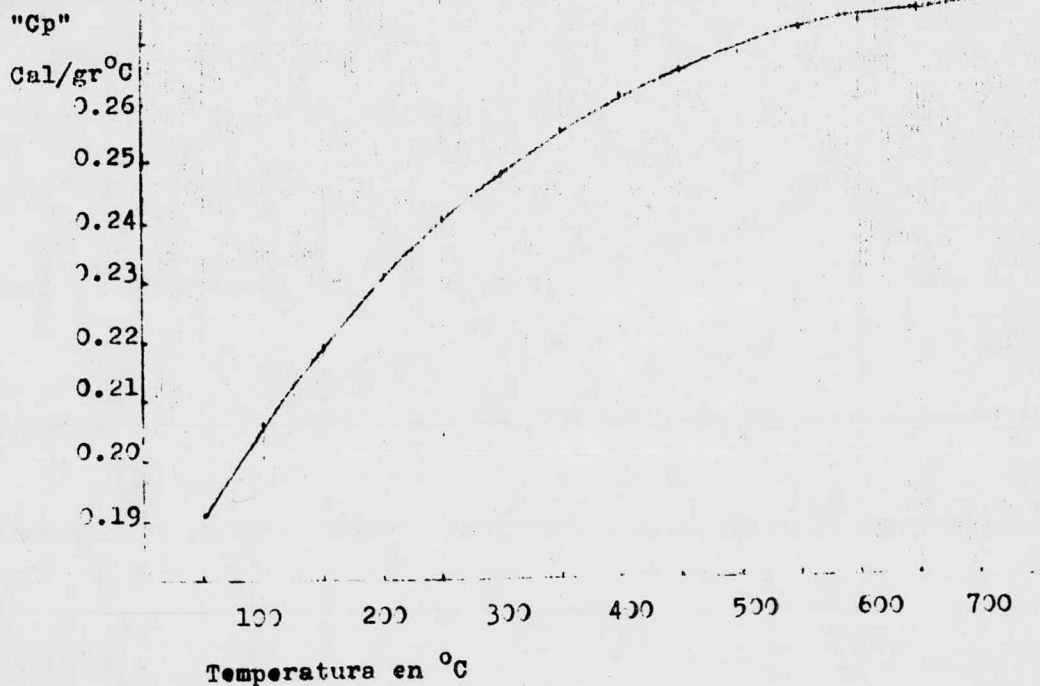
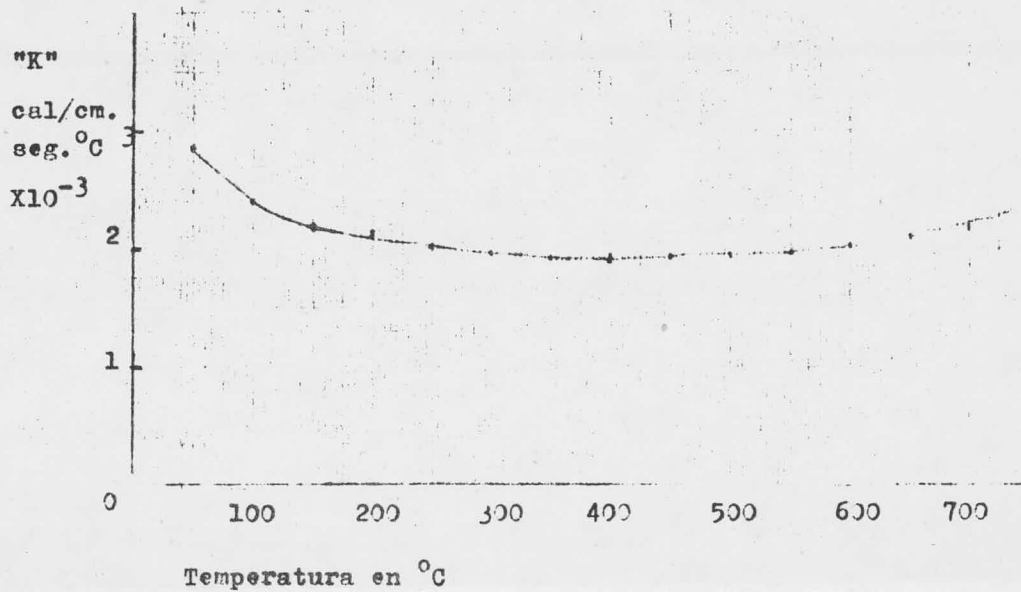


Figura 12 .- Curva temperatura VS "K"



TRABAJO EXPERIMENTAL

El método empleado para las determinaciones experimentales de propiedades térmicas de arenas de moldeo nacionales se basa en el método empleado por Pehlke. Las modificaciones hechas aquí del experimento de Pehlke fueron basicemente 2: a).- solo se usaron 4 termopares y b).- el equipo experimental fué distinto y se describe a continuación.

EQUIPO EXPERIMENTAL.

Para las tres primeras determinaciones se empleó un horno de mufla calentado por resistencias "Linderberh" con control de temperatura de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, un registrador de temperaturas "Philips" para doce canales con velocidad de registro de cada termopar de 5 segundos y termopares Cromel-Alumel de 1/8" (con cubierta de acero de Eléctronica Industrial Monclova). Para las dos ultimas determinaciones se empleó basicamente lo mismo y lo unico que se varió fué el horno, el horno empleado para estas dos ultimas determinaciones fué un horno cilindrico calentado por resistencias hecho en el mismo laboratorio (ver apendice).

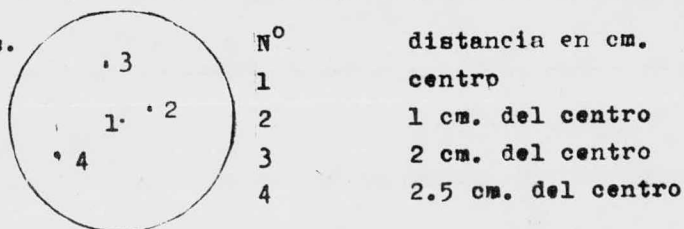
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La arena empleada fué una mezcla de arena silica A.F.S. 80-90 ligada con bentonita y diferentes niveles de humedad para las tres primeras determinaciones, y para las dos ultimas determinaciones el ligante fué una bentonita calcica. Después de haber mez-

-clado manualmente la arena durante un tiempo de modo que la mezcla sea homogénea, esta se apisonó manualmente dentro de un tubo de acero inoxidable de 8 cm. de diámetro X 30 cm. de largo, cuidando que la densidad del compactado sea aproximadamente la misma para todas las determinaciones. A continuación se mete el tubo en el horno tapando posteriormente el horno con una cubierta especial refractaria, esta cubierta tiene agujeros por donde salen los termopares para ser conectados al registrador. Solo se utilizaron 4 termopares colocados en el centro del tubo, a 1 cm. del centro, a 2 cm. del centro y a 2.5 cm. del centro de acuerdo a la disposición mostrada en la fig. 13. Los termopares se colocaron a una profundidad de 15 cm. ó sea la mitad del tubo donde se comprobó que el flujo de calor es esencialmente unidireccional.

Siguiendo el método de Pehlke, se calienta el horno hasta un nivel de temperatura donde se miden las temperaturas en cada posición y se vuelven a medir un minuto después. Los niveles de temperatura fueron de 600°C a 850°C cada 50°C para las tres primeras formulaciones y de 50°C a 700°C cada 50°C para las dos últimas determinaciones.

Figura 13



Las formulaciones fueron las siguientes:

N ^o 1	Arena silica 80-90,	5%	bentonita sódica y 4%	de humedad
N ^o 2	" " " "	"	" 6%	" "
N ^o 3	" " " "	"	" 8%	" "
N ^o 4	" " " 3%	"	calcica y 5%	de humedad
N ^o 5	" " " 5%	"	" " " "	" "

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados de temperaturas anotadas por el registrador para cada posición radial, a cada nivel de temperatura y para cada formulación se dan a continuación:

Formulación N^o1

Nivel de T	posición radial	temperatura a t_i	a $t_i + \Delta t$
600°C	centro	505.0°C	505.5°C
"	a 1 cm. del centro	525.0	526.0
"	" 2 " " "	537.0	538.0
"	" 2.5 " " "	555.0	556.0
650°C	centro	552.0	553.0
"	a 1 cm. del centro	565.0	566.0
"	" 2 " " "	578.0	579.5
"	" 2.5 " " "	595.0	597.0
700°C	centro	615.0	616.0
"	a 1 cm. del centro	630.0	631.5
"	" 2 " " "	640.0	641.5

700°C	a 2.5 cm. del centro	649.0	651.0
750°C	centro	660.0	661.0
"	a 1 cm. del centro	673.0	675.0
"	" 2 " " "	690.0	692.0
"	" 2.5 " " "	705.0	707.0
800°C	centro	718.0	719.5
"	a 1 cm. del centro	730.0	732.0
"	" 2 " " "	745.0	747.0
"	" 2.5 " " "	768.0	770.5
850°C	centro	780.0	782.0
"	a 1 cm. del centro	803.0	805.0
"	" 2 " " "	820.0	822.5
"	" 2.5 " " "	840.0	842.5

Formulación N°2

Nivel de T	posición radial	temperatura a ti	a ti + Δt
600°C	centro	510.0	510.5
"	a 1 cm. del centro	529.0	530.0
"	" 2 " " "	542.0	543.5
"	" 2.5 " " "	560.0	562.0
650°C	centro	558.0	559.0
"	a 1 cm. del centro	570.0	571.5
"	" 2 " " "	581.0	582.5
"	" 2.5 " " "	598.0	599.5
700°C	centro	610.0	611.5
"	a 1 cm. del centro	628.0	629.0
"	" 2 " " "	643.0	644.5
"	" 2.5 " " "	655.0	657.0

750°C	centro	665.0	666.5
"	a 1 cm. del centro	679.0	680.5
"	" 2 " " "	692.0	694.0
"	" 2.5 " " "	715.0	717.0
800°C	centro	710.0	712.0
"	a 1 cm. del centro	729.0	731.0
"	" 2 " " "	750.0	752.5
"	" 2.5 " " "	760.0	762.5
850°C	centro	770.0	771.5
"	a 1 cm. del centro	800.0	802.0
"	" 2 " " "	822.0	824.5
"	" 2.5 " " "	842.0	844.5

Formulación N^o3

Nivel de T	posición radial	temperatura a ti	a ti + Δt
600°C	centro	512.0	513.5
"	a 1 cm. del centro	532.0	533.5
"	" 2 " " "	540.0	542.0
"	" 2.5 " " "	555.0	557.0
650°C	centro	560.0	561.5
"	a 1 cm. del centro	572.5	574.0
"	" 2 " " "	583.0	584.5
"	" 2.5 " " "	599.0	601.0
700°C	centro	618.0	619.5
"	a 1 cm. del centro	632.0	634.0
"	" 2 " " "	645.0	647.5
"	" 2.5 " " "	656.0	658.0
750°C	centro	668.0	619.5

750°C	a 1 cm. del centro	679.0	681.0
"	" 2 " " "	695.0	697.0
"	" 2.5 " " "	718.0	720.5
800°C	centro	715.0	717.0
"	a 1 cm. del centro	730.0	732.5
"	" 2 " " "	752.0	754.0
"	" 2.5 " " "	765.0	767.5
850°C	centro	780.0	782.0
"	a 1 cm. del centro	808.0	810.5
"	" 2 " " "	829.0	831.5
"	" 2.5 " " "	845.0	847.5

Formulación N²)

Nivel de T	posición radial	temperatura a ti	a ti + Δt
50°C	centro	35.0°C	35.5°C
"	a 1 cm. del centro	40.0	41.0
"	" 2 " " "	43.0	44.0
"	" 2.5 " " "	46.0	47.5
100	centro	53.0	54.0
"	a 1 cm. del centro	58.0	59.5
"	" 2 " " "	63.5	65.0
"	" 2.5 " " "	67.0	69.0
150	centro	73.0	74.0
"	a 1 cm. del centro	78.0	79.5
"	" 2 " " "	83.0	85.0
"	" 2.5 " " "	88.0	90.0
200	centro	100.0	101.5

200	a 1 cm. del centro	110.0	111.5
"	" 2 " " "	118.0	119.5
"	" 2.5 " " "	125.0	127.0
250°C	centro	129.0	130.5
"	a 1 cm. del centro	140.0	141.5
"	" 2 " " "	149.0	151.0
"	" 2.5 " " "	159.0	161.0
300°C	centro	163.0	164.0
"	a 1 cm. del centro	177.0	179.0
"	" 2 " " "	185.0	187.0
"	" 2.5 " " "	199.0	201.0
350°C	centro	205.0	207.0
"	a 1 cm. del centro	215.0	216.5
"	" 2 " " "	230.0	232.0
"	" 2.5 " " "	245.0	247.0
400°C	centro	255.0	256.5
"	a 1 cm. del centro	270.0	272.0
"	" 2 " " "	297.0	299.0
"	" 2.5 " " "	315.0	317.0
450°C	centro	332.0	333.5
"	a 1 cm. del centro	352.0	354.0
"	" 2 " " "	370.0	372.0
"	" 2.5 " " "	391.0	393.5
500°C	centro	390.0	391.5
"	a 1 cm. del centro	405.0	407.0
"	" 2 " " "	418.0	420.0
"	" 2.5 " " "	427.0	429.0
550°C	centro	428.0	429.0

550°C	a 1 cm. del centro	449.0	451.0
"	" 2 " " "	467.0	469.0
"	" 2.5 " " "	488.0	490.0
600°C	centro	480.0	482.0
"	a 1 cm. del centro	493.0	495.0
"	" 2 " " "	510.0	512.0
"	" 2.5 " " "	525.0	527.5
650°C	centro	510.0	512.0
"	a 1 cm. del centro	513.0	515.0
"	" 2 " " "	562.0	564.5
"	" 2.5 " " "	583.0	585.0
700°C	centro	562.0	564.0
"	a 1 cm. del centro	595.0	597.0
"	" 2 " " "	620.0	623.0
"	" 2.5 " " "	635.0	638.0

Formulación N°5

Nivel de T	posición radial	temperatura a t_1	a $t_1 + \Delta t$
50°C	centro	37.0°C	37.5°C
"	a 1 cm. del centro	44.0	45.0
"	" 2 " " "	48.0	49.0
"	" 2.5 " " "	53.0	54.5
100°C	centro	55.0	56.0
"	a 1 cm. del centro	62.0	63.5
"	" 2 " " "	67.0	68.5
"	" 2.5 " " "	72.0	74.0
150°C	centro	76.0	77.5

150°C	a 1 cm. del centro	81.0	82.5
"	" 2 " " "	87.0	88.5
"	" 2.5 " " "	93.0	95.0
200°C	centro	95.0	96.5
"	a 1 cm. del centro	112.0	113.5
"	" 2 " " "	123.0	125.0
"	" 2.5 " " "	130.0	132.0
250°C	centro	130.0	131.5
"	a 1 cm. del centro	144.0	145.5
"	" 2 " " "	153.0	155.0
"	" 2.5 " " "	162.0	164.0
300°C	centro	167.0	168.5
"	a 1 cm. del centro	180.0	181.5
"	" 2 " " "	189.0	191.0
"	" 2.5 " " "	205.0	207.0
350°C	centro	208.0	209.5
"	a 1 cm. del centro	220.0	221.5
"	" 2 " " "	237.0	239.0
"	" 2.5 " " "	250.0	252.5
400°C	centro	256.0	257.5
"	a 1 cm. del centro	278.0	279.5
"	" 2 " " "	300.0	302.0
"	" 2.5 " " "	320.0	322.0
450°C	centro	330.0	331.5
"	a 1 cm. del centro	356.0	358.0
"	" 2 " " "	378.0	380.0
"	" 2.5 " " "	399.0	401.0
500°C	centro	395.0	396.5
"	a 1 cm. del centro	412.0	414.0

500°C	a 2 cm. del centro	429.0	431.0
"	" 2.5 " " "	440.0	442.0
550°C	centro	430.0	431.5
"	a 1 cm. del centro	455.0	457.0
"	" 2 " " "	472.0	474.0
"	" 2.5 " " "	495.0	497.0
600°C	centro	490.0	492.0
"	a 1 cm. del centro	500.0	502.0
"	" 2 " " "	517.0	519.0
"	" 2.5 " " "	532.0	534.5
650°C	centro	518.0	520.0
"	a 1 cm. del centro	547.0	549.0
"	" 2 " " "	570.0	572.0
"	" 2.5 " " "	592.0	594.5
700°C	centro	564.0	566.0
"	a 1 cm. del centro	600.0	602.5
"	" 2 " " "	630.0	633.0
"	" 2.5 " " "	640.0	643.0

Usando el programa de computación (hecho de acuerdo a las bases establecidas por Pehlke y cuyo análisis y desarrollo se encuentra en la referencia 8) determinamos "∞" y "K" en función de la temperatura, para cuatro ordenes de ajuste diferentes (n = 1, 2, 3 y 4). Recordar que para aproximar la verdadera distribución de temperaturas a la realidad física se usa una serie de sumas de potencias del tipo de:

$$T(r) = A + B_1 r^2 + B_2 r^4 + \dots + B_n r^{2n} \quad (12)$$

Donde n es el orden de ajuste. Los resultados arrojados por la computadora para los diferentes ordenes de ajuste y las diferentes formulaciones se dan a continuación:

Para orden de ajuste $n = 1$

Formulación N°1 : Arena sílica A.F.S. 80-90 con 5% de bentonita - sódica y 4% de humedad.

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	2.6×10^{-4}	8.17×10^{-4}
650	3.05 " "	9.56 " "
700	3.52 " "	11.06 " "
750	4.05 " "	12.67 " "
800	4.61 " "	14.38 " "
850	5.19 " "	16.25 " "

Formulación N°2 : Arena sílica A.F.S. 80-90 con 5% de bentonita - sódica y 6% de humedad.

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	1.76×10^{-4}	5.50×10^{-4}
650	2.06 " "	6.44 " "
700	2.39 " "	7.45 " "
750	2.75 " "	8.52 " "
800	3.11 " "	9.69 " "
850	3.52 " "	10.94 " "

Formulación N^o 3 : Arena sílica A.F.S. 80-90 con 5% de bentonita -
sódica y 8% de humedad

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	2.94 X 10 ⁻⁴	9.41 X 10 ⁻⁴
650	3.47 " "	11.00 " "
700	4.00 " "	12.72 " "
750	4.58 " "	14.56 " "
800	5.22 " "	16.50 " "
850	5.88 " "	18.58 " "

Formulación N^o 4 : Arena sílica A.F.S. 80-90 con 3% de bentonita -
calcica y 5% de humedad

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
50	1.67 X 10 ⁻⁵	1.17 X 10 ⁻⁴
100	2.83 " "	1.80 " "
150	4.47 " "	2.65 " "
200	6.58 " "	3.69 " "
250	9.17 " "	4.95 " "
300	12.22 " "	6.38 " "
350	15.75 " "	8.05 " "
400	19.72 " "	9.92 " "
450	24.20 " "	11.97 " "
500	29.20 " "	14.25 " "
550	34.45 " "	16.72 " "
600	40.56 " "	19.39 " "

650	46.67×10^{-5}	22.27×10^{-4}
700	53.60 " "	25.33 " "

Formulación N°5 : Arena sílica A.F.S. 80-90 con 5% de bentonita -
calceica y 5% de humedad.

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
50	2.01×10^{-5}	1.46×10^{-4}
100	3.44 " "	2.20 " "
150	5.30 " "	3.19 " "
200	7.64 " "	4.38 " "
250	10.52 " "	5.80 " "
300	13.89 " "	7.44 " "
350	17.77 " "	9.33 " "
400	22.14 " "	11.42 " "
450	27.05 " "	13.75 " "
500	32.50 " "	16.27 " "
550	38.30 " "	19.05 " "
600	44.72 " "	22.05 " "
650	51.67 " "	25.25 " "
700	59.17 " "	28.61 " "

Para orden de ajuste $n = 2$

Formulación N°1

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	5.14×10^{-4}	1.94×10^{-3}
650	5.95 " "	2.23 " "

700	6.77×10^{-4}	2.55×10^{-3}
750	7.69 " "	2.88 " "
800	8.63 " "	3.25 " "
850	9.66 " "	3.64 " "

Formulación N°2

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
600	6.81×10^{-4}	1.90×10^{-3}
650	8.05 " "	2.25 " "
700	9.38 " "	2.63 " "
750	10.86 " "	3.03 " "
800	12.42 " "	3.47 " "
850	14.00 " "	3.94 " "

Formulación N°3

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
600	2.75×10^{-4}	0.94×10^{-3}
650	3.19 " "	1.10 " "
700	3.66 " "	1.25 " "
750	4.17 " "	1.43 " "
800	4.72 " "	1.62 " "
850	5.31 " "	1.82 " "

Formulación N°4

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
50	2.23 X 10 ⁻⁵	1.66 X 10 ⁻⁴
100	3.72 " "	2.35 " "
150	6.05 " "	3.41 " "
200	9.27 " "	4.80 " "
250	13.36 " "	6.55 " "
300	18.33 " "	8.66 " "
350	24.16 " "	11.13 " "
400	30.83 " "	13.94 " "
450	38.33 " "	17.11 " "
500	46.95 " "	20.63 " "
550	56.11 " "	24.50 " "
600	66.38 " "	28.80 " "
650	77.50 " "	33.00 " "
700	89.44 " "	38.30 " "

Formulación N° 5

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
50	7.90 X 10 ⁻⁵	6.58 X 10 ⁻⁴
100	7.55 " "	6.92 " "
150	6.52 " "	6.86 " "
200	4.86 " "	6.50 " "
250	2.53 " "	6.00 " "
300	4.40 " "	6.23 " "
350	4.68 " "	6.33 " "
400	8.36 " "	7.59 " "
450	13.30 " "	8.83 " "
500	18.80 " "	9.91 " "

550	25.00×10^{-5}	10.66×10^{-4}
600	31.90 " "	11.77 " "
650	39.10 " "	12.22 " "
700	47.70 " "	14.00 " "

Para orden de ajuste $n = 3$

Formulación N°1

Temperatura en $^{\circ}\text{C}$	"K" en cal/cm.seg. $^{\circ}\text{C}$	"K" en $\text{cm}^2/\text{seg.}$
600	1.80×10^{-4}	6.00×10^{-4}
650	2.22 " "	7.03 " "
700	2.56 " "	8.14 " "
750	2.91 " "	9.03 " "
800	3.33 " "	10.55 " "
850	3.77 " "	11.91 " "

Formulación N°2

Temperatura en $^{\circ}\text{C}$	"K" en cal/cm.seg. $^{\circ}\text{C}$	"K" en $\text{cm}^2/\text{seg.}$
600	1.65×10^{-4}	5.00×10^{-4}
650	1.91 " "	5.80 " "
700	2.25 " "	6.83 " "
750	2.59 " "	7.83 " "
800	2.91 " "	8.92 " "
850	3.33 " "	10.08 " "

Formulación N^o3

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	2.49 X 10 ⁻⁴	0.81 X 10 ⁻³
650	2.92 " "	0.91 " "
700	3.39 " "	1.09 " "
750	3.86 " "	1.21 " "
800	4.39 " "	1.40 " "
850	4.95 " "	1.58 " "

Formulación N^o4

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
50	1.57 X 10 ⁻⁵	1.02 X 10 ⁻⁴
100	2.36 " "	1.48 " "
150	3.27 " "	2.03 " "
200	4.30 " "	2.61 " "
250	5.47 " "	3.33 " "
300	6.77 " "	4.11 " "
350	8.19 " "	4.91 " "
400	9.75 " "	5.88 " "
450	11.44 " "	6.88 " "
500	13.25 " "	7.96 " "
550	15.15 " "	9.11 " "
600	17.22 " "	10.36 " "
650	19.41 " "	11.66 " "
700	21.75 " "	13.05 " "

Formulación N°5

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
50	1.64 X 10 ⁻⁵	1.14 X 10 ⁻⁴
100	2.69 " "	1.73 " "
150	4.16 " "	2.50 " "
200	6.03 " "	3.44 " "
250	8.33 " "	4.58 " "
300	11.03 " "	5.88 " "
350	14.11 " "	7.36 " "
400	17.60 " "	9.03 " "
450	21.50 " "	10.88 " "
500	25.80 " "	12.92 " "
550	30.55 " "	15.11 " "
600	35.83 " "	17.50 " "
650	41.38 " "	20.05 " "
700	47.22 " "	22.80 " "

Para orden de ajuste n = 4

Formulación N°1

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg.°C	"α" en cm ² /seg.
600	5.55 X 10 ⁻⁴	1.69 X 10 ⁻³
650	6.50 " "	1.98 " "
700	7.55 " "	2.31 " "
750	8.66 " "	2.65 " "
800	9.88 " "	3.00 " "
850	11.16 " "	3.39 " "

Formulación N°2

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
600	2.92 X 10 ⁻³	9.36 X 10 ⁻³
650	3.42 " "	10.94 " "
700	3.94 " "	12.63 " "
750	4.50 " "	14.47 " "
800	5.11 " "	16.41 " "
850	5.78 " "	18.50 " "

Formulación N°3

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
600	1.58 X 10 ⁻⁴	5.80 X 10 ⁻⁴
650	1.83 " "	6.70 " "
700	2.10 " "	7.64 " "
750	2.37 " "	8.67 " "
800	2.67 " "	9.78 " "
850	3.00 " "	11.00 " "

Formulación N°4

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg.
50	2.13 X 10 ⁻⁵	1.57 X 10 ⁻⁴
100	3.30 " "	1.95 " "

150	5.85×10^{-5}	2.86×10^{-4}
200	8.05 " "	3.20 " "
250	10.47 " "	4.12 " "
300	13.05 " "	5.18 " "
350	17.17 " "	6.23 " "
400	22.38 " "	7.85 " "
450	29.54 " "	9.02 " "
500	35.80 " "	10.63 " "
550	40.50 " "	13.97 " "
600	46.70 " "	18.45 " "
650	53.80 " "	23.04 " "
700	62.30 " "	27.02 " "

Formulación N

Temperatura en °C	"K" en cal/cm.seg. °C	"α" en cm ² /seg
50	6.87×10^{-5}	5.49×10^{-4}
100	7.23 " "	6.12 " "
150	6.05 " "	5.95 " "
200	5.07 " "	5.38 " "
250	3.17 " "	5.05 " "
300	4.48 " "	6.19 " "
350	5.16 " "	6.27 " "
400	5.49 " "	6.48 " "
450	10.57 " "	7.47 " "
500	14.83 " "	8.29 " "
550	20.84 " "	9.27 " "
600	29.50 " "	10.39 " "
650	36.48 " "	10.97 " "
700	40.50 " "	11.37

ANALISIS DE RESULTADOS

Se graficó en primer lugar la difusividad térmica y la conductividad térmica VS la temperatura, para las diferentes formulaciones y para un orden de ajuste $n = 2$ (estadísticamente es el mejor ajuste) figuras 14 a 23. Es evidente que tanto la difusividad térmica como la conductividad térmica aumentan con el incremento de temperatura en el rango de 600 a 850°C. En la quinta formulación (3% de bentonita calcácea y 5% de humedad) existe un mínimo en "K" y α en el rango de 250 a 300°C.

El efecto de temperatura sobre las propiedades térmicas de arenas de moldeo lo estudiaron Pehlke y Kirt (5) en U.S.A. y Narayana y Ramakrishnan (1) en la India. La gráfica "K" VS temperatura (fig. 24) obtenida por Narayana y Ramakrishnan muestra un mínimo entre 450 y 550°C y arriba de los 550°C "K" aumenta rápidamente. La curva "K" VS temperatura (fig.25) obtenida por Pehlke y Kirt también muestra un mínimo entre 400 y 600°C, la curva " α " VS temperatura (fig.26) de los mismos autores tiene una forma similar. Este mínimo se atribuye a la disminución del área de contacto entre granos por pérdida de humedad en la película de bentonita alrededor de ellos, el aumento de "K" y " α " arriba de los 600°C se explica por el aumento de radiación transgranular e intergranular.

Para conocer el efecto del contenido de humedad sobre las -

propiedades térmicas de arenas de moldeo, se graficó en segundo lugar "K" y " α " VS % de humedad para un orden de ajuste $n = 2$ y a diferentes niveles de temperatura (figs. 27 y 28). De estas gráficas se observó que "K" y " α " aumentan con el aumento en el contenido de humedad alcanzando un valor máximo a 6% de humedad, a 8% de humedad "K" y " α " descienden considerablemente.

Narayama y Ramakrishnan obtuvieron una curva "K" VS % de humedad (fig. 29) para una arena de composición similar a la estudiada aquí (5% de bentonita sódica). El efecto fué totalmente opuesto, entre 6 y 7% en el contenido de humedad "K" aumenta en lugar de descender. Pero Narayama y Ramakrishnan no solo estudiaron el efecto del contenido de humedad sobre la conductividad térmica a un solo contenido de bentonita, ellos obtuvieron curvas "K" VS % de humedad a distintos contenidos de bentonita (fig. 30) y de esta observamos que "K" aumenta con el aumento en el contenido de humedad. Sobre lo mismo la gráfica de Rao (7) de U.S.A. -- (31) para una arena con 5% de bentonita sódica, no se observan ni mínimos ni máximos y solo se nota un ligero aumento de "K" con el aumento de temperatura. Este mismo efecto se nota en la gráfica "K" VS % de humedad obtenida por el mismo Rao para diferentes contenidos de bentonita (fig. 32).

En tercer lugar se graficó "K" y " α " VS el cociente $\frac{\text{agua}}{n}$ bentonita (figs. 33 y 34) para un orden de ajuste $n = 2$ y para diferentes niveles de temperatura. Observamos que el efecto del cociente

-ente agua/bentonita sobre las propiedades térmicas de la arena - estudiada aquí, fué el mismo que el que ejerce la humedad, debido a que no se vario el contenido de bentonita. La curva "K" VS cociente agua/bentonita (fig. 35) de Narayama y Ramakrishnan muestra un aumento de "K" con el aumento del cociente agua/bentonita.

En cuarto lugar se analizó el efecto del contenido de bentonita sobre las propiedades térmicas de la arena de moldeo. En el presente trabajo solo se determinaron "K" y " α " a 3 y 5% de bentonita calcíca a diferentes niveles de temperatura de 50 a 700°C. Los resultados indican una disminución de "K" y " α " en la arena con 5% de bentonita calcíca, esto es más notorio a más altas temperaturas. Si observamos la gráfica "K" VS % de bentonita sódica obtenida por Narayama y Ramakrishnan a diferentes cocientes agua/bentonita (fig. 36), se nota que "K" aumenta con el aumento en el % de bentonita. Un efecto contrario se observa en la curva obtenida por Rao (fig. 32).

Puede mencionarse el análisis del efecto de la densidad del compactado sobre las propiedades térmicas de arenas de moldeo. Rao hizo un estudio detallado de este efecto, si observamos su gráfica "K" VS densidad del compactado (fig. 37) notamos que "K" aumenta con el incremento de la densidad del compactado.

Es posible hacer una comparación de datos de propiedades térmicas de arenas de moldeo (de formulación parecida) obtenidos

en diferentes investigaciones en el mundo, a una misma temperatura:

Investigación	a 650°C	"K" en cal/cm.sec. °C	"α" en cm ² /seg.
M.C. Adams (Inglaterra)		1.40 X 10 ⁻³	
Seshadri (India)		0.90 " "	2.5 X 10 ⁻³
Pehlke (U.S.A.)		2.30 " "	5.2 " "
Narayama (India)		0.61 " "	
Virolle (Francia)			4.2 " "
U.N.A.M. a n = 2 (México)		0.60 " "	2.2 " "

De aquí podemos decir que los datos de "K" son muy diferentes unos con respecto a otros. El valor obtenido por Pehlke es muy alto con respecto a los demás, más pequeño pero en mismo orden está el valor obtenido por Adams, y mucho más pequeños pero parecidos entre si están los valores obtenidos por Narayama y el obtenido en el presente trabajo.

Con respecto a "α" los valores no difieren tanto. El valor de Pehlke sigue siendo el más alto y muy parecido a este, está el valor de Virolle y más pequeños pero casi iguales están los valores de Seshadri y el del presente trabajo.

Figura 14.- Curva "K" VS temperatura de la formulación N^o1 (1% de humedad y 5% de bentonita sódica) a n = 2

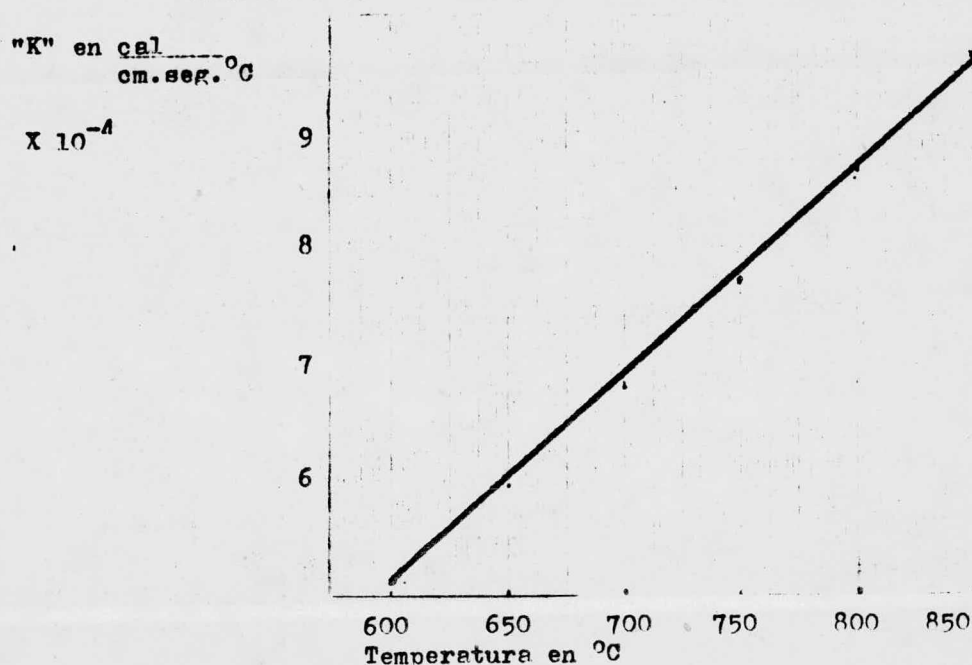


Figura 15.- Curva " α " VS temperatura de la formulación N^o1 a un n = 2

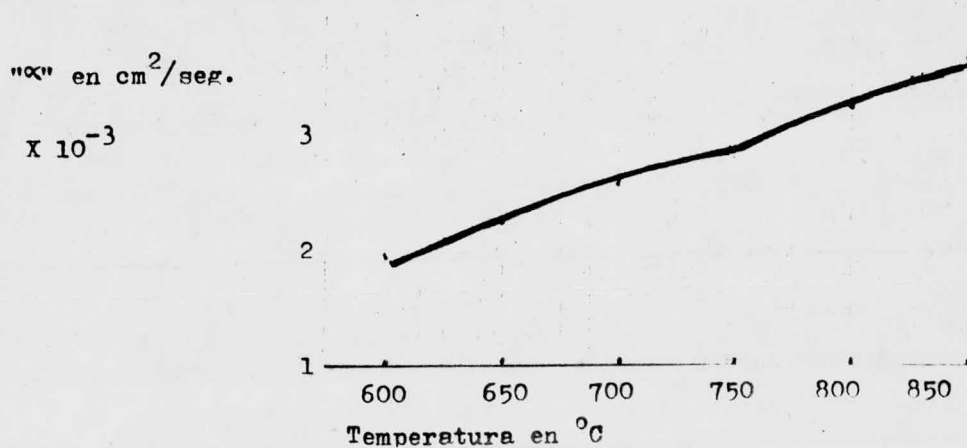


Figura 16.- Curva "K" VS temperatura de la formulación N°2

(6% de humedad y 5% de bentonita sódica) a $a = 2$.

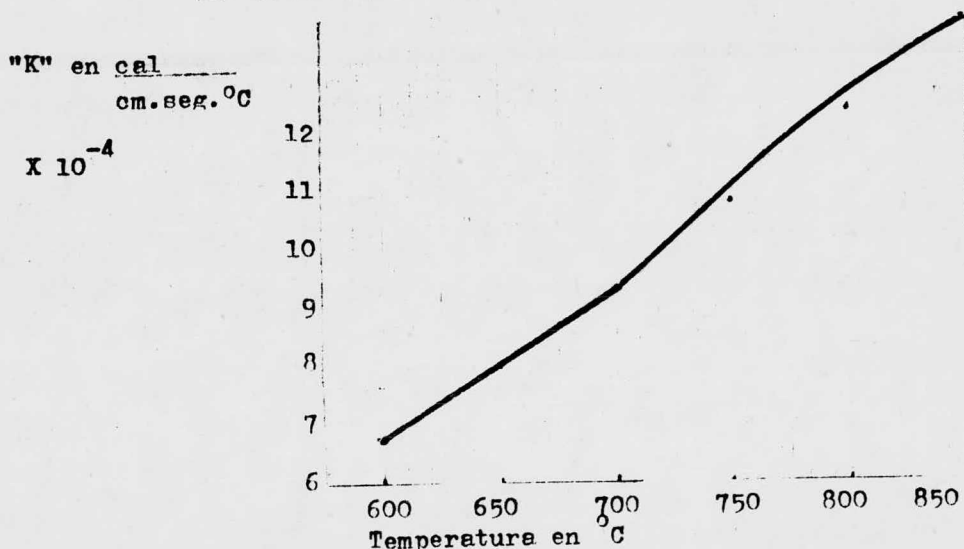


Figura 17.- Curva " α " VS temperatura de la formulación N°2

a un orden de ajuste $n = 2$

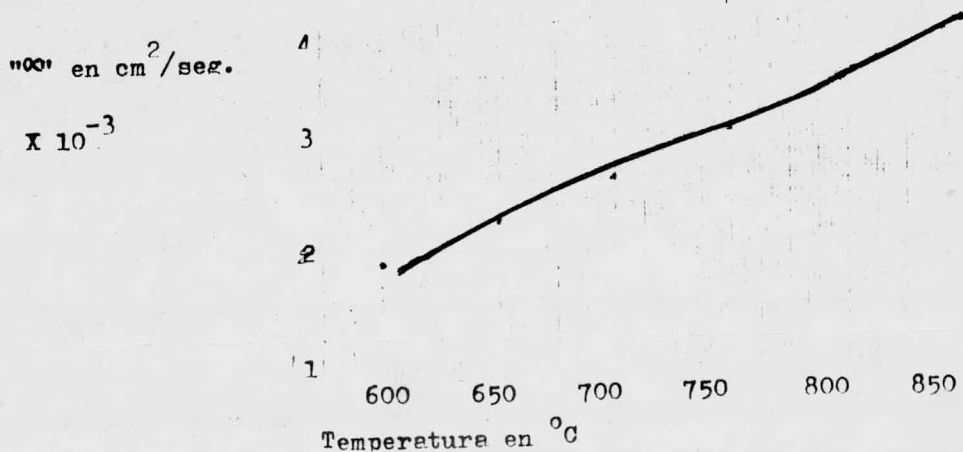


Figura 18.- Curva "K" VS temperatura de la formulación N°3

(8% de humedad y 5% de bentonita sódica) a $n = 2$

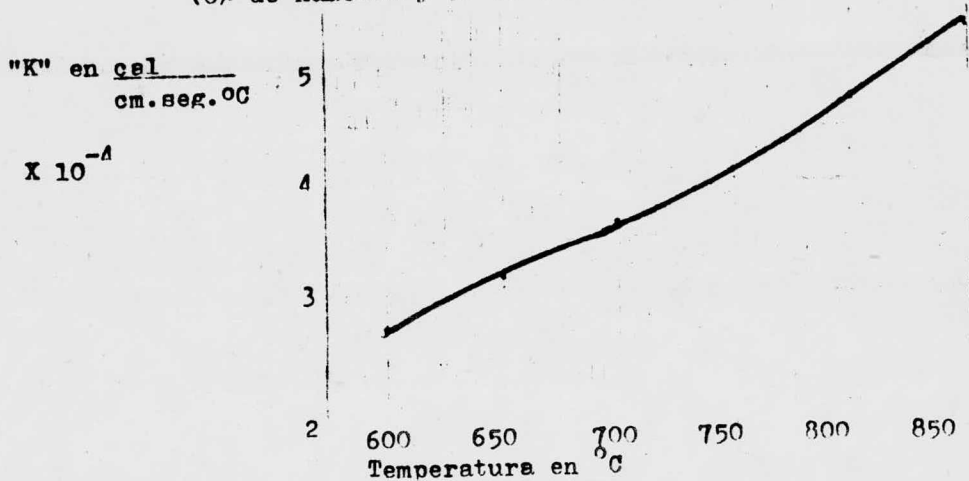


Figura 19.- Curva " α " VS temperatura de la formulación N°3

a un $n = 2$

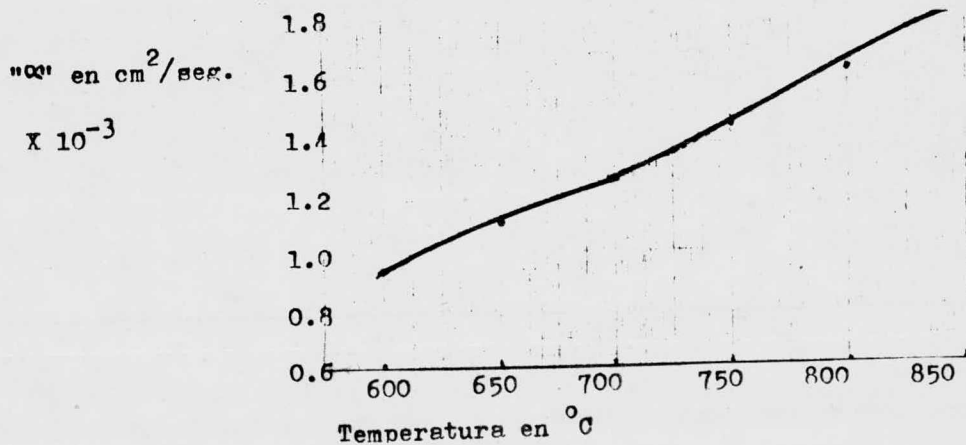


Figura 20.- Curva "K" VS temperatura de la formulación N^o 4
(3% de bentonita calcica y 5% de humedad) n = 2

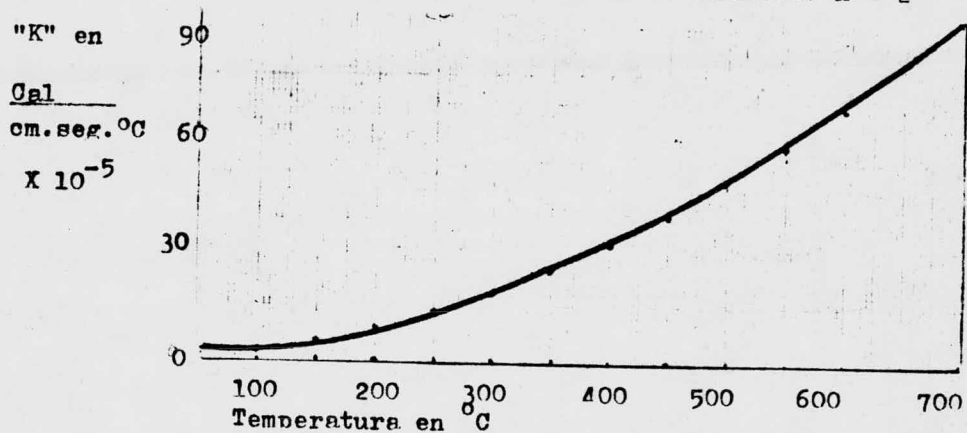


Figura 21.- Curva " α " VS temperatura de la formulación N^o 4
a un n = 2

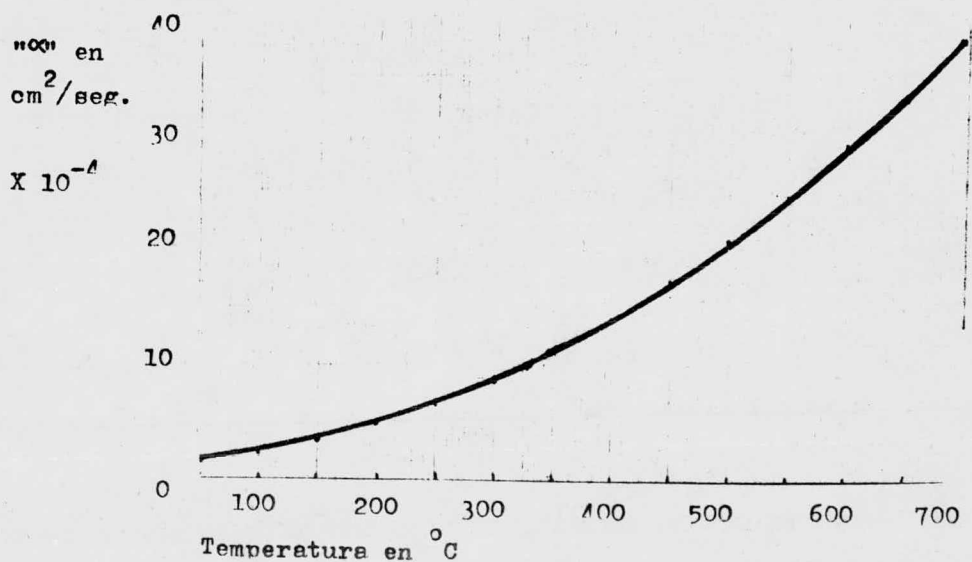


Figura 22.- Curva "K" VS temperatura de la formulación N^o5

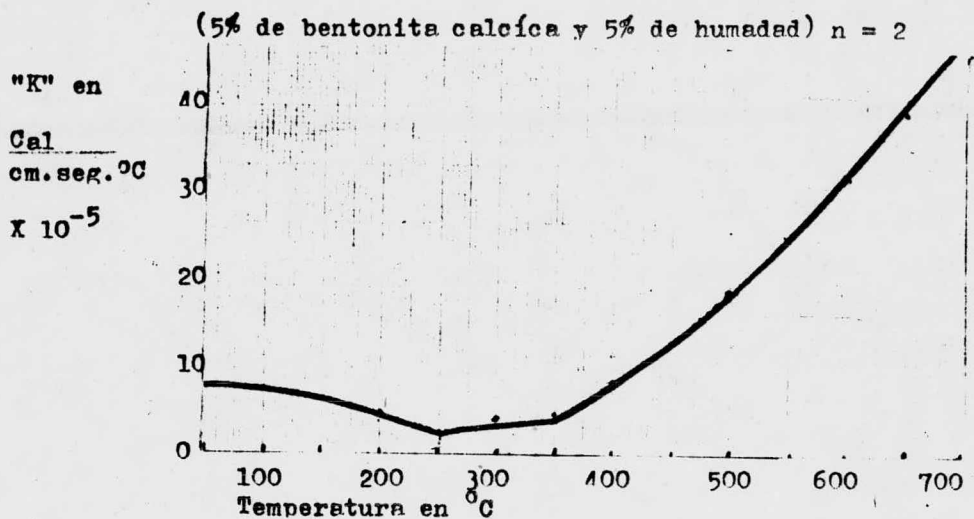


Figura 23.- Curva " α " VS temperatura de la formulación N^o5

a un orden de ajuste $n = 2$

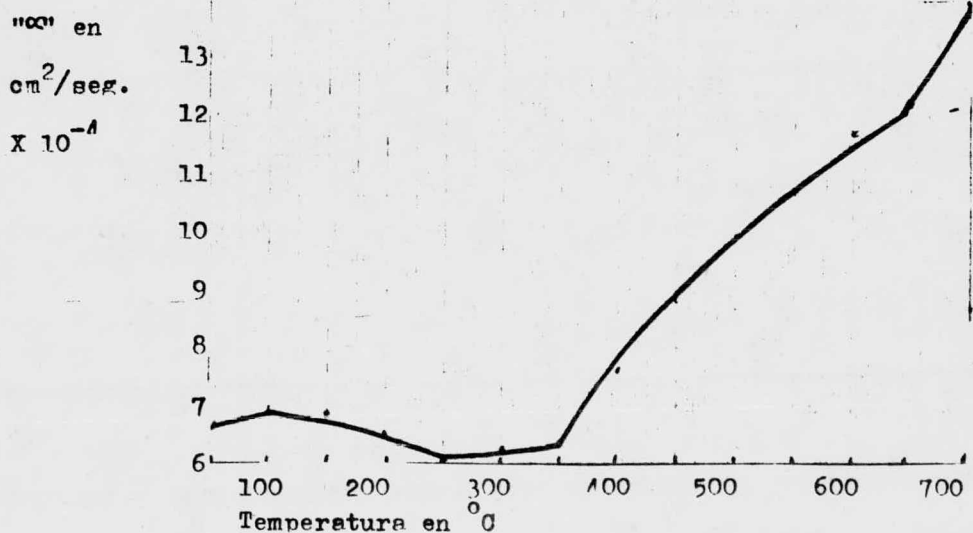


Figura 24.- Curva "K" VS temperatura obtenida por Narayana y Ramesh-makrishnan para un contenido de humedad de 3 y 5%

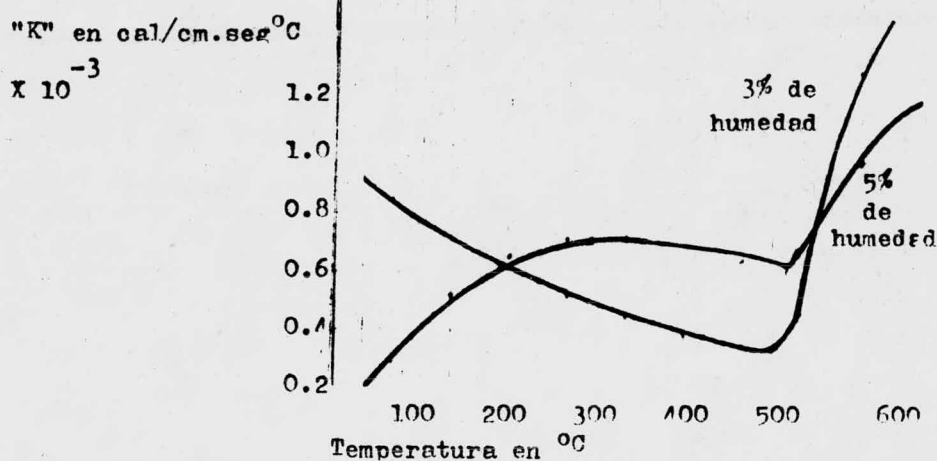


Figura 25.- Curva "K" VS temperatura obtenida por Pehlke y Kirt

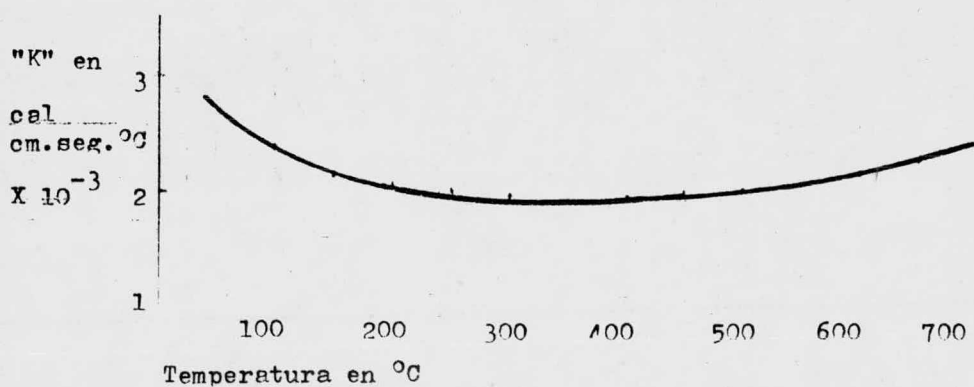


Figura 26.- Curva "α" VS temperatura obtenida por Pehlke y Kirt

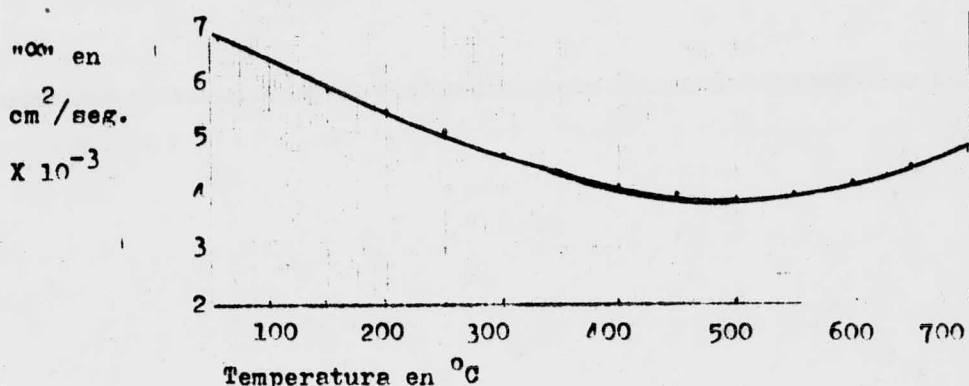


Figura 27.- Efecto del contenido de humedad sobre "K" de una arena nacional con 5% de bentonita sódica. A $n = 2$ y diferentes niveles de temperatura.

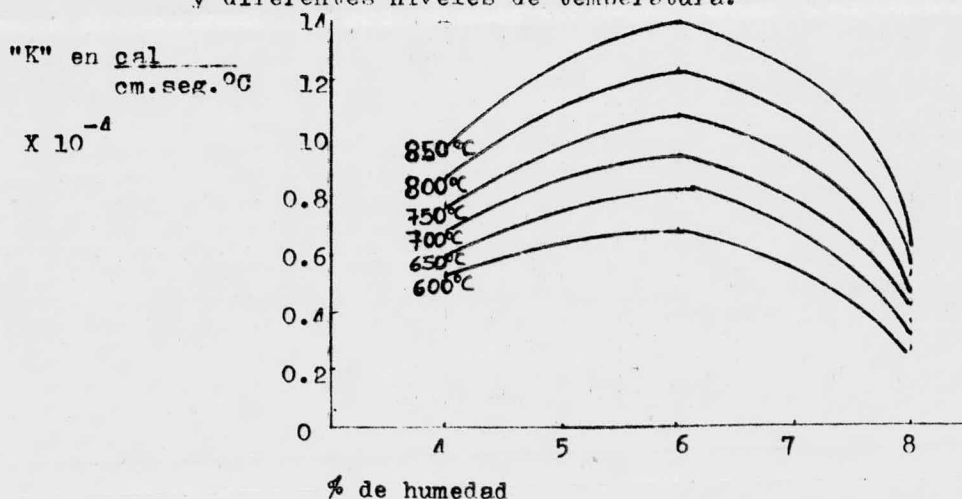


Figura 28.- Efecto del contenido de humedad sobre "α" de una arena nacional con 5% de bentonita sódica. A n = 2

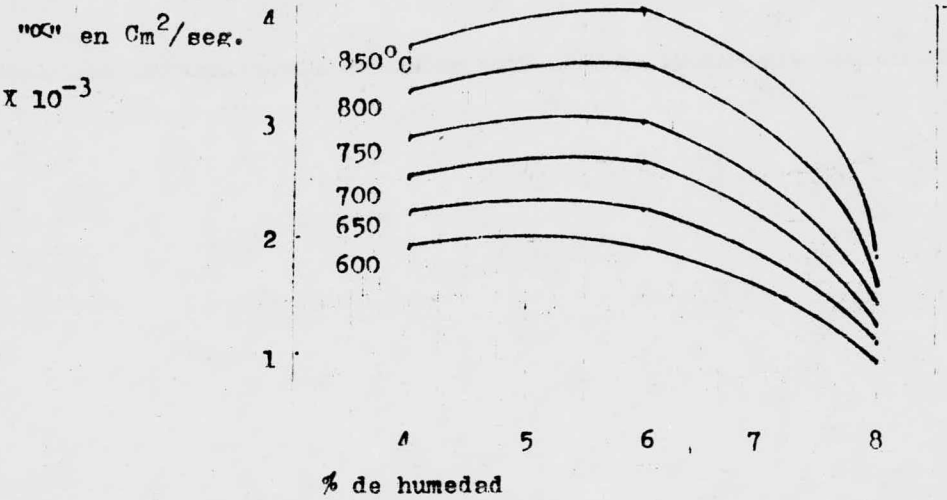


Figura 29.- Efecto del contenido de humedad sobre "K" encontrado por Narayama y Ramakrishnan para una arena con 5% de bentonita sódica

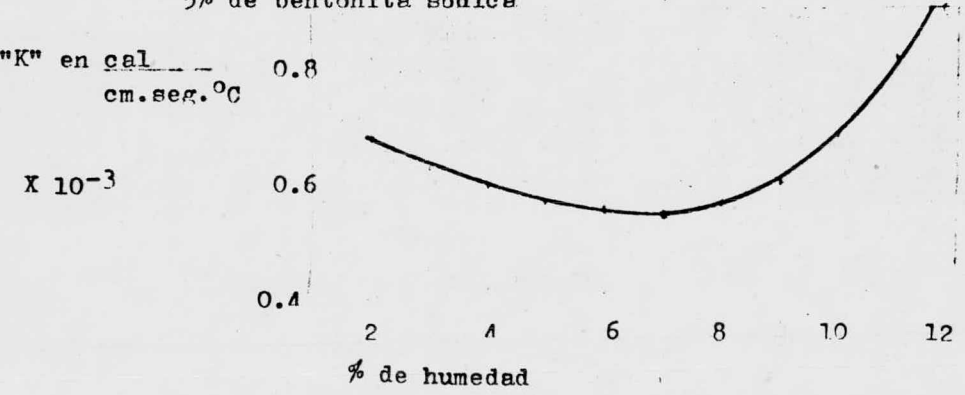


Figura 30.- Efecto del contenido de humedad sobre "K" encontrado por Narayana y Ramakrishnan. A diferentes contenidos de bentonita

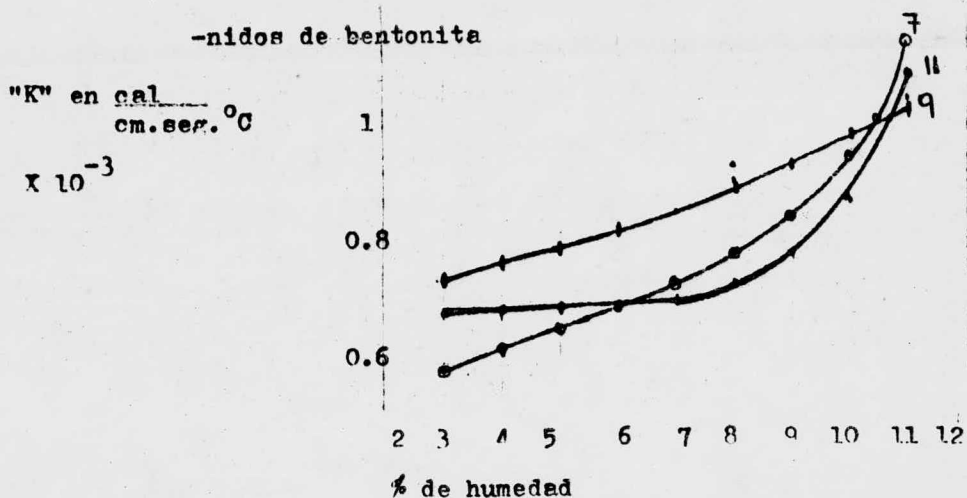


Figura 31.- Efecto del contenido de humedad sobre "K" encontrado por Rao para una arena con 5% de bentonita sódica.

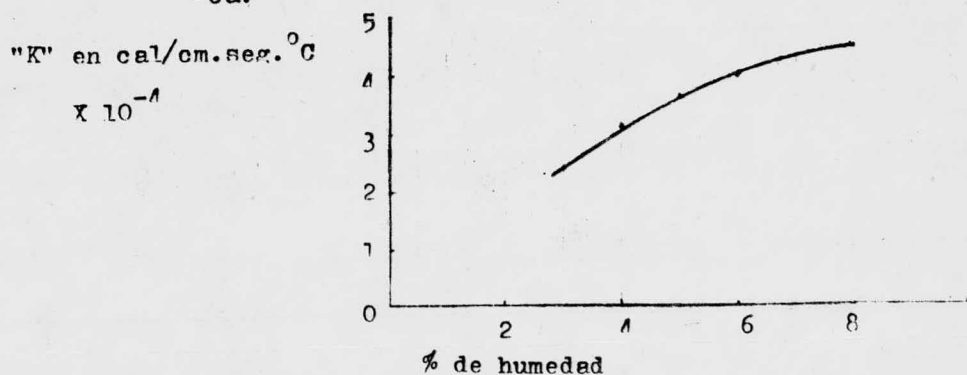


Figura 32.- Efecto del contenido de humedad sobre "K" encontrado por Rao a diferentes contenidos de bentonita.

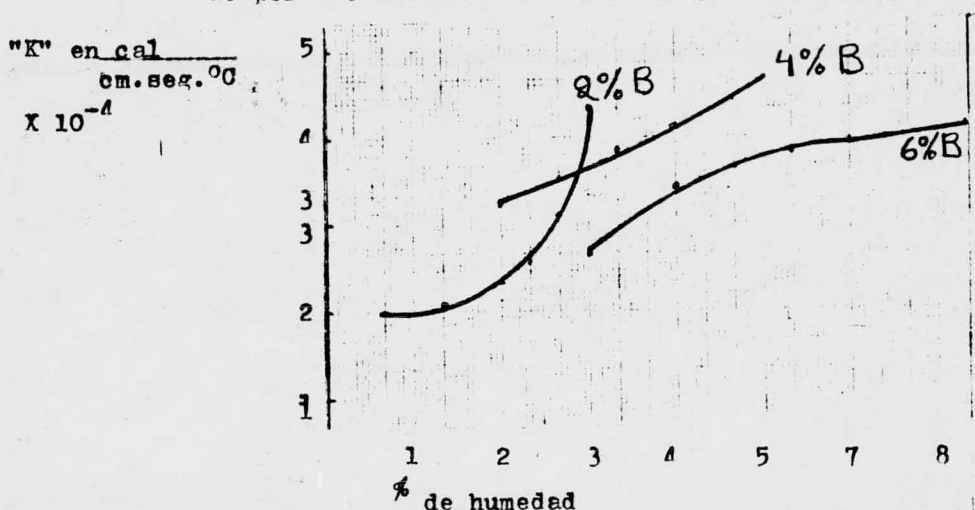


Figura 33.- Efecto del cociente agua/bentonita sobre "K" de una arena nacional con 5% de bentonita sódica. A un $n=2$, a diferentes niveles de temperatura

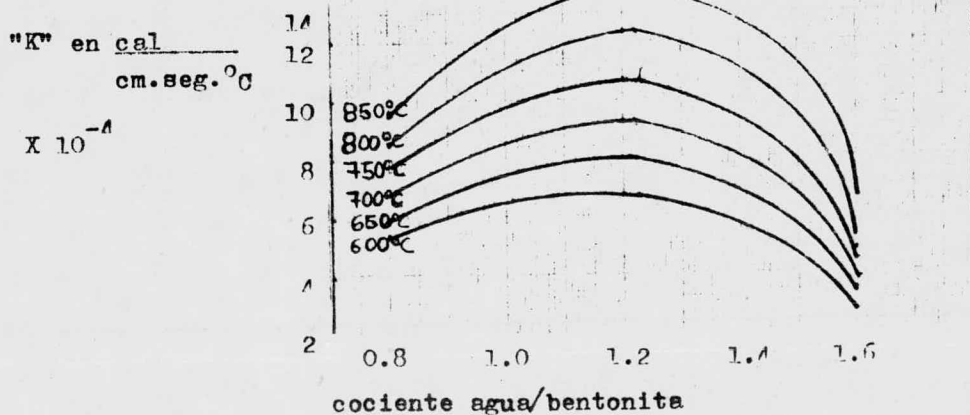


Figura 34.- Efecto del cociente agua/bentonita sobre " α " de una arena nacional. A un orden de ajuste $n = 2$.

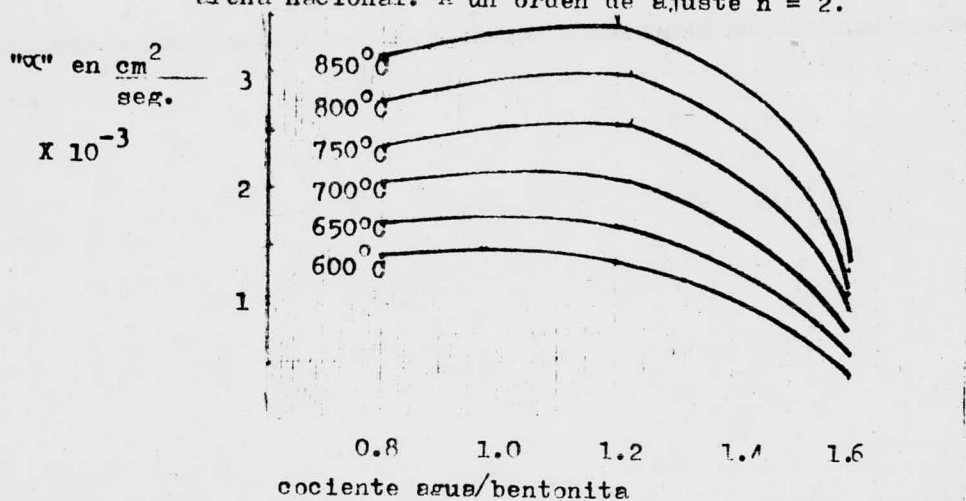


Figura 35.- Efecto del cociente agua/bentonita sobre " K " obtenida por Narayama y Ramakrishnan

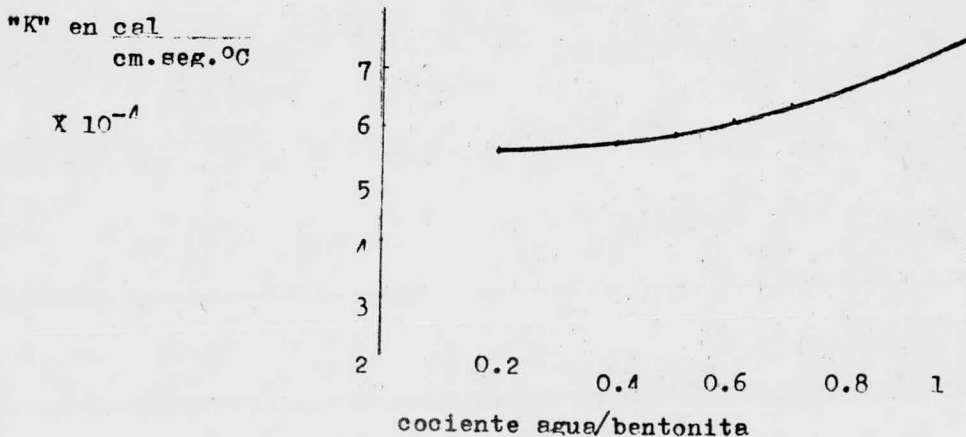


Figura 36.- Efecto del contenido de bentonita sobre "K" encontrado por Narayana y Ramakrishnan. A diferentes cocientes agua/bentonita

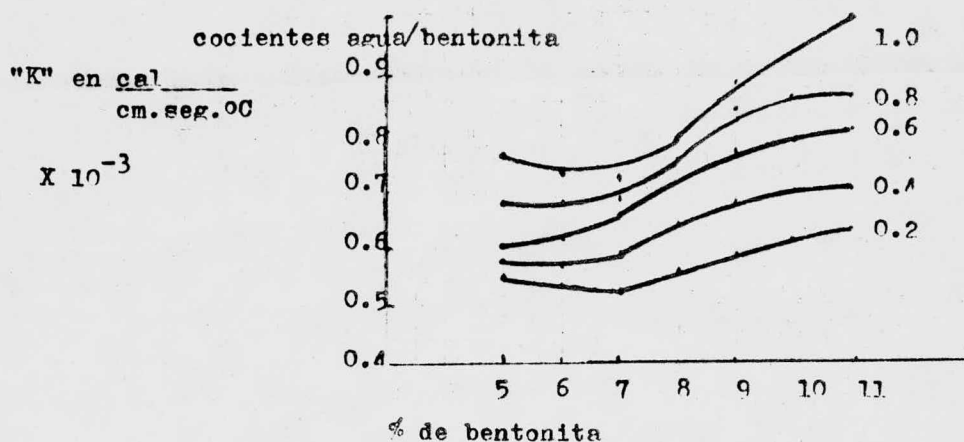
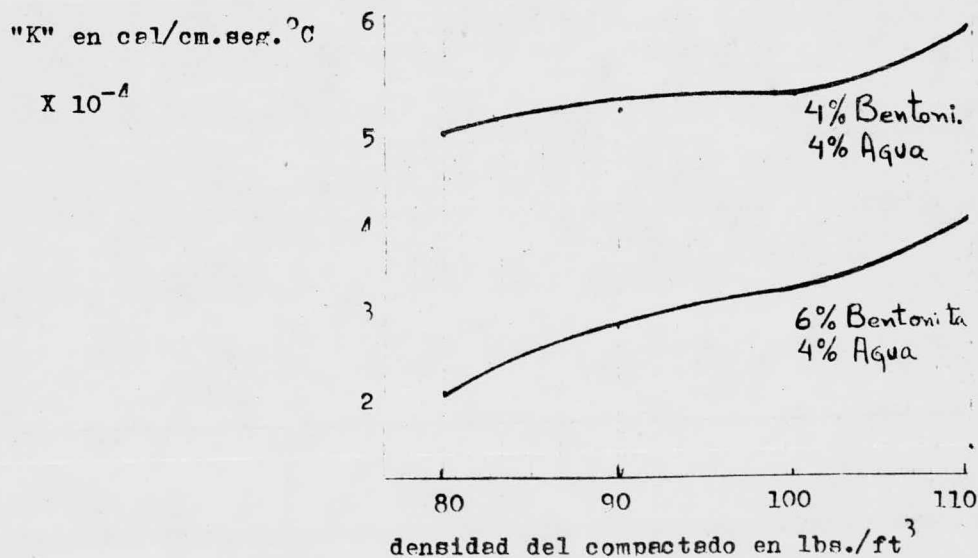


Figura 37.- Efecto de la densidad del compactado sobre "K" encontrado por Rao



CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos en el presente trabajo y de resultados obtenidos en otras investigaciones, se tienen las siguientes conclusiones:

1.- La conductividad térmica "K" y la difusividad térmica " α " aumentan con el aumento de temperatura arriba de los 600°C. En el presente trabajo no se intentó explicar el mínimo entre 450 y 600°C que presentan las curvas de otras investigaciones.

2.- "K" aumenta con el aumento en el contenido de humedad a diferentes contenidos de bentonita, excepto a 5% de bentonita.

3.- El cociente agua/bentonita tiene un efecto parecido al que ejerce la humedad sobre las propiedades térmicas de arenas de moldeo. Para afirmar un efecto definitivo del cociente agua/bentonita sobre las propiedades térmicas de arenas de moldeo es necesario más experimentación.

4.- "K" disminuye con el aumento en el contenido de bentonita. Se considera hace falta más experimentación, ya que otros autores afirman que "K" aumenta con el aumento de bentonita.

5.- Como los valores de propiedades térmicas obtenidas en las diferentes investigaciones, varían mucho entre sí, es necesario estandarizar un método y realizar un estudio sistematizado de propiedades térmicas de arenas nacionales.

6.- Se propone el método de Pehlke y Kirt, ya que es un mé-

-todo rápido, no necesite de fusión de metales y usa una técnica de computación que nos asegura un mejor tratamiento de datos.

APENDICE

Fabricación del horno.- Se necesitaba un horno que nos diera 1000 °C en la cámara de calefacción, de buena conductividad térmica y que no presentara gradiente térmica. Para lograr esto se fabricó un horno de tubo calentado por medio de una resistencia.

Se usó Kanthal como resistencia con un factor $ct = 1.032$ y una resistencia por unidad de longitud $= 0.5451$. Como núcleo se usó un tubo de acero inoxidable de 11.3 cm. de diámetro y 33 cm. de longitud.

El cálculo de la longitud necesaria de Kanthal se da a continuación:

Primero calculamos el volumen de la cámara de calefacción:

$$D = 11.3 \text{ cm.}, L = 33 \text{ cm.}$$

$$vol = \pi \cdot r^2 \cdot L = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} = \frac{\pi \cdot (11.3)^2 \cdot 33}{4}$$

$$vol = 3.31 \text{ dm}^3$$

En segundo lugar y por medio de tablas determinamos la potencia necesaria para elevar la temperatura de la cámara a la deseada.

Para un volumen $= 3.31 \text{ dm}^3$ de la cámara de calefacción la potencia necesaria es 2.24 Kw

Luego calculamos la resistencia necesaria a la temperatura de trabajo con ayuda de la ley de ohm:

$$R_t = \frac{V^2}{W}$$

$$V = 220 \text{ volts.}$$

$$R_t = \frac{(220)^2}{2240}$$

$$R_t = 21.61 \text{ ohms.}$$

De aquí calculamos la resistencia a la temperatura ambiente, ya que a esta temperatura cortaremos nuestra resistencia:

$$R_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{R_t}{ct}$$

$$R_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{21.61 \text{ ohms}}{1.032} = 20.91 \text{ ohms.}$$

Una vez que se conoce $R_{20^{\circ}\text{C}}$ es fácil conocer la longitud necesaria, por medio de la ecuación:

$$L = \frac{R_{20^{\circ}\text{C}}}{0.5451 \text{ ohms./ft}} = \frac{20.91 \text{ ohms.}}{0.5451 \text{ ohms./ft}}$$

$$L = 38.415 \text{ fts.} = 11.7 \text{ metros.}$$

Material usado para la construcción del horno:

- 1.- tubo de acero inoxidable de 11.3 cm. de diametro, 33 cm de largo y 5 mm. de espesor.
- 2.- arrollamiento de fibra de vidrio
- 3.- capa de cemento refractario
- 4.- capa de concreto refractario
- 5.- arrollamiento de fibra de vidrio
- 6.- material aislante térmico (asbesto en polvo)
- 7.- tubo de 28 cm. de diametro y 34 cm. de largo
- 8.- termopar para control de temperatura del horno

BIBLIOGRAFIA

- (1) - K.L. Narayana y G. Ramakrishnan
"Thermal properties of bentonite bonded homogeneous sand mixes"
Brit. found. 1976 p. 12
- (2) - M.C. Adams y H.F. Taylor
"Flow of heat from sand casting by conduction, radiation and convection"
A.F.S. Trans., 1957 p. 65-70
- (3) - X. Virolle, R. Chevriot y M. Jeancolas
"Experimental study of the thermal diffusivity of molding materials"
Cast metals research journal vol. 3 N^o1, p. 22-29 (march 1967)
- (4) - M. Seshadri y R. Ramachandran
"A transient heat flow method of determining thermal properties of mould material"
A., Brit. found. 1962, 55, 385
- (5) - R.D. Pehlke y M.J. Kirt
"Determination of material thermal properties using computer techniques"
Cast metals research journal, vol 9, N^o2 (june 1973)
- (6) - R.D. Pehlke, M.J. Kirt, D.J. Cook y R.E. Marrone
"Numerical simulation of casting solidification"
Cast metals research journal, vol 9, N^o2 p. 49-55 (june 1973)
- (7) - B.B. Rao y D.C. Willians
"Effects of variation in rammed sand density and various additives on thermal conductivity of green sand mixtures"
Modern casting, ocl 49, N^o3 p. 79-88 (march 1966)

- (8) Carlos Marotto Cabrera
Tesis 1977
Facultad de Quimica U.N.A.M.
- (9) D.V. Atterton
"The apparent thermal conductivities of molding material at high temperatures"
Journal of the iron and steel institute vol. 174 p.201-211
(1953)
- (10) D.H. Whitmore y Q.F. Ingerson
"Apparent thermal conductivity of molding sand at elevated temperatures"
Modern casting p. 49-57 (feb. 1960)
- (11) C. Hisatune y A. Shimizu
"Study on the apparent thermal conductivity of molding materials"
Imono, vol. 1, N°36 p. 19-24 (jan 1964)
- (12) W. Richter, S. Lippman y A. Arnold
"The relation between temperature and rate of heat flow at intermediate and high temperatures"
- (13) M. Worzak
"Study of the variable field of temperatures within a refractory material submitted to thermal shock"
Recue generale de thermique, N°20 (aug. 1963)
- (14) L.R. Ingersoll and O.A. Koeppe
Phys. rev. 1924 p. 24-92
- (15) D. D'Eustachio and R.C. Shreiner
Trans Ashue 1952 p. 58-331
- (16) F.C. Hooper y S.C. Chang
Trans ASHUE, 1953, 59, 463

- (17) - D.A. Devries
Soil science, 1952, 73 (2), 83
- (18) - R. Brocard
"Simple and exact method of measuring thermal conductivity
in solid materials"
L'Usine nouvelle, N°33, p. 65-67 (aug. 1962)
- (19) - C.F. Lucks, O.L. Linebrink y K.L. Johnson
"Thermal conductivities of three sands"
A.F.S. Trans. vol. 55, p. 62-65 (1947)
- (20) - H.W. Dietert, E.J. Hastly y R.L. Doelman
"Heat abstraction of molding sands"
Foundry, vol. 75, p. 84-85 (sept. 1947)
- (21) - R.W. Ruddle y A.L. Mincher
"Thermal properties and chilling power of some non-metallic
mold materials"
J. Inst. of met., vol. 76, p. 43-90 (sept 1949)
- (22) - Y. Tanasawa
"A new method for the measurement of the thermal constants
of wet substance"
Trans. soc. of mech. Eng. (Tokyo), vol. 1, p. 217 (1935)
- (23) - A. Kanz
"Investigation of the thermal conductivity of refractory buil
-ding materials"
Materials comittee, Verein Deutsche Eisenhutteleute N°78
(1925)
- (24) - F. Neumann
Annales de chimie physique, 111 serie, vol. 66, p. 183 (1862)
- (25) - E. Gruneisen
Annales de physique, vol. 4, N°3, p. 42 (1900)

- (26) - N. Chworinoff
"Theory of solidification in cast pieces"
Giesserei p. 177-186 (may 17, 1940), p. 201-208 (may 31, 1940)
, p. 222-225 (june 14, 1940)
- (27) - Z. Falecki
"Effect of degree of densifying the molding sand mixture on -
solidification rate and properties of castings"
Przeglad odlewnictwa, p. 298-303 (oct. 1961)
- (28) - J.B. Mc. Intyre
"Influence of mold materials, on several cast alloys"
Foundry trade journal, p. 127-134 (feb. 1, 1962) and p. 197-
203 (feb. 15, 1962)
- (29) - M.C. Flemming, F.R. Mollard and H.F. Taylor
"Mold variables influence on fluidity of aluminum"
Modern casting, p. 100-110 (nov. 1961)
- (30) - I. Igarashi y G. Ohira
"Investigation of casting, cooling, and solidification of --
sand casting"
First report of Tohoku Univ., Sendai Japan
- (31) - G. Ohira
"Solidification of sand casting"
Tech. rept Tohoku Univ., Sendai Japan vol. 19, N^o2, p. 201-
223 (1955)
- (32) - V. Paschkis
"Studies on solidification of castings"
A.F.S. Trans. p. 90 (1945)
- (33) - V. Paschkis
"Influence of properties on solidification of metals"
A.F.S. trans. p. 54-65 (1947)

- (34) - V. Paschkis
 "Studies on solidification of steel spheres"
 A.F.S. trans. p. 373-377 (1948)
- (35) - V. Paschkis
 "Heat transfer, A. Foundryman's tool"
 A.F.S. trans., p. 310-314 (1949)
- (36) - T.T. Rick
 "A practical method for determining heat abstraction by --
 molding materials"
 Iron age, vol. 21, p. 74-77 (april 1949)
- (37) - M. Pell Walpole
 "Experimental study of some factors which determine solidi-
 fication rate in sand cast bronze cylinders"
 Foundrie N°127 p. 297-305 (aug. 1956)
- (38) - C. Locke, C.W. Briggs y R.L. Ashbrook
 "Heat transfer of various molding materials for steel cas-
 -tings"
 foundry trade journal p. 181-185 (aug. 11, 1952)
- (39) - G. Berger y A. Belin
 "Solidification and dimensions to give to risers"
 Fonderie, N°105, p. 4175-4186 (oct. 1954)
- (40) - J. Berry, V. Kondic y G. Martin
 "Solidification times of simple shaped castings in sand --
 molds"
 A.F.S. trans. p. 449-476 (1959)
- (41) - E.F.M. Van Der Held y F.G. Van Drunen
 Physica, 1949, 15, 865
- (42) - Institute of British Foundrymen

"Mold materials effect on cooling rate and physical properties of cast metals"

Second report, subcommittee T.S. 46, A.F.S. trans., p. 106-120
(1959)

(43) - Institute of British Foundrymen

"Effect of mold materials on the solidification rate of cast metals"

Report of subcommittee T.S. 21, 33 y 46, T. 2631, International foundry congress, London, paper N^o1130 (1955)

(44) - G. Halbart

"Elements of a mathematical foundry theory"

Published by H. Valliant Carmane, 4 place st. Michel, Liege.

(1945)

(45) - B. Carnahan, H.A. Luther y J.C. Wilkes

Applied numerical methods, John Wiley & Sons Inc. New York

(1969)