



Determinación de la Conductividad Térmica y de
la Permeabilidad de los Materiales Refractarios,
su Estudio y su Correlación con otras
de sus Características

P A R T E I:
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Fernando / Monreal Hernández



Universidad Nacional
Autónoma de México

Biblioteca Central

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM



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.

FACULTAD DE QUIMICA

Determinación de la Conductividad Térmica y de
la Permeabilidad de los Materiales Refractarios,
su Estudio y su Correlación con otras
de sus Características

PARTE I:
CONDUCTIVIDAD TERMICA

T E S I S

Que para obtener el título de :
INGENIERO QUIMICO

p r e s e n t a :

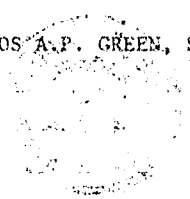
FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	I.Q. Manuel Gavaldón Mont.
Vocal:	Dr. Liberto De Pablo Galán.
Secretario:	I.Q. Jorge Spamer García Conde.
1er. Suplente:	I.Q. Alberto Obregón Pérez.
2do. Suplente:	I.Q. Cutherto Ramírez Castillo.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

CIA. MEXICANA DE REFRACTARIOS A.P. GREEN, S.A.



SUSTENTANTE:

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

ASESOR DEL TEMA:

DR. LIBERTO DE PABLO GALAN.

Con admiración y gratitud a mi padre,
quien con su ejemplo ha trazado el sendero

Con veneración y todo mi cariño a mi madre

Con admiración y cariño a mis hermanos

A mis maestros, compañeros y amigos

Agradezco a la Cia. Mexicana de Refractivos
A. P. Green, S. A. la oportunidad y facilidades que me fueron proporcionadas para la realización de este estudio y especialmente a las siguientes personas:
Dr. Liberto de Pablo Galán
Ing. Juan Manuel Bravo L.

S U M A R I O.

SINOPSIS.

INTRODUCCION - Capítulo I

GENERALIDADES - Capítulo II

CONDUCTIVIDAD TERMICA. TEORIA Y ANTECEDENTES
BIBLIOGRAFICOS - Capítulo III

DESCRIPCION DEL APARATO Y PROCEDIMIENTO
EXPERIMENTAL - Capítulo IV

RESULTADOS - Capítulo V

CONCLUSIONES - Capítulo VI

BIBLIOGRAFIA.

S I N O P S I S

En el presente trabajo se determinó la Conductividad Térmica de los materiales refractarios; para ello se analizaron los métodos mas convenientes construyendo el aparato respectivo.

El principal objeto del conocimiento de ésta - propiedad, es contribuir al control de calidad de los materiales refractarios, así como tener mayor información de sus propiedades para su - correcta aplicación.

CAPITULO II N T R O D U C C I O N

En los últimos años la industria se ha visto afectada por -- grandes avances tecnológicos. Importantes progresos en metalurgia, vidrio, productos del petróleo, cemento y muchas otras industrias son palpables. -- Tales circunstancias han creado procesos que involucren el uso de temperaturas altas y condiciones más severas de operación dentro de los hornos -- revestidos con materiales refractarios. Por tal razón que se necesite un -- control de calidad más riguroso y un constante desarrollo de nuevos productos y técnicas que provean información básica para las diversas aplicaciones a que estos materiales están sujetos.

Las principales propiedades que se determinan actualmente a -- los materiales refractarios para su control de calidad y para su aplicación en los procesos y equipos de diseño son las siguientes:

- a) Equivalente al cono pirométrico.
- b) Cambio lineal permanente.
- c) Deformación bajo carga.
- d) Prueba de disgregación.
- e) Porosidad aparente

- f) Absorción de agua.
- g) Módulo de ruptura.
- h) Compresión en plano.
- i) Densidad
- j) Análisis químico.

Sin embargo en México no se habían determinado hasta la fecha otras propiedades importantes que ya se exigen actualmente, dos de estas son:

1. Conductividad térmica
2. Permeabilidad.

CAPITULO IIGENERALIDADES.

Definidos en su forma más simple los refractarios son materiales cerámicos inorgánicos, no metálicos que pueden ser sometidos a altas temperaturas soportando condiciones severas o destructivas de servicio (29). - Su fabricación está estrechamente ligada al desarrollo de la industria moderna. El calor es fuente de energía que se aprovecha en todas sus formas gracias al concurso de los refractarios.

El uso de los refractarios es básico para el funcionamiento de la industria y puede decirse que sin ellos no podrían fabricarse el acero, el vidrio o el azúcar por lo procedimientos que se conocen actualmente. Ya que las condiciones de operación en cada proceso son muy diferentes, es necesario contar con diversos tipos de refractarios, que además de resistir temperaturas elevadas, deberán soportar abrasión mecánica, cambios bruscos de temperatura, cargas en caliente o ataque de metales fundidos y vapores corrosivos a temperaturas muy elevadas. De cualquier forma siempre será necesario hacer un estudio detallado de las condiciones de operación de un horno con el objeto de saber cual es el tipo de refractario adecuado.

Una de las clasificaciones más sencillas que se da a los --
refractarios es la siguiente:

- A. Sílico - aluminosos
- B. Sílice.
- C. Básicos.
- D. Aislantes térmicos.
- E. Especiales.

En México hasta la fecha el grupo predominante ha sido el pri
mero, no sólo porque resulta ser los más baratos sino porque son los mas ver
sátiles siendo los más aplicables en la industria en general. Estos se cla-
sifican a su vez en productos de:

- a) Calidad baja
- b) Calidad intermedia
- c) Alta calidad
- d) Calidad superior
- e) 50% de alúmina
- f) 60% de alúmina
- g) 70% de alúmina

Principalmente esta clasificación se basa en su punto de fu-
sión o equivalente al cono pirométrico de la escala Orton, sin embargo, en
algunos casos se toman en consideración algunas otras propiedades.

Los refractarios del grupo B tienen un contenido superior al

95% de SiO_2 ; éstos están fabricados a base cuarzo y cal hidratada que los liga. Estos materiales tienen una excelente resistencia a la deformación - bajo carga en caliente, siendo una de sus limitaciones principales su elevada expansión térmica reversible y consecuentemente su baja resistencia - al choque térmico. Su uso más generalizado es en la industria del vidrio.

Los básicos son materiales de un punto de fusión muy elevado, siendo prácticamente inertes al ataque de escorias básicas. Estos materiales son fabricados a base de dolomita, combinaciones de magnesita y cromo o de cada uno por separado

Los aislantes térmicos del grupo D se clasifican atendiendo a su densidad y a su temperatura de servicio de acuerdo a la siguiente tabla.

<u>GRUPO</u>	<u>TEMPERATURA DE SERVICIO ($^{\circ}\text{C}$)</u>	<u>DENSIDAD (g/cm^3)</u>
16	845	0.54
20	1065	0.64
23	1230	0.77
26	1400	0.86
28	1510	0.96
30	1620	1.09
32	1730	1.52
33	1790	1.52

En el último grupo se comprenden todos los demás refractarios, entre los cuales tenemos los de 80% o más de alúmina, que son excelentes -- para servicios de temperaturas de operación muy elevadas y donde además se requieren piezas resistentes estructuralmente. Se incluyen también dentro -- de este grupo, los materiales de carburo de silicio, zirconio, grafito, nitruro de boro, etc.

En el presente trabajo se estudiarán únicamente algunos de los refractarios aislantes del grupo D ya que es en estos donde la conductividad térmica toma mayor importancia.

En la tabla II-1 se indican las características principales de los refractarios aislantes considerados.

TABLA-II-1.

PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS REFRACTARIOS AISLANTES COMERCIALES ESTUDIADOS.									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
EQUIVALENTE CONO PIROMETRICO (ORTON). DESIGNACION ASTM.C 24-54	✱	✱	✱	✱	✱	✱	✱	✱	✱
TEMPERATURA MAXIMA RECOMENDABLE °C	870	1095	1260	1425	1535	1260	1425	1520	1650
POROSIDAD APARENTE % DESIGNACION ASTM.C 20-46	+	+	+	6-24	60-68	30-60	63-73	63-75	67-73
ABSORCION DE AGUA % DESIGNACION ASTM.C 20-46	+	+	+	77-79	55-65	10-32	83	86-93	73-85
DENSIDAD $\frac{g}{cm^3}$ DESIGNACION ASTM.C 20-46	0.5-0.55	0.62-0.66	0.75-0.80	0.80-0.85	0.90-0.96	0.75-0.80	0.75-0.80	0.74-0.80	0.80-0.87
CONTENIDO DE ALUMINA %	11-13	10-12	20-32	48-50	59-61	32-37	41-43	60-63	62-65

✱ AUNQUE LA MEDIDA DEL CONO PIROMETRICO EQUIVALENTE ES CARACTERISTICA PARA MATERIALES REFRACTARIOS, NO SE ACOSTUMBRA DETERMINARLO PARA LOS LADRILLOS AISLANTES.

PERO SIEMPRE SE INDICA LA TEMPERATURA MAXIMA RECOMENDADA.

+ NO SE DETERMINARON POR NO SER APLICABLES LAS PRUEBAS CORRESPONDIENTES DE LA A.S.T.M.

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ	F.Q.	TESIS PROFESIONAL
	1970	
	Fig-II-1.	
	CALIDADES DE LADRILLOS ESTUDIADOS	

CAPITULO III

CONDUCTIVIDAD TERMICA.

TEORIA Y ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS.

CONDUCTIVIDAD TERMICA.

Cuando se calienta un horno, fluye hacia el exterior energía térmica que causa una diferencia de temperaturas entre las superficies internas y externas de paredes y techos. Parte de ésta energía térmica es almacenada en el revestimiento refractario del horno, y parte fluye a través de las paredes y bóvedas y es perdida al aire exterior por radiación y convección. La cantidad de calor que así se escapa es a menudo de considerable importancia en la economía de los procesos (18).

Conducción térmica (21) es el proceso por el cual el calor es transferido por interacción entre los átomos individuales, iones y moléculas. En los fluidos una molécula choca con otra que tiene menor energía cinética e imparte algo de su energía a ella. En los sólidos la energía es transferida por interacción entre los átomos vecinos.

De la ecuación de Fourier el coeficiente de conductividad térmica se define (32) como la cantidad de calor que fluye a través de la de la unidad de área, en la unidad de tiempo, si el gradiente de temperatura a través de esta área es la unidad.

Una alta conductividad térmica es deseable para los refractarios empleados en construcciones que requieren transferencias de calor a través del revestimiento, como en muflas, hornos con hogar de combustión inferior (30), paredes de hornos de subproductos de coke y en recuperadores (27); sin embargo, en la mayor parte de los hornos se necesitan materiales refractarios con un coeficiente de conductividad térmica bajo, para la conservación del calor.

CONDUCCION POR FONONES (21)

En los cuerpos sólidos hay dos procesos por los cuales la conducción del calor toma lugar. La energía se transfiere por el acoplamiento entre las vibraciones estructurales ó por movimiento electrónico y colisiones con los átomos. Para materiales dieléctricos, como lo són la mayor parte de los materiales cerámicos, los electrones no están libres para moverse a través de la estructura en concentraciones apreciables, y el calor se transfiere principalmente por vibraciones estructurales. Si las vibraciones estructurales fueran completamente armónicas no habría resistencia al flujo de calor; en cristales reales la naturaleza anarmónica de las vibraciones lleva a la atenuación de las ondas termoelásticas y a una conductividad térmica disminuida. En el desarrollo de una teoría para el proceso de conducción, las formas de vibración son cuantificadas y por analogía con los fotones de la teoría de radiación han sido llamados fonones por Peierls (22), que considera, fluyen a lo largo del gradiente térmico.

Ya que la conductividad térmica del cuerpo se determina por las colisiones inelásticas y dispersión de los fonones, es conveniente emplear un concepto de trayectoria libre media para este proceso. Por analogía con la teoría cinética, Debye (22) ha expresado convenientemente la conductividad térmica de un sólido como:

$$K = \frac{1}{3} s v l \quad - - - - - (1)$$

donde: s = calor específico por unidad de volúmen.

v = velocidad de onda elástica (o media de partícula).

y l = trayectoria libre media del fonón.

El análisis teórico de la conductividad térmica de los dieléctricos ha sido referido principalmente a determinar la trayectoria libre media para colisiones de fonones. Si las vibraciones fueran completamente armónicas a través de la estructura, no ofrecerían resistencia al flujo de fonones y la trayectoria libre media, así como la conductividad térmica de tales cuerpos sería infinita.

Las teorías actuales no permiten la predicción de la conductividad térmica a partir de los principios básicos.

EFFECTO DE ESTRUCTURA CRISTALINA.

Hay grandes variaciones en conductividad térmica para diferentes materiales cristalinos. Para una comparación realmente satisfacto--

ría los materiales deben ser comparados a temperaturas aproximadas a la temperatura característica Debye. El efecto de la celda estructural, sobre la conductividad, está dado por el grado de desviación de las vibraciones perfectamente armónicas. La anarmonicidad es afectada particularmente por los pesos atómicos relativos de los iones presentes. Sin embargo, además hay efectos secundarios relacionados a detalles de la estructura atómica, indicados por el hecho de que la conductividad térmica varía con la dirección de la propagación del calor en una estructura cristalina.

Los cristales con estructuras más complejas, tienen una mayor tendencia hacia la dispersión o desparramamiento térmico de las ondas estructurales y consecuentemente a disminuir la conductividad térmica. Los materiales como la mulita (21) con estructura compleja, tienen una trayectoria libre media baja para las ondas termoelásticas que se aproxima a las dimensiones de una celda unitaria a moderadas temperaturas, presentando una conductividad térmica menor que por ejemplo el aluminato de magnesio. El decremento de la trayectoria libre media abajo de este valor no es físicamente posible, así que la conductividad térmica viene a ser aproximadamente independiente de la temperatura a elevadas temperaturas.

SOLUCIONES SOLIDAS.

También, como en las estructuras cristalinas complejas, la conductividad térmica, se disminuye grandemente por la adición de un segundo componente en solución sólida. La adición de un segundo átomo en solución

sólida, provee centros adicionales de dispersión o desparramamiento (1).

En un cuerpo real operan varios mecanismos de desparramamiento que limitan la trayectoria libre media de los fonones. Klemens (22) ha mostrado que si más de un mecanismo está presente, la trayectoria libre media total debida a los diversos procesos puede ser dada por:

$$\frac{1}{l_u} = \frac{1}{l_t} + \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \quad \text{--- (2)}$$

l_u = trayectoria libre media total

l_t, l_1, l_2 , etc. = trayectoria libre media de los procesos individuales tan grandes como los procesos individuales son independientes uno del otro.

Esto es que las inversas de las trayectoria libre medias para diferentes - procesos de dispersión son aditivas.

Consecuentemente el efecto de desparramamiento por la impureza en solución sólida es mayor a bajas temperaturas y para estructuras - simples en las que el desparramamiento térmico es bajo y la trayectoria libre media, debido a este proceso es alta. El desparramamiento adicional para concentraciones bajas es directamente proporcional a la concentración en volumen del segundo componente adicionado. Esto significa que la resistividad ($1/k$), incrementa en proporción a la fracción en volumen adicionada. Además, el efecto de las impurezas sobre la resistividad es independiente de la temperatura, la trayectoria libre media del desparramamiento es independiente

de la temperatura. Puesto que, la trayectoria libre media debido al desparramamiento térmico decrece rápidamente con la temperatura, el efecto de las impurezas sobre la conductividad, depende grandemente del nivel de temperatura.

A temperaturas (22) arriba de la temperatura Debye, la trayectoria libre media por desparramamiento térmico es inversamente proporcional a la temperatura y la trayectoria libre media debida al desparramamiento por impurezas, como se mencionó, usualmente se considera independiente de la temperatura. La capacidad calorífica s , y la velocidad de onda v , aproximadamente son independientes de la temperatura, así que una buena aproximación de la resistividad térmica es dada por:

$$r = \frac{1}{k} = a + bt \quad - - - - - (3)$$

a y b = constantes.

Además, la inversa de la trayectoria libre media, es directamente proporcional a la concentración de centros dispersores, C , así que a una temperatura constante:

$$r = \frac{1}{k} = x + yc \quad - - - - - (4)$$

x y y = constantes.

El valor mínimo posible, como quiera, para la trayectoria libre media es el orden de las dimensiones de la estructura, así que el efecto de

las impurezas, alcanza un límite en algún valor bajo de conductividad térmica del orden de $0.003 \text{ cal. seg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ para óxidos, la cual no puede ser reducida (23). Este es el caso, por ejemplo, para vidrios (23). La efectividad de las impurezas en reducir la conductividad térmica depende de cuanto ellas desorganizan a la estructura.

Si una nueva fase se forma por la adición de un segundo componente, su efecto sobre la conductividad térmica dependerá de la conductividad relativa de la nueva fase, y de la distribución de la fase. Estas diferencias serán tratadas mas adelante.

CONDUCCION DE ENERGIA RADIANTE (1)

La transferencia de energía radiante, es un aspecto de la transferencia de calor en materiales cerámicos que viene a ser de primera importancia en algunas aplicaciones.

La energía radiante total emitida desde una superficie de área A a la temperatura T en un medio con un índice de refracción η está dada por:

$$q = \eta^2 \sigma E A T^4 \quad \text{--- (5)}$$

donde:

E = emisividad total.

σ = constante de radiación = $1.353 \times 10^{-12} \text{ qcal/seg/cm}^2/\text{grado}^4$.

La transferencia de calor entre dos placas grandes paralelas a diferentes temperaturas, cuando el medio entre ambas no absorbe energía está dado por:

$$q = \eta^2 \sigma E A (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{--- (6)}$$

donde:

$$E_E = \frac{E}{2} - E = \text{emisividad efectiva.}$$

con una emisión y reflexión entre ambas superficies incluida.

Los sistemas en los que el coeficiente de absorción es grande, - comparado a la distancia entre las superficies, exhiben un proceso de transferencia de calor consistente en que cada elemento de volumen absorbe energía emitida de la parte adyacente de la muestra de temperatura más alta, y la emite de tal manera que una transferencia neta de energía resulta de la absorción y reradiación en la dirección del gradiente de temperatura. Para un material completamente transparente ($a = 0$) no hay interacción de material y radiación. Para un sólido opaco ($a = \infty$) la transferencia de calor es enteramente por conducción. Para materiales intermedios, cada elemento - absorbe una parte de la radiación incidente y también emite energía radiante. A elevadas temperaturas ésto puede contar como una parte considerable - del calor total transferido.

Si consideramos un elemento de volumen y con un coeficiente de absorción a en un sólido teniendo un gradiente de temperatura, una cantidad I.a.v de la radiación de intensidad I, se absorbe por la parte calentada de la muestra, en el equilibrio se emite una cantidad igual de energía. Este proceso de absorción y reradiación, viene a ser importante en sólidos no - opacos, cuando se aumenta el nivel de temperatura. Para un sólido de espesor infinito, la conductividad térmica efectiva resultante de este proceso, está dada por la relación:

$$K_{\text{rad}} = \frac{16\sigma\eta^2 T^3}{3a} \quad \text{--- (7)}$$

y:

$$q = -K_{\text{rad}} A \frac{dt}{dx} \quad \text{--- (8)}$$

Puesto que la transferencia de calor por este proceso es proporcional a la tercera potencia de la temperatura, e inversamente proporcional al coeficiente de absorción, es un proceso importante a temperaturas moderadas (500 - 1000 °C) para vidrios y cristales simples y a altas temperaturas (arriba de 1500°C) para óxidos refractarios translúcidos. La conductividad aparente de cristales simples decrece a un mínimo y después se incrementa como resultado del efecto de transferencia de calor por radiación. La titania (TiO₂) policristalina tiene un coeficiente de desparramamiento mucho más alto y, consecuentemente el efecto del proceso de radiación, viene a ser importante hasta que se alcanzan temperaturas mucho más altas.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS VIDRIOS.

De la misma forma en que una estructura cristalina muy desordenada, así como la de la composición (Th₁U)_{2+x} tiene una baja conductividad térmica que es casi independiente de la temperatura, los vidrios - con su estructura completamente no cristalina está establecido que tienen - una trayectoria libre media para los fonones que está limitada por la estructura desordenada a un valor del orden de la separación interatómica. - Este valor de la trayectoria libre media es independiente de la temperatura, consecuentemente la conductividad térmica para vidrios es baja, incrementando ligeramente con la temperatura.

El efecto de cambiar de una estructura cristalina a una estructura desordenada, es ilustrado por el efecto de una radiación de neutrones sobre un cristal de cuarzo. La radiación desorganiza el material cristalino hasta perder con excesiva radiación todas las trazas de cristalinidad y la estructura se torna similar a la encontrada para un vidrio de silice. Los pasos intermedios en el proceso de radiación son acompañados por decrementos en la conductividad térmica. Estos cambios corresponden al progresivo incremento del desparramamiento de fonones, debido al desplazamiento de átomos en la estructura y a una consecuente disminución de la trayectoria libre media de los fonones.

El principal proceso de transferencia de calor a elevadas temperaturas a través de vidrios (arriba de alrededor de 500°C) es el de -- conducción de energía radiante mostrado por el rápido incremento en conductividad térmica con la temperatura. Esto significa que para altas temperaturas, la conductividad efectiva es alta, puesto que el coeficiente de transmisión es normalmente alto en vidrios.

La fase vítrea silicea normalmente presente en los materiales cerámicos quemados como una liga material tiene un valor de conductividad térmica similar al del vidrio sílice-óxido de sodio-óxido de calcio y -- al de sílice fundida.

CONDUCTIVIDAD TERMICA DE LOS MATERIALES CERAMICOS MULTIFASE.

Casi todos los materiales cerámicos están compuestos de --

mezclas de una o más fases sólidas con una fase porosa. La conductividad térmica resultante de esta mezcla depende del arreglo particular de las fases presentes.

El arreglo más simple es un sistema de dos fases en el cual hay una orientación regular de materiales y una estructura de losas paralelas como la que se ilustra en la fig. III-1a. Otras distribuciones idealizadas ilustradas son:

- b) una fase mayor continua con inclusiones esféricas de una fase secundaria y
- c) Partículas aproximadamente esféricas de una fase mayor discontinua en una fase continua secundaria.

La conductividad térmica para un arreglo del tipo de la fig. III-1a. depende de la conductividad relativa de los dos materiales y de la dirección del flujo de calor. Si el flujo de calor es paralelo al plano de las losas, se tiene un arreglo equivalente al de un circuito eléctrico paralelo. Todas las placas tienen el mismo gradiente térmico y la mayor parte del flujo de calor es a través del mejor conductor, así la conductividad está dada por:

$$K_m = V_1 K_1 + V_2 K_2 \quad \text{--- (9)}$$

donde: V_1, V_2 = fracción en volumen de cada componente.

En este caso la conducción de calor es dominada por el mejor conductor, y si K_1 es mucho mayor que K_2 , entonces K_m es aproximadamente igual a $V_1 K_1$. En contraste, si las losas tienen un arreglo normal al flujo de calor, son equivalentes a un circuito eléctrico en serie. El flujo de calor a través de cada losa es igual, pero los gradientes de temperatura son diferentes;

la conductividad total está dada por:

$$\frac{i}{K_m} = \frac{V_1}{K_1} + \frac{V_2}{K_2} \quad \text{--- (10)}$$

$$K_m = \frac{K_1 K_2}{V_1 K_2 + V_2 K_1} \quad \text{--- (11)}$$

En este caso la conducción de calor es dominada por el conductor más pobre y si K_1 es mayor que K_2 , K_m es aproximadamente igual a K_2/V_2 .

La estructura ilustrada en la fig. III-1b, es idealizada pero es buena aproximación para una mezcla con menos de aproximadamente 10% de una segunda fase dispersada. Para concentraciones mas altas es esencial usar ecuaciones derivadas para inclusiones esféricas al azar o partículas esféricas separadas. Relaciones aplicables a esta mezcla han sido derivadas por varios autores de la relación de Maxwell-Eucken; para una matriz continua, con una conductividad K_c y con una fase esférica dispersada K_d ; la conductividad de la mezcla está dada por:

$$K_m = K_c \frac{1 + 2V_d \frac{1 - \frac{K_c}{K_d}}{2 \frac{K_c}{K_d} + 1}}{1 - V_d \frac{1 - \frac{K_c}{K_d}}{\frac{K_c}{K_d} + 1}} \quad \text{--- (13)}$$

Cuando K_c es mucho mayor que K_d , entonces:

$$K_m \approx K_c \frac{1 - V_d}{1 + \frac{V_d}{2}} \quad \text{--- (14)}$$

Y si $K_c \ll K_d$, entonces:

$$K_m \approx K_c \frac{1 + 2V_d}{1 - V_d} \quad \text{--- (14)}$$

Una ecuación general empírica que puede ser usada para una variedad de mezclas es:

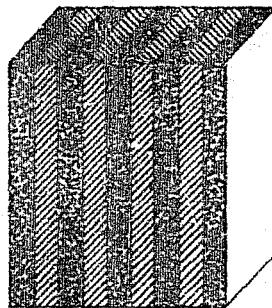
$$K^n = V_i K_i^n \quad \text{--- (15)}$$

donde: n = es un exponente entre $+1$ y -1 .

V_i = fracción de volumen ocupada por la fase i .

Las correlaciones empíricas de datos experimentales frecuentemente se hacen más simples usando la Ec' 15 con un exponente correspondiente a los resultados experimentales.

Los resultados en sistemas particulares dependerán de los detalles de la microtextura.

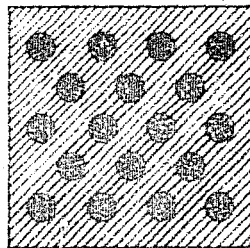


(a)

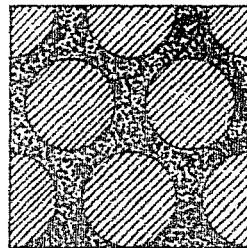
(a) - Placas Paralelas.

(b). Fase Continua Mayor.

(c). Fase Continua Menor.



(b)



(c)

TESIS PROFESIONAL	
F.Q. 1970	Fig.-III-1.
	CONDUCTIVIDAD TERMICA EN SISTEMAS IDEALIZADOS DE DOS FASES.
FERNANDO MONREAL HERNANDEZ	

LA POROSIDAD DE LOS MATERIALES CERÁMICOS.

Antes de 1939, Austin J.B. (2) determinó de acuerdo con los resultados obtenidos de sus investigaciones que las principales variables - que afectaban la conductividad térmica de materiales cerámicos y no metálicos eran:

- 1) El espacio hueco total
- 2) La composición química
- 3) La temperatura de servicio
- 4) El tiempo y temperatura de quemado.

Además (21) de las fases sólidas presentes, casi todos los materiales cerámicos contienen una cierta porosidad. El efecto de la porosidad sobre la conductividad térmica de un material, depende de la conductividad - de los poros. A bajas temperaturas la porosidad tienen una conductividad -- térmica mas baja que para cualquiera de las fases sólidas.

Franch y Kingery (16) estudiaron el efecto de los poros isométricos aproximadamente esféricos y de poros cilíndricos asimétricos sobre la conductividad térmica de alúmina, grafito y níquel; encontrando que la - orientación del poro afectó profundamente las determinaciones para una po-rosidad determinada. A temperaturas alrededor de 500°C la conductividad de una muestra porosa en cualquier dirección es igual a la conductividad del - sólido por uno menos la fracción porosa:

$$K_p = K_s (1 - P_c) \quad \text{--- (16)}$$

donde:

K_p = conductividad térmica de la muestra porosa.

K_s = conductividad térmica del sólido.

P_c = fracción porosa.

Sin embargo, si la fase porosa es continua como aislantes - fibrosos, la conductividad total sigue la Ec. 11 y la conductividad real del poro debe ser considerada. Además de la conductividad del aire presente, -- (la convección sólo es importante en poros de varios milímetros en diámetro), demostrado por Waddams A.L. (41), la radiación a través de los poros contribuye a la transferencia de calor a elevadas temperaturas. Así mismo, Loeb - (24) estableció que la conductividad térmica de un material poroso es debida a los procesos de conducción y radiación, presentando en su teoría la relación de la conductividad efectiva a la conductividad del material sólido, a la emisividad de la superficie de los poros y a la medida, forma y distribución de los mismos.

La conductividad efectiva de una fase porosa puede ser calculada cuando el gradiente de temperatura es pequeño. En la Ec. 6, el término $(T_1^4 - T_2^4)$, puede ser factorizado a: $(T_1 - T_2) (T_1 + T_2) - - - - -$ $(T_1^2 + T_2^2)$, como el gradiente es pequeño, $T_1 + T_2$ es aproximadamente igual a $2T_m$, y $T_1^2 + T_2^2$ será también aproximadamente $2T_m^2$, donde m es la temperatura media. De la Ec. 6:

$$q = 4 \eta^2 \sigma E_E A T_m^3 \Delta T - - - - - (17)$$

De tal forma que la transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperaturas para pequeñas diferencias, a un nivel específico. Si la transferencia de calor es considerada al través de una cavidad plana con lados paralelos y espesor dp , una conductividad efectiva puede definirse por la relación:

$$q = -K_{eff} A \frac{\Delta t}{dp} \quad (18)$$

Comparando las ecuaciones 17 y 18 podemos obtener una relación para la conductividad efectiva:

$$K_{eff} = 4 dp \eta^2 \sigma E_E T_m^3 \quad (19)$$

El efecto de radiación sobre la conductividad es directamente proporcional a la medida de poro y a la tercera potencia de la temperatura. Consecuentemente poros de gran tamaño contribuyen a incrementar la conductividad a elevadas temperaturas; poros de medida pequeña permanecen como buenas barreras al flujo de calor.

El efecto total de porosidad sobre la conductividad también depende de la emisividad, la cual está en un margen de 0.3 a 0.5 para la mayoría de los materiales óxidos, mientras que para carburos y grafito es de 0.7 a 0.9.

En los materiales aislantes el efecto de la porosidad y tamaño de poro se desarrolla de acuerdo a lo anterior; los poros pequeños

contribuyen disminuyendo la transferencia de calor y los grandes deben realmente incrementar la conductividad a elevadas temperaturas. Consecuentemente, el tamaño de poro es particularmente importante como un rasgo característico de la microtextura en la determinación de las propiedades de transferencia de calor a elevadas temperaturas. Para un óptima resistencia térmica es deseable tener los poros pequeños y la fase porosa continua. Esto es la razón de la dificultad en la manufactura de materiales refractarios aislantes satisfactorios para altas temperaturas, pues los poros finos en este tipo de arcillas refractarias se ocluyen a elevadas temperaturas. Para hacer un producto estable el tamaño de poro tiene que ser moderadamente grande y consecuentemente las propiedades aislantes son menos satisfactorias para el rango de elevada temperatura.

Barret, Vyse y Green en un estudio (4) (5) sobre la influencia de la textura sobre el poder de aislamiento o conductividad térmica de materiales aislantes, concluyen que también en los sólidos porosos son de gran importancia la proporción, forma, orientación y continuidad de los espacios vacíos y que para una línea de materiales la conductividad térmica es proporcional a la porosidad. De las medidas de conductividad térmica y permeabilidad al aire sobre 13 calidades de (5) ladrillos aislantes, en el sentido perpendicular a ambas caras de 229 X 114 mm (9 X 4 1/2- pulg.) y -- 229 X 76 mm (9 X 3 pulg) de los mismos, se concluyeron que estas propiedades se encuentran interrelacionadas.

En la determinación de la conductividad térmica de materiales cerámicos complejos que contienen gran número de fases más la porosidad,

se obtienen mejores resultados determinando la conductividad de la fase sólida de acuerdo con la distribución de fase y considerando entonces la estructura y distribución de la fase porosa presente y su conductividad efectiva. Estas variaciones dan un amplio rango de conductividades térmicas para productos cerámicos dependientes de su composición y microestructura.

A temperaturas (27) atmosféricas, la conductividad térmica de un vidrio es considerablemente menor que la del material cristalino de la misma composición. Con el incremento de temperatura, la conductividad de vidrios tiende a aumentar, en tanto que la del material cristalino tiende a decrecer. Sin embargo, en cuerpos refractarios constituidos de agregados cristalinos con una cantidad limitada de vidrio, este efecto es a menudo obscurecido por otros factores.

La conductividad de un refractario en servicio a altas temperaturas puede cambiar como resultado de una reacción química, la cual forma una fase líquida o soluciones sólidas.

Estos factores de estructura, dependencia con la temperatura y cambios posibles durante el uso, deben ser considerados en el desarrollo y aplicación de materiales cerámicos como conductores o aislantes térmicos.

EFFECTO DE LOS GASES EN LAS ATMOSFERAS
DE TRABAJO SOBRE LA CONDUCTIVIDAD DE
REFRACTARIOS.

Young R.C., Hartwing F.J. y Norton C.L. (45) han estudiado la forma en que la conductividad térmica efectiva de refractarios porosos puede ser substancialmente cambiada por el caracter del gas en la atmósfera en la cual son empleados. Esto es de considerable importancia en muchas áreas, así como en la industria petroquímica y el diseño de hornos metalúrgicos de tratamiento térmico donde los refractarios son usados en una amplia variedad de gases diferentes al aire. Los materiales probados por los investigadores anteriormente mencionados, fueron cuatro tipos de ladrillo aislante y uno denso, todos a base de caolín, en atmósferas de argón (un gas de baja conductividad), helio (un gas de alta conductividad) y aire.

NonKen, Wygant y Crowley han investigado y hecho medidas sobre refractarios comerciales en gases diferentes al aire. NonKen investigó ladrillos aislantes, concretos refractarios y polvo de MgO en gas "crackeado" para ciudad y gas nitrógeno. Wygant y Crowley, investigaron la conductividad térmica de concreto refractario en helio a diferentes presiones.

Como conclusión de diversos trabajos estudiados, puede decirse que, atmósferas ricas en hidrógeno y helio pueden incrementar radicalmente las conductividades térmicas de refractarios porosos. A bajas pre-

siones y temperaturas la magnitud del efecto, se presume que depende de la composición del gas y la estructura del refractario. A elevadas presiones el efecto es mucho mayor para los mismos materiales, tal vez debido a la rotura de las paredes de algunas celdas y consecuentemente incremento de la permeabilidad del gas.

La conductividad térmica del hidrógeno es aproximadamente siete veces mayor que la del aire. Consecuentemente, la presencia de este gas en los poros de un producto incrementa la velocidad de flujo de calor a través del refractario. Con una atmósfera de 100% de hidrógeno, el flujo de calor a través de un ladrillo aislante u otros refractarios con una porosidad similar, sería dos y media veces la de una atmósfera de aire. A bajas concentraciones de hidrógeno, el efecto sería menor, siendo la relación casi directamente proporcional al porcentaje de hidrógeno presente.

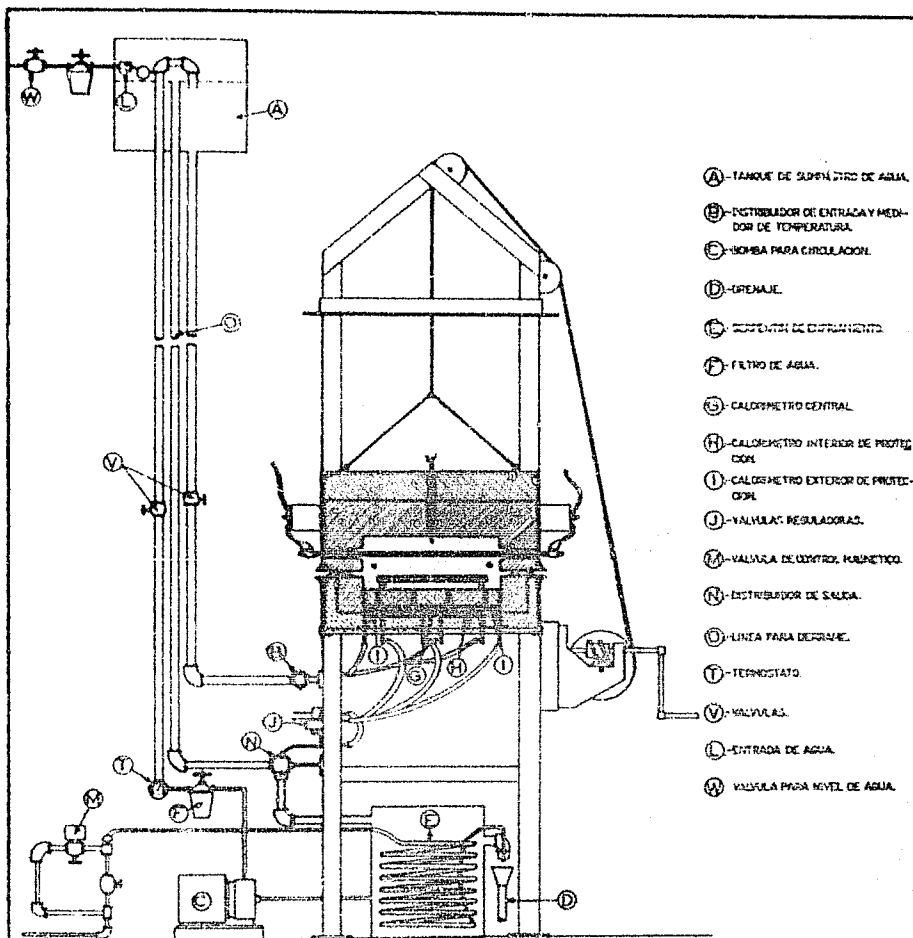
Las ecuaciones de Loeb (modificada), Ribaud, Russell y Eucken (44), parecen producir resultados correctos con error experimental para los efectos de atmósferas altamente conductoras, sobre las conductividades térmicas de refractarios porosos.

MÉTODOS Y APARATOS PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

La mayor parte de las pruebas a elevadas temperaturas sobre la conductividad térmica de refractarios han sido realizadas ajustando un flujo uniforme paralelo de calor, normal a las caras de una placa. La cantidad de calor fluyendo, es medida por un calorímetro de agua y el espesor y área de la muestra son conocidos y puede decirse que varían para cada diseño, variando también la forma de medición de las temperaturas de cara fría y cara caliente en la muestra.

No es fácil establecer un flujo uniforme por medios sencillos y puede alcanzarse solamente tomando cuidadosas prevenciones. Además, las temperaturas sobre los planos isométricos deben ser leídas con mucho cuidado. Al mismo tiempo un flujo de equilibrio debe ser establecido para una temperatura de cara caliente constante por un intervalo de tiempo largo. Quizás ninguna otra medida física es acosada por tantas dificultades. Los trabajos por Norton (29) y Patton y Norton (31) son una excelente discusión acerca de estos factores, sus errores y su corrección.

En la fig. No. III-2 se describe un aparato del tipo mencionado, el cual fué primeramente construido en el laboratorio de refractarios



TESIS PROFESIONAL	
F.Q. 1970	Fig-III-2.
	APARATO PARA LA DETERMINACION DE CONDUCTIVIDAD TERMICA.
	A.S.T.M. C 207-68.
FERNANDO MONTEAL HERNANDEZ	

de Babcock and Wilcox Company y posteriormente adaptado por el Método Standard del ASTM C 201-47. Las características especiales de este aparato son la fuente de abastecimiento de agua a temperatura constante, el control de temperatura del horno para mantener la temperatura en una corrida de 24 horas con una variación de $\pm 2^{\circ}\text{F}$ (aprox. 1°C), y los pasos de flujo en el calorímetro.

A continuación se describen las principales características de los aparatos diseñados por algunos investigadores, basados en el arreglo -- descrito.

Antes de 1935, Filolenko y Finck (14), realizan pruebas en un aparato calentado con resistencias sobre materiales tanto de baja como de alta conductividad, el cual podía operar hasta 1100°C , sin embargo, en pruebas sobre materiales similares e inclusive los mismos, se obtienen discrepancias hasta de 50 a 100%, por lo que se ha corregido con objeto de obtener un verdadero equilibrio térmico permitiéndose además en el nuevo aparato un fácil reemplazo, tanto de los elementos calentadores como de los termopares. Fué publicado en 1937 en el Journal of the American Ceramic Society (15).

Halm y Lapoujade (19), obligados por el espacio de que disponían en su laboratorio, diseñaron un aparato compacto, el cual usa muestras de $110 \times 110 \times 60$ mm., una superficie de la cual se calienta por una resistencia de Kanthal, manteniendo sobre la otra un calorímetro de agua. Un anillo de protección hecho del mismo refractario se acopla al conjunto con una sección separada del calorímetro en contacto con él. Una exactitud del

12% se obtiene sobre una misma muestra.

En 1950 se publicó (26) con el nombre del método de la "Placa Plana" el diseño de un nuevo aparato, el cual había sido probado exitosamente en la determinación de valores de conductividad para ladrillos aislantes, de sílice y de cromo magnesita a temperaturas medias de 1100°C . El aparato utiliza una placa de prueba de $229 \times 229 \times 76$ mm. (9 x 9 x 3 pulg.) aislada totalmente. El medio de calentamiento se localiza inmediatamente abajo de la sección de prueba y un calorímetro de agua arriba del aislamiento cubriendo la parte superior de la sección de prueba. El diseño lo constituyen termopares y calentadores periféricos para minimizar las pérdidas por calor y los efectos laterales en el block de prueba. Los medios calentadores también en este caso fueron fabricados de Kanthal y 16 gauge, resistencias que fueron operadas con éxito hasta 1200°C .

El diseño de un horno para ser empleado a temperaturas de - 200 a 1540°C es publicado en 1954, en el cual un horno eléctrico provee una fuente uniforme de calor sobre la cara caliente de un ladrillo rectangular de 229 mm. (9 pulg.) y un calorímetro de cobre con sus protecciones se coloca en la cara de menor temperatura (7).

Clements (12) presenta un aparato que utiliza placas de - - $229 \times 229 \times 76$ (9 x 9 x 3 pulg.) para temperaturas hasta de 1350°C , empleando un calorímetro de agua, pretende conseguir un flujo de calor normal a través del panel con el empleo de calentadores periféricos.

Sutton (39), publica en 1960 un aparato diseñado para medir la conductividad térmica de materiales cerámicos y metales a 1200°C , ya sea por un método directo o por el método de comparación. Este aparato fué diseñado originalmente por G.B. Wilkes, profesor de ingeniería del M. I. T., -- efectuando Sutton, varias modificaciones sobre él, incluyendo el regulador de temperatura de agua y la forma de conectar los termopares en la unidad. Esencialmente requiere 4 componentes básicos:

- 1) Una fuente de agua a temperatura constante a una velocidad de flujo constante.
- 2) Una fuente de calor para mantener la temperatura constante.
- 3) Un calorímetro de agua.
- 4) Un sistema para registrar el gradiente de temperatura en la muestra y - cambio de temperatura en el calorímetro.

Un flujo constante se mantiene por el cabezal de un recipiente localizado 3.05 m (10 pies) arriba del calorímetro, fluyendo el agua a través de 15.25 m (50 pies) de tubo de cobre enroscado en el interior de un baño de agua a temperatura constante. La fuente de calor de temperatura constante es un block de grafito que tiene cuatro elementos de calentamiento eléctrico de carburo de silicio, conectados en serie, empleando un regulador de voltaje para controlar la fuente de 115 volts. c.a. Dos transformadores variables conectados en paralelo, controlan la corriente que se mide por dos amperímetros; la temperatura del block puede mantenerse con 0.5°C de exactitud en un periodo de 48 horas a temperaturas abajo de 300°C , mien-

tras que a temperaturas considerablemente altas (1000°C), se registran desviaciones hasta de 5°C , en un periodo de 12 horas. La muestra es usualmente una varilla de 229 mm (9 pulg.) de longitud y 19 mm ($3/4$ pulg.) de diámetro, ésta encaja en un hoyo del block calentador. Un cilindro protector concéntrico a la muestra y del mismo material, ayuda a mantener un calor unidireccional a lo largo del eje de la muestra. Un calorímetro de cobre se coloca sobre el extremo menos caliente de la muestra, en el cual puede ésta conectarse perfectamente, para proveer un buen contacto térmico. Dos termopilas (5 termopares en serie) de cobre - constantan, se usan para medir la diferencia de temperatura en el agua entrando y saliendo del calorímetro. La precisión observada de éste aparato, es del 3% en el rango de temperaturas de 30 a 300°C y alrededor de 3 a 10% en el rango de 300 a 1200°C ; siendo el tiempo necesario para una corrida de 10 a 24 horas para temperaturas de bloque de calentamiento de 400°C , mientras que se requieren de 24 a 48 hrs. para alcanzar el equilibrio a 1200°C y para cubrir totalmente el margen de temperaturas hasta 1200°C deben realizarse dos corridas requiriendo de 35 a 72 horas.

Desde 1962, Ruh y McDowell (36), han venido efectuando bastantes estudios sobre la conductividad de materiales refractarios de alta alumina, arcilla refractaria, sílice, cromo, magnesita, zirconio, carburo de silicio y ladrillos aislantes en un aparato con una modificación al de ASTM C 201-47, cubriendo temperaturas entre los 200 y 2000°F . Esta modificación fué motivada por el hecho de que el aparato iba a ser instalado en un segundo piso, por lo que sería muy molesto usar una columna de agua, aplicando -

presión sobre un tanque para obtener una presión de agua constante, equivalente a 3.05 m. (10 pies) sobre la válvula del calorímetro. Por lo que se usó una válvula de control de diafragma para mantener la presión de agua en el calorímetro, ésta válvula requiere le sea suministrada una presión de aire a 1.4 Kg/cm^2 (20 lb/pulg.^2), y regula la presión del agua de 0.21 a 1.05 Kg/cm^2 (3 a 15 lb/pulg.^2). Actualmente, la unidad opera a 0.53 Kg/cm^2 (7.5 lb/pulg.^2), que equivale aproximadamente a 5.2 m de H_2O (17 pies de H_2O).

La conductividad térmica se mide también por otros sistemas, así un espécimen cilíndrico es conveniente algunas veces, teniéndose un método denominado del "tubo de prueba", en el cual la muestra cilíndrica se calienta interiormente por medios eléctricos y se mide la temperatura en sus caras, interior y exterior. En éste sistema las pérdidas por calor en los bordes son minimizadas, ya que el área de las orillas es pequeña comparada con el área exterior, pero es difícil obtener refractarios de la forma apropiada. El método cilíndrico ha sido usado por Holler y otros investigadores para pruebas a elevadas temperaturas.

El método Northrup, consiste en pasar un flujo uniforme lineal de calor a través de dos capas de refractario en contacto. Si la caída de temperatura se conoce a través de cada capa y la conductividad es conocida para un material, la conductividad del otro puede ser determinada, ya que el calor transferido por ambos es el mismo, aplicándose la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Caída de Temp. en el espécimen A}}{\text{Caída de Temp. en el espécimen B}} = \frac{K_B}{K_A} \quad \text{--- (20)}$$

donde:

K_A = conductividad térmica del material A

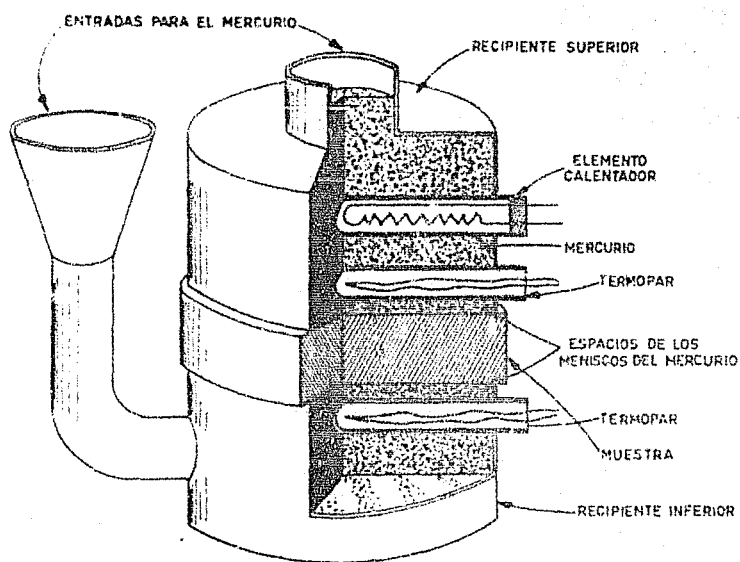
K_B = conductividad térmica del material B

Dinger C., Kind A., Schutz W. y Dietzel A. (13) diseñaron un instrumento que permite buena aproximación y rapidez en la medida de conductividades térmicas de materiales refractarios hasta 1400°C . El principio fundamental consiste en el uso de un cilindro hueco calentado. El cilindro - está formado por siete u ocho discos del material de prueba colocados uno - sobre el otro y barrenados a través de su centro para la inserción del elemento calentador. Este consiste de una barra de carbón rodeada de polvo de carbón (mineral) y colocado en un tubo de silimanita. El tubo se cierra con unas válvulas de diseño especial de grafito. Rodeando el cilindro hueco hecho con las piezas de prueba se coloca el calorímetro de agua, que consiste de dos compartimentos conectados por un pasaje espiral que sirve para medir el flujo de agua. La temperatura del agua se indica a la entrada y a la salida. Para medir la temperatura interior y exterior, la columna de muestras lleva insertados termopares de Pt - Pt/Rh, en las superficies interiores y de Ni - Ni/Cr en las exteriores. La relación de los radios de los cilindros tiene marcado efecto en la exactitud obtenida, siendo la relación adecuada de 4 (del radio exterior del cilindro al radio interior del mismo).

El calorímetro de Winckler (43) consiste de dos corazas esféricas concéntricas de platino, es conveniente una muestra también esférica - ajustada en el centro de la coraza interior. El calor se suministra elec-

tricamente al centro de la muestra. El calorímetro se encuentra dentro de un horno esférico eléctrico y la conductividad térmica se determina de las temperaturas tomadas del interior y exterior de la muestra cuando se ha alcanzado un régimen constante de flujo de calor. Con éste aparato también el calor específico se puede obtener notando el aumento de temperatura de la muestra con una cantidad determinada de calor.

En 1964 con la finalidad de estudiar los efectos de radiación en materiales cerámicos, Bopp (6), desarrolló un método para medir la conductividad térmica. El empleo de éste aparato permite el uso de pequeñas muestras, las cuales son colocadas entre contactos de mercurio; el bloque superior es calentado eléctricamente y el inferior se mantiene a una temperatura lo mas baja que sea posible, y la conductividad térmica se calcula de acuerdo a la potencia eléctrica requerida para producir una diferencia de temperatura determinada entre los bloques. La resistencia del aparato en serie con el espécimen es determinada comparando los resultados para especímenes de diferente espesor. Las limitaciones y fuentes de error del método, son definidas por Ioffe e Ioffe (42). La novedad de éste método es el uso de contactos de mercurio en lugar de los bloques de cobre empleados con el mismo principio. La exactitud observada es de 3 a 10% para conductividades del rango de 10^{-3} a 10^{-1} cal por seq. $\text{cm}^{-1}^{\circ}\text{C}$. Las principales características de este instrumento se muestran en la Fig. III-3. El recipiente superior se sostiene en posición por unas bandas de hule, las cuales no se muestran. Los termopares se colocan soldados dentro de sus capuchones hechos de tubos de acero inoxidable de 1/16 pulg. de diámetro. El elemento calentador es un rollo de alambre de cromel, dentro de un pequeño tubo de



CELDA PARA DETERMINACION DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA.

TESIS PROFESIONAL	
F.Q. 1970	Fig.-III-3.
	APARATO DE BOPP PARA DETERMINAR- CONDUCTIVIDADES Y LOS EFECTOS DE RA- DIACION EN MATERIALES CERAMICOS.
FERNANDO MONREAL HERNANDEZ	

vidrio. La conductividad térmica k , de una muestra delgada es dada por:

$$k = \frac{2}{d} (A/q - 1/h)^{-1} \quad (21)$$

donde:

d = espesor de la muestra

A = Área de contacto de un lado de la muestra con mercurio.

q = es la potencia de calentamiento dividida por la diferencia de temperaturas en el estado estacionario.

$1/h$ = corrección para el gradiente térmico entre los termopares y las superficies del espécimen.

Se ha usado un método diferente para determinar la conductividad térmica haciendo uso de la ecuación de Fourier para flujo de calor no uniforme.

Si se consideran las ecuaciones:

$$t = \frac{2 t_0}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\chi}{2 h \sqrt{\tau}} e^{-\beta^2} d\beta \quad (22)$$

$$\frac{h^2}{\pi^2} = \frac{k}{\rho c} \quad (23)$$

Se notará que el valor de la difusividad h^2 puede ser determinado estudiando los cambios de temperatura en un material dado. Del valor de h , la conductividad térmica puede calcularse si la densidad y calor específico son conocidos, propiedades que no son difíciles de medir. Este método ha sido efectuado prácticamente aplicando a una superficie del material de prueba, una temperatura variando armónicamente. La temperatura es entonces registrada en el interior del sólido a varias distancias de la superficie y de estos valores se calcula h . Nótese que este método no requiere una medida de la cantidad de calor fluyendo. Por otro lado, se encuentran las mismas dificultades de los otros métodos de asegurar un flujo lineal de calor.

Otro método de medida de éste tipo, consiste en computar la difusividad midiendo el cambio de temperatura sobre el eje de un cilindro, - la temperatura exterior del cual es repentinamente variada apagando el sistema calefactor. Este método es conveniente para especímenes pequeños.

CAPITULO IV.

DESCRIPCION DEL APARATO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

El aparato construido para la medición de la conductividad térmica de materiales refractarios, fué diseñado por Clayton y Whyman (11) en 1965 en los Laboratorios de Investigación y Desarrollo, Lathom., en su sección de Refractarios.

La decisión de su construcción en México, obedeció a las necesidades del Laboratorio de Investigación, Desarrollo y el Control de Calidad de los productos de Compañía Mexicana de Refractarios A.P. Green y la elección de este diseño, estuvo determinada por las investigaciones y un estudio efectuado del método en E.U.A. en los Laboratorios de Investigación de A.P. Green Refractories Co. (40).

Fundamentalmente el aparato está constituido por un horno que calienta electricamente una muestra de prueba en contacto con un calorímetro metálico. El aparato está total y debidamente aislado y el calorímetro protegido convenientemente para asegurar un flujo de calor estacionario, lineal y paralelo. El funcionamiento del aparato es gobernado por un sistema de instrumentación, pudiéndose programar las pruebas, controlar eficazmente el proceso y registrar algunos datos.

El conocimiento de la caída de temperatura a través del

calorímetro, permite el cálculo de flujo de calor a través de éste, que es el mismo que fluye a través de la muestra en estado estacionario, y de este valor y la caída de temperatura a través de la muestra, el valor de la conductividad térmica del material probado puede ser calculado.

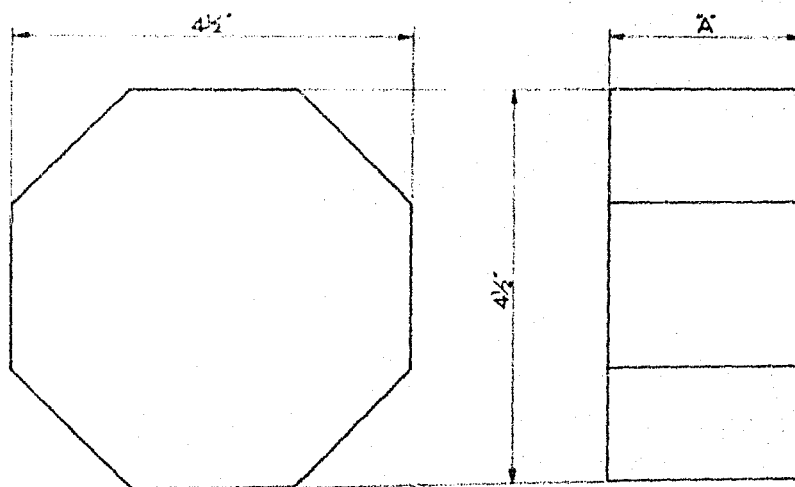
Las muestras de prueba utilizadas, fueron cortadas en forma octagonal, en lugar de los discos sugeridos por los diseñadores del método, - por ser mas fáciles de obtener de ladrillos estandard, como se indica en la Fig. No. IV-1. Puede verse que las piezas son octágonos de 48 mm (1 7/8 pulg.) por lado, los cuales pueden ser cortados de piezas normales de fabricación de 229 x 114 mm. (9 X 4 1/2 pulg.), teniendo espesores adecuados. Estas forman la cubierta superior de un horno de resistencias de carburo de silicio en - forma de barras.

Un calorímetro metálico de 64 mm (2 1/2 pulg.) de diámetro y - - 33 mm (1 1/2 pulg.) de espesor es colocado en el centro de la superficie de la muestra de prueba y está rodeado por dos anillos protectores aislados entre sí y del calorímetro. Este y los anillos protectores son del mismo metal, para el cual la conductividad térmica es conocida con exactitud.

La comparación de resultados con los obtenidos por otros investigadores, ha mostrado muy buena concordancia.

A continuación se mencionan algunas de las ventajas que éste aparato puede ofrecer sobre el requerido por el método estandard de prueba - -

ESPESORES DE MUESTRA RECOMENDADOS	
Dimensión "A"	Materiales
$\frac{1}{4}$ "	Material Aislante
2	Material Refractorio



MUESTRA PARA EL APARATO DE CONDUCTIVIDAD TERMICA. DIMENSIONES Y FORMA.

TESIS PROFESIONAL	
F.Q.	Fig-IV-1.
1970	MUESTRA EMPLEDA PARA LAS DETERMINACIONES
FERNANDO MONTEALBA HERNANDEZ	

del ASTM, Designación C 201-68, Fig. No. III-2.

- a) Procedimiento de operación más sencillo.
- b) El volúmen ocupado por todas las instalaciones necesarias es inferior.
- c) El diseño usado evita el complicado sistema de circulación de agua requerido por el aparato del ASTM:
 - 1) No necesita de un cabezal para el suministro de agua - al calorímetro a presión constante.
 - 2) No necesita de tanques de almacenamiento de agua.
 - 3) No requiere bombas, filtros, válvulas y líneas de control y flujo de agua.
- d) Solamente una pieza de una forma se requiere del especimen de prueba y de dimensiones inferiores.
- e) Un procedimiento general es utilizado para las determinaciones tanto de ladrillos refractarios, como aislantes, - plásticos refractarios o concretos.
- f) El cambio de muestras es mucho más sencillo y rápido.

Como ha quedado establecido anteriormente, el problema de la medición de conductividad térmica de materiales refractarios ha producido -- una gran variedad de aparatos de diferentes tipos, en los cuales se ha perseguido una solución práctica. Muchos, aunque capaces de producir resultados precisos, son muy complicados para su uso en rutinas de laboratorio, mientras que otros, siendo muy simples, carecen de suficiente precisión.

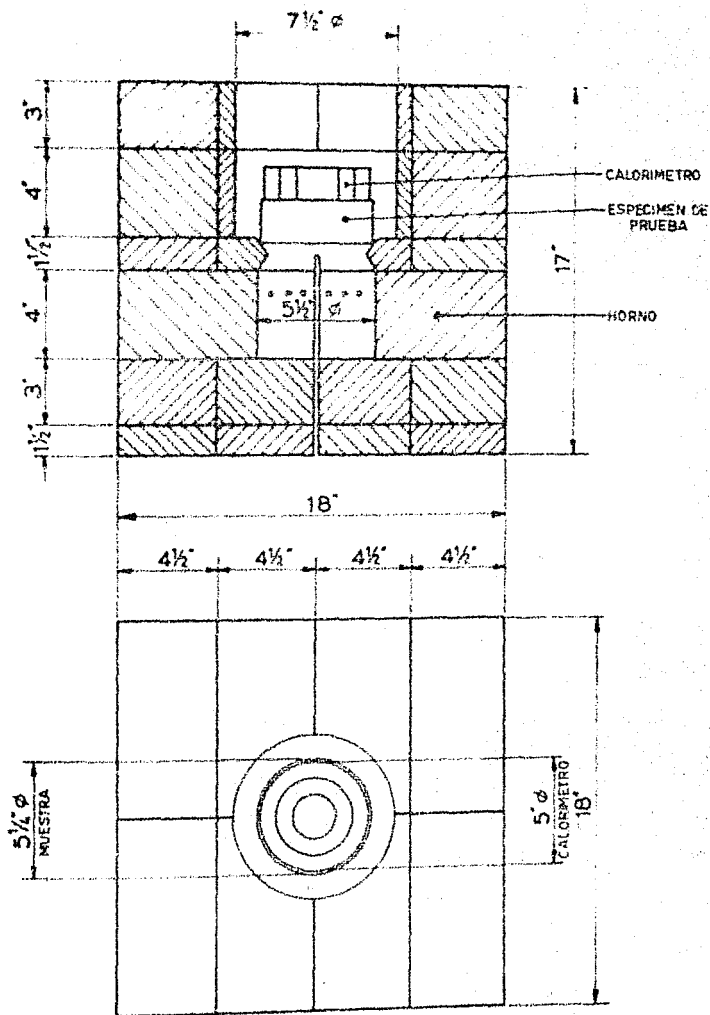
El método descrito en seguida, está basado en el principio usado por Griffiths y Challenor (17) y ha sido desarrollado específicamente para facilidad y simplicidad en su construcción y manejo, consecuentemente requiriendo demandas mínimas sobre el tiempo de operación. A pesar de lo anterior, suficiente exactitud es alcanzada para los propósitos normales. - Este aparato es adecuado para la investigación de productos refractarios des de el tipo de materiales aislantes hasta productos electrofundidos (de valores bajos y altos de conductividad térmica respectivamente) y para temperaturas de cara caliente de 300°C (572°F) a 1500°C (2732°C), siendo la cantidad de material requerido para las pruebas comparativamente pequeña.

Los calentadores laterales y de protección existentes en varios diseños muy precisos pero complicados, han sido eliminados y la linearidad del flujo de calor a través de la sección relevante de la pieza de prueba se logra mediante un cuidadoso diseño. Para evitar dificultades inherentes en el balanceo de las velocidades de flujo en los aparatos con calorímetros de agua un sistema compacto metálico ha sido usado y para asegurar la linealidad del flujo de calor a través de este último, un arreglo con un doble anillo protector es utilizado.

APARATO.-

El diseño del horno se muestra en la figura No. IV-2.

La fuente calorífica consiste de seis elementos de calentamiento de carburo de silicio con una zona efectiva de 178 mm (7 pulg.) de



TESIS PROFESIONAL

F.Q.
1970

Fig-IV-2.

CONJUNTO QUE MUESTRA LA CONSTRUCCION
DEL HORNO CON LA BRILLO REFRACTARIO AIS-
LANTE, Y INSTALACION DEL ESPECIMEN DE -
PRUEBA Y CALORIMETRO

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

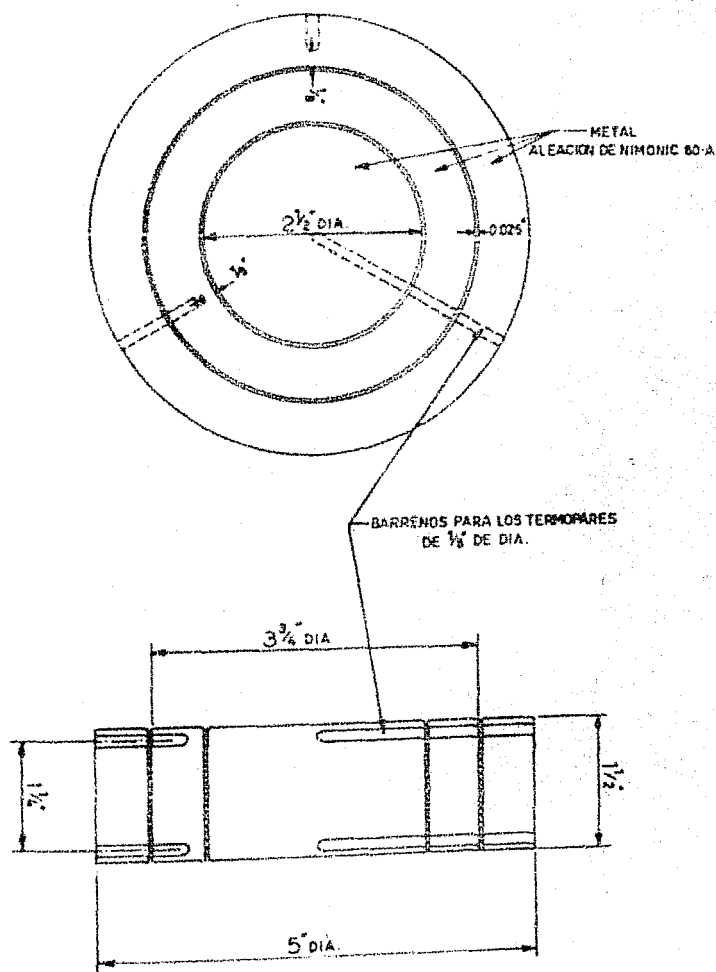
longitud y con una capacidad para disipar aproximadamente 2.5 k.v.a. La potencia es suministrada por medio de un autotransformador variable, operado con un controlador rectificador de silicio, gobernado por la señal (energía de salida) de un termopar que sobresale a través de los elementos de calentamiento.

El horno es totalmente construido de ladrillo refractario - aislante del grupo 28 (para 2800°F) de aproximadamente 60-68% de porosidad, siendo recubiertas las caras calientes con un cemento aluminoso.

Todos los termopares usados son de Platino/Platino, 13% de Rodio, excepto el del horno que es Platino/Platino, 10% de Rodio, y son calibrados cada uno contra otro antes de usarse. Los termopares insertados en el calorímetro son revestidos con aisladores de alumina de doble perforación, de 3 mm de diámetro exterior, quedando así ajustados muy bien en las perforaciones de 3.2 mm. (1/8 de pulg.) de diámetro barrenados en el metal. La f.e.m. producida es medida con un potenciómetro de alta precisión, capaz de leer exactamente hasta 0.001 m.v. para diferencias de temperaturas.

La elección del metal para la construcción del calorímetro fué importante, éste debe ser resistente a la oxidación a temperaturas arriba de 950°C (1742°F) y con una conductividad térmica exactamente conocida, con un rango tal que produzca una caída de temperatura conveniente en el uso de este aparato. Un material que satisface completamente estos requerimientos es la aleación "Nimonic 80 A", la cual ha sido empleada para este propósito. El montaje del calorímetro mostrado en la Fig. No. IV-3, consi-

MONTAJE DEL CALORIMETRO



TESIS PROFESIONAL	
F.Q. 1970	Fig- IV-3.
	CALORIMETRO Y DISTRIBUCION DE TERMOPARES.
FERNANDO MONREAL HERNANDEZ	

te en un bloque sólido calorimétrico de 64 mm. (2 1/2 pulg.) de diámetro, - 38 mm. (1 1/2 pulg.) de espesor, rodeado por dos anillos protectores concéntricos, del mismo material y espesor, separados uno del otro y del calorímetro por 1 mm. (0.025 pulg.), siendo rellenas las hendiduras entre ellos con papel de asbesto. Perforaciones de 3.2 mm. (1/8 pulg.) de diámetro son taladradas como se muestra, para la inserción de dos termopares dentro de - estos componentes para indicar la caída de temperatura en cada sección. Muy importante es la exactitud del barrenado y maquinado en la manufactura del calorímetro.

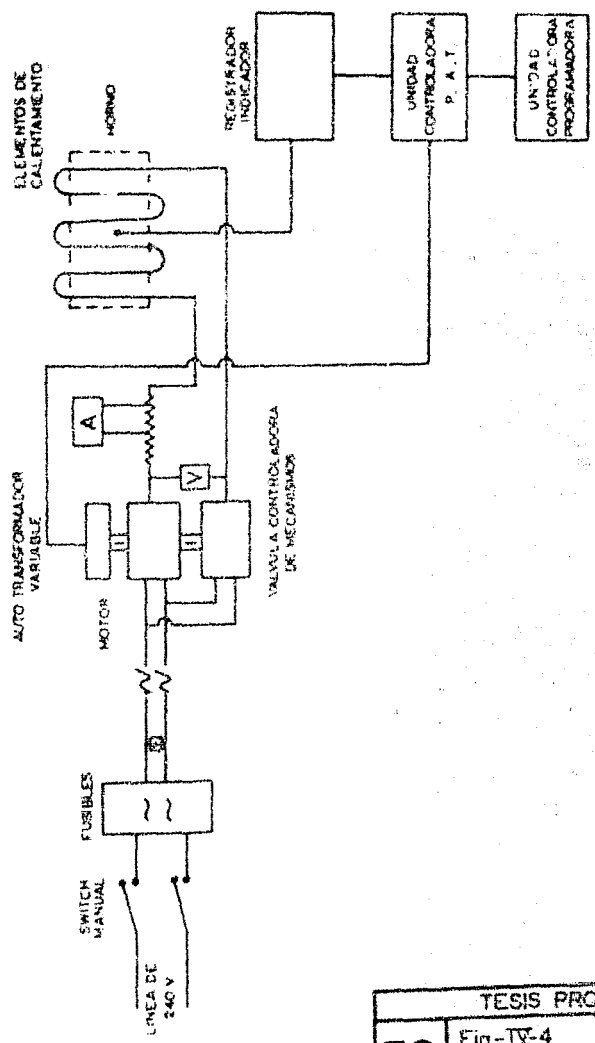
INSTRUMENTACION Y CIRCUITO ELECTRICO.

La Fig. No. IV-4 es un diagrama de bloques en el cual pueden verse la distribución y conexión de los instrumentos controladores y registradores que trabajan en el aparato construido.

La Fig. No. IV-5 corresponde al diagrama eléctrico del aparato.

Descripción de la instrumentación del Aparato.

- 1) Elementos de calentamiento: se emplearon 6 elementos conectados en serie con las siguientes características:
 Marca: Crystolon Hot Rods.
 Tipo: barras de carburo de silicio.
 Fabricante: Norton Company.
 Longitud total: 513 mm. (21 pulg.)



Longitud efectiva de calentamiento 178 mm. (7 pulg.)

Diámetro: 19 mm. (3/4 pulg.).

Resistencia nominal: 2.71 ohms.

- 2) Termopares: se usan termopares de Platino/Platino/13% Rodio enfundados en aislantes de cerámica de doble orificio de 3 mm. de diámetro exterior para medir las temperaturas en la muestra y el calorímetro, y termopares de -- Platino/Platino/10% Rodio para medir la temperatura del horno.
- 3) Controlador-Programador: se empleó un Unidad Controladora-Programadora Modelo 10170 de Leeds & Northrup.
- 4) Unidad Controladora-Posicionador: se instaló un P.A.T. - (Position Adjusting Type) de triple acción serie 60. fabricado por Leeds & Northrup.
- 5) Auto Transformer Variable: se usó una unidad de Leeds & Northrup Modelo D Serie: 1741255.
- 6) Conductor de Mecanismos: fué acoplada una válvula directora de mecanismos para control eléctrico de la Serie - 10260 de Leeds & Northrup.
- 7) Registrador-Indicador: se instaló un Speedomax G. de -- Leeds & Northrup Modelo S, Serie 60,000.
- 8) Potenciómetro: para la lectura de las temperaturas ha sido empleado un potenciómetro portátil de alta precisión No. 8462 de Leeds & Northrup.
- 9) Selector de Switches: un selector rotatorio de switches No. 8248 de Leeds & Northrup.

DESCRIPCION DEL FUNCIONAMIENTO DE LA INSTRUMENTACION.

Inicialmente se inserta en la unidad programadora-controladora, la leva que contiene el programa de calentamiento al cual se someterá el proceso, acoplando los engranes requeridos para dar a la leva la velocidad de rotación necesaria para la que fué diseñada.

Una vez que son conectados los switches y accionado el encendedor que da movimiento al programa, la unidad programadora-controladora envía, de acuerdo con el programa inserta, una señal al posicionador, el cual regula la admisión de voltaje por medio del auto transformador variable, sujetando los elementos calentadores a mayor o menor voltaje, según sea el caso.

La unidad registrador-controlador lee e indica la temperatura en el horno, la cual de no estar en balance o equilibrio con la del programa en la unidad programadora, gobierna al posicionador con tendencia a balancearla, el que volverá a actuar sobre el auto transformador variable permitiendo mayor o menor voltaje sobre las resistencias de carburo de silicio, hasta balancear el conjunto.

DATOS DEL PROGRAMA DE LA UNIDAD

PROGRAMADORA - CONTROLADORA.

Registrador	Speedomax G de Leeds & Northrup Modelo S, Serie 60,000
Rango de registro	0 - 1200°C
Elemento primario	Termopar de Platino/Platino-10% Rodio
Velocidad de la carta de registro	1 cm/min.
Duración	150 hrs.
Iniciación del programa en	178°C
Mantener en	178°C por 24 hrs.
Incrementar a	420°C en 6 hrs. (25°C X hr.)
Mantener en	420°C por 24 hrs.
Incrementar a	615°C en 6 hrs. (30°C x hr.)
Mantener en	615°C por 24 hrs.
Incrementar a	830°C en 6 hrs. (35°C x hr.)
Mantener en	830°C por 24 hrs.
Incrementar a	1040°C en 6 hrs. (35°C x hr.)
Mantener en	1040°C por 24 hrs.
Decrecer a	25°C en 6 hrs. (170°C x hr.)
Extensión del programa en	25°C

PREPARACION DE LA MUESTRA DE PRUEBA.

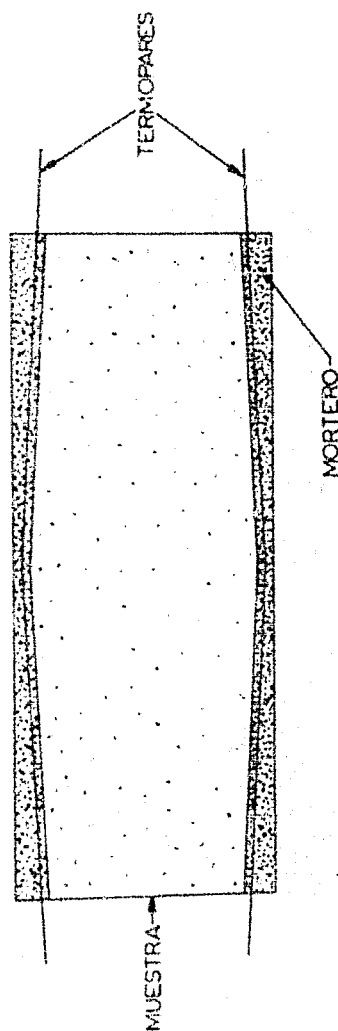
El espécimen de prueba puede ser cortado de piezas estandar de manufactura normal de la serie de 229 X 114 mm (9 X 4 1/2 pulg.) o moldeado, para formar un octágono de 48 mm (1 7/8 pulg.) por lado (ver Fig. No. IV-1), aunque otras formas como discos pueden ser utilizadas. Los espesores se dan de acuerdo con el tipo de material por probar. La experiencia ha mostrado que es conveniente mantener la resistencia térmica de la muestra de prueba - en los mismo rangos, de tal manera que para materiales aislantes espesores - del orden de 25 mm (1 pulg.) son adecuados para ladrillos de sílice. 51 mm - (2 pulg.) y para productos electrofundidos o de zircón de alta densidad, etc. 76 mm (3 pulg.) de espesor son convenientes.

Las caras del espécimen deben ser planas y paralelas, ranurándose - se posteriormente para el soporte de los termopares.

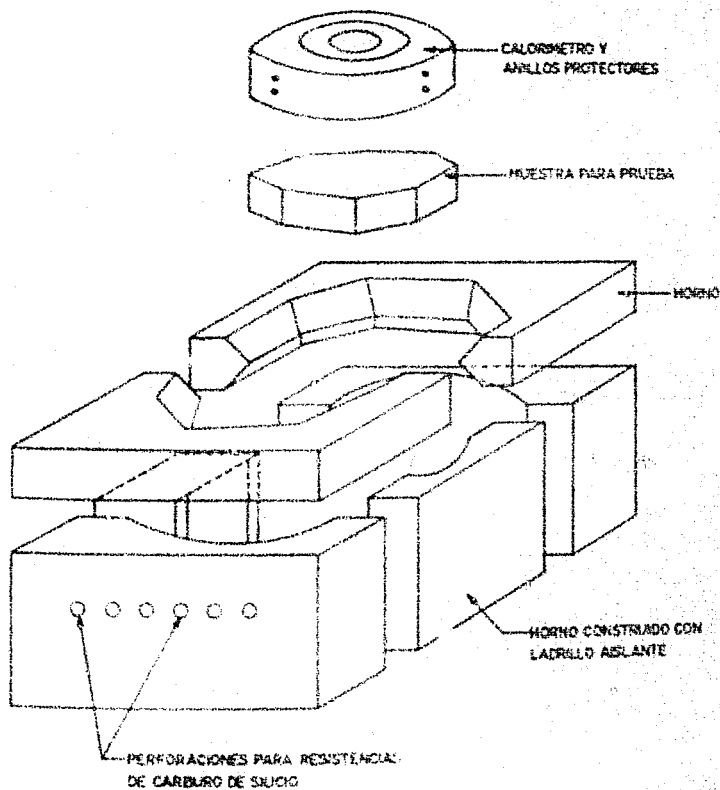
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

Los termopares son cementados en las ranuras efectuadas en el - espécimen de prueba, para lo cual se les ha dejado una longitud de 76 mm -- (3 pulg.) de cada lado de la unión caliente desenfundada, teniendo cuidado de hacer estas uniones como se muestra en la Fig. IV-6. La pieza de prueba es colocada en el aparato como se muestra en la Fig. No. IV-7. Para reducir la resistencia térmica por el contacto entre el espécimen y el calorímetro cuando son probados materiales no muy tersos, polvo fino de carburo de silicio es roceado en la superficie superior de la pieza de prueba y emparejado usando una regla recta. (Debe tenerse mucho cuidado de evitar la contamina-

DIAGRAMA MOSTRANDO LA POSICION DE LOS TERMOPARES
EN LA MUESTRA



TESIS PROFESIONAL	
F.O.	Fig.- IV-6.
1970	POSICION DE LOS TERMOPARES EN LA MUESTRA.
FERNANDO MONTE // L. HERNANDEZ	



TESIS PROFESIONAL	
F.G. 1970	Fig-IX-7
	ENSAMBLE DEL HORNO, MUESTRA Y CALORIMETRO
	FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

ción de la junta caliente del termopar con el carburo de silicio).

Los seis termopares son insertados en el calorímetro y los anillos protectores, asegurando que la unión caliente de los termopares este en contacto con los extremos de las perforaciones en el metal. El conjunto es entonces colocado centralmente sobre la pieza de prueba, siendo llevados cuidadosamente a través de pequeñas perforaciones en las paredes laterales a un selector adaptado al potenciómetro.

Agregado para la fabricación de ladrillo aislante del mismo tipo que el empleado para construir el horno es vaciado en el espacio entre la pieza de prueba y el horno hasta el nivel de la superficie superior del espécimen. Finalmente, vermiculita exfoliada (de 1/8 a 1/16 de pulgada de medida de grano) es vaciada en el espacio restante hasta el nivel de la superficie superior del calorímetro.

La muestra es entonces calentada a la temperatura requerida y cuando esté en el equilibrio todos los termopares son leídos. Si varias conductividades se requieren para diferentes temperaturas, entonces el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio para temperaturas de cara caliente arriba de 250°C es aproximadamente de seis horas. Es importante tener en consideración que el aparato debe ser operado donde no existan corrientes de aire.

Resultados:

La conductividad térmica es calculada usando la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{K_c \cdot AT_c \cdot d_s}{AT_s \cdot d_c} \text{ --- (24)}$$

Donde:

K_s = Conductividad térmica de la muestra.

K_c = Conductividad térmica del calorímetro.

AT_s = Caída de temperatura a través de la muestra.

AT_c = Caída de temperatura a través del calorímetro.

d_s = Espesor de la muestra

d_c = Espesor del calorímetro.

d_s es la distancia entre los centros de las juntas calientes de los termopares conectados en la muestra.

d_c es la distancia entre los centros de las oradaciones en el calorímetro, siendo ésta una constante del conjunto. Por consiguiente debe tenerse cuidado de que las uniones calientes de los termopares del calorímetro salgan, centralmente de los extremos de los aisladores de doble barreno.

K_c es obtenida de la curva de conductividad térmica del calorímetro contra temperatura, para cada temperatura media del calorímetro.

CAPÍTULO V.

RESULTADOS.

En el capítulo anterior se describe el procedimiento experimental, así como el programa de calentamiento al cual fueron sometidas las muestras de nueve calidades de ladrillos refractarios aislantes.

Las muestras se obtuvieron de lotes de producción normal y se escogieron al azar.

Varias pruebas se realizaron con muestras de cada una de las diferentes calidades de ladrillo aislante, utilizando los resultados de las primeras para afinar algunas variables del equipo, instrumentación y práctica experimental. Las dos últimas corridas para cada calidad se reportan como los resultados.

Las muestras fueron sometidas a calentamiento para medir su comportamiento desde el punto de vista de conducción de calor, a 5 temperaturas diferentes. (5 posiciones en la leva-programa). La obtención de la primera posición del programa se alcanza operando el aparato manualmente, hasta obtener en el registrador la temperatura del horno que se tiene programada para esta posición. Una vez alcanzada ésta, se deja estabilizar el sistema - 24 horas. Estabilizado, es decir, alcanzado un estado de régimen estacionario, se tomaron 3 lecturas de cada uno de los 3 termopares a intervalos de media hora. En seguida, se opera el equipo automáticamente calentando al

horno hasta alcanzar la temperatura correspondiente a la segunda posición y nuevamente se deja estabilizar el conjunto por 24 horas, procediendo enseguida en la misma forma anterior a tomar 5 lecturas de cada una de las 8 temperaturas en los diferentes puntos del sistema. El procedimiento se repite para la tercera, cuarta y quinta posiciones del programa.

Los resultados para las muestras de cada calidad se reportan en las tablas que en hojas adelante se presentan. Estos resultados se reportan para cada una de las cinco temperaturas de estudio como un promedio de tres de las lecturas obtenidas, pues la mayor y la menor fueron eliminadas.

Con los resultados promedio obtenidos para cada muestra, se trazaron las curvas correspondientes de "K vs T" y de ellas se obtuvo una curva media para cada calidad de ladrillo aislante que son las que se reportan en este capítulo. (Curvas V - 1 a V - 9).

En las tablas de resultados además de indicarse todas las temperaturas medias y datos de las muestras para el cálculo de las conductividades, se incluyen las propiedades, densidad, porosidad y absorción de agua - obtenidas para cada una por los procedimientos y con los aparatos indicados por la prueba para la porosidad aparente, absorción de agua, gravedad específica aparente y densidad aparente para ladrillos refractarios quemados, - Designación A.S.T.M. C 20-46 (1967).

De los ladrillos aislantes considerados, los tipos I, II y III son químicamente ligados y no quemados, es decir, difieren de los demás que

si s6n por lo que las pruebas mencionadas anteriormente para determinar propiedades no se aplicaron a ellos.

Tratando de correlacionar la conductividad t6rmica de los ladrillos refractarios aislantes con algunas de sus propiedades se trazaron las curvas V-10 y V-11. En estas curvas se grafic6 la conductividad t6rmica en contrada contra un promedio de los resultados de densidad aparente y porosidad ap .rente determinados en cada una de las dos muestras de cada calidad de ladrillo en estudio, teniendo como par6metros cada una de las cinco temperaturas a las cuales se determin6 la conductividad.

Solamente 4 curvas "K vs densidad aparente" y 3 de "K vs porosidad aparente" se muestran con el objeto de apreciar con mayor claridad la tendencia de las mismas, ya que a todas las temperaturas de estudio se obtuvieron curvas muy similares.

TABLA DE RESULTADOS No. V - 1

Material: 1	Corrida No. 1				
Densidad g/cm ³ :	0.52				
Porosidad % :					
Absorción de Agua % :					
Dimensiones de la Muestra :					
Espesor	1.059 pulgadas				
Longitud y Ancho.	Configuración octagonal de Aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas				
Espesor del Calorímetro:	1.2655 pulgadas.				
RESULTADOS DE LA PRUEBA:					
PUNTO No. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	167.0	420.4	620.8	831.0	
Cara Fría °C	155.4	316.0	490.4	565.4	
Diferencia °C	11.6	104.4	130.4	265.6	
Temperatura Media °C	161.2	368.2	555.6	698.2	
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	0.5679	1.2023	1.2451	1.4566	
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	155.0	302.0	410.8	513.2	
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	156.3	311.0	432.0	546.7	
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	154.0	304.0	412.8	516.3	
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	153.8	295.3	403.0	500.4	
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	146.5	283.0	386.4	486.8	
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	143.0	271.2	368.0	460.8	

TABLA DE RESULTADOS No. V - 2

Material: I	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³ :	0.55
Porosidad % :	
Absorción de Agua % :	

Dimensiones de la Muestra :

Espesor	1.0826 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de Aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas

Espesor del Calorímetro: 1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :

1 2 3 4 5

Temperaturas en la Muestra:

Cara Caliente °C	164.6	407.8	625.2	824.4
Cara Fría °C	153.4	310.3	453.1	571.0
Diferencia °C	11.2	97.5	172.1	253.4

Temperatura Media °C

159.0 359.05 539.15 697.7

"K" calculadas en $\frac{\text{Cal.-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{ }^{\circ}\text{C}}$

0.2821 0.6956 0.6678 1.3301

Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C

156.2	301.4	434.0	532.3
-------	-------	-------	-------

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C

156.5 305.7 443.1 550.7

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C

155.0	303.6	434.8	543.9
-------	-------	-------	-------

Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C

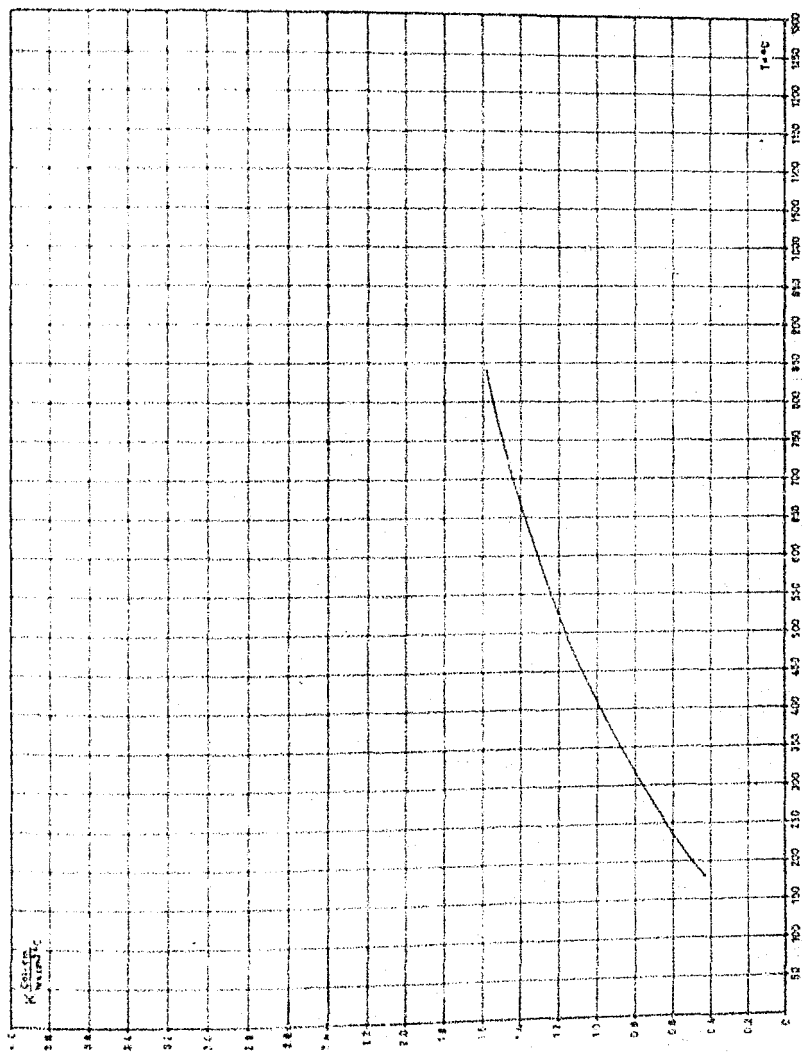
155.7 297.2 429.6 521.0

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C

153.0	294.0	418.3	519.5
-------	-------	-------	-------

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C

147.8	282.0	404.5	495.0
-------	-------	-------	-------



TESS PROFESIONAL	
Fig.-X-1	F.O.
CALIDAD: I.	1970
"K vs. T"	
FERNANDO MONREAL HERNANDEZ	

TABLA DE RESULTADOS No. V - 3

Material : II Corrida No. 1
Densidad g/cm³ : 0.66

Porosidad % :
Absorción de Agua % :

Dimensiones de la Muestra :
Espesor

Longitud y Ancho

1.0433 pulgadas

Configuración octagonal de Aprox. 4 1/2 pulgadas
entre cada dos caras opuestas paralelas

1.2655 pulgadas

Espesor del Calorímetro:

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUESTO No. :

Temperaturas en la Muestra:

Carra Caliente °C
Carra Fría °C
Diferencia °C

Temperatura Media °C

°K calculadas en $\frac{\text{Cal/cm}^2}{h, \text{cm}} \times 2.73$

Temp. Carra Caliente en el Calorímetro °C

Temp. Carra Caliente en el Anillo Protector Interior °C

Temp. Carra Caliente en el Anillo Protector Exterior °C

Temp. Carra Fría en el Calorímetro °C

Temp. Carra Fría en el Anillo Protector Interior °C

Temp. Carra Fría en el Anillo Protector Exterior °C

1 2 3 4 5

171.2 420.4 660.8 925.4 1038.0
139.0 334.8 467.2 600.3 750.3
32.2 85.6 193.6 225.1 287.7
155.1 377.6 564.0 712.85 894.15

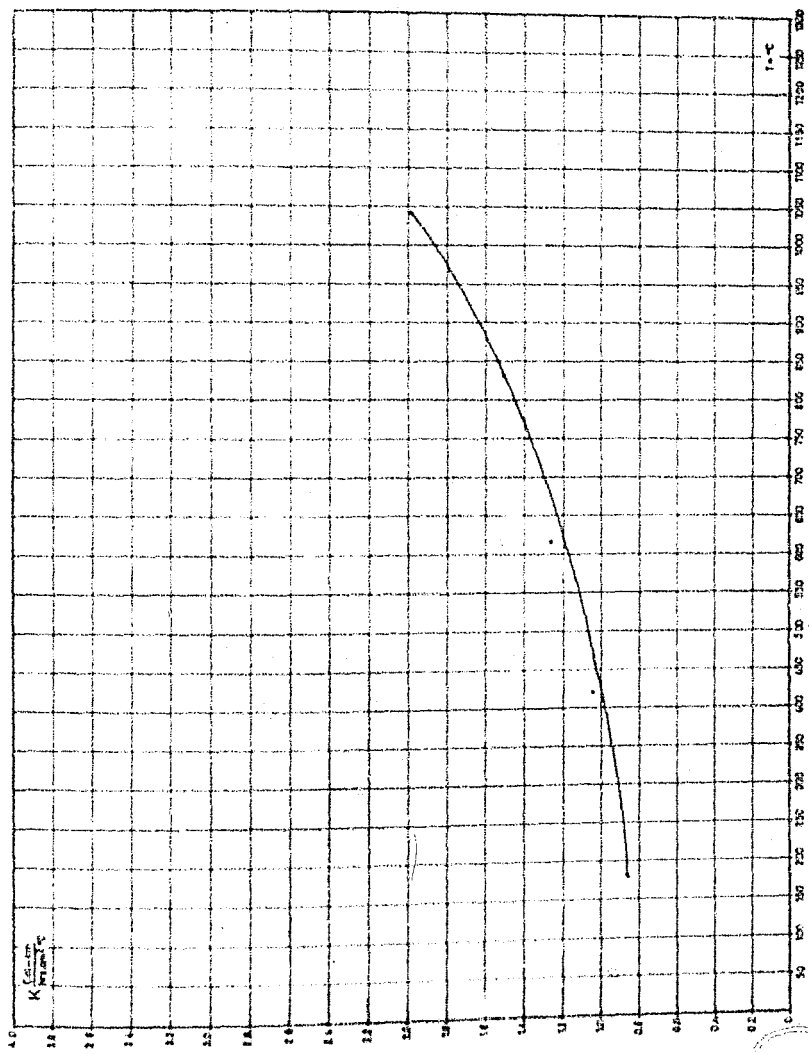
0.46 1.3463 1.1923 1.6169 1.7513

134.6 305.0 417.0 526.2 544.5
135.5 303.8 427.0 540.3 673.0
134.0 305.0 420.0 522.0 636.0

135.5 300.3 409.7 513.5 628.0
128.0 285.5 395.0 497.0 612.0
119.0 260.4 365.7 444.0 566.5

TABLA DE RESULTADOS No. V-4

Material: II	Corrida No. 2
Densidad g/cm^3 :	0.64
Porosidad % :	
Absorción de Agua % :	
Dimensiones de la Muestra :	
Espesor	1.0433 pulgadas.
Longitud y Ancho.	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas
Espesor del Calorímetro:	1.2655 pulgadas
RESULTADOS DE LA PRUEBA:	
PUNTO No. :	1 2 3 4 5
Temperaturas en la Muestra:	
Cara Caliente °C	164.0 415.2 619.4 824.2 1035.6
Cara Fría °C	158.8 309.3 400.2 379.4 722.5
Diferencia °C	5.2 105.9 219.2 244.8 313.1
Temperatura Media °C	161.4 362.25 509.8 701.8 879.05
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	1.0059 1.0013 1.4636 1.4437 1.8416
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	158.0 289.3 353.0 522.0 644.9
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	160.0 291.6 357.3 529.0 650.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	158.6 291.0 355.0 526.0 647.0
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	156.2 285.0 343.0 510.8 627.3
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	152.4 279.2 342.0 505.7 622.5
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	141.2 254.8 292.6 423.9 525.0



TESIS PROFESIONAL

Fig. - X-2
CALIDAD II.
1970 "K vs T"

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 5

Material : III Corrida No. 1

Densidad g/cm^3 : 0.76

Porosidad % :

Absorción de Agua % :

Dimensiones de la Muestra :

Espesor

1.091 pulgadas

Longitud y Ancho

Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas
entre cada dos caras opuestas paralelas

Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :

1 2 3 4 5

Temperaturas en la Muestra:

Cara Caliente °C

172.0 416.2 620.6 822.4 1037.2

Cara Fría °C

164.0 316.6 432.6 554.0 698.0

Diferencia °C

8.0 99.6 188.0 268.4 339.2

Temperatura Media °C

168.0 366.4 526.6 688.2 867.6

"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$

0.664 0.866 1.037 1.469

Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C

161.0 304.2 404.4 511.0 631.7

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C

160.0 302.5 402.8 506.0 626.0

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C

160.4 403.2 403.0 508.0 627.2

Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C

162.0 301.5 399.2 503.0 618.0

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C

158.0 297.0 397.1 502.7 621.2

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C

147.4 270.1 355.0 456.0 562.5

TABLA DE RESULTADOS No. V - 6

Material : III Corrida No. 2
 Densidad g/cm^3 : 0.79
 Porosidad % :
 Absorción de Agua % :

Dimensiones de la Muestra :

Espesor 1.079 pulgadas
 Longitud y Ancho Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas
 entre cada dos caras opuestas paralelas

Espesor del Calorímetro: 1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :

Temperaturas en la Muestra:

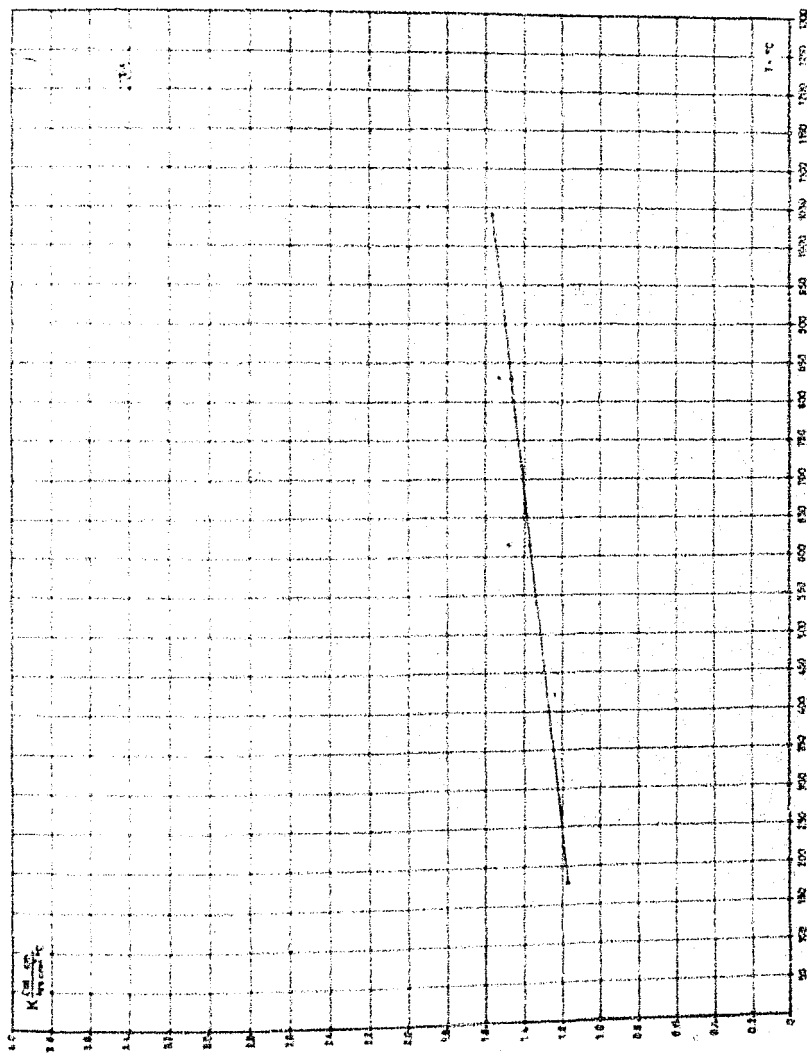
	1	2	3	4	5
Cara Caliente °C	174.6	417.4	622.0	825.0	1039.4
Cara Fría °C	171.0	320.0	440.4	562.2	708.0
Diferencia °C	3.6	97.4	181.6	262.8	331.4

	1	2	3	4	5
Temperatura Media °C	172.8	368.7	531.2	693.6	873.7

"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	1	2	3	4	5
	1.494	1.398	1.339	1.739	1.709

	1	2	3	4	5
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	167.6	304.6	410.8	518.0	634.3
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	164.8	302.0	407.0	513.2	624.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	165.6	303.2	408.6	516.4	629.2

	1	2	3	4	5
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	164.8	298.5	402.7	504.3	618.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	162.6	293.3	394.6	500.2	613.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	156.5	283.0	382.0	483.7	593.5



TESIS PROFESIONAL

F. G. Fig. X-3

1970 CALIDAD: III

"K. G. T."

FERNANDO MONREAL HERNÁNDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 7

Material : IV	Corrida No. 1
Densidad g/cm ³ :	0.81
Porosidad % :	63.0
Absorción de Agua % :	77.0

Dimensiones de la Muestra:

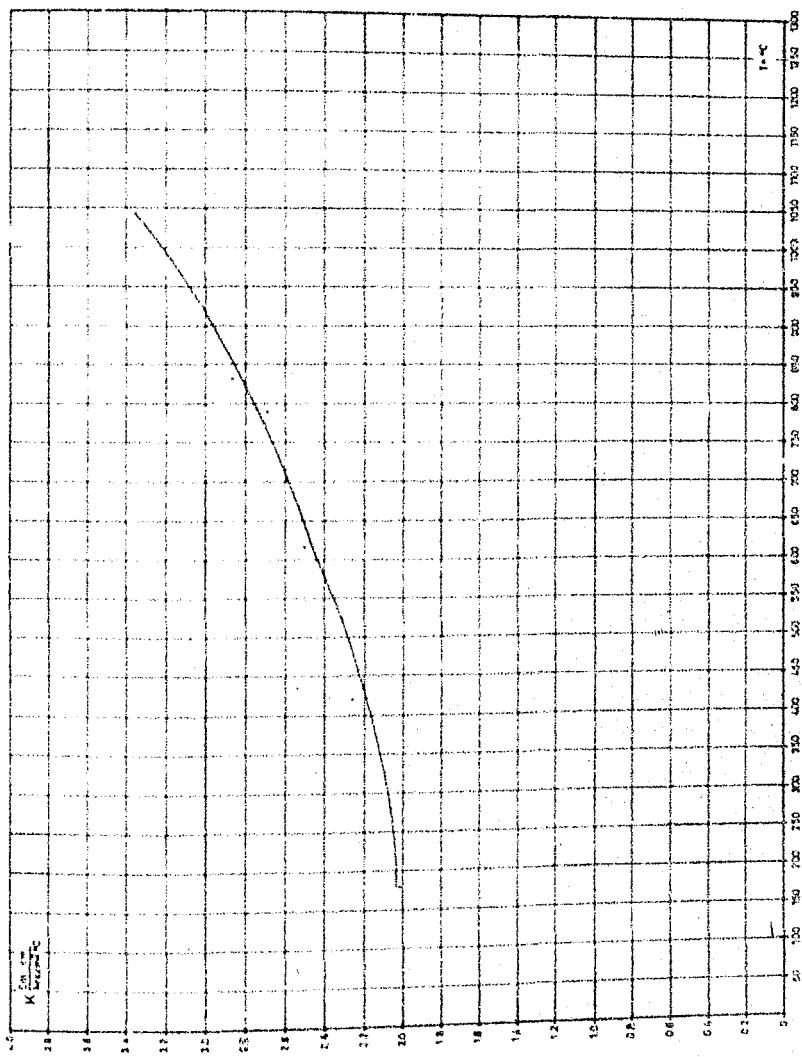
Espesor	1.072 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	172.0	416.6	626.0	829.0	1039.0
Cara Fría °C	154.0	392.0	501.1	668.0	840.2
Diferencia °C	18.0	24.6	124.9	161.0	198.8
Temperatura Media °C	163.0	404.3	563.6	748.5	939.6
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	2.13	2.39	2.81	3.38	4.2
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	160.0	298.2	416.0	511.2	645.5
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	157.2	296.1	412.0	506.2	630.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	159.0	297.3	414.2	589.0	634.2
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	158.0	294.0	408.0	499.0	638.2
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	158.2	292.0	406.0	491.0	630.2
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	157.0	290.2	404.2	490.2	626.0



TESIS PROFESIONAL

Fg-Z-4.
CALIDAD IX
1970
"Kva.T"

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 9

Material :	V	Corrida No. 1
Densidad g/cm ³ :		0.92
Porosidad % :		67.0
Absorción de Agua % :		63.0

Dimensiones de la Muestra :

Espesor	1.12 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	165.0	412.0	601.0	822.0	1038.0
Cara Fría °C	153.0	386.0	511.0	672.0	858.0
Diferencia °C	12.0	26.0	90.0	150.0	180.0
Temperatura Media °C	159.0	399.0	556.0	747.0	948.0
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	2.28	2.96	3.28	3.61	3.95
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	152.0	384.0	506.0	670.0	855.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	151.0	381.2	504.2	666.0	853.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	151.2	381.0	504.8	665.0	853.2
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	151.0	381.0	504.0	665.0	852.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	149.0	380.0	500.2	660.0	848.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	149.6	379.8	502.2	661.2	849.8

TABLA DE RESULTADOS No. V - 10

Material :	V	Corrida No. 2
Densidad g/cm^3 :		0.96
Porosidad % :		62.0
Absorción de Agua % :		57.0

Dimensiones de la Muestra :

 Espesor

1.11 pulgadas

Longitud y Ancho

Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas
entre cada dos caras opuestas paralelas.

 Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

 PUNTO NO. :

1 2 3 4 5

Temperaturas en la Muestra:

Cara Caliente °C	170.0	413.0	626.0	828.0	1041.0
Cara Fría °C	159.8	390.9	545.0	683.0	879.0
Diferencia °C	10.2	22.1	81.0	145.0	162.0

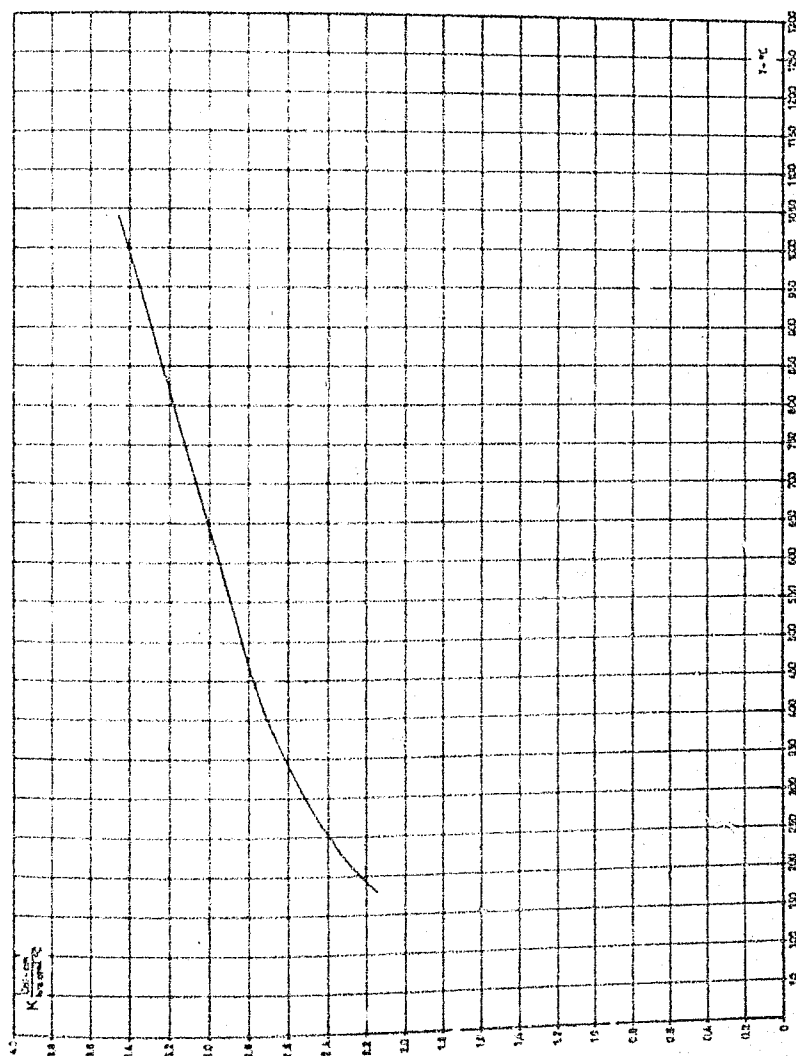
Temperatura Media °C

164.9 401.9 585.5 755.5 960.0

"K" calculadas en $\frac{Cal-cm}{hr.cm^2°C}$

1.90 2.41 2.71 2.93 3.18

Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	160.0	393.0	556.0	718.0	991.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	158.5	391.0	554.0	714.0	989.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	159.0	390.2	553.8	713.0	988.0
Temp. Cara Fría en el Calorímetro	158.0	390.0	553.0	712.0	987.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	158.5	390.2	552.3	710.2	984.3
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	157.0	389.0	550.0	710.0	983.0



TESIS PROFESIONAL

Fig. X-5.

F. Q. CALIDAD: X

1970 "K vs. T"

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 12

Material: VI	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³ :	0.87
Porosidad % :	63.7
Absorción de Agua % :	75.5

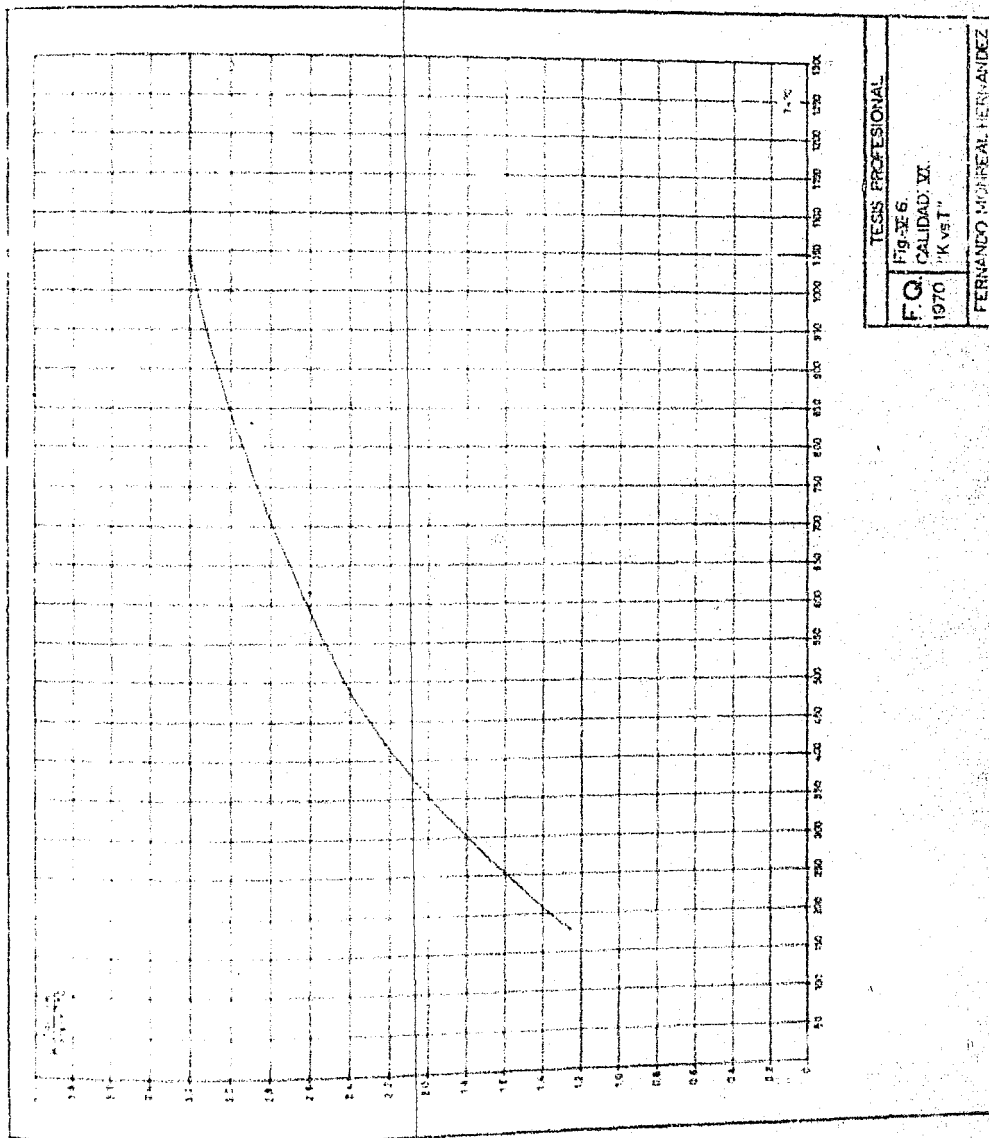
Dimensiones de la Muestra :

Espeor	1.043 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espeor del Calorímetro: 1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No.:	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	172.3	418.6	618.7	824.4	1035.5
Cara Fría °C	163.8	405.5	581.4	615.0	961.2
Diferencia °C	8.5	13.1	27.3	209.4	74.3
Temperatura Media °C	168.1	412.1	600.1	719.7	998.4
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	1.58 ^a	1.911	2.677	2.379	3.287
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	162.8	358.9	498.4	612.0	788.7
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	161.5	368.2	510.8	600.2	828.4
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	160.8	371.2	564.2	602.8	849.8
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	160.8	353.2	487.0	607.0	766.1
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	157.8	344.8	478.3	609.2	751.1
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	159.2	349.8	482.1	608.1	760.2



TESIS PROFESIONAL

Fig. N° 6.

F.Q. CALIDAD: VI

1970 "K.V.S.T."

FERNANDO MOREAL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 13

Material: VII	Corrida No. 1
Densidad g/cm^3 :	0.79
Porosidad % :	70.2
Absorción de Agua % :	82.6

Dimensiones de la Muestra :

 Espesor
 Longitud y Ancho

1.134 pulgadas
Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas
entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	176.6	416.4	614.0	829.8	1041.4
Cara Fría °C	157.4	392.7	515.0	799.0	960.0
Diferencia °C	19.2	23.7	99.0	30.8	81.4
Temperatura Media °C	167.0	404.6	564.5	814.4	1000.7
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	2.34	3.12	3.42	3.55	3.54
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	154.2	345.6	432.5	700.0	831.7
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	148.5	345.9	436.2	706.7	843.7
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	155.2	358.6	459.8	742.8	849.8
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	152.2	334.6	431.0	682.4	807.8
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	151.8	318.5	400.5	661.5	785.5
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	151.9	313.0	404.0	640.0	761.0

TABLA DE RESULTADOS No. V - 14

Material: VII	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³ :	0.77
Porosidad % :	70.9
Absorción de Agua % :	82.9

Dimensiones de la Muestra :

Espesor	1.18 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro:

1.2555 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No.:

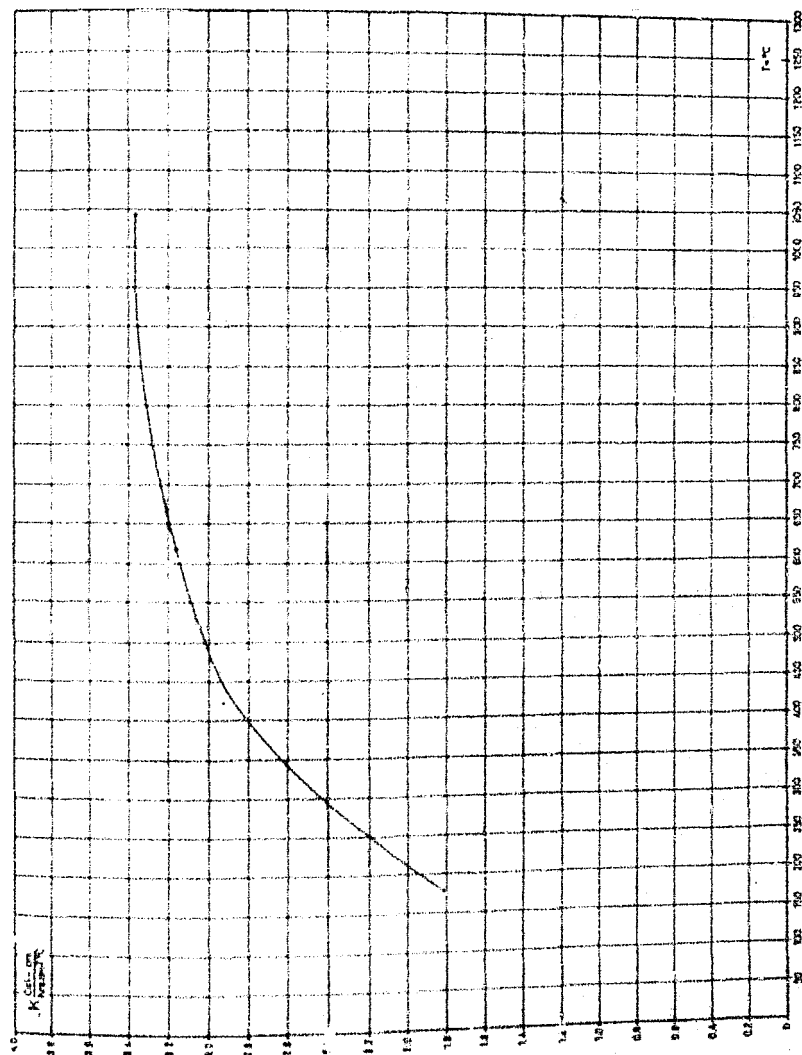
Temperaturas en la Muestra:

	1	2	3	4	5
Cara Caliente °C	178.0	415.0	615.0	845.0	1040.0
Cara Fría °C	158.0	384.0	520.0	736.0	920.0
Diferencia °C	20.0	31.0	95.0	109.0	120.0
Temperatura Media °C	168.0	399.5	567.5	790.5	980.0

"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$

1.28 2.31 2.82 3.10 3.16

Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	155.2	348.0	491.8	676.2	858.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	155.8	346.8	490.6	674.8	841.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	148.8	344.9	488.8	672.2	846.8
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	153.1	339.8	487.7	668.7	845.4
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	154.2	338.6	488.6	669.8	846.8
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	153.0	341.8	489.2	671.2	847.0



TESIS PROFESIONAL

Fig. 2-7.

FG. CALIDAD. VII.

1970 "K. va. I"

FERNANDO MICHAEL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 15

Material : VIII Corrida No. 1
 Densidad g/cm^3 : 0.82
 Porosidad % : 71.3
 Absorción de Agua % : 89.2

Dimensiones de la Muestra :

Espesor

1.17 pulgadas

Longitud y Ancho

Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas
 entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro:

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No.:

1 2 3 4 5

Temperaturas en la Muestra:

Cara Caliente °C	176.0	417.0	614.0	825.0	1035.0
Cara Fría °C	160.0	387.0	524.0	665.0	840.0
Diferencia °C	16.0	30.0	90.0	160.0	195.0

Temperatura Media °C

168.0 402.0 569.0 745.0 937.5

"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$

3.01 3.4 3.63 3.88 3.92

Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C

159.0 385.0 521.0 664.0 834.0

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C

154.0 380.0 512.8 657.2 826.2

Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C

155.2 379.8 518.2 656.2 827.6

Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C

158.0 384.0 519.0 660.0 830.0

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C

154.2 380.8 510.1 649.8 821.2

Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C

154.4 379.6 509.8 651.6 824.1

TABLA DE RESULTADOS No. V - 16

Material :	VIII	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³ :		0.80
Porosidad % :		72.8
Absorción de Agua % :		90.2

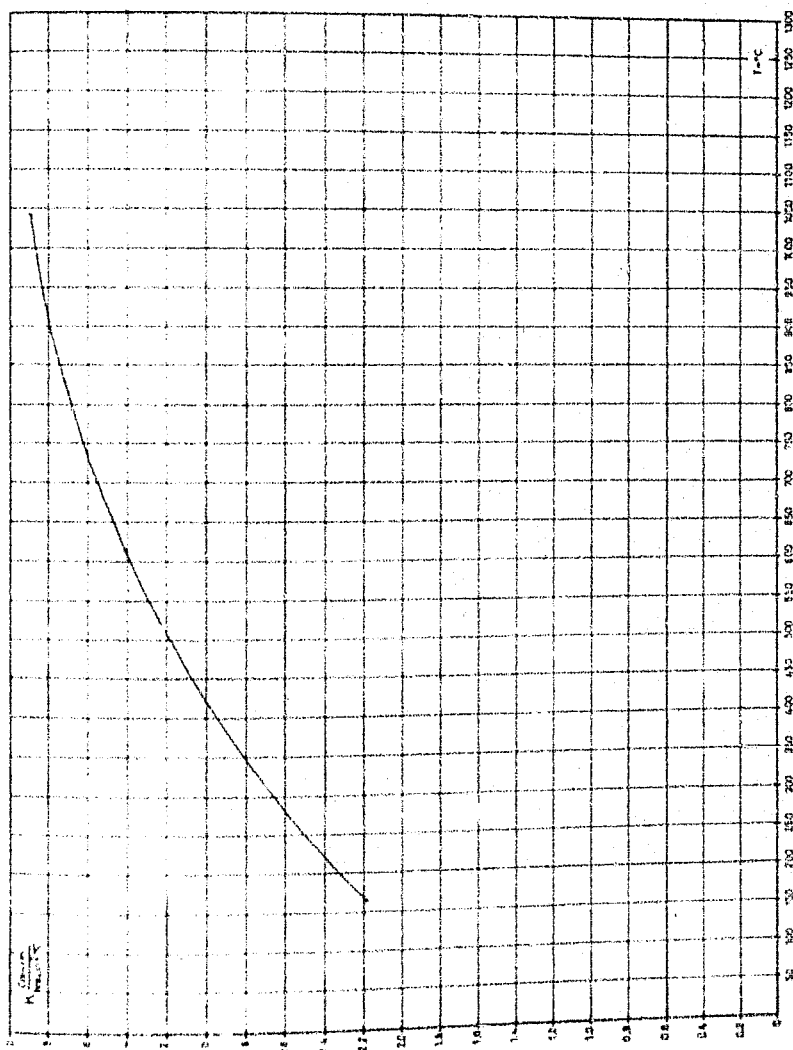
Dimensiones de la Muestra :

Espesor	1.19 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro: 1.2655 pulgadas.

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No.:	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	170.0	415.0	620.0	830.0	1040.0
Cara Fría °C	160.0	401.0	560.0	710.0	880.0
Diferencia °C	10.0	14.0	60.0	120.0	160.0
Temperatura Media °C	165.0	408.0	590.0	770.0	960.0
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	1.48	2.56	3.16	3.54	3.81
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	159.0	399.0	556.0	702.0	872.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	157.0	392.0	554.0	700.2	864.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	158.2	398.0	554.8	702.0	869.8
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	156.0	382.0	518.0	670.0	850.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	152.4	380.2	511.2	661.2	849.2
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	154.6	381.2	517.1	667.8	848.9



TESIS PROFESIONAL

Fig.-X-8.

F. Q. CALIDAD: VIII.

1970 "K vs. T"

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

TABLA DE RESULTADOS No. V - 17

Material :	IX	Corrida No. 1
Densidad g/cm ³ :		0.87
Porosidad % :		69.5
Absorción de Agua % :		91.8

Dimensiones de la Muestra:

Espesor 1.067 pulgadas

Longitud y Ancho

Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro :

1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO No. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	176.0	419.0	613.0	827.0	1040.0
Cara Fría °C	159.0	390.0	501.0	661.0	852.0
Diferencia °C	17.0	29.0	112.0	166.0	188.0
Temperatura Media °C	167.5	404.5	557.0	744.0	946.0
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	2.04	2.82	3.11	3.41	3.82
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	156.0	388.9	499.0	660.0	849.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	154.2	381.2	492.0	658.0	842.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	152.8	384.6	494.0	657.8	843.6
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	155.0	386.0	496.0	655.0	845.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	153.0	384.2	491.8	651.2	840.8
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	152.2	384.0	493.2	648.8	842.2

TABLA DE RESULTADOS No. V - 18

Material :	IX	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³ :		0.83
Porosidad % :		70.7
Absorción de Agua % :		83.0

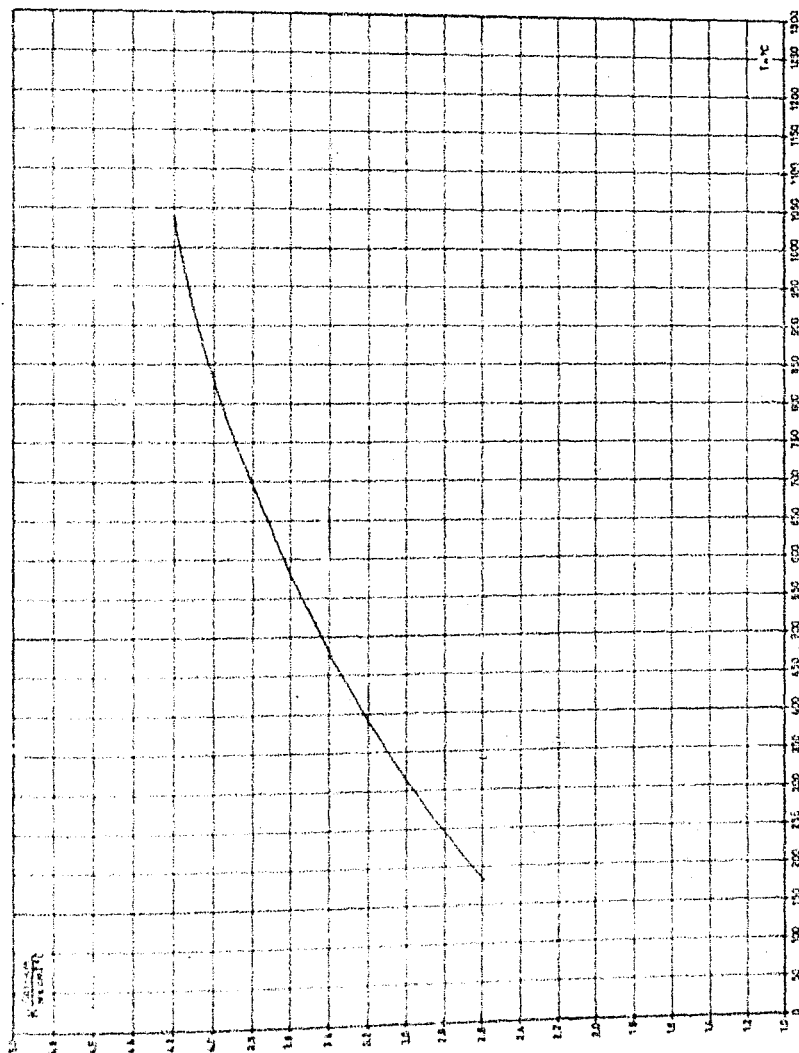
Dimensiones de la Muestra:

Espesor	1.094 pulgadas
Longitud y Ancho	Configuración octagonal de aprox. 4 1/2 pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.

Espesor del Calorímetro: 1.2655 pulgadas

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

PUNTO NO. :	1	2	3	4	5
Temperaturas en la Muestra:					
Cara Caliente °C	172.0	420.0	618.0	825.0	1042.0
Cara Fría °C	158.0	394.0	510.0	667.0	846.0
Diferencia °C	14.0	26.0	108.0	158.0	196.0
Temperatura Media °C	165.0	407.0	564.0	746.0	944.0
"K" calculadas en $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr.cm}^2\text{°C}}$	2.91	3.56	4.05	4.34	4.54
Temp. Cara Caliente en el Calorímetro °C	154.0	391.0	508.0	664.0	844.0
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Interior °C	151.8	389.0	502.0	660.0	840.8
Temp. Cara Caliente en el Anillo Protector Exterior °C	152.6	387.2	503.8	659.8	841.2
Temp. Cara Fría en el Calorímetro °C	152.0	388.0	504.0	658.0	839.0
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Interior °C	150.2	381.2	500.1	656.2	832.8
Temp. Cara Fría en el Anillo Protector Exterior °C	148.4	384.8	498.8	655.8	834.2



TESIS PROFESIONAL

Fg. 9.

F.Q.

CALIDAD: IX

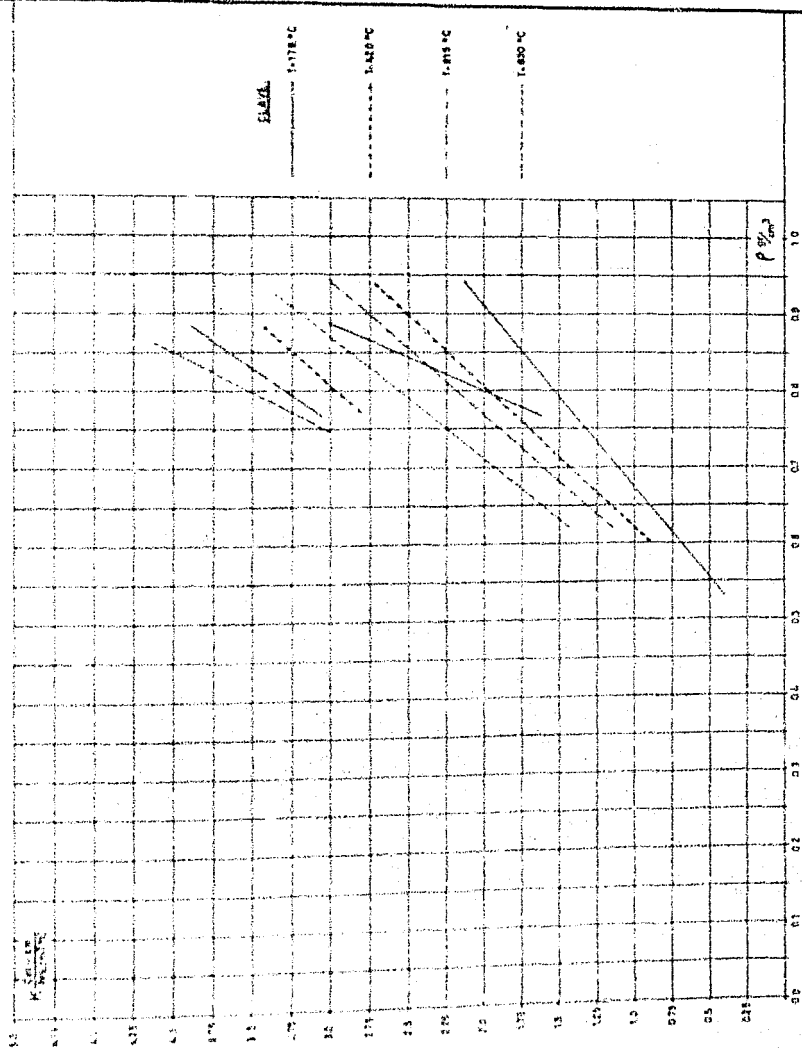
1970

"K vs. T"

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

OBSERVACIONES.

- 1.- Las lecturas se realizan actualmente con ayuda de una lente de aumento acoplada al potenciómetro.
- 2.- Frecuentemente durante cada determinación, se efectúan recalibraciones en el potenciómetro.
- 3.- Los programas de calentamiento se han estado modificando, afinaciones en la instrumentación se realizaron y se ha elegido la situación del lugar más adecuado para la operación del aparato buscando la obtención de reproducibilidad experimental de resultados conveniente.
- 4.- Un sólo operario se requiere, el cual coloca la muestra, monta el calorímetro y los termopares, inserta el programa de trabajo, efectúa las conexiones necesarias y toma las lecturas del potenciómetro, recalibrándolo continuamente.
- 5.- Las temperaturas elegidas de medición son las que normalmente se reportan en la literatura, aproximadas debido a la sensibilidad del sistema.
- 6.- Las conductividades de cada material se graficaron a la temperatura de cara caliente de la muestra, ya que en tal forma se acostumbra hacerlo para materiales cerámicos en los que se comportan como materiales diferentes los que están próximos a la cara caliente, los que se tienen a una temperatura media y los que están en la cara fría, sobre todo en materiales aislantes como los estudiados.
Por otra parte, esta temperatura de cara caliente idealmente es la temperatura del horno de calentamiento, siendo esta normalmente controlable.



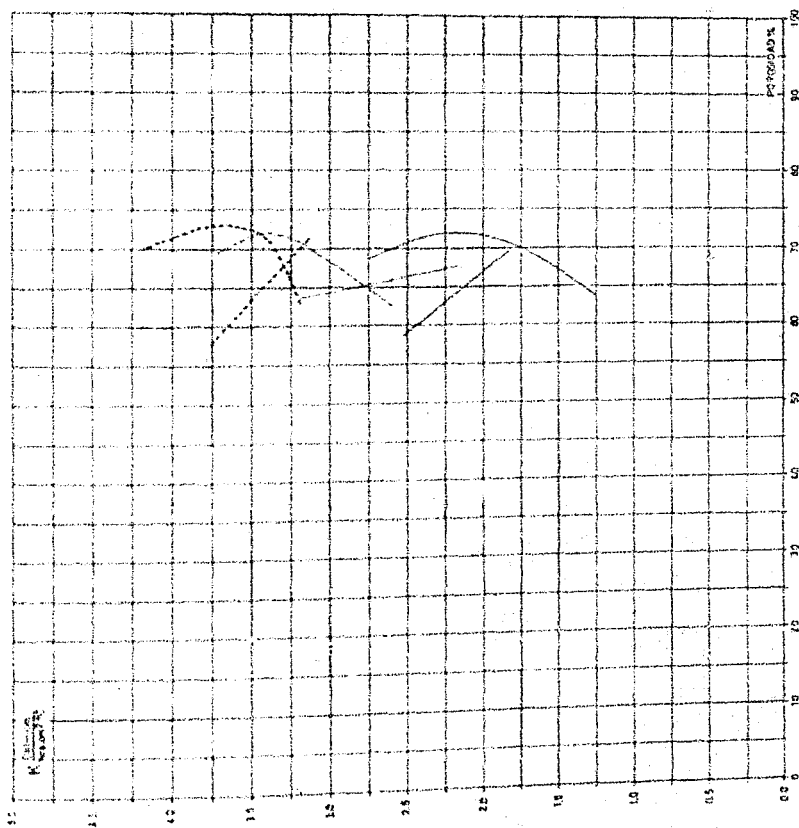
TESIS PROFESIONAL

Fig. 10.

Densidad vs. T°

1970 a varias temperaturas.

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ



TESIS PROFESIONAL

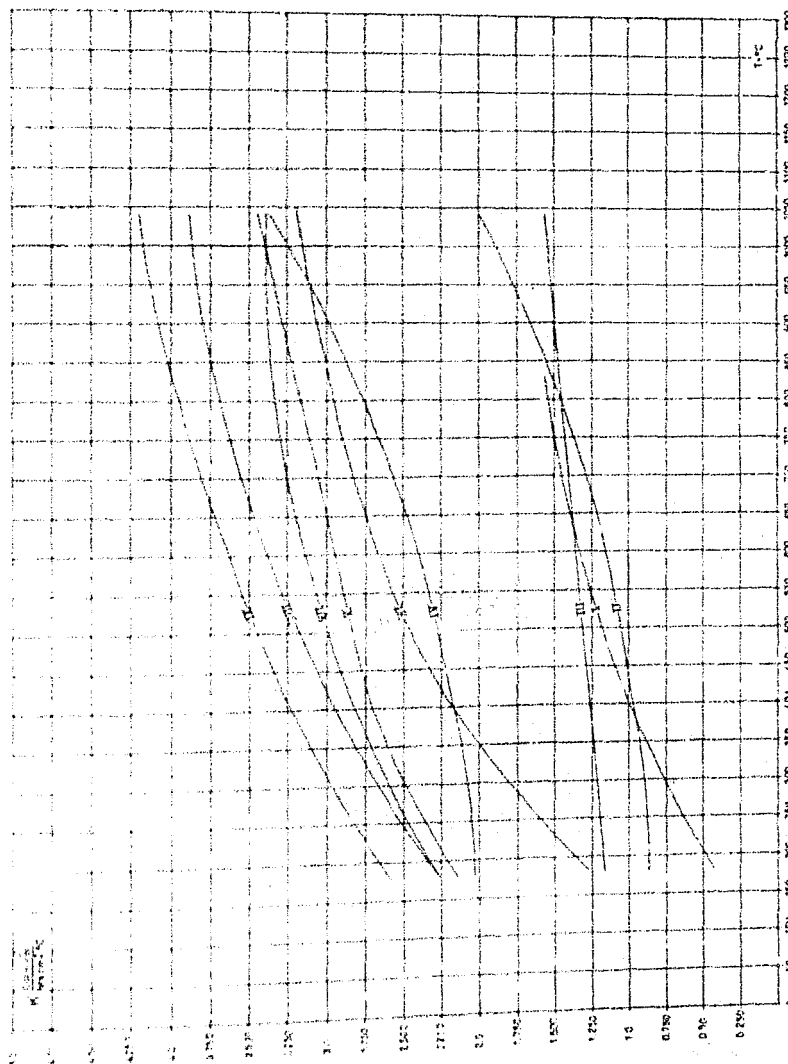
Fig. 11.

"K vs Período."

F.O.

1970

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ



TESIS PROFESIONAL

F.G. Fig. 12-12
 MATERIALES DE CONCRETO PARA TENDAS
 LAS CALIDADES DE LABORES ESTU-
 DIADAS

FERNANDO MONREAL HERNANDEZ

CAPITULO VI.

CONCLUSIONES.

- 1.- Un aparato para la determinación de la conductividad térmica de materiales cerámicos, que puede operar entre 150 y 1500°C, se evaluó, construyó y puso en operación.
- 2.- Se determinaron las conductividades térmicas para nueve calidades diferentes de ladrillo aislante.
- 3.- La exactitud del aparato ha sido comprobada por comparación de los resultados obtenidos con los reportados en la literatura para materiales similares medidos con el aparato recomendado por el A.S.T.M. Designación: C 201-68 (3, 31 y 35), y con los resultados reportados por la Compañía A.P. Green Refractories Co. en los Estados Unidos de Norteamérica y medidos con un aparato similar.

Se realizan estudios tendientes a optimizar los ciclos de operación y en consecuencia afinar tanto la exactitud como la duplicidad de los resultados.

- 4.- La instrumentación utilizada puede mejorarse, si una mayor exactitud es necesaria, y debe complementarse para hacer totalmente automática la ---

operación del aparato.

5.- El procedimiento de manejo es sencillo y las cantidades de muestra necesarias son relativamente pequeñas.

6.- Debido a que las principales fuentes de error son realizadas durante el procedimiento experimental como:

- A) Variación en la forma y lugar de colocación de los termopares.
- B) Colocación de la muestra, calorímetro y anillos protectores.
- C) Buen contacto térmico entre la muestra y el calorímetro.
- D) Construcción eficiente de los termopares.
- E) Errores en la toma de lecturas.
- F) Variaciones de corriente eléctrica.

Será necesario una preparación más eficiente de los operadores y mejorar, como ya se mencionó, ciertos instrumentos.

7.- De la gráfica construida "Densidad vs. K" se concluye que en general -- los materiales más densos tienen un coeficiente de conductividad térmica mayor.

8.- De las curvas obtenidas en "Porosidad vs. K" se puede observar que cuando menos en ciertos rangos a mayor porosidad, menor coeficiente de conductividad térmica y viceversa.

- 9.- De la gráfica de conjunto en la que se muestran las curvas para cada uno de los materiales estudiados, se aprecia que la conductividad térmica aumenta en relación directa con la temperatura de servicio de cada uno de estos materiales. (gráfica V-12).
- 10.-Una investigación complementaria sobre las muestras, desde el punto de vista cristalográfico por medio de petrografía y difracción con rayos X deberá realizarse, tendiente a analizar y correlacionar los cambios - cristalográficos ocurridos con las tendencias de conductividad.
- 11.-Del estudio teórico efectuado y de los resultados analizados puede concluirse que los factores mas importantes que afectan la conductividad - térmica son:
- 1) El espacio hueco total.
 - 2) La composición química.
 - 3) La temperatura de servicio.
 - 4) El tiempo y temperatura de quemado de los materiales.

Deben ser considerados además, la proporción, forma, orientación y continuidad de los espacios vacíos, la conductividad térmica de la matriz sólida y el gas en los poros.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Adams, M. y Loeb, A.L.

Thermal Conductivity: II, "Development of a thermal conductivity expression for the special case of prolate spheroids".
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 37 (2, Part. II),
1954.

Pags.: 73 - 74

- 2.- Austin, J.B.

Factors affecting thermal conductivity of nonmetallic materials.
Brick & Clay Record, Vol. 94 (3), 1939.

Pags.: 42 - 44.

- 3.- Austin, J.B. y Pierce, R.H.H., Jr.

Reliability of measurements of the thermal conductivity of
refractory brick.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 18, 1935.

Pags.: 48 - 54.

- 4.- Barret, L.R.

Heat transfer in refractory insulating materials.

Parte I: Texture and insulating power.

Transactions of the British Ceramic Society, Vol. 48, 1949.

Pags.: 235 - 262.

- 5.- Barret, L.R.; Vyse, J. y Green, A.T.

Heat Transfer in Refractory Insulating Materials.

Parte II: Studies of a Heat dissipation test for insulating materials.

Transactions of the Brithish Ceramic Society, Vol. 49, 1950.
Pags. 95 - 121.

Parte III: Thermal conductivity and permeability as related directional properties.

Ibid, Pags.: 122 - 128.

- 6.- Bopp, C.D.

Measurement of thermal conductivity with mercury contacts.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 43 No. 3, 1964.

Pags.: 151 y 152.

- 7.- Brady, J.G.

An apparatus for the measurement of the thermal conductivity of refractory materials at elevated temperatures.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 23, 1954.

Pags.: 19 - 30.

- 8.- Bravo, J.M.

Slag resistance of some selective refractories.

Iowa State University of Science and Technology.

Master Thesis, 1965

- 9.- Budni Kov, P.P.

The technology of ceramics and refractories

Translation by Scripta Technica.

The M.I.T. Press. - 1964.

- 10.- Chavart, F.R. y Kingery, W.D.

Thermal conductivity: XIII, "Effect of microstructure on conductivity of single-phase ceramics.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 24, 1957.

Pags.: 306 - 315.

- 11.- Clayton, H.W. y Whyman, M.H.

Technical Report,

of Pilkington Brothers Limited, 1965.

- 12.- Clements, J.F. y Vyse, J.

A new thermal conductivity apparatus for refractory materials.

Transactions of The British Ceramic Society, Vol. 53, 1954.

Pags.: 134 - 155.

- 13.- Dinger, C.; Kind, A; Schutz, N; y Dietzel, A.

Determining thermal conductivity at high temperatures.

Ber. Deut. Keram. Ges., Vol. 20 (8), 1939.

Pags.: 347 - 362.

- 14.- Filolenko, N.E. y Finck, J.L.

An apparatus for measuring the thermal conductivity of refractories at high temperatures.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 18 (1), 1935.

Pags. 6 - 12.

- 15.- Finck, J.L.

Improved apparatus for measuring thermal conductivity of refractories at high temperatures.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 20 (11), 1937.
 Pags.: 378 - 382.

16.-Francel, J. y Kingery, W.D.

Thermal conductivity: IX, "Experimental investigation of effect of porosity on thermal conductivity."

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 37 (2, Parte II), 1954.

Pags.: 99 - 107.

17.-Griffiths, E. y Challenor, A.R.

Determination of the thermal conductivity of refractory materials.

Transactions of The British Ceramic Society, Vol. 40 (2), 1941.

Pags.: 40 - 53.

18.-Hadfield, R. y Sarjant, R.J.

Control of the thermal properties of refractory materials.

Journal of Refractories, Vol. 10 (2), 1934.

Pags.: 62 - 66.

19.-Halm, L. y Lapoujade, P.

Note on the measurement of thermal conductivity of refractory products.

Bull. Soc. Franc. Céram., No. 4, 1949.

Pags.: 6 - 11.

20.-Heilman, R.H.

Heat transmission through bare and insulated furnace walls.

Transactions of The American Institute of Chemical Engineers.

Vol. 31, 1935.

Pags.: 165, 189 y 191.

21.-Kingery, W.D.

Introduction to Ceramics.
John Wiley & Sons, Inc.
4a. Edición, Abril de 1967.
Pags.: 486 - 509.

22.-Kingery, W.D.

Thermal conductivity: XIV, "Conductivity of multicomponent systems"
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 42, No. 12,
diciembre 1959
Pags.: 617 - 627.

23.-Kittel, C.

"Interpretation of thermal conductivity of glasses"
Ceramic Abstracts, enero de 1950.
Pagina: 15a.

24.-Loeb, A.L.

Thermal conductivity: VIII, "Theory of thermal conductivity of
porous materials."
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 37 (2, Parte II), 1954.
Pags.: 96 - 99.

25.-McNamara, Edward P. y Dulberg, Irving.

Fundamentals of Ceramics.
College of Mineral Industries.
The Pennsylvania State University, 1958.

26.-Measurements of thermal conductivity.

Ceramics, 1, 1950.

Pags.: 614 - 618.

27.-Modern Refractory Practice.

Harbison - Walker Refractories Company.

The William Feather Company, Cleveland, 1961.

Pags.: 320 - 336.

28.-Nicholls, F.

Determination of thermal conductivity of 353 refractories.

Bulletin of The American Ceramic Society, Vol. 15 (2), 1936.

Página: 37

29.-Norton, C.L. Jr.

Apparatus for measuring thermal conductivity of refractories.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 25 (5), 1942.

Página: 451,

30.-Norton, F.H.

Refractories.

Mc.Graw - Hill Book Company, Inc.

1949

Capítulo No. XVIII

31.-Patton, T.C. y Norton, C.L. Jr.

Measurement of thermal conductivity of fireclay refractories.

Journal of The American Ceramic Society, Vol. 26, 1943.

Página: 350.

32.-Perry, John H.

Chemical Engineers' Handbook

McGraw - Hill Book Company, Inc.

4a. Edición - 1963.

33.-Refractories Bibliography. - 1928 a 1947 (inclusive).

American Iron and Steel Institute, and The American Ceramic Society, Inc.

Columbus, Ohio - 1950.

34.-Refractories Bibliography. - 1947 - 1956.

Compiled by: The Joint Refractory Committee of The American Iron and Steel Institute and The Refractories Institute.

University of Oklahoma Press. - 1959.

35.-Refractories, Glass and Other Ceramic Materials;

Manufactured Carbon and Graphite Products.

1969, Book of A.S.T.M. Standards with Related Material.

Parte - 13

American Society for Testing and Materials. - 1969.

36.-Ruh, Edwin y McDowell, J. Spotts.

Thermal conductivity of fireclay brick.

Journal of The American Ceramic Society, Vo. 45, No. 4, 1962.

Pags.: 189 - 195.

37.-Schwartz, M.A.

Thermal conductivity of some refractory materials at elevated temperatures.

U.S. Atomic Energy Comm. Publ.,
No. NEPA - 1015, 1949.

38.-Singer, Felix y Singer, Sonja S.
Industrial Ceramics.
Chapman & Hall Ltd.
Londres - 1963.

39.-Sutton, W.H.
Apparatus for measuring thermal conductivity of ceramic and
metallic materials to 1200°C.
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 43 (2), 1960.
Pages.: 81 - 86.

40.-Thermal Conductivity Furnace.
Laboratory Report - Laboratory Number E-19
A.P. Green Refractories Co.
Research Center, Mexico Missouri
25 de abril de 1968.

41.-Waddams, A.L.
Flow of heat through granular material.
Journal Soc. Chem. Ind., Vol. 63T (11), 1944.
Pages.: 337 - 340

42.-Wallace, Richard W.; Norton, C.L. Jr; Bart Ronald y
Brady, John G.
Precision studies using A.S.T.M. thermal conductivity test
for refractories.

Industrial Heating.
Refractories and Insulation Section.
Enero de 1969. - Pags.: 122 a 126.

43.-Winckler, J.R.

Spherical furnace calorimeter for direct measurement of
specific heat and thermal conductivity.
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 26 (10), 1943.
Pags.: 339 - 349

44.-Wygant, J.F. y Crowley, M.S.

Effects of high-conductivity gases on the thermal conductivity
of insulating refractory concrete.
Journal of The American Ceramic Society.
Mayo 1958.

45.-Young, R.C.; Hartwing, F.J. y Norton, C.L.

Effect of various atmospheres on thermal conductance of
refractories.
Journal of The American Ceramic Society, Vol. 47 No. 5,
Pags.: 205 - 210.
Mayo 21, 1964.