



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

ESCUELA DE CIENCIAS QUÍMICAS

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACION
DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS.

TRABAJO RECEPTACIONAL

GRACIELA DELCADO VARGAS

SAN LUIS POTOSÍ S. L. P.

1981



T
QC3 21

D4

C.1



1080076437



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS

**DISEÑO DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACION
DE CONDUCTIVIDADES TERMICAS.**

**TRABAJO RECEPTACIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO**

P R E S E N T A :

GRACIELA DELGADO VARGAS

SAN LUIS POTOSI S. L. P.



1981

X
QC321
D4



DEDICO ESTE TRABAJO:

Con todo el agradecimiento y respeto

A MIS PADRES:

**Manuel Delgado Pérez y
Ma. Guadalupe Vargas de Delgado.**

A MI ESPOSO:

Ramón Méndez Segovia.

A MIS HIJOS:

**Berenice Abigail y
Gerardito.**

A MIS HERMANOS:

**Ma. Edith
Ma. Virginia
Alicia
Manuel
Raúl
Carlos y
Miguel.**

A MIS ABUELITAS:

**Ana Pérez y
Gabriela Santos.**

**Espero haber cumplido con todos, en especial con mis
padres, por el gran esfuerzo y apoyo que siempre me
han brindado.**

A LA ESCUELA DE CIENCIAS QUIMICAS,

A MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS:

GRACIELA.

I N D I C E

	Pág.
CAPITULO I	
INTRODUCCION	1
CAPITULO II	
MECANISMOS DE TRANSMISION DE CALOR ...	2
Convección, Convección forzada	2
Convección natural	2
Flujo laminar, flujo turbulento	3
Conduccción, Ley de Fourier	4
Conduccción en régimen estacionario ..	5
Conduccción en estado transitorio	6
Conduccción en paredes compuestas	7
Radiación, Ley de Boltzman	8
Emitancia, potencia emisora	10
Ley de Kirchhoff	10
Conductividad calorífica	12
Conductividad calorífica en líquidos..	13
CAPITULO III	
METODOS Y APARATOS PARA MEDIR LA CONDUCTIVIDAD TERMICA	14
Método Standar del ASTM-201-47	14
Filolenko y Finck	16
Halm Lapoujade	16
Método de la placa plana	17
Clements	17
Sutton	18
Ruh y Mc Dowll	19
Método Northrup	20
Dinger c.Kind A Schutz W. y Dietzel a.	21
Calorímetro de Wincler	22
Método de Boop	23
Diseño de Clyton y Wyman	25
Fundamento del aparato y diseño	25
Instrumentación, descripción del aparato	28

	Pág.
Datos, procedimiento experimental.....	33
Resultados	43
 CAPITULO IV	
CALCULOS Y ECUACIONES DE DISEÑO	49
Cálculo de flujo de calor	50
Cálculo de la resistencia	51
Cálculo del flujo de agua	53
Cálculo de la corriente	54
Tabla de resultados	56
 CAPITULO V	
ESTIMACION DE COSTOS	57
 CAPITULO VI	
ESPECIFICACIONES PARA EL EQUIPO	58
 CAPITULO VII	
PRACTICA PROPUESTA	59
 CONCLUSIONES	 63
NOMENCLATURA	65
BIBLIOGRAFIA	67
DIBUJOS Y ESQUEMAS DEL EQUIPO	71
TABLAS DE CONSULTA	80

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

La intención de este trabajo es complementar el área de transferencia de calor del laboratorio de Ingeniería Química de la escuela, ya que se trata del diseño de un equipo para determinar las conductividades térmicas de materiales no metálicos, tales como madera, concreto, asbesto, lana de vidrio, vidrio, refractarios, arcilla, pudiéndose ampliar esta lista tomando como factor limitante la forma de la muestra y la capacidad de calentamiento.

También se pueden medir las conductividades de materiales metálicos ajustándose a las dimensiones del equipo. Las mediciones de las temperaturas de la muestra se hará por medio de termopares; éstos irán colocados en cada extremo de la muestra y la lectura se efectuará por medio de un potenciómetro.

La finalidad de este equipo es ver como se lleva a cabo la transmisión de calor en los diferentes materiales en estado inestable, así como la variación de temperatura para cada muestra en función del tiempo y analizar una aplicación de la transferencia de calor por conducción para placas planas de sección constante.

C A P I T U L O 1 1

MECANISMOS DE TRANSMISION DE CALOR.

La transmisión de energía en forma de calor se lleva a cabo en tres formas: convección, conducción y radiación.

CALOR: Forma de energía que se transmite mediante un gradiente de temperatura.

CONVECCION: Sucede cuando sobre las partículas o partícula del fluido actúan fuerzas que vencen las fuerzas de fricción y la inercia del mismo fluido, ejemplo: la corriente de aire que circula en un radiador común de calefacción.

Existen dos formas de convección y son:

CONVECCION NATURAL: Es cuando las fuerzas utilizadas para producir la convección son generadas solamente por las diferencias de densidades dentro del fluido y estas diferencias son a su vez debidas a un gradiente de temperatura existentes dentro del fluido, ejemplo: el calentamiento de agua en un recipiente antes de sufrir la ebullición.

CONVECCION FORZADA: Cuando las fuerzas se generan por un dispositivo mecánico, como un agitador o un ventilador. El flujo no depende del gradiente de densidad, ejemplo: bombear un fluido a través de una tubería caliente.

Para los cálculos de transferencia de calor por este mecanismo se usa la siguiente ecuación: (Ref. 3)

$$q = h_c A (T_1 - T_2) \dots\dots\dots (2.1)$$

Esta suposición es válida excepto para gases muy diluidos, en que la trayectoria libre media de las moléculas es comparable con las condiciones del sistema (flujo deslizante) o mucho mayor (flujo (Knudsen)).

Para la transferencia de calor por convección se deben considerar los siguientes regímenes de flujo, pues de estos depende la mayor o menor transferencia de calor:

FLUJO LAMINAR: Cuando el sentido de la corriente en un tubo es siempre paralela al tubo sin que halla ninguna mezcla transversal.

FLUJO TURBULENTO: Cuando se forman torbellinos en la corriente del fluido y por lo tanto hay mezcla transversal con respecto al tubo.

Para distinguir un regimen de otro, es necesario recurrir al número adimensional de Reynolds, cuyas variables dependen de las condiciones del sistema: (Ref. 3)

$$Re = \frac{D V P}{\mu} \dots\dots\dots (2.2)$$

Cuando los valores del número de Reynolds son menores de 2100, el flujo es laminar y cuando es de 4000 en adelante el flujo es turbulento.

Hay una región de transición en la que puede haber cualquier tipo de régimen, dependiendo de las condiciones de entrada al tubo y de la distancia media a partir de la entrada. En esta región el número de Reynolds oscila entre 2100 y 4000.

CONDUCCION: Cuando el calor fluye sin que se produzca un desplazamiento notorio de la materia, ejemplo: el flujo de calor a través de sólidos como los ladrillos de las paredes de un horno.

LEY DE FOURIER: Base de la transferencia de calor por conducción la cual en estado estacionario que es el estado más frecuente, tiene la forma siguiente:

$$dQ = - dAK \frac{dT}{dx} \dots\dots (2.3)$$

La cual nos dice que la velocidad instantánea de paso de calor (dQ) es proporcional al área normal de flujo (dA) y al gradiente de temperatura (dT/dx). El signo menos establece que la transferencia de calor se lleva a cabo desde la región de mayor temperatura hasta la de menor temperatura y se explica por medio de la siguiente figura :2.1

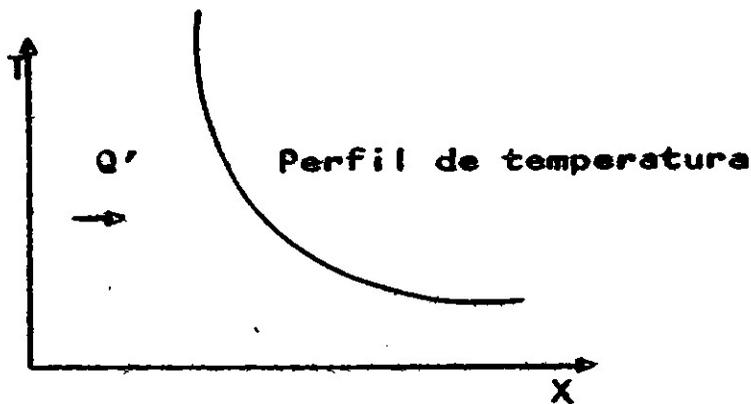


Fig. 2.1 perfil de temperatura donde Q' es el flujo de calor por unidad de tiempo.

CONDUCCION EN REGIMEN ESTACIONARIO: Es cuando la temperatura de cualquier punto del sistema no varfa con el tiempo y se expresa como: (Ref. 2)

$$Q \frac{dx}{A} = - k dt \dots\dots\dots (2.4)$$

Si el área es constante y la conductividad calorífica es independiente de la temperatura, la ecuación se transforma en:

$$\frac{Q}{A} (x_2 - x_1) = - k (T_2 - T_1) \dots (2.4a)$$

$$Q = KA \left(\frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1} \right) = \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x / KA} \dots (2.4b)$$

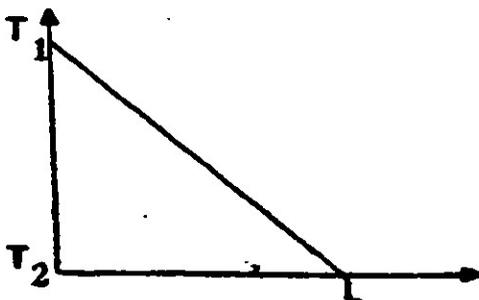


Fig. 2.2 En esta figura se muestra la variación de la temperatura en una placa, como función de la distancia, además la distribución es lineal, donde la conductividad térmica es constante y T_1 y T_2 son las temperaturas altas y bajas respectivamente y L es el espesor de la placa.

En el momento que se ha alcanzado régimen permanente se cumple la siguiente ecuación: (Ref. 8)

$$Q = -kAdT/dL \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

Es decir, el flujo de calor es directamente proporcional al área de transferencia de calor y al gradiente de temperatura; la ecuación anterior puede expresarse:

$$Q/A = -k \frac{dT}{dL} \quad \dots\dots\dots (2.5a)$$

Es importante mencionar que la ecuación constituye propiamente la definición de (k) conductividad térmica y se admite -- que ésta es constante para fluidos y sólidos homogéneos. Esta ecuación se cumple también para líquidos y gases, por lo tanto la "Ley de Fourier" expresada anteriormente, rige el fenómeno de conducción cuando se realiza en sólidos, líquidos y gases.

CONDUCCION EN ESTADO TRANSITORIO: En el enfriamiento y calentamiento de sólidos y al iniciar e interrumpir una transmisión de calor en condiciones de estado estacionario y en general, en todos aquellos procesos en los cuales esta inte---

rrupción se cumple durante un tiempo relativamente corto y - la temperatura en función del tiempo, se dice que el proceso es transitorio.

CONDUCCION EN PAREDES COMPUESTAS: Para establecer el flujo - de calor en paredes compuestas de n-1 placas de diferentes - materiales en contacto como es muestra en la figura 2.3, en estas condiciones:

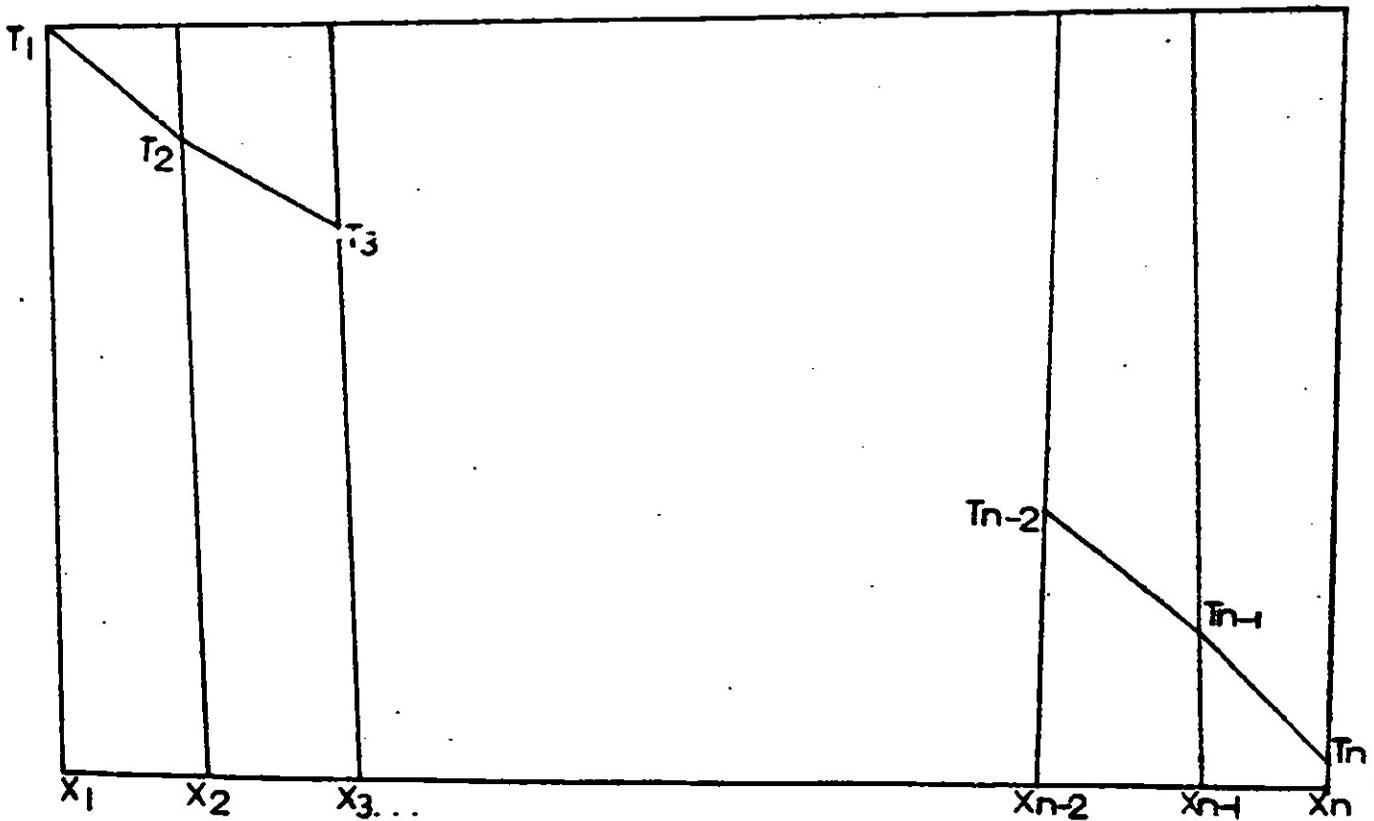


Fig. 2.3 Paredes compuestas con n-1 placas.

Suponiendo K constante para cada intervalo (Ref. 4)

$$q = (K_{1,2}) A (T_1 - T_2) / (x_2 - x_1)$$

$$q = (K_{2-3}) A (T_2 - T_3) / (x_3 - x_2)$$

$$q = (K_{n-1,n}) A (T_{n-1} - T_n) / (x_n - x_{n-1})$$

Despejando AT y sumando las tres expresiones, obtenemos:
(Ref. 4)

$$q \left[\frac{x_2 - x_1}{K_{1,2} A} + \frac{x_2 - x_3}{K_{2,3} A} = \dots = \frac{x_n - x_{n-1}}{K_{n,n-1} A} \right] = T_1 - T_n$$

De donde se obtiene:

$$q = \frac{T_1 - T_n}{\sum_{i=2}^n \frac{x_i - x_{i-1}}{K_{i-1,i} A}} \dots \dots \dots (2.6)$$

Esta expresión indica que el flujo de calor a través de las n-1 placas de diferentes materiales es igual a la diferencia total de temperatura entre la suma de las n-1 resistencias de la transmisión calorífica que se representa por:

$$\frac{x_i - x_{i-1}}{K_{i-1,i} A}$$

Si k varía con la temperatura linealmente se empleará una conductividad (Km), o siempre y cuando su variación dentro de los límites fuese pequeña.

RADIACION: Es la transmisión de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas. Si la transmisión se hace en el vacío, no se transforma en calor ni sufre modificaciones en su trayectoria; en cambio en condiciones normales, si la radiación encuentra obstáculos en su camino, puede ser reflejada o absorbida.

En este trabajo solo se mencionará la radiación térmica, la cual es debida exclusivamente a la temperatura (Ref. 11)

PRINCIPALES LEYES DE LA RADIACION

LEY DE STEFAN BOLTZMAN: Aplicada a la radiación de un cuerpo negro. Un radiador perfecto o cuerpo negro es aquel que emite energía radiante de su superficie a razón proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, o sea: (Ref. 10)

$$q^{\circ} = \sigma T^4 \dots\dots\dots (2.1)$$

Donde σ se conoce como la constante de Stefan Boltzman y su valor depende de las unidades utilizadas.

LEY DE STEFAN BOLTZMAN establece que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro depende exclusivamente de la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

Por otra parte, un cuerpo real no satisface las características de un cuerpo negro, dado que emite una menor cantidad de radiación que éste. Si un cuerpo emite a una temperatura dada, una fracción constante de la emisión correspondiente a un cuerpo negro a cada longitud de onda, se conoce como un cuerpo gris. (Ref. 10)

$$q^{\circ} = \epsilon \sigma T^4 \dots\dots\dots (2.8)$$

Donde ϵ es la emitancia de la superficie gris y se define como: (Ref. 10)

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \dots\dots\dots (2.9)$$

EMISIVIDAD O EMITANCIA: Es la relación entre la energía emitida por un cuerpo gris y la que emitiría un cuerpo negro de las mismas dimensiones y de la misma temperatura.

POTENCIA EMISORA: O poder emisivo (E) es la cantidad total de energía por unidad de superficie y por unidad de tiempo.

LEY DE KIRCHHOFF: Establece que cuando hay equilibrio o calorífico, un cuerpo absorbe tanto como emite.

$$\epsilon = A_b \dots\dots\dots (2.10)$$

Ab.- Absortividad.

La Ley de Kirchhoff es válida en los problemas ordinarios de radiación térmica, donde la radiación reflejada y la radiación incidente tienen longitudes de onda similares.

La ley no es válida cuando una superficie irradia longitudes de onda larga estando irradiadas en longitudes de onda cortas. Mas aún la ley demuestra que la emisividad de cualquier superficie debe ser menor que la de un cuerpo -

negro a la misma temperatura, por lo tanto la emisividad - de cualquier superficie real debe ser menor que la unidad.

La radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura absoluta T_1 como se muestra esquemáticamente en la figura 2.4, hacia una envolvente a temperatura T_2 , que lo rodea - completamente y la cual se comporta también como cuerpo negro.

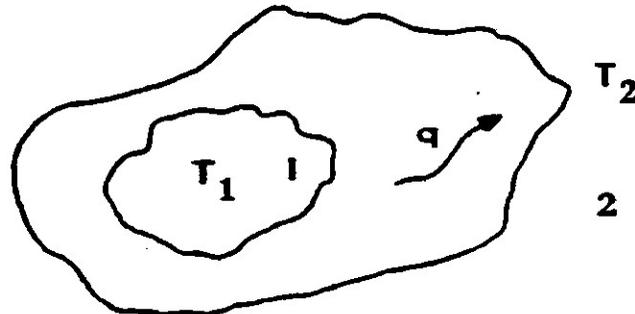


Fig. 2.4 Transferencia de calor por radiación.

Para evaluarse mediante la expresión: (Ref. 1)

$$q = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.11)$$

A_1 = área del cuerpo 1

CONDUCTIVIDAD CALORIFICA.

La conductividad calorífica (k), es una propiedad que interviene en la mayor parte de los problemas de transmisión de calor; su importancia en el transporte de energía es igual a la de la viscosidad en el transporte de cantidad de movimiento. El factor de proporcionalidad (K) es una magnitud característica de la sustancia dada, variable con la temperatura y el estado de agregación.

Las conductividades caloríficas de los sólidos han de determinarse experimentalmente, ya que éstos dependen de numerosos factores que son difíciles de medir o deducir.

En los sólidos la conductividad térmica decrece o se incrementa proporcionalmente con la temperatura. En el caso de los sólidos porosos, por ejemplo: la conductividad calorífica depende de la fracción de los huecos, del tamaño de los poros y del fluido que está constituido y contenido en los poros. En los materiales cristalinos tienen importancia las fases y el tamaño de los cristales fundamentalmente en los sólidos amorfos ejerce un gran efecto el grado de orientación molecular.

Por lo general, los metales son mejores conductores que los no metales y los materiales cristalinos conducen más fácilmente el calor que los amorfos. Los sólidos porosos secos son muy malos conductores del calor y por lo tanto se dis-

tinguen por ser excelentes aislantes térmicos y se usan para evitar pérdidas de calor en los equipos.

La conductividad de la mayor parte de los metales puros, disminuye con la temperatura, mientras que la de los no metales aumenta. Las aleaciones presentan un comportamiento intermedio.

CONDUCTIVIDAD CALORIFICA DE LIQUIDOS.

La conductividad calorífica de un líquido es muy difícil separar totalmente el efecto de convección, pero puede disminuir hasta valores prácticamente inapreciables si se emplean capas muy frías y diferentes de temperatura, inferiores a un grado.

La conductividad calorífica de los líquidos no metálicos, con excepción del agua, varía de 0.075 a 0.225 Kcal/m°C-h. En general, disminuye con la temperatura, con excepciones algunas. La diferencia de la presión solo puede ser apreciada a presiones del orden de 100 atmósferas.

En los gases la conductividad calorífica es proporcional a su viscosidad.

C A P I T U L O I I I

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 que fluye es medido por un calorímetro de agua y el espesor y áreas de las muestras son conocidos y puede decirse que varía 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 cuidadosamente previsiones. Además las temperaturas sobre los planos isométricos deben ser leídos 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.

Quizá ninguna medida otra física es acosada por tantas dificultades. Los trabajos de Norton (Ref. 9) y Patton y Norton (Ref. 10) son una excelente discusión acerca de estos factores, sus errores y su corrección.

En la figura 3.1 se describe un aparato del tipo mencionado el cual fué primeramente construído en el laboratorio de refractarios de Babcock and Wilcox Company y posteriormente adaptado por el Método Standard del ASTM C.

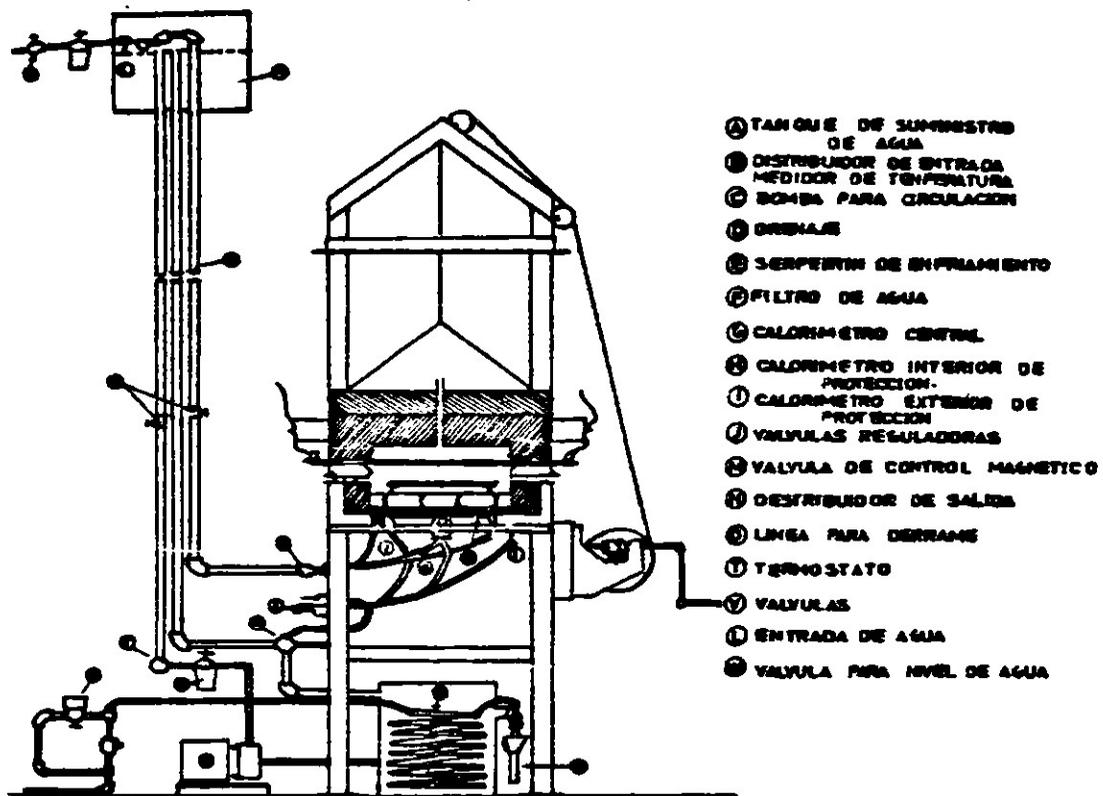


FIG. II-1 APARATO PARA LA DETERMINACION DE
 CONDUCTIVIDAD TERMICA ASTM C207-60

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 (Ref. 11) 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.

Fue publicado en 1937 en el Journal Of The American Ceramic Society (Ref. 12).

Halm Lapoujade (Ref. 13), obligados por el espacio en el 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 Kanthal, manteniendo sobre la otra un calorímetro de agua. Un anillo de protección hecho del mismo material de muestra se acopla al conjunto con una sección separada del calorí-

metro en contacto con él. Una exactitud del 12% se obtiene sobre una misma muestra.

En 1950 se publicó (Ref. 14) 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 conductividades para ladrillos aislantes de sílice y de cromo-magnesita a temperaturas medias de 1100°C. El aparato utiliza una placa de prueba de 229 x 229 x 76 mm. (9x9x3 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 (Ref. 15).

Clements (Ref. 16) presenta un aparato que utiliza placas de 229 x 229 x 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 (Ref. 17) publica en 1960 un aparato diseñado para medir la conductividad térmica de materiales cerámicos y metales de 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 cuatro 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 y
- 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 con-

trolar la fuente de 110 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 período de 48 - horas a temperaturas abajo de 300°C mientras que a temperaturas considerablemente altas (1000°C), se registran desviaciones hasta de 5°C, en un período de 12 horas. La muestra es usualmente una varrilla de 229m. (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 (cinco termopares en serie) de cobre-constantan, se usa para medir la diferencia de temperatura en el agua que entra y sale del calorímetro. La precisión observada de este aparato es de 3% a 10% 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 requiere de 24 a 48 horas para alcanzar el equilibrio de 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 (Ref. 18) ha venido efectuando bastantes estudios sobre la conductividad de materiales refractarios de alta alúmina, arcilla refractaria, sílice, -

romo, 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; esta válvula requiere le sea suministrada una presión de aire de 1.4 kg/cm^2 (20 lb/pulg.^2) y se 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 agua (17 pies).

La conductividad térmica se mide también por otros sistemas, así un espécimen cilíndrico es conveniente algunas veces, teniendo 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 este 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 materiales 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:

$$\frac{\text{Caída de temperatura en el espécimen A}}{\text{Caída de temperatura en el espécimen B}} = \frac{K_B}{K_A} \dots(3.1)$$

Donde:

K_A = Conductividad térmica del material A

K_B = Conductividad térmica del material B

Dinger C., Kind A., Schutz W. y Dietzel A. (Ref. 19) diseñaron un instrumento que permite buena aproximación y rapidez en la medida de conductividades térmicas de materiales 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 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. La temperatura de 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 los 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 (Ref. 20) 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 eléctricamente 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 este 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 la radiación en materiales cerámicos Bopp. (Ref. 21) desarrolló un método para medir la conductividad térmica.

El empleo de este aparato permite el uso de pequeñas muestras, las cuales son colocadas entre los contactos de mercurio; el bloque superior es calentado eléctricamente y el interior se mantiene a una temperatura lo más bajo que sea posible y la conductividad térmica se calcula de acuerdo a la potencia eléctrica requerida para producir una diferen-

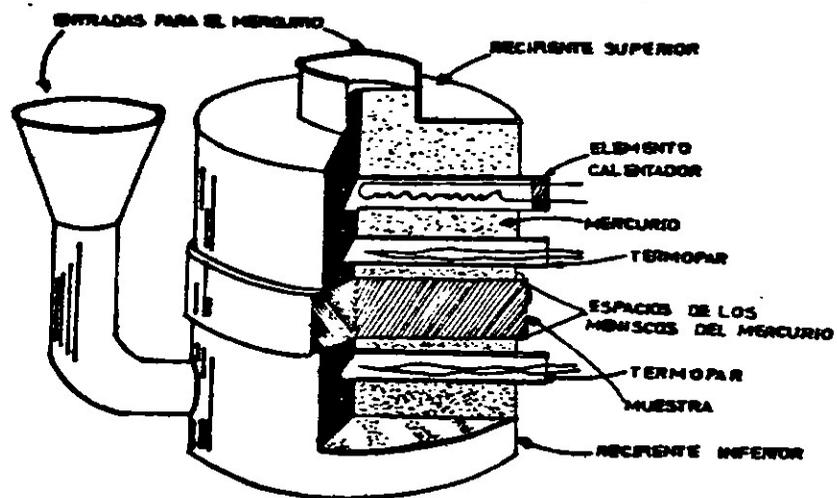
cia de temperatura determinada entre los bloques. La resistencia del aparato en serie con el espécimen es determinada comparando los resultados para especímenes de diferente espesor. Las limitaciones y fuentes de error del método son definidas por Loffe-E Loffe (Ref. 22). La novedad de este método es 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/seg.cm⁻¹°C. Las principales características de este aparato se muestran en la figura III-2.

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 vidrio. La conductividad térmica K, de una muestra delgada es dada por: (Ref. 23)

$$K=d \left(\frac{A}{q_e} - 1/h \right)^{-1} \dots\dots\dots (3.2)$$

Donde:

- d = Espesor de la muestra
- A_x = Area de contacto de un lado de la muestra con -- mercurio.
- q_e = 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 la superficie del espécimen.



**CELDA PARA DETERMINACION DE CONDUCTIVIDAD
TERMICA**

**FIG. II-2 APARATO DE BOPP PARA DETERMINAR
CONDUCTIVIDADES Y LOS EFECTOS DE RADIA-
CION EN MATERIALES CERAMICOS.**

Clayton y Wyman (Ref. 23) diseñaron en 1965 un aparato para la determinación de conductividades térmicas de materiales refractarios, en los laboratorios de investigación y desarrollo Lathom, en su sección de refractarios.

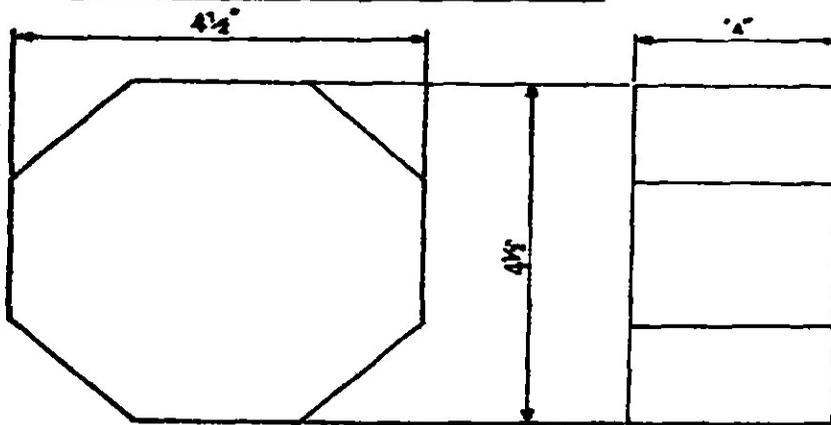
Este aparato se tomó como base para la construcción de uno en México y esta decisión obedeció a las necesidades del laboratorio de investigación y desarrollo y el control de calidad de compañía mexicana de refractarios A.P. Green; esta elección estuvo determinada por las investigaciones y un estudio efectuado del método en E.U.A. en los laboratorios de investigación de A.P. Green Refractarios Co. (Ref. 24)

Fundamentalmente el aparato está constituido por un horno que calienta eléctricamente 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

ESPESORES DE MUESTRA RECOMENDADOS	
DIMENSION "A"	MATERIALES
1½"	MATERIAL AISLANTE
2	MATERIAL REFRACTORIO



MUESTRA PARA EL APARATO DE CONDUCTIVIDAD TERMICA. DIMENSIONES Y FORMA

FIG. III-3 MUESTRA EMPLEADA PARA LAS DETERMINACIONES.

octagonal, en lugar de los discos sugeridos por los diseñadores del método, por ser más fáciles de obtener de ladrillos standard, como se indica en la figura III-3. 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 los investigadores, han mostrado muy buena concordancia.

A continuación se menciona algunas de las ventajas que este aparato puede ofrecer sobre el requerido por el método standard de prueba del ASTM designación:(Fig. 3-1)

- a) Procedimiento de operación más sencillo.
- b) El volumen 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 espécimen 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 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.

APARATO

El diseño del horno se muestra en la figura III-4

La fuente calorífica consiste en seis elementos de calentamiento de carburo de silicio con una zona efectiva de 178 mm. (7 pulg.) de longitud y con una capacidad para disipar

ha sido empleada para este propósito. El montaje del calorímetro mostrado en la figura III-5 consiste en un bloque sólido calorimétrico de 64 mm. (2 1/2 pulg.) de diámetro y 38 mm. (1½ pulg.) de espesor rodeada de dos anillos protectores concéntricos, del mismo material y espesor, separados uno de 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 de pulg.) 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 figura III-6 es un diagrama de bloques en el cual puede verse la distribución y conexión de los instrumentos controladores y registradores que trabajan en el aparato construido.

La figura III-7 corresponde al diagrama eléctrico del aparato.

DESCRIPCION DE LA INSTRUMENTACION DEL APARATO.

- 1) Elementos de calentamiento: se emplearon seis elementos conectados en serie con las siguientes características:

Marca: Crystolon Hot Rods.

Tipo: Barras de carburo de silicio.

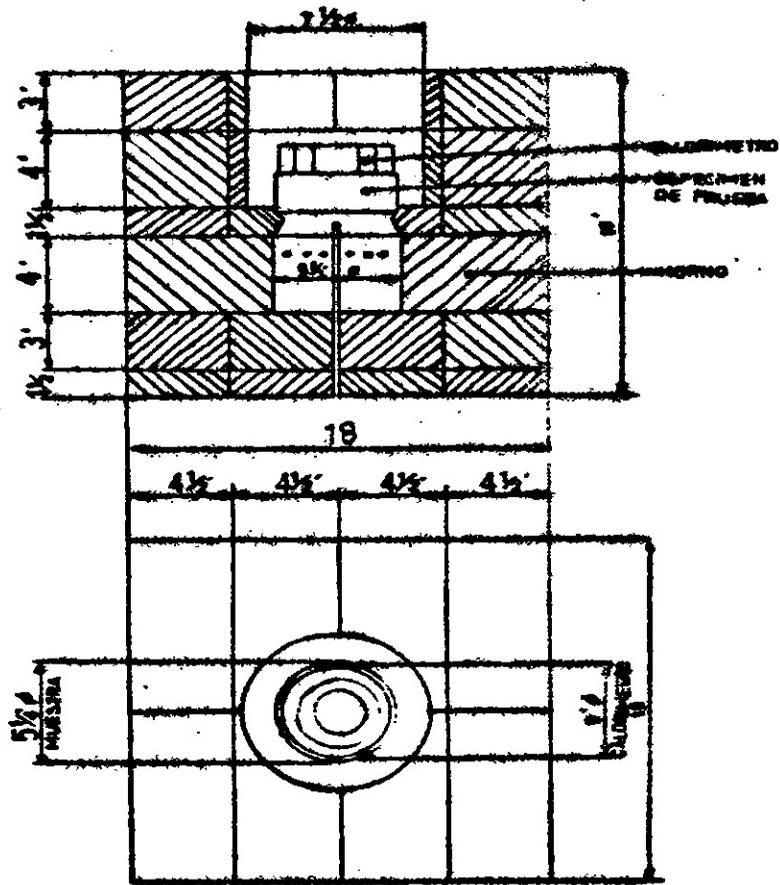


FIG III-4

Conjunto que muestra la construcción del
 horno con ladrillo refractorio aislante, e ins-
 talación del espécimen de prueba y calorímetro.

MONTAJE DEL CALORIMETRO

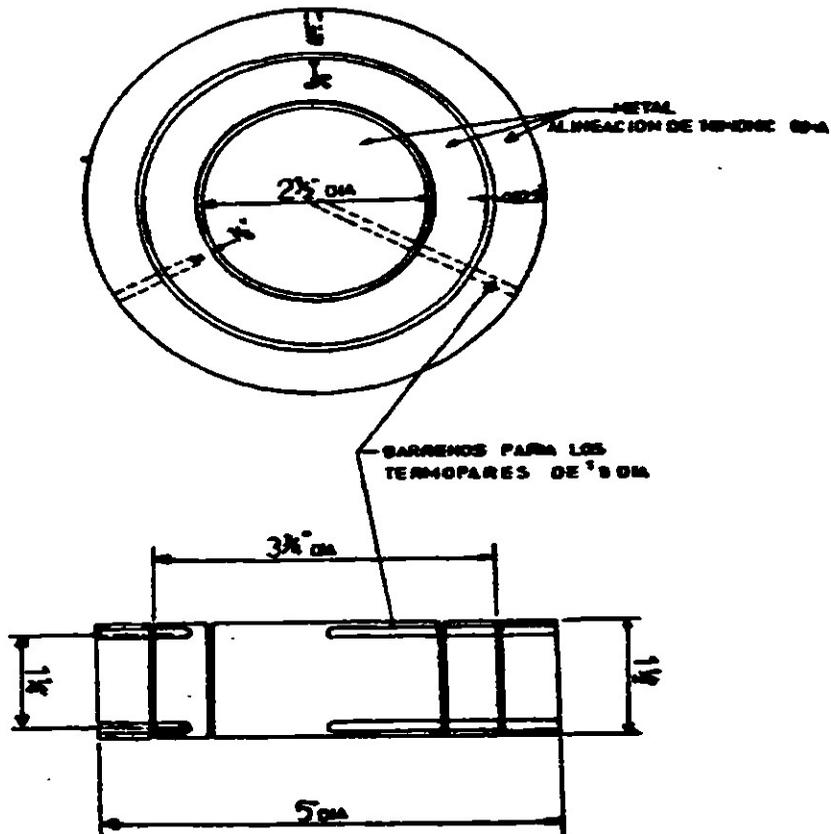


FIG. II-5 CALORIMETRO Y DISTRIBUCIONES DE TERMOPARES.

Fabricante: Norton Company

Longitud total: 533 mm. (21 pulg.)

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

Diámetro: 10 mm. (3/8 de pulg.)

Resistencia nominal: 2.71 ohms.

- 2) Termopares: se usa 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 en el calorímetro y termopares de Platino/Platino 10% Rodio para medir -- la temperatura del horno.
- 3) Controlador programador: se emplea una unidad controladora-programadora Modelo 10170 de Leeds & Northrup.
- 4) Unidad controladora-posicionador: Se instaló en P.A. T. (Position Adjusting Type) de triple acción serie 60 fabricado por Ledds & Northrup.
- 5) Autotransformador variable: Se usó una unidad de -- Ledds & Northrup Modelo D serie 17441 255.
- 6) Conductor de mecanismos: Fué acoplada una válvula directora de mecanismos para control eléctrico de la serie 1°260 de Ledds & Northrup.
- 7) Registrador-indicador: Se instaló un speedomax G. de Ledds & Northrup Modelo S serie 60000.

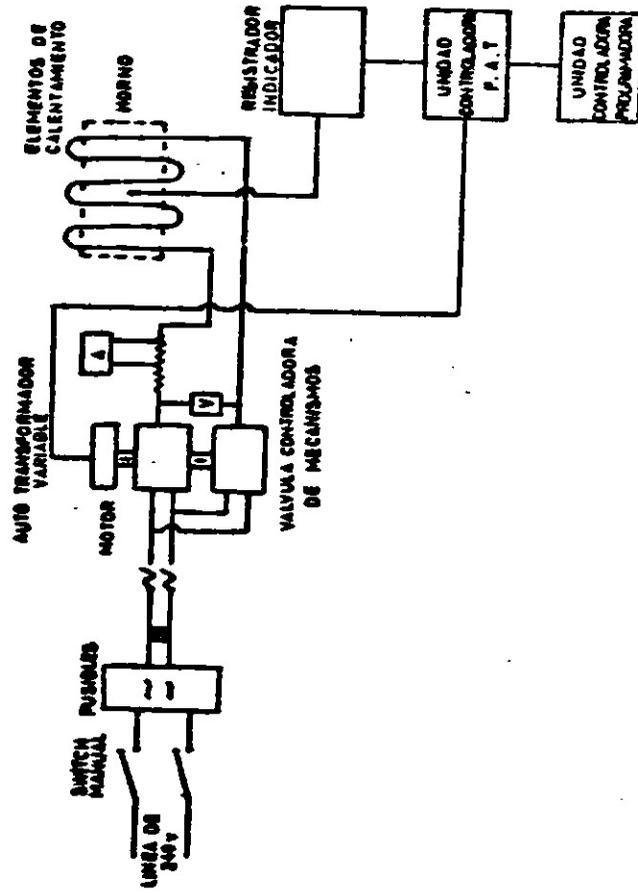


FIG. III-6 DIAGRAMA DE BLOQUES DE INSTRUMENTACION.

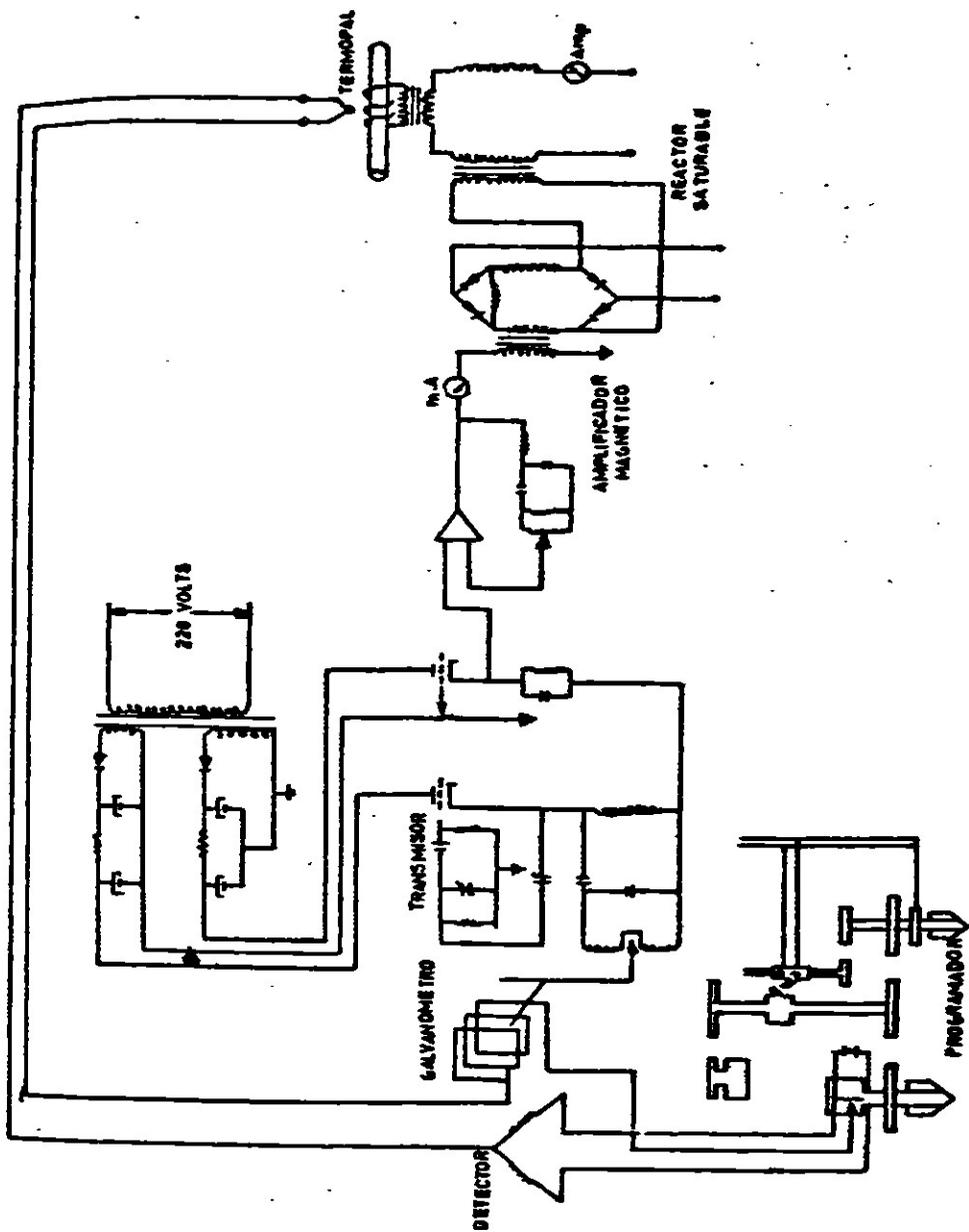


FIG. III-7 DIAGRAMA ELECTRICO.

- 8) Potenciómetro: Para las lecturas de las temperaturas ha sido empleado un potenciómetro portátil de alta - precisión No. 8662 de Ledds & Northrup.
- 9) Selector de Switches: Un selector rotatorio de switches No. 8248 de Ledds & 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 dá movimiento al programa, la unidad programadora-controladora envía de acuerdo con el programa inserto, una señal de 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 autotransformador 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 60000
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 horas
Incrementar a	420 en 6 horas (25°C por hora)
Mantener en	420°C por 24 horas
Incrementar a	615°C en 6 horas (30°C por hora)
Mantener en	615°C por 24 horas
Incrementar a	830°C en 6 horas (35°C por hora)
Mantener en	830°C por 24 horas
Incrementar a	1040°C en 6 horas (35°C por hora)
Mantener en	1040°C por 24 horas
Decrecer a	25°C en 6 horas (170°C por hora)
Detención 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 4½ pulg.) o moldeado, para formar un octágono de 48 mm. (1 7/8 pulg.) por lado, (ver figura III-3) aunque otras formas como discos pueden ser utilizados; 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 mismos rangos, de tal manera que para materiales aislantes espesores del orden de 25 mm. (1 pulg.) son adecuados para ladrillos de silice, 51 mm. (2 pulg.) y para productos electrofundidos o Zircón de alta densidad, etc., 76 mm. (3 pulg.) son las más convenientes.

Las caras de la espécimen deber ser planas y paralelas, ranurándose posteriormente para el soporte de los termopares.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los termopares son sementados 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 lo indica la figura III-8. Las piezas de prueba se colocan en el aparato como se muestra en la figura No. III-9.

DIAGRAMA MOSTRANDO LA POSICION DE LOS
TERMOPARES EN LA MUESTRA

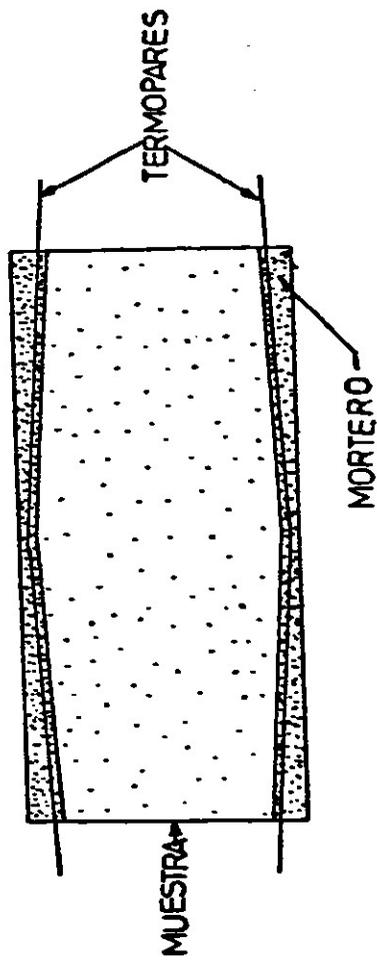


FIG. III-8 POSICION DE LOS TERMOPARES EN LA
MUESTRA

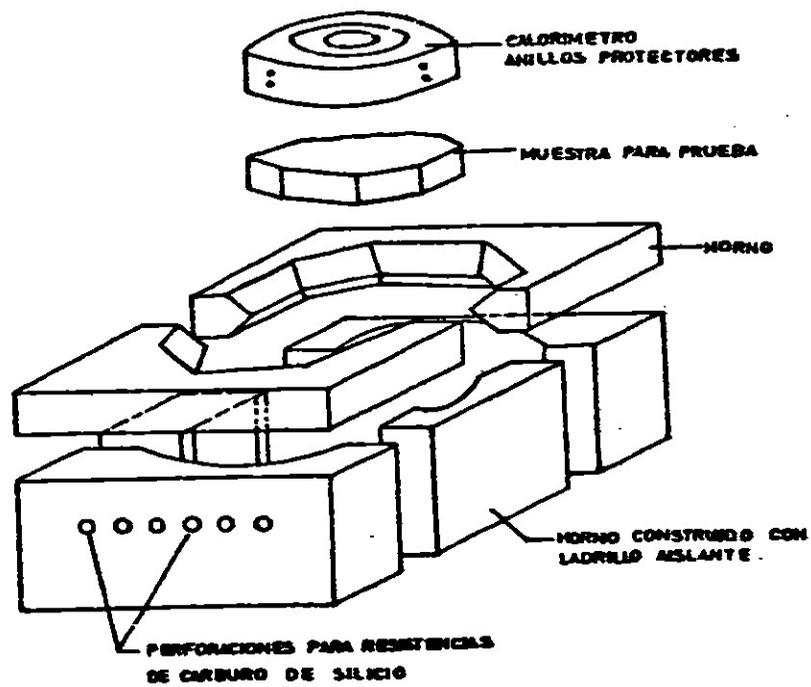


FIG. III-9 ENSAMBLE DEL HORNO
MUESTRA Y CALORIMETRO

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 tener mucho cuidado de evitar la contaminación 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 esté en contacto con los extremos de las perforaciones en el metal.

El conjunto es entonces colocado centralmente sobre la pieza de prueba, siendo llevado 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 de la espécimen. Finalmente vermiculita exofilada de (1/8 a 1/16 de pulg. de medida de grano) es vaciada en el espacio rotante hasta el nivel de la superficie superior de calorímetro.

La muestra es entonces calentada a la temperatura requerida y cuando está en el equilibrio todos los termopares son leídos. Si varias conductividades se requieren para diferen

tes temperaturas, entonces el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio para temperaturas de cara caliente arriba de 25°C es aproximadamente de seis horas. Es importante tener en consideración que el aparato debe ser operado donde no existe corriente de aire. Resultados:

La conductividad térmica es calculada usando la siguiente expresión:

$$K_s = \frac{K_c AT_c d_s}{AT_s d_c}$$

Donde: K_s = Conductividad térmica de la muestra.

K_c = Conductividad térmica del calorímetro.

AT_s = 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 barrenos.

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

R E S U L T A D O S :

Anteriormente se describió 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 lostes 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 muestras fueron sometidas a calentamiento para medir su comportamiento desde el punto de vista de conducción de calor a cinco temperaturas diferentes. (Cinco posiciones de 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 esa posición. Una vez alcanzada ésta, se deja estabilizar el sistema 24 horas. Ya estabilizado, es decir, alcanzando un estado de régimen estacionario, se toman cinco lecturas de cada uno de los termopares a intervalos de media hora. Enseguida se opera el aparato automáticamente calentado el 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 cinco lecturas de cada una de las ocho 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 verán adelante. Se presentan con las cinco temperaturas de estudio como un promedio de tres de las lecturas obtenidas ya que se elimina la mayor y la menor.

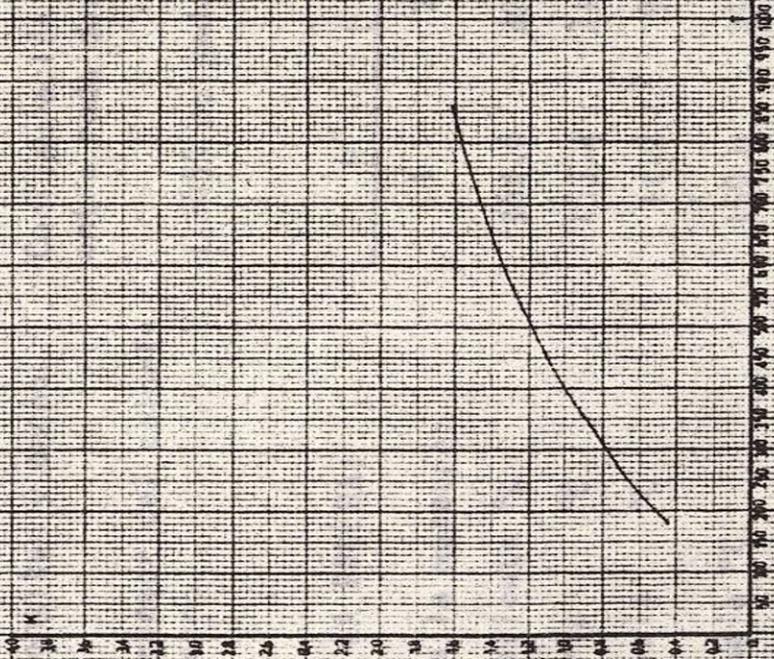
En los resultados promedio obtenidos para cada muestra, se trazaron las curvas correspondientes de K vs T y de ellas se obtuvo una curva media para cada calidad de ladrillo aislante, de los cuales solamente se mostrarán dos.

TABLA DE RESULTADOS:

Material No. 2	Corrida No. 1
Densidad $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	0.79
Espesor	1.134 pulgadas
Longitud y ancho	Configuración octagonal de aprox. $4\frac{1}{2}$ pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas.
Espesor del calorímetro	1.2655 pulgadas.

RESULTADOS DE LA PRUEBA

	P	U	N	T	O	N o.
	1	2	3	4	5	
Temperatura de la muestra:						
Cara caliente °C	176.6	416.4	614.0	829.8	1041.4	
Cara fría °C	154.7	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	100.7	
"K" calculadas $\frac{\text{Cal-cm}}{\text{hr cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	2.34	3.12	3.42	3.55	3.54	



X/V

TABLA DE RESULTADOS:

Material No. 1	Corrida No. 2
Densidad g/cm ³	0.55
Espesor	1.0826
Longitud y ancho	Configuración octagonal de aprox. 4½ pulgadas entre cada dos caras opuestas paralelas
Espesor del calorímetro	1.2655 pulgadas.

RESULTADOS DE LA PRUEBA:

	P	U	N	T	O	N o .
Temperatura de la muestra:	1	2	3	4	5	
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 0.8956 0.6678 1.3301

TABLA DE RESULTADOS:

Material No. 2 Corrida No. 2
 Densidad gr/cm³ 0.77
 Espesor 1.18
 Longitud y ancho Configuración octagonal de aprox. 4½ pulgadas entre cada dos caras opuestas para-lelas.
 Espesor del calorímetro 1.2655

RESULTADOS DE LA PRUEBA: P U N T O N o.

	1	2	3	4	5
--	---	---	---	---	---

Temperatura de la muestra:

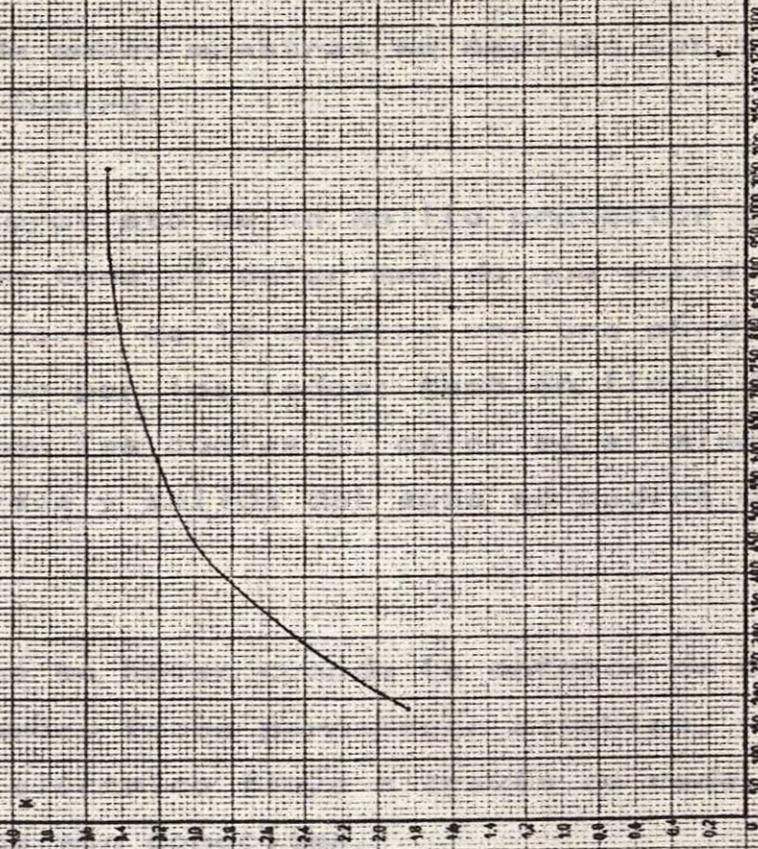
Cara caliente °C 178.0 415.0 615.0 845.0 1040.0

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 168.0 399.5 567.5 790.0 980.0

"K" calculadas $\frac{\text{Cal-cm}^2}{\text{hr Cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ 1.28 2.31 2.82 3.10 3.16



K V S T

C A P I T U L O . I V

CALCULOS Y ECUACIONES DE DISEÑO

El equipo consiste en una caja metálica en la que se lleva una resistencia eléctrica, la cual calienta dos muestras idénticas del material al que se le determinará la conductividad. (Fig. 4-1)

La temperatura de ambas muestras se medirán con termopares y un potenciómetro.

El aparato está provisto de un anillo protector aislante para asegurar que todo el calor medido que entra en las placas, pase a través de la muestra con una pérdida despreciable de calor por los lados; también lleva dos chaquetas de agua con las cuales el calor se elimina (la temperatura de entrada y salida del agua se medirá con un termómetro).

Las observaciones se hacen cuando la entrada de calor y la temperatura de ambas fases permanecen estables, ya que la mitad del gasto eléctrico fluye a través de cada muestra - cuyas dimensiones son conocidas.

Los cálculos que a continuación se presentan, solo son una aproximación teórica de lo que realmente se desea, por lo que se supuso las dimensiones del equipo así como la diferencia de temperatura entre las dos placas, con el fin de calcular el flujo de calor, resistencia y flujo de agua requerida para resolver el calor.

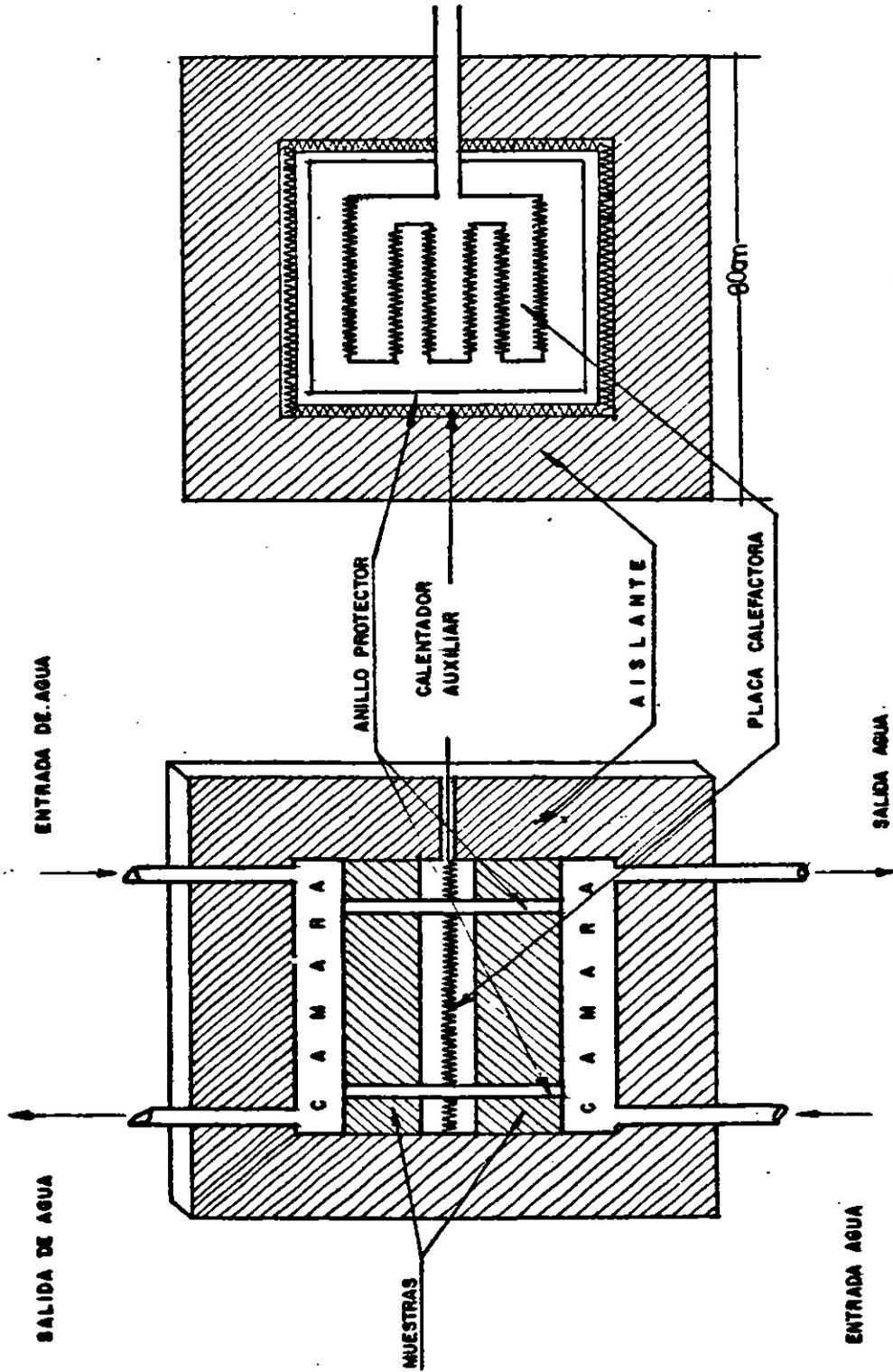


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL APARATO DE CONDUCTIVIDAD PROTEJIDO FIG. IV-1

ESCALA 1:100

DIBUJO: GRACIELA DELGADO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SLP CIENCIAS QUIMICAS

C A L C U L O S .

Para efectuar los cálculos utilizamos tres diferentes tipos de materiales, con el fin de ver las variaciones que hay entre ellos en cuanto a sus propiedades, ya que utilizamos - conductividades térmicas (K) y calores específicos (C_p) conocidos.

METODOLOGIA DE CALCULO:

a) Dimensiones del equipo y de la muestra.

28 x 28 pulgadas el equipo

Muestra:

A = 1.722 Ft² Area

x = 0.0416 Ft espesor

AT= 68°F incremento de temperatura

b) Materiales utilizados:

Ladrillo común

Vidrio

Cobre.

c) Cálculo del flujo de calor:

Usando la ecuación (11-4)

$$Q = \frac{A K AT}{x}$$

Donde:

A = área de las placas

K = Conductividad térmica del material.

x = espesor de las placas

$$= 51 =$$

AT = incremento de temperatura entre las placas

Q = flujo de calor.

1) Ladrillo común.

$$K_{68^{\circ}\text{F}} = 0.4 \text{ BTU/hr Ft}^2 (\text{°F/Ft})$$

$$Q = \frac{(1.722 \text{ Ft}^2) (0.4 \text{ BTU/hr Ft}^2) (\text{°F/Ft}) (68^{\circ}\text{F})}{(0.0416 \text{ Ft})}$$

$$Q = 1126.054 \text{ BTU/hr}$$

2) Vidrio.

$$K_{68^{\circ}\text{F}} = 0.73 \text{ BTU/Hr Ft}^2 (\text{°F/ Ft}^2)$$

$$Q = \frac{(1.722 \text{ Ft}^2) (0.73 \text{ BTU/hr Ft}^2) (\text{°F/Ft}^2)(68^{\circ}\text{F})}{(0.0416 \text{ Ft})}$$

$$Q = 2054.809 \text{ BTU/hr}$$

3) Cobre.

$$K_{68^{\circ}\text{F}} = 224 \text{ BTU/hr ft}^2 (\text{°F/ft})$$

$$Q = \frac{(1.722 \text{ ft}^2) (224 \text{ BTU/hf ft}^2 (\text{°F/ft}) (68^{\circ}\text{F}))}{(0.0416. \text{ ft})}$$

$$Q = 630516.92 \text{ BTU/hr}$$

d) CALCULO DE LA RESISTENCIA:

Para el cálculo de la resistencia utilizamos la --
ecuación de la Referencia No. 1 (Pág.)

$$Q = I E \quad \text{y} \quad EI = RI^2$$

$$\text{entonces } R = \frac{E^2}{Q}$$

$$= 52 =$$

donde:

R = Resistencia

E = Voltaje

Q = Flujo de calor

1) Ladrillo común:

$$Q = 1126.054 \text{ BTU/hr}$$

$$Q = (1126.054 \text{ BTU/hr}) (0.293 \text{ Watt-hr/BTU})$$

$$Q = 329.93 \text{ Watt.}$$

$$R = \frac{(110 \text{ volts})^2}{(329.93 \text{ Watt})}$$

$$R = \underline{36.6755 \text{ ohms}}$$

2) Vidrio:

$$Q = (2054.809 \text{ BTU/hr}) (0.293 \text{ Watt-hr/BTU})$$

$$Q = 602.054 \text{ Watt}$$

$$R = \frac{(110 \text{ volts})^2}{(602.054 \text{ Watt})}$$

$$R = \underline{20.098 \text{ ohms}}$$

3) Cobre:

$$Q = (630516.92 \text{ BTU/hr})(0.0293 \text{ Watt-hr/BTU})$$

$$Q = 184741.45 \text{ Watt}$$

$$R = \frac{(110 \text{ Volts})^2}{(184741.45 \text{ Watt})}$$

$$R = \underline{0.0655 \text{ ohms}}$$

e) CALCULO DEL FLUJO DE AGUA:

Utilizamos la ecuación de la referencia (1)

$$Q = m C_p \Delta T$$

Donde:

m = Flujo de agua que se utilizará para remover - el calor.

C_p = Capacidad calorífica de los diferentes mate-- riales.

ΔT = Incremento de temperatura del agua.

Despejando:

$$m = \frac{Q}{C_p \Delta T}$$

1) Ladrillo común:

$$Q = 383.763 \text{ K calorfas/hr}$$

$$C_p = 0.2 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 0.9982 \text{ Kg/lt a } 20^\circ\text{C del agua}$$

$$m = \frac{(383.765 \text{ Kcal/hr})}{(0.2 \text{ Kcal/kg}^\circ\text{C}) (20^\circ\text{C})}$$

$$m = (70.972 \text{ Kg/hr}) (0.9982 \text{ Kg/lt})$$

$$\underline{m = 70.844 \text{ lt/hr.}}$$

2) VIDRIO:

$$Q = 517.82 \text{ Kcal/hr}$$

$$C_p = 0.2 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C a } 20^\circ\text{C}$$

$$p = 0.9982 \text{ Kg/lt a } 20^\circ\text{C de el agua}$$

$$= 54 =$$

$$m = \frac{517.82 \text{ Kcal/hr}}{(0.2 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C})(20^\circ\text{C})}$$

$$m = (129.455 \text{ Kg/hr})(0.09982 \text{ Kg/lit})$$

$$\underline{m = 129.222 \text{ lit/hr}}$$

3) COBRE:

$$Q = 158890.26 \text{ Kcal/hr}$$

$$C_p = 0.0915 \text{ Kcal/kg a } 20^\circ\text{C}$$

$$p = 0.9982 \text{ Kg/lit a } 20^\circ\text{C de el agua}$$

$$m = \frac{158890.26 \text{ Kcal/hr}}{(0.0915 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C})(20^\circ\text{C})}$$

$$m = (86825.2 \text{ Kg/hr})(0.9982 \text{ Kg/lit})$$

$$\underline{m = 86668.915 \text{ lit/hr}}$$

f) CALCULO DEL APERAJE DE LA RESISTENCIA VARIABLE:

Para el cálculo de la corriente utilizamos la ecuación
(Ref. 1)

$$Q = I E$$

$$I = \frac{Q}{E}$$

$$I = 110 \text{ volts.}$$

1) Ladrillo común

$$Q = 329.93 \text{ Watt}$$

$$I = \frac{329.93 \text{ Watt}}{110 \text{ volts}}$$

$$\underline{I = 2.99 \text{ amperes}}$$

2) Vidrio:

$$Q = 602.05 \text{ Watt}$$

$$I = \frac{602.05 \text{ Watt}}{110 \text{ volts}}$$

$$\underline{I = 5.4731 \text{ ampers}}$$

3) COBRE:

$$Q = 184741.45 \text{ Watts}$$

$$I = \frac{184741.45 \text{ Watts}}{110 \text{ volts}}$$

$$\underline{I = 1679.467 \text{ ampers}}$$

TABLA DE RESULTADOS

	LADRILLO COMUN	VIDRIO	COBRE
Flujo de calor	1126.054 BTU/hr	2054.8098TU/hr	630516.92BTU/hr
Resistencia	33.6755/ohms	20.098 ohms	0.0655 Ohms
Flujo de agua	70.844 lt/hr	129.222 lt/hr	86668.915 lt/hr
Amperaje de la Resistencia	2.99 Ampers	5.473 Ampers	1679.467 Ampers

C A P I T U L O V

ESTIMACION DE COSTOS

MATERIAL	No. DE UNID.	COSTO UNIT. (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Termopares	4	1,302.50	5,270.0
Cables para termopar	5 m.	55.10	275.70
Lana de vidrio	2 Kg	79.0	158.0
Tubo de cobre $\frac{1}{2}$ "	3 m.	80.0	240.0
Termómetros	2	190.0	380.0
Lámina de acero	3 m ²		600.0
Resistencia 500 Watts	2		100.0
Accesorios	-		1000.0
Mano de obra	-		<u>2000.0</u>
			10,023.70

NOTA: El costo de los termopares es de el año de 1979 porque en las casas vendedoras no quisieron dar la cotización, pues querían estar seguros de la venta, así es que este costo del equipo es una aproximación al costo real.

C A P I T U L O V I

ESPECIFICACIONES PARA EL EQUIPO.

Los termopares que se usarán para el rango de temperatura son del tipo "J". El termopar irá protegido con un tubo de acero inoxidable en cuyo extremo se anexará un cable de extensión (especial) que se conectará en el potenciómetro; cada termopar llevará su cable propio.

Las placas se colocarán como muestran las figuras siguientes, así como el material aislante.

El agua se conectará por medio de una manguera al tubo de cobre.

La energía eléctrica se tomará de las líneas que están colocadas en los extremos del laboratorio.

C A P I T U L O V I I

PRACTICA PROPUESTA

DETERMINACION DE CONDUCTIVIDADES TERMICAS

CONTENIDO:

- 1) Objetivo
- 2) Consideraciones teóricas
- 3) Equipo utilizado
- 4) Datos necesarios
- 5) Procedimiento
- 6) Cálculos
- 7) Presentación de resultados
- 8) Nomenclatura
- 9) Gufa de estudios
- 10) Bibliografía

1) Objetivo:

El principal objetivo de esta práctica es determinar las conductividades térmicas de diferentes materiales, así como la variación de temperaturas en distintos tiempos.

2) Consideraciones teóricas:

En general, para la transferencia de calor por el mecanismo de conducción se utiliza la "Ley de Fourier" así como se menciona en los capítulos anteriores, pero sin embargo en esta práctica consideramos la ecuación como básica para los cálculos que se requieren.

3) Equipo utilizado:

- a) Cuatro termopares que irán colocados en cada extremo de las muestras, ya que éstos son especialmente diseñados para medir temperaturas de superficie.
- b) Dos termómetros; éstos irán colocados en la entrada y salida del agua.
- c) Un potenciómetro portátil de precisión para registrar la temperatura.
- d) Un cronómetro.

4) Datos necesarios:

- a) Dimensiones de la muestra
- b) Amperaje de la resistencia.

5) Procedimiento:

- a) Calibre el potenciómetro (el instructor le indicará como hacerlo)
- b) Mida la temperatura inicial del agua que va a remover el calor.
- c) Coloque las muestras como indican las figuras.
- d) Coloque cada termopar sobre las muestras.
- e) Mida la temperatura inicial de las muestras.
- f) Observe las temperaturas del agua y de las placas y cuando se estabilicen, anótelas; también anote el tiempo requerido.

6) Cálculos:

Para el cálculo de las conductividades térmicas de cada material, utilizamos la ecuación 11-4 puesto que se conocen las dimensiones de la muestra.

ECUACIONES:

$$Q \frac{dx}{A} = - K dt \dots\dots\dots (2-4)$$

De esta ecuación calcularemos solamente la conductividad, puesto que los demás factores se conocen.

Despejando:

$$K = \frac{Q}{A} \frac{(X_2 - X_1)}{(T_1 - T_2)} \dots\dots\dots (2 - 4b)$$

7) Presentación de resultados:

- a) Tabule los resultados lo mejor posible.
- b) Indique si los resultados obtenidos son lógicos o no y explicar porqué.
- c) Reportar si encontramos fallas en el equipo y comentar las mejoras del mismo.

8) Nomenclatura:

- R = Resistencia
- A = Area de muestra
- K = Conductividad térmica de cada material
- X = Espesor de la muestra
- T = Diferencia de temperatura entre los lados de la placa.
- Q = Flujo de calor entre las placas
- E = Voltaje.

9) Gufa de Estudios:

- 1.- De qué es función la transmisión de calor en estado transitorio.

- 2.- Qué analogía observa usted entre la conducción de calor y la corriente eléctrica.
- 3.- Explique el concepto de resistencia en la conducción a través de paredes compuestas.
- 4.- Escriba las ecuaciones esenciales de la conducción y explique cada término.
- 5.- Cuáles son las leyes de la radiación.
- 6.- Describa la técnica y operación del equipo.

10) Bibliografía:

- a).- E.J. CROSBY.- Experimentos sobre fenómenos de transporte en las operaciones unitarias de la Industria Química. (Editorial Hispano Americana, SA)
- b) MANRIQUE JOSE A.- Transferencia de calor; Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Harla y Row Latinoamericana (1977).
- c) BIRD R. B. STEWART W. T.- Fenómenos de transporte. (Ed. Reverte 1964).

CONCLUSIONES

El equipo, desde el punto de vista teórico, funciona satisfactoriamente, aunque lo ideal sería que la temperatura de cada muestra aumentara conforme va transcurriendo el tiempo, para poder obtener unas gráficas aceptables.

En cuanto al aspecto económico, el equipo tiene un costo regular considerando que la Escuela de CIENCIAS QUIMICAS - actualmente cuenta con un potenciómetro de 16 canales, que darían lectura en 16 posiciones.

El equipo se diseñó para usarlo en secciones con un tiempo máximo de dos horas (tiempo de duración de la práctica).

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

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 las muestras, chaquetas de agua y anillos protectores.
- c) Buen contacto térmico entre la muestra y las chaquetas de agua.
- d) Construcción eficiente de los termopares.
- e) Error en la toma de lecturas.
- f) Variaciones de la corriente eléctrica.

Será necesario instruir bien a los alumnos para mejorar o evitar lo menos de errores mencionados anteriormente.

Del estudio teórico efectuado y de los resultados analizados, puede concluirse que los factores más importantes - que afectan la conductividad térmica son:

- a) La composición química.
- b) La temperatura de servicio.
- c) El tiempo y la temperatura de quemado de los materiales.

Deben ser considerados además la proporción, forma, orientación y continuidad de los espacios vacíos.

NOMENCLATURA

A_b = Absortividad.

A = Area de sección transversal.

A_1 = Area del cuerpo 1

A_x = Area de contacto de un lado de la muestra con mercurio.

D = Diámetro de la tubería por donde pasa el fluido.

dQ = Velocidad instantánea del paso del calor.

dA = Area normal de flujo.

dT = Gradiente de temperatura.

d = Espesor de la muestra.

E = Poder emisor de un cuerpo gris a una temperatura T

E_b = Poder emisor de un cuerpo negro.

ϵ = Emitancia o emisividad de un cuerpo negro

h_c = Coeficiente de convección.

L = Espesor de la placa.

K = Conductividad térmica.

K_A = Conductividad térmica del material A.

K_B = Conductividad térmica del material B.

K_m = Conductividad media aritmética.

n = Número de placas.

q^* = Calor emitido por un radiador perfecto (energía radiante)

q_e = Potencia de calentamiento dividida por la diferencia de temperaturas en el estado estacionario.

q = Velocidad de flujo de calor a través de la superficie.

v = Velocidad lineal del fluido.

R_e = Número de Reynolds adimensional.

T_1 = Temperatura alta.

T_2 = Temperatura baja.

x = Espesor de la muestra.

ρ = Densidad del fluido.

μ = Viscosidad del fluido.

= 66 =

σ = Coeficiente de Stefan Boltzman.

$1/h_c$ = Corrección para el gradiente térmico entre los termo
pares y la superficie de la muestra.

t = Tiempo.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- KERN D. Q.- Procesos de Transferencia de Calor. (Edt.- Mc Graw Hill Book Company, Inc. N.Y. 1950.)
- 2.- BROWN GEORGE GRANGER.- Operaciones Básicas de la Ingeniería Química. (Ed. Marín, S.A. 1965)
- 3.- J. OCON Y G. TOJO.- Problemas de Ingeniería Química, - Tomo I, (reimpresión 1971 Editorial Aguilar)
- 4.- MANRRIQUE JOSE A.- Transferencia de calor.- Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. (Harlay Row Latinoamericana) (1977).
- 5.- E. J. CROSBY.- Experimentos sobre fenómenos de transporte en las operaciones unitarias de la Industria Química. (Ed. Hispanoamericana, S.A. 1968).
- 6.- BIRD R. B. S. STEWART W. E.- Fenómenos de transporte. - (Ed. Reverte 1964).
- 7.- PERRY JHON A.- MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO.- Mc Graw - Hill Company, 3a. Ed. Tomo I y II (1976).
- 8.- LIBRO DE PRACTICAS DEL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.- 1er. Curso, 2a. Edición.- Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas del Instituto Politécnico Nacional.

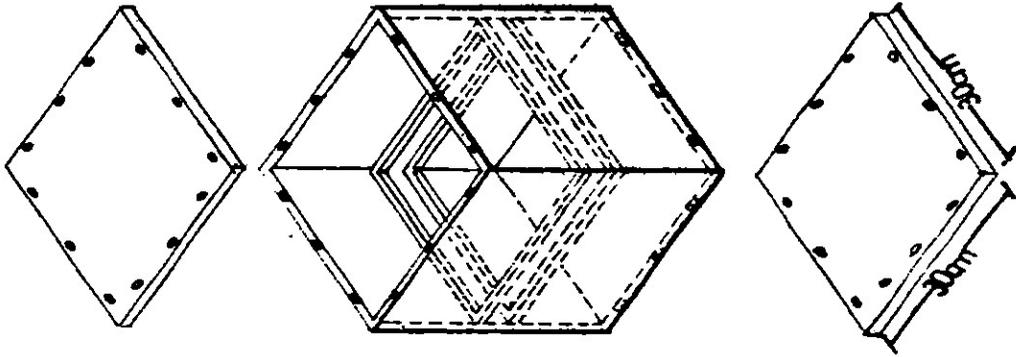
- 9.- NORTON C.L. JR.- Apparatu For Measuring Thermal Conductivity of Refractories. (Journal of the American Ceramic Society, Vol. 25 (5) 1942, pág. 451)
- 10.- PATTON, T.C. y NORTON C.L. JR.- Measurement of ther --
mal conductivity of Fireclay refractoris, (Journal of_
the American Ceramic Society, Vol. 26. 1943, pág. 350)
11. FINCK, J.L.- Improved aparatus for measuring Thermal -
conductivity of refractories at high temperatures. Vol.
20 (11), pág. 378 a 382.
- 12.- FILOLENKO, N.E. y FINCK, J.L.- An apparatus for measuring the thermal conductivity of refractories at high_
temperatures. (Journal of ther American Ceramic Society Vol. 18) (1). 1935, páginas 6-12.
- 13.- HALM L. y LAPOUJADE, P.- Note on the Measurement of -
the thermal conductivity of refractory products. (Bull
Soc. Franc. Ceram. No. 4 1949, pág. 6-11).
- 14.- MEASUREMENT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY, Ceramics 1,_
1950, páginas 614 a la 618.
- 15.- BRADY J.G.- An apparatus for the Measurement of the -
thermal Conductivity of the refractory materials at -
elevated temperatures, (Journal of the American Ceramic Society, Vol. 23. 1954, Páginas 19 a la 30).

- 16.- CLEMENTS J.F. y VYSE J.A.- New Thermal Conductivity - Apparatus for Refractory Materials. Transactions of - the British Ceramic Society, Vol. 53 1954, pág. 134_ a 155.
- 17.- SUTTON W.H. Apparatus for measuring thermal Conducti- vity of ceramic and metallic materials to 1200°C, - - Journal of the American Ceramic Society, Vol. 43 (2)- 1960, páginas 81-86.
- 18.- RUTH, EDWIN y MC DOWELL, J. SPOTTS.- Thermal Condti- vity of Fireclay Brick.- Journal of the Amercian Cera_ mic Society, Vol. 45, No. 4, 1962, pág. 189-195.
- 19.- DINGER, C., KIND A., SCHUTZ N. y DIETZEL.- A. Determi_ ning Thermal Conductivity at high temperatures, Ber, _ Deut. Keram Ges. Vol. 20 (8) 1939, pág. 347-362.
- 20.- WINCKLER J.R.- Spherical Furnace calorimeter direct - measurement of specific heat and thermal conductivity Journal of the Amercian Ceramic Society, Vol. 26 (10) 1943, págs. 339-349.
- 21.- BOOP, C.D.- An apparatus of the thermal conductivity, with mercury contacts.- Journal of the American Cera-- mic Society, Vol. 43 No. 3, 1964, pág. 151-152.
- 22.- WELLASE, RICHARD W. NORTON C.L. JR.- BART RONALD y - BRADY JOHN G.- Precision studies using A.S.T.M. Ther- mal Conductivity Test for refractories. Industrial -- Heating, Refractories and insulation Section. Enerc -

de 1969, pág. 122-126.

23.- CLYTON H.W. y WHIMAN, M.H., Technical Report., of Fil
kington Brothers Limited. 1965.

24.- THERMAL CONDUCTIVITY FURNACE.- Laboratory Report. Labo
ratory Number E-19, A.P. GREEN REFRACTORIES Co., Re--
search Center, Mex. Missouri, 23 de abril de 1968.

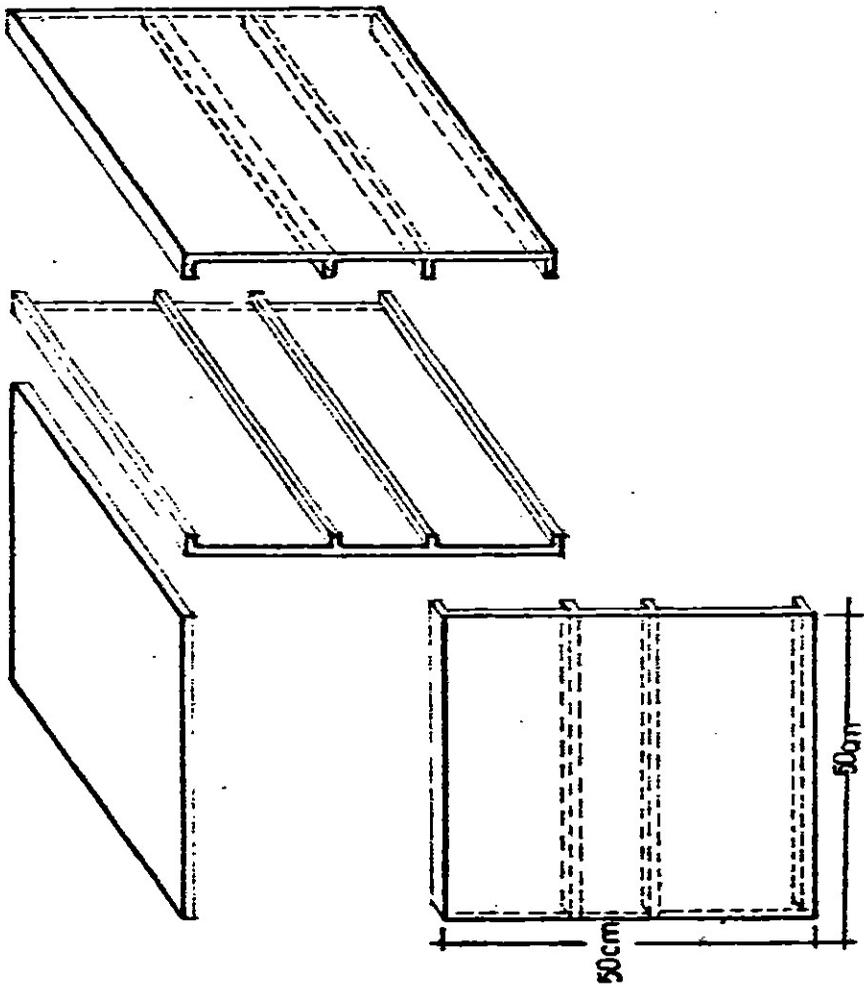


CAJA PORTAMUESTRA

ESCALA 1:100

DIBUJO:
GRACIELA DELGADO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE S.L.P.
CIENCIAS QUÍMICAS



VISTA PARCIAL DE PORTAFOLIO

ESCALA 1:100

DIBUJO:
GRACIELA DELGADO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE S.L.P.
CIENCIAS QUIMICAS

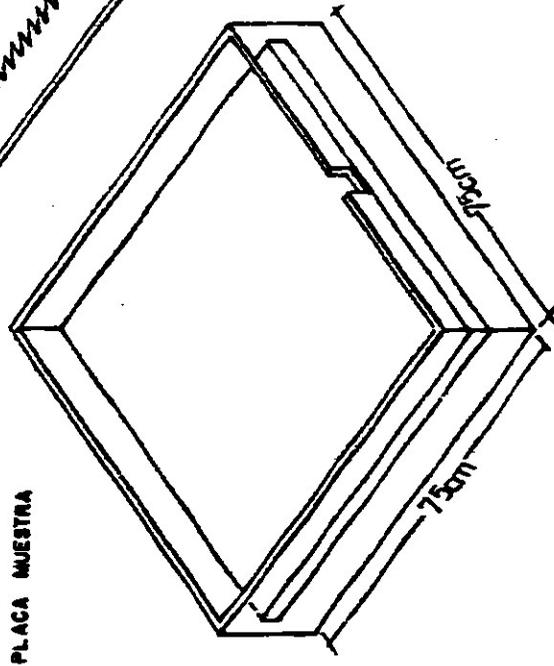
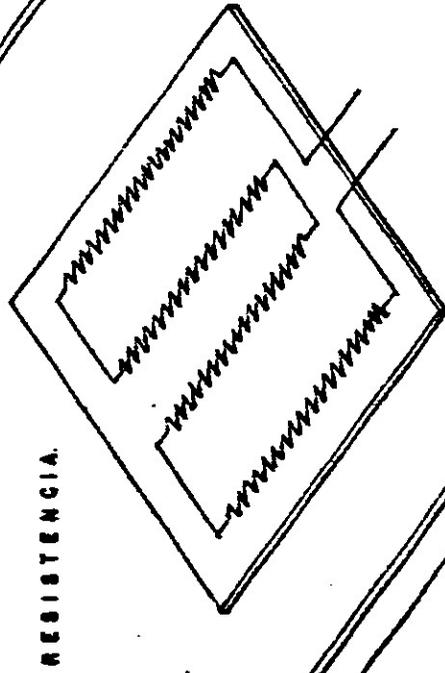
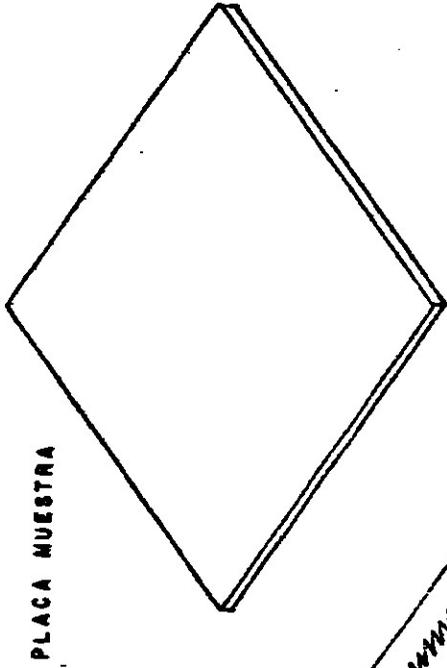


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL
ARREGLO DE PLACAS Y RESIS-
TENCIA

ESCALA 1:100

DIBUJO
GRACIELA DELGADO

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE S.L.P.
CIENCIAS QUIMICAS

A P E N D I C E

TABLA I. CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE AISLANTES Y ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCION. (continúa)

Subtítulos			
Ladrillo de carburo de silicio, recristalizado	129	1 112	10.7
	129	1 472	9.2
	129	1 832	8.0
	129	2 192	7.0
	129	2 552	6.3
Magnesia, pulverizada	49.7	117	0.35
Magnesia, carbonato ligero	19	70	0.04
Magnesio, óxido, comprimido	49.9	68	0.32
Madera, fibra cruzada			
Balsa	7.8	86	0.025-0.03
Olmo	51.5	59	0.12
Maple	44.7	122	0.11
Pino, blanco	34.0	59	0.087
Teca	40.0	59	0.10
Abeto	28.1	140	0.062
Madera, paralelo a la fibra			
Pino	34.4	70	0.20
Mármol			1.2-1.7
Mica, perpendicular a los planos		122	0.25
Negro de humo	10	104	0.038
Nieve	34.7	32	0.27
Piedra pómez		70-151	0.14
Pizarra		201	0.86
Papel			0.075
Papel tapiz, tipo aislante	14.8	70	0.028
Papel tapiz, cartoncillo	43	86	0.04
Parafina		32	0.14
Plásticos piroxilina			0.075
Porcelana		392	0.88
Seda	6.3		0.028
Barnizada		100	0.096
Vidrio			0.2-0.73
Tipo boro-silicato	139	86-167	0.63
Vidrio a la soda			0.3-0.44
Vidrio de ventana			0.3-0.61
Viruta de madera	8.8	86	0.034
Yeso, moldeado y seco	78	68	0.25

* De S. Marks, "Mechanical Engineers' Handbook", McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1941.

A P E N D I C E

TABLA I. CONDUCTIVIDADES TERMICAS DE AISLANTES Y ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCION. (continúa)

Subtítulos			
Ladrillo de carburo de silicio, recristalizado	129	1 112	10.7
	129	1 472	9.2
	129	1 832	8.0
	129	2 192	7.0
	129	2 552	6.3
Magnesia, pulverizada	49.7	117	0.35
Magnesia, carbonato ligero	19	70	0.04
Magnesio, óxido, comprimido	49.9	68	0.32
Madera, fibra cruzada			
Balsa	7.8	86	0.025-0.03
Olmo	51.5	59	0.12
Maple	44.7	122	0.11
Pino, blanco	34.0	59	0.067
Teca	40.0	59	0.10
Abeto	28.1	140	0.062
Madera, paralelo a la fibra			
Pino	34.4	70	0.20
Mármol			1.2-1.7
Mica; perpendicular a los planos		122	0.25
Negro de humo	10	104	0.038
Nieve	34.7	32	0.27
Piedra pómez		70-151	0.14
Pizarra		201	0.26
Papel			0.075
Papel tapiz, tipo aislante	14.8	70	0.032
Papel tapiz, cartoncillo	43	86	0.04
Parafina		32	0.14
Plásticos piroxilina			0.075
Porcelana		392	0.88
Seda	6.3		0.026
Barnizada		100	0.096
Vidrio			0.2-0.73
Tipo boro-silicato	139	86-167	0.63
Vidrio a la soda			0.3-0.44
Vidrio de ventana			0.3-0.67
Viruta de madera	8.8	86	0.034
Yeso, moldeado y seco	78	68	0.25

* De S. Marks, "Mechanical Engineers' Handbook", McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1941.


FRANCISCO ZARCO
ED. ALAMITOS
SAN LUIS POTOSI, S. P. R.
TEL. 2-17-91