

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
FACULTAD DE QUIMICA

---



ESTIMACION Y CONSTRUCCION DE UN HORNO  
PARA OBTENCION DE FIBRAS METALICAS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A N

FRANCISCO PEREZ ORTIZ  
JESUS RODRIGUEZ GUERRERO  
JOSE OCTAVIANO ZAINOS HERNANDEZ

1 9 7 7



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

Tesis 1977  
DO [REDACTED]  
ECHA [REDACTED]  
ROC [REDACTED]  
[REDACTED]

326



QUIMICA

PRESIDENTE: Ing. Manuel Labastida Pérez  
Jurado asignado VOCAL: Ing. Guillermo Alcayde Lacorte  
originalmente - SECRETARIO: Ing. Humberto Rodríguez Caldera  
según el tema 1er. SUPLENTE: Ing. Guillermo Isunza M.  
2do. SUPLENTE: Ing. Alejandro Carpy Guillén

Sitio donde se desarrolló el tema: Centro de Investigación -  
de Materiales, U.N.A.M., Facultad de Química, U.N.A.M. y do-  
micilio de los sustentantes.

Nombre completo y firma de los sustentantes:

Francisco Pérez Ortiz \_\_\_\_\_

Jesús Rodríguez Guerrero \_\_\_\_\_

José Octaviano Zaínos Hernández \_\_\_\_\_

Nombre completo y firma del asesor del tema:

Ing. Humberto Rodríguez Caldera \_\_\_\_\_

Nombre completo y firma del supervisor técnico:

Ing. Guillermo Alcayde Lacorte \_\_\_\_\_

## A NUESTRAS MADRES

A esa mujer que supo velar junto a  
la cuna del niño caprichoso,  
a aquella cuya alma fervorosa inunda de  
luz invisible todo el hogar,  
a aquella que tiene su punto de orgullo  
en los hijos bien educados  
y que tiene su recompensa en la bendi--  
ción eterna del Dios Todopoderoso.

"María"

"María"

"Magdalena"

## A NUESTROS PADRES

Que por su aliento, dedicación y --  
ejemplo infundieron en nosotros una gran  
confianza para perseverar en el umbral -  
de nuestra vida.

"Francisco"

"José"

"Manuel"

A NUESTROS HERMANOS

Que con sus consejos, aliento y ayuda nos dieron la confianza necesaria para seguir adelante en los momentos difíciles de nuestra vida.

- Román, Lucía.
- Antonio, Bellanira.
- Julián, Nieves, Natalia, Manuela, Javier, Rosalba, Antonio, Roberto.

Por su cariño y  
comprensión a

- Ma. Eugenia
- Ma. Esther
- Ma. de la Luz

Con aprecio y respeto a nuestros  
maestros que supieron tener la paciencia  
cia para darnos ejemplo durante la --  
época escolar.

Ing. Humberto Rodríguez C.

Ing. Guillermo Alcayde L.

Ing. Manuel Labastida P.

"El que encuentra un amigo, encuentra  
un tesoro"

Queremos dar también nuestros agrade-  
cimientos a todos aquellos amigos que nos-  
han infundido aliento, fuerzã y alegría a  
lo largo de nuestra vida.

# I N D I C E

	Pág.
Agradecimientos	
Lista de figuras.....	I
Lista de ilustraciones.....	III
Lista de tablas.....	IV
I.- Introducción.....	1
II.- Objetivo.....	5
III.- Generalidades.....	7
3.1.- Clasificación de hornos.....	8
3.2.- Quemadores.....	12
3.3.- Refractarios.....	22
3.4.- Termopares.....	39
3.5.- Fibras metálicas.....	46
3.6.- Materiales compuestos.....	52
3.6.1.- Fibras empleadas en materiales - compuestos.....	56
3.6.2.- Propiedades mecánicas de las fi- bras que refuerzan concreto.....	58
3.6.3.- Preparación de concreto reforza- do con fibras.....	64
3.6.4.- Ventajas de las fibras que re- fuerzan concreto.....	69

	Pág.
3.7.- Transferencia de calor.....	72
IV.- Propuesta experimental.....	82
4.1.- Aluminio.....	83
4.2.- Cálculos del horno.....	92
4.2.1.- Cálculos del material refracta rio.....	93
4.2.2.- Combustible y aire para la com- bustión.....	100
4.2.3.- Cámara de combustión.....	102
4.2.4.- Transferencia de calor.....	105
4.2.5.- Capacidad del quemador.....	116
4.3.- Construcción del horno.....	122
4.4.- Descripción del equipo e instrumentos..	132
4.5.- Costo de material, equipo e instrumen- tos.....	134
4.6.- Costo de mano de obra.....	137
4.7.- Etapa experimental.....	138
V.- Resultados.....	141
VI.- Conclusiones.....	143
VII.- Bibliografía.....	145

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.- Grietas que tienen lugar en un calentamiento repentino.....	33
Fig. 2.- Grietas que aparecen en un enfriamiento repentino.....	33
Fig. 3.- Típica fractura de desconchado.....	36
Fig. 4.- Grietas por tensión en el extremo de un ladrillo.....	36
Fig. 5.- Separación de una capa delgada debida al fenómeno de vitrificación.....	36
Fig. 6.- Termopar.....	40
Fig. 7.- Flujo de calor a través de una pared compuesta.....	74
Fig. 8.- Resistencia cilíndrica en serie.....	75
Fig. 9.- Diámetros y temperaturas del horno...	112
Fig. 10.- Perfil de temperaturas.....	114
Fig. 11.- Conductividad térmica del ladrillo - refractario 42-M.....	118
Fig. 12.- Conductividad térmica del concreto - refractario aislante APG-55.....	119
Fig. 13.- Conductividad térmica del Green-Block 19.....	120

	Pág.
Figura 14.- Conductividad térmica del concreto re	
fractario Mizzou.....	121

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1.- Estructura del horno.....	122
Ilustración 2.- Colocación del piso.....	123
Ilustración 3.- Colocación de las juntas de asbesto en los ladrillos.....	124
Ilustración 4 y 5.- Colocación de la tercera capa- de aislante.....	125
Ilustración 6.- Aspectos de la colocación de la -- tercera capa.....	126
Ilustración 7.- Colocación de la tercera capa de - aislante.....	127
Ilustración 8.- Vista del horno con los tres ais- lantes.....	128
Ilustración 9.- Construcción de la tapa.....	129
Ilustración 10.- Horno totalmente construído.....	130
Ilustración 11.- Cámara de combustión.....	130
Ilustración 12.- Instalación del quemador.....	131

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.- Conos pirométricos Orton.....	29
Tabla 2.- Termopares comerciales.....	43
Tabla 3.- Resistencia de fibras que refuerzan con- creto.....	61
Tabla 4.- Proporción en peso normal de concreto - reforzado con fibras.....	67
Tabla 5.- Propiedades físicas del aluminio.....	83
Tabla 6.- Disolución del aluminio en algunos áci- dos.....	89
Tabla 7.- Relación óptima (R) para crisoles.....	103
Tabla 8.- Espacios entre el crisol y la pared del refractario.....	104
Tabla 9.- Pérdidas de calor a través de las pare- des.....	113
Tabla 10.- Etapa experimental.....	138

CAPITULO I

1.- INTRODUCCION

## 1.- INTRODUCCION

En la actualidad, la generación de nuevos materiales y el desarrollo de la tecnología para su producción industrial es de vital importancia, para de esta forma, sustituir los materiales tradicionales con ventajas en sus características y también por su atractivo económico.

Entre los materiales que actualmente tienen una mayor proyección al futuro se encuentran los materiales compuestos, en particular los reforzados con fibras de altos módulos.

En países de tecnología avanzada ya se tiene un elevado grado de utilización de los mismos, para usos especiales o muy sofisticados, como son aquellos usados en aeronáutica espacial.

En otros casos se empiezan a aplicar estos materiales a nivel de concretos reforzados para la industria de la construcción. En nuestro país, esta área se encuentra incipiente o bien todavía no se tienen noticias de la utilización comercial de estos materiales.

Es por ello necesario el impulsar aún a nivel modesto, el desarrollo de tecnologías para generación de fibras de alto módulo para su penetración paulatina en el mercado. Entre las fibras que poseen un módulo superior -

al del concreto se encuentran las fibras metálicas y las cerámicas, fue por ello el interés de iniciar este estudio paralelamente a la necesidad que tenía el laboratorio de fundición del Centro de Investigación de Materiales, - de un equipo adecuado para realizar pruebas con metales de alto punto de fusión; se pensó además, en emplear el horno para obtener fibras metálicas, por lo que para estudiarlo y construirlo se consideraron los siguientes tipos:

- a).- De inducción con y sin núcleo.
- b).- De resistencia.
- c).- De crisol.

El horno de inducción con núcleo se descartó por las dificultades que presenta su operación intermitente.

El horno de inducción sin núcleo, proporciona una fusión limpia, alcanza temperaturas altas fácilmente y es de construcción sencilla.

El horno de resistencia, con transferencia de calor por radiación, presenta las ventajas siguientes: fusión limpia, alcanza temperaturas altas, es de construcción sencilla y de fácil control.

La desventaja de los hornos anteriores es su alto costo, por lo que resultan de difícil adquisición.

Cuando se sujetó el horno de crisol a un análisis,

se concluyó que era el más adecuado para un proyecto de esta naturaleza, ya que proporciona una fusión limpia, su construcción es sencilla, de operación simple y sobre todo de fácil adquisición por su bajo costo.

En una etapa posterior a la estimación y construcción del horno, se realizarán pruebas experimentales para obtención de las fibras metálicas.

El proceso consistirá en introducir el material en el horno en un crisol de grafito, el cual presentará un orificio en el centro, que permitirá la fluidización del material una vez fundido.

Se tratará que el material fluya por gravedad formando gotas, mismas que serán deformadas por aire a alta-velocidad, para la producción de las fibras.

CAPITULO II

2.- OBJETIVOS

## 2.- OBJETIVOS

2.1.- El objetivo de esta tesis es <sup>desarrollar</sup> estimar y construir un horno para fundir metales de alto punto de fusión y ver las posibilidades que existen de obtener fibras metálicas con el mismo.

Para efecto de cálculos se tomará como base la temperatura interior del horno de 1600°C y exterior 40°C; el combustible a usar será gas L.P. y la capacidad del horno será de 3 kg. de metal, por etapa.

2.2.- Se estimarán experimentalmente los parámetros de proceso apropiados para que el metal fundido fluya continuamente, con el objeto de obtener las fibras.

En un trabajo posterior se procederá a optimizar -- las condiciones más convenientes para obtener las fibras metálicas, en su relación costo versus propiedad.

El metal que se usará durante el desarrollo del trabajo será el aluminio, por ser de los que más se prestan para la fase experimental.

CAPITULO III

3.- GENERALIDADES

### 3.1.- CLASIFICACION DE HORNOS

Los hornos se emplean en trabajos a temperaturas elevadas en diseños variables, construyéndose muchos de ellos sobre pedido para tareas concretas. Se clasifican de la manera siguiente:

1.- Por su nombre.- Tienen distintos funcionamientos y formas en la industria. Un solo calificativo no siempre aclara el tipo de horno, por ejemplo, un "horno de cal" puede ser vertical o un cilindro rotatorio ligeramente inclinado respecto a la horizontal. En consecuencia, habrán de emplearse diversos calificativos para definir el tipo empleado.

Otros términos generales son fogón, mufla, retorta, calcinador, tostador, etc. En la industria se emplean estos términos con diferentes significados y con gran frecuencia se usan indistintamente para varios casos, por lo que la clasificación por nombres es casi siempre confusa. (16)

2.- Según el uso.- También se identifican por sus usos como hornos de cemento, hornos de cal, gesógenos, hornos de coque, altos hornos, carquesas, retortas de zinc y muchos otros. Todos éstos tienen diseños diferentes, impuestos por las propiedades físicas y químicas de la carga sometida a tratamiento y por tanto se clasifican como hornos de

tratamiento.

Hay otra categoría que exige simplemente un espacio calentador para poner la carga, ésta puede consistir en -- elementos individuales tales como tochos o artículos cerámicos, sólidos o fluidos dentro de recipientes o tuberías-- que se colocan en el espacio calentado. Ejemplos de estos-- son los hornos para tratamientos térmicos, las marmitas o crisoles para fundir, los hogares de las calderas de vapor etc. y estos se clasifican en general como hornos indus--- triales. (16)

3.- Según el movimiento de la carga.- El movimiento de la carga puede ser periódico o continuo. En el periódico la carga no se mueve durante el calentamiento y están in-- cluidos los hornos de tratamientos térmicos para artículos-- muy grandes, los hornos de crisol para fundir, las muflas-- de baja capacidad, etc. En los hornos continuos la carga - se mueve constantemente, entra el horno por un punto y sa-- le por el otro. La carga puede moverse por gravedad, por - el movimiento de la solera o en una corriente fluida.. (16)

4.- Según el combustible empleado u otras fuentes - de calor.- Los hogares pueden quemar combustible sólido so bre parrillas, combustibles líquidos, gaseosos y sólidos - pulverizados impulsados por una corriente de aire insufla--

do por las toberas de los quemadores. Pueden calentarse también mediante electricidad como en los tipos de inducción, conducción, arco radiante. El calor puede generarse también dentro de la misma carga, por una reacción exotérmica, o -- mezclando a ella combustible. (16)

5.- Según el método empleado para economizar calor.- Cuando los productos de la combustión salientes calientan previamente el aire comburente o el combustible, o ambos, o a la carga entrante, se ahorra combustible. En un horno de recuperación los productos de combustión y el aire comburente circulan por los lados opuestos de una pared divisora -- transmisora del calor y la llama recorre el horno en el mismo sentido. Si la carga sale del horno a temperatura ambiente o cercana a ella, el aire para combustión o los artículos entrantes pueden calentarse previamente con los artículos que salen. Este es el horno llamado compensador. (16)

6.- Según el método como se aplica el calor.- De acuerdo con esto se clasifican en hornos directos y calentadores indirectos. Los primeros son aquellos en que los gases de combustión se ponen en contacto directo con la carga; mientras que los segundos son aquellos en los que los gases de combustión están separados por una pared a través de la cual debe pasar el calor.

Entre los hornos directos se tienen los de túnel y los empleados para cocer ladrillos, los rotatorios, los altos hornos y otros. Entre los calentadores indirectos se encuentran los de mufla, tubos radiantes, calderas de vapor, serpentines, crisoles para derretir, etc. Un horno de convección es una modificación del tipo directo, ya que a la carga la calientan los gases de combustión y está protegida contra el contacto directo de la llama. Los calentadores indirectos se usan cuando son necesarias atmósferas especiales. (16)

7.- Según el diseño o la forma.- Los hornos verticales comprenden los cubilotes, los altos hornos, los gasógenos, etc. Los horizontales abarcan los de túnel, los rotatorios, los de cerámica, los de tratamiento térmico, etc.

Los hornos de depósito son los de reverbero, los hornos para vidrio, de fusión, etc. Los hornos de espacio o cámara incluyen los tostadores de minerales, los quemadores de azufre, los rotatorios y los hogares de las calderas de vapor.

Los hornos circulares comprenden los usados en la fabricación de ácido clorhídrico, en el caldeo de lingotes o tochos, en el tratamiento del mineral cromita, etc. Los hornos de varios pisos pueden clasificarse en verticales y

circulares. Los hornos para sólidos fluidizados se consideran como verticales y a veces como de espacio o cámara. -

(16)

8.- Según algún nombre especial.- Los hornos se designan a menudo (pero no se clasifican) con un nombre propio. Dicho nombre puede ser el del inventor, el de la compañía que lo fabrica, el del sitio en que se utilizó primero o con un nombre comercial, muchas veces registrado. Estos incluyen el horno Lepol, el horno Herreshoff, el tostador Trali, el horno Mannheim, el tostador Nichols-Freeman, el horno Thermofor, etc. (16).

### 3.2.- QUEMADORES

Para los quemadores, se mezcla previamente el gas con cierta cantidad de aire, que corrientemente es considerablemente menor de la necesaria para la combustión. Cuando se aspira este aire primario por un chorro de gas a baja presión, el quemador se llama atmosférico.

Al proyectar quemadores para dicha combustión, lo primero en considerar es el volumen del gas necesario y luego las características de la llama; así, si hay que conseguir una llama de gran temperatura, se necesita una alta relación del aire primario al gas. Han de conocerse la presión mínima del gas disponible y las características geomé

tricas del espacio en que ha de realizarse la combustión y en el que ha de producirse el calor a transmitir.

El quemador consta de: (I) un orificio de donde sale el gas, (II) un tubo inyector que arrastra el aire y lo mezcla con el gas y (III) una serie de lumbreras y aberturas por donde sale la mezcla de gas y aire para su combustión. Al instalar el quemador se suele poner una llave o válvula para regular la circulación del gas. Hay que tener cuidado de colocar el quemador de modo que el aire, sin contaminación importante con los productos de la combustión quede libremente disponible en la abertura del obturador del aire del tubo mezclador en las condiciones de máxima demanda, y deben además tomarse disposiciones que permitan la circulación fácil del aire secundario hacia las lumbreras y la libre descarga de los productos de la combustión. El cono interior de la llama nunca deberá chocar con el objeto, pues la combustión incompleta que resultaría produciría cantidades peligrosas de óxido de carbono. (16)

Orificio.- Al seleccionar un orificio, conviene hacerlo con un alto coeficiente de derrame o descarga, pues se obtendrá mayor arrastre de aire. El gasto de gas en un orificio de bordes agudos lo proporciona la fórmula:

$$Q = 4.569 AK \sqrt{\frac{H}{d}}$$

en la que  $Q$  = cantidad de gas circulante,  $m^3/h$

$A$  = área del orificio,  $cm^2$

$K$  = constante de orificio, o sea coeficiente de descarga o derrame.

$H$  = presión en el orificio, cm de agua (por encima de la atmosférica)

$d$  = densidad del gas con relación al aire, cerca del orificio.

Hasta una presión en el orificio de 25.4 cm de agua, no se introduce ningún error de importancia, debido a la -- variación de la densidad causada por el aumento de presión.

(16)

En - 2 - se pueden obtener algunos valores de  $K$  para diversos orificios de bordes agudos.

Relación de aire-gas.- Para el funcionamiento flexible del quemador atmosférico, conviene trabajar con una relación de aire primario a gas, en el tubo mezclador, de tal carácter que las variaciones ordinarias de la composición -- no sean críticas. En la más antigua aplicación del gas fabricado, la relación del aire primario al gas era de 1.5 a 2, es decir, 30 a 40% del aire total necesario. Con el progreso de la técnica del diseño del quemador se ha posibilitado conseguir porcentajes mucho más elevados de aereación--

de la mezcla primaria. Cuando el acceso del aire secundario a la lumbrera es algo restringido, como en algunos calentadores de tipo radiante, provistos de parrilas cerámicas, el porcentaje de aereación primaria puede llegar al 80%. No obstante, relaciones del aire primario al gas tan elevadas son más críticas y se evitan donde es importante la flexibilidad.

Si dicha relación es demasiado bajo, la llama se --- alarga y puede producir óxido de carbono si choca. Sus puntas se vuelven amarillas y la combustión es humeante. Una relación demasiado alta conduce a retornos de la llama con producción de óxido de carbono o a su lanzamiento más allá de lo debido, lo que también es inconveniente. (16).

El tubo inyector. - Para asegurar el arrastre máximo con la mínima presión del gas, el tubo inyector deberá tener la forma de venturi.

En Bur. Standards Tech, Paper 193, se indican las siguientes observaciones como algunas de las más importantes que hay que considerar en relación con el tubo inyector:

a). - La variación del diámetro del tubo desde el acceso de entrada hasta la salida deberá ser gradual. (16)

b). - Dicho acceso seguirá aproximadamente una curvatura de no menos de 7.5 cm de radio para una garganta de --

15.9 mm (5/8") y en proporción para otros tamaños. Para el tubo de las dimensiones indicadas el derrame por el orificio se verificará a unos 38 mm de dicha garganta. (16)

c).- El ángulo de la salida será de unos dos grados. El tubo de salida no deberá ser demasiado corto; para un buen servicio, su longitud mínima será de seis diámetros de la garganta. Se determina un área satisfactoria de la garganta multiplicando las de las lumbreras por 0.43.

El Bureau of Standards (circ. 394) expone la relación que existe entre el diseño del quemador y la cantidad del movimiento de la corriente del gas con referencia especial al arrastre del aire. El producto de la masa y la velocidad del chorro de gas, a la salida del orificio, guarda una relación suficientemente constante con la cantidad de movimiento de la mezcla de gas y aire primario que pasa por una determinada sección del quemador, para permitir -- la utilización de una constante en la mayoría de los problemas de diseño o proyecto; es decir que  $MV/mv = C$ . Para quemadores del mismo diseño geométrico, C, tiene el mismo valor para los distintos tamaños, estas consideraciones -- son aproximadas y sujetas a algunas modificaciones a medida que el quemador se calienta y con el aumento de presión y gases de baja densidad. (16)

Según lo anterior, los quemadores geoméricamente semejantes tienen una constante de inyección característica, que es:

$$K = \frac{Q}{q} \sqrt{\frac{a D}{d}}$$

-2-

en la que K = constante de los quemadores

q = cantidad de gas que circula en la unidad de tiempo.

Q = volumen de la mezcla de gas y aire que circula en la unidad de tiempo.

a = aire del orificio

D = densidad de la mezcla de aire y gas, con relación al aire.

d = densidad del gas con relación al aire

El valor de K se determinará experimentalmente, pero no deberá de tomarse mayor de 0,8 P, siendo P el área total de lumbreras, aunque con quemadores bien diseñados, adecuadamente alineados o centrados con orificios de bordes agudos, se han tenido valores tan altos como 1.2 P.

Con esta consideración de la constante de los quemadores, pueden deducirse varias fórmulas útiles.

Se recomienda que el área libre del cabezal del mezclador por el cual se admite el aire, se fije aproximada-

mente en 1.25 veces el área de lumbreras. (16)

El cabezal del quemador.- Son consideraciones de importancia en relación con el cabezal del quemador, el área de lumbreras, la altura y el coeficiente de derrame de las mismas, el área particular de cada una de ellas, el espaciamiento entre ellas, el volumen del quemador y la distribución del aire secundario.

Para el gas natural, el butano y el propano, pueden quemarse cantidades que den 470 a 590 Kcal/h, por  $\text{cm}^2$  de área de lumbrera; para los gases fabricados de 860 a 1000 Kcal/h. ( $\text{cm}^2$  de lumbrera).

Se prefieren las lumbreras formadas por perforaciones, no deberá colocarse ninguna gasa en el quemador. En los pequeños quemadores de hierro o acero, el cabezal, el tubo y el inyector del quemador se fundirán de una pieza y no se unirán con ningún cemento.

Las áreas de las lumbreras individuales son factores importantes para la estabilidad de la llama y su retorno o lanzamiento más lejos de lo debido. Según el Bureau of Standards, no deberá excederse de las siguientes áreas:

Para gas fabricado: No. 40 M.D.S. ( $0.048 \text{ cm}^2$ )

Para gas natural: No. 30 M.D.S. ( $0.084 \text{ cm}^2$ )

Para propano y butano: No. 32 M.D.S. ( $0.068 \text{ cm}^2$ )

Los quemadores universales requieren lumbreras especiales pequeñas con áreas totales que se aproximan a las recomendadas para el gas natural.

Las proporciones de las lumbreras han de ser tales que la llama no retroceda debido a la baja velocidad de la corriente de aire-gas, ni sea lanzada demasiado lejos por una excesiva velocidad. Para conseguir altas relaciones -- del aire al gas sin retroceso de la llama tiene que proporcionarse a la mezcla de gas y aire una cantidad de movimiento amplia para asegurar, dentro del cabezal del quemador, la presión adecuada para originar la velocidad requerida a través de las lumbreras. (16)

Kowalke y Gagske dedujeron ciertas fórmulas entre las relaciones de aire a gas y la relación del área de la garganta a las de las lumbreras y entre el área del orificio y el área de la garganta. El trabajo fué después perfeccionado. Las ecuaciones obtenidas en dicho trabajo se han reordenado en la siguiente forma:

$$A_p = \frac{0.85}{C} \times (R + 1) \times \frac{D + R}{d} \times A_o \quad -3-$$

en donde  $A_p$  = área de las lumbreras,  $\text{cm}^2$

$A_o$  = área del orificio,  $\text{cm}^2$

$C$  = coeficiente de derrame o descarga de la lum-

brera, sus valores varían de 0.45 a 1, a veces se toma 0.6.

R = relación del aire primario al gas.

d = densidad del gas con relación al aire.

El coeficiente 0.85 es característico del quemador y solo es aplicable a los bien diseñados, como los que utilizan tubos inyectoros que cumplen con las indicaciones -- del Bureau of Standards. Se han hallado valores de dicho -- coeficiente que van de 0.35 a 0.7.

La forma general de la ecuación anterior es la siguiente:

$$A_p = \frac{K^2 A_o}{CF} \frac{(R + 1) (R + d)}{d} \quad -4-$$

en la que K es el coeficiente de derrame del orificio para el gas (sus valores van de 0.75 a 0.85) y F es la característica del inyector.

Deberá evitarse la disposición de las lumbreras en dos hileras sin acceso de aire secundario entre ellas. Las lumbreras no se perforan demasiado cercanas al tubo inyector y no deberá desviarse la corriente de aire-gas contra ciertas de ellas. Hay que tomar precaución para asegurar -- sustancialmente la misma presión en todas las lumbreras. -- Es difícil estimar el coeficiente de derrame de éstas a --

causa de las diversas formas en que pueden hacerse. Para aproximaciones, pueden utilizarse valores de 0.6 a 0.8, aunque se han encontrado desde 0.45 a 1.0.

Wills recomienda que el área libre de la sección transversal del cabezal del quemador sea tres veces la de las lumbreras que se dispongan. Si se requiere una distribución uniforme del calor, no deberá ser demasiado grande la diferencia entre las velocidades de la mezcla de aire y gas en la primera y la última lumbrera.

Apertura del obturador de aire.- El Bureau of Standards recomienda que la apertura posible del obturador de aire deberá ser tan grande que la velocidad lineal a través de ella no exceda de 1.2 a 1.5 m/seg. (16)

En la industria las ecuaciones que se utilizan para calcular la capacidad del quemador (14) son las siguientes:

$$Q = q_1 + q_2 \quad -5-$$

en la que:

$$q_1 = m C_p \Delta t \quad -6-$$

donde  $m =$  kg/h de la carga

$C_p =$  calor específico de la carga

$\Delta t =$  diferencia de temperaturas

$$q_2 = 0.172 A \sigma \left[ \left( \frac{T_q + 460}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f + 460}{100} \right)^4 \right] \quad -7-$$

donde  $A$  = área efectiva del refractario,  $ft^2$ .

$\sigma$  = emisividad, (0.64 para gases)

$T_g$  = temperatura del horno

$T_f$  = temperatura de la carga.

0.172 = constante de Stefan-Boltzmann. 31

### 3.3.- REFRACTARIOS

El término refractario comprende estrictamente todos los materiales de C.P.E. (cono pirométrico equivalente) superior al cono 26. Los materiales refractarios se componen principalmente de diversos silicatos, de alúmina, de calcio, de magnesita, de óxido férrico y crómico.

La mayor parte de los refractarios tienen muy poca resistencia mecánica a temperaturas elevadas, por lo tanto, para mejorar las propiedades mecánicas <sup>que</sup> es necesario mezclar un material refractario con otro. Algunas veces ya se encuentra mezclado en el estado natural. (18)

3.3.1.- Clasificación.- Los refractarios se pueden clasificar en cinco variedades (13) que son las siguientes:

- 1.- Refractarios arcillosos 3
- 2.- Refractarios silicosos
- 3.- Refractarios de alto contenido de alúmina
- 4.- Refractarios básicos
- 5.- Refractarios aislantes

Existen además una serie de productos denominados - Especialidades Refractarias, dentro de las cuales se tienen: concretos aislantes, plásticos, apisonables, morteros, materiales granulados y materiales aplicables con pistola o a mano. A continuación se dará una breve explicación de los diferentes tipos de refractarios.

1.- Refractarios arcillosos.- Se denominan también sílico-aluminosos, por ser la sílice y la alúmina los componentes principales de ellos. Las materias primas que se utilizan para la fabricación de estos materiales son arcillas duras, arcillas plásticas o suaves caolines. Existen diferentes calidades de arcilla, tanto en su análisis como en sus propiedades físicas. Se conocen cinco tipos de ladrillo: calidad superior, alta calidad, semi-sílica, calidad media y baja calidad. Los de calidad superior contienen de 40 a 44% de alúmina, tienen un cono pirométrico de 33 - mínimo, que corresponde a una temperatura de ablandamiento de 1741 °C; los de alta calidad tienen un cono pirométrico no menor de 31 y 1/2 que corresponde a una temperatura de ablandamiento de 1699°C; los de calidad media tienen un cono pirométrico equivalente a menos de 29 que equivale a -- una temperatura de ablandamiento de 1645°C.

Los refractarios arcillosos se componen de los si--

güentes materiales; óxido de silicio, óxido de aluminio, -  
 óxido de fierro, óxido de titanio, óxido de calcio y óxido  
 de magnesio. (13)

2.- Refractarios silicosos. - Están constituidos fun-  
 damentalmente por óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). La materia pri-  
 ma principal es el cuarzo, ya que el cuarzo por ser de for-  
 ma cristalográfica es más inestable a altas temperaturas -  
 que el óxido de silicio, es necesario transformarlo median-  
 te un cocimiento a tridimita y cristobalita que son las --  
 formas cristalográficas de la sílice estables a altas tem-  
 peraturas. Se encuentran en el mercado dos tipos de ladri-  
 llos silicosos: el convencional o regular que contiene más  
 de 0.5% de alúmina, titanio y óxidos alcalinos y el silico-  
 so especial que contiene 0.5% o menos de los compuestos --  
 arriba mencionados.

Los ladrillos de sílice deben contener como mínimo-  
 98% de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y se componen de los siguientes mate-  
 riales: óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de fie-  
 rro, óxido de calcio, óxido de magnesio y óxido de titanio  
 (13)

3.- Refractarios de alto contenido de alúmina. - Es-  
 tos materiales también pueden llamarse alúmino-silicosos -  
 por estar constituidos principalmente por óxidos de alumi-

nio. En el mercado se presentan estos materiales con varia ciones de 10 puntos en el porcentaje de alúmina, partiendo de 50% de  $Al_2O_3$  como base y se clasifican como sigue: de - 50, de 60 y de 70% de  $Al_2O_3$ . Estas tres clases son las más comunes, pero existen de 80, 85, 90 y 99% de alúmina, que se usan en casos especiales. (13)

4.- Refractarios básicos.- Están constituidos princi- palmente de óxido de cromo y óxido de magnesio. Cuando el refrac- tario está constituido por ambos óxidos se puede llamar magne- sita-cromo o cromo-magnesita, dependiendo de la cantidad de -- óxido que predomine. Las materias primas para la fabricación de estos refractarios son: magnesita, hidróxido de magnesio - químicamente precipitado y minerales de cromo. Existen dos subclases de este tipo de refractarios que son los ladri- llos químicamente unidos y los ladrillos quemados. La pri- mera comprende aquellos ladrillos básicos que toman su for- ma y la conservan durante su instalación gracias a la pre- sión aplicada al prensarlos y a aglutinantes de cierto fra- guado al aire, que suministran las propiedades físicas re- queridas por el material refractario en cuestión. La segun- da comprende los materiales que además de ser prensados y- aglutinados son sujetos a un determinado quemado, con esto se consiguen propiedades físicas que no se tienen en los -

ladrillos refractarios químicamente unidos.

Las diferentes clases de ladrillos refractario básico de que se dispone son las siguientes:

- a).- Ladrillos de magnesita
- b).- Ladrillos de cromo
- c).- Ladrillos de magnesita-cromo
- d).- Ladrillos de cromo-magnesita
- e).- Ladrillos de forsterita
- f).- Ladrillos de magnesita ligado con alquitran y los ladrillos de magnesita-dolomita.

Estos ladrillos contienen las siguientes propiedades: alto punto de fusión, conductividad térmica de alta a moderada, gran resistencia al ataque químico por escoria y expansión térmica relativamente alta pero uniforme. (13)

5.- Refractarios aislantes.- Existen dos tipos de refractarios aislantes, los ladrillos aislantes quemados y los ladrillos aislantes prensados. Las características principales de los aislantes son: baja densidad, alta porosidad, baja conductividad térmica y propiedades físicas muy bajas. Las materias primas para este tipo de refractarios son: diatomácea, vermiculita, perlita, arcilla refractaria y minerales de alta alúmina. (13)

Especialidades Refractarias.- Dentro de este tipo -

de materiales existe una serie de productos tan extensa, -- que únicamente se dirá que existen especialidades como: -- plásticos, concretos, concretos aislantes, apisonables, -- morteros y materiales aplicables con pistola o a mano, dentro de cada una de las cinco grandes ramas en que se dividen los materiales refractarios. (13)

3.3.2.- Propiedades de los refractarios.- Las propiedades del ladrillo refractario varían mucho, dependiendo de las arcillas y materiales no plásticos utilizados, -- de la densidad (en definitiva de la presión utilizada en su formación) y de la temperatura de cocción. Las propiedades de mayor importancia (12), son:

- 1.- Punto de fusión
- 2.- Fluencia bajo compresión
- 3.- Resistencia al descascarillado o desconchado
- 4.- Resistencia a la escoria
- 5.- Estabilidad a gases y vapores
- 6.- Resistencia a la abrasión
- 7.- Dilatación y contracción

Cada una de las aplicaciones posibles requiere que se tengan en cuenta todas estas propiedades para obtener el máximo rendimiento. Siempre es mejor consultar a fabricantes con experiencia al seleccionar una calidad determi-

nada. Es importante tomar en cuenta todas las propiedades indicadas u otras a ellas parecidas cuando se elijan otros tipos de refractario.

1.- Punto de fusión.- Un método común para determinar el punto de fusión es comparar las características de pandeo de la muestra con una serie de conos pirométricos - standard. Existen dos tipos de conos pirométricos, el Segler y el Orton, generalmente se usa éste último. La precisión - que se puede obtener es de más o menos 15°C.

En la tabla 1 se da una lista de los conos pirométricos Orton (de acuerdo al National Bureau of Standards) - y la equivalencia de la temperatura de los conos.

El valor de punto de fusión como dato para determinar las posibilidades de un material para una finalidad de terminada, ha sido a menudo sobreestimada. Lo que nos indica el punto de fusión es si un material es o no conveniente por encima de una cierta temperatura. Por ejemplo, si se desea hacer un ladrillo refractario para ser utilizado a temperaturas de horno de 1600°C y se seleccionan varias muestras de arcilla, la prueba de punto de fusión eliminaría inmediatamente todas aquellas cuyo punto de fusión fuera igual o inferior a dicha temperatura. Sin embargo, una arcilla cuyo reblandecimiento tiene lugar a 1850°C no será

necesariamente mejor para este ladrillo que otra en la que dicho fenómeno tenga lugar a una temperatura de 1750°C.

TABLA 1

Puntos finales de conos pirométricos Orton.					
No. del cono	Punto °C	Final °F	No. del cono	Punto °C	Final °F
12	1337	2439	34	1759	3198
13	1349	2460	35	1784	3243
14	1398	2548	36	1796	3265
15	1430	2606	37	1830	3326
16	1491	2716	38	1850	3362
17	1512	2736	39	1865	3389
18	1522	2772	40	1885	3425
19	1541	2806	41	1970	3578
20	1564	2847	42	2015	3659
23	1590	2894			
26	1605	2921			
27	1627	2960			
28	1638	2980			
29	1645	2993			
30	1654	3009			
31	1679	3054			
31 1/2	1699	3090			
32	1717	3125			
32 1/2	1730	3146			
33	1741	3166			

El punto de fusión no es un criterio absoluto de su capacidad para soportar una cierta carga a altas temperaturas, ya que sus posibilidades de aplicación van ligadas directamente a la temperatura a la cual pueden utilizarse con éxito. (12)

2.- Resistencia a la compresión.- Actualmente las rotu -

ras por presión componen una pequeña porción de los problemas que entrañan la construcción de hornos. Sin embargo, - para largos períodos de calentamiento, en ciertas zonas tales como techos, pilares y paredes calentadas por ambos lados, su resistencia a la deformación dependerá de la naturaleza de los refractarios en todo el transcurso del calentamiento.

La prueba típica de compresión es la norma standard ASTM. En Europa se lleva a cabo este ensayo en modelos pequeños, por ejemplo en cilindros de una pulgada de diámetro por -- una pulgada de altura. Estas pruebas consisten en que la muestra en compresión se calienta a un régimen determinado y se determina la deformación al final del ensayo. También se han hecho ensayos para la tensión y la torsión.

Algunos autores han encontrado gran concordancia entre los datos de compresión, tensión y pandeo y sugieren - el método con modelos más pequeños como el más conveniente, ya que la temperatura puede ser más uniforme en todo el modelo y el horno puede ser así de menor tamaño y más fácilmente controlable. (12)

Módulos de elasticidad a temperaturas elevadas.- Las propiedades elásticas de los refractarios pueden arrojar - mucha luz en el agregado más bien complejo, de cristales -

que lo constituyen. Proporcionan una idea de la resistencia o fuerza del enlace y recogen discontinuidades y tensiones internas existentes en la estructura. (12)

3.- Resistencia al descascarillado o desconchado.- El desconchado se ha definido tradicionalmente como la fractura del ladrillo o bloque refractario debido a cualquiera de las siguientes causas:

a).- Un gradiente de temperatura en el ladrillo debido al enfriamiento o calentamiento no uniformes que es suficiente para producir tensiones de magnitud tal que causen roturas.

b).- Una compresión en la estructura del refractario debida a la expansión de la totalidad de la pieza, suficiente para producir tensiones que puedan provocar rotura.

c).- Una variación en el coeficiente de expansión térmica entre la capa superficial y el cuerpo del ladrillo, debida a la penetración superficial de la escoria o a un cambio estructural mientras funciona.

El primer caso es el más predominante en refractarios de sílice, magnesita y cromita. El segundo caso es debido al mal diseño del horno y el tercero se puede evitar utilizando ladrillos cocidos a temperaturas más altas que la de operación y evitando la penetración de la escoria --

hasta donde sea posible. ]

A pesar de los estudios que se han hecho sobre las tensiones y fracturas de los materiales quebradizos, no se conoce perfectamente lo que en realidad ocurre. (12)

Tensiones en los sólidos debido a cambios térmicos.- Es muy poca la diferencia en la apreciación de tensiones que tienen origen en un calentamiento y las causadas por un enfriamiento. Las tensiones, así como la fractura son diferentes en ambos casos.

Para determinar las tensiones se puede emplear el método fotoeléctrico, con hologramas y el ensayo de tensiones por cambios térmicos; en los cuales los modelos se calientan y se enfrían súbitamente. De acuerdo a los resultados obtenidos se dedujo lo siguiente:

a).- Las tensiones que se originan a causa de un calentamiento o enfriamiento súbito de su superficie a través de ciertos intervalos de temperatura, son del mismo orden pero de signo contrario. (12)

b).- No existen fuerzas de tensión longitudinal cuando se calienta súbitamente. (12)

c).- El esfuerzo cortante máximo producido es igual a una mitad de las tensiones máximas que resultan. (12)

d).- Las fuerzas son generalmente bajas en los vér-

tices pero alcanzan su valor máximo a lo largo de los lados calentados a una distancia fija de los vértices. (12)

Estudio de las grietas.- En las figuras 1 y 2 se muestran los resultados del calentamiento y enfriamiento súbito respectivamente, los estudios se hicieron sobre ladrillos de tamaño standard de grano fino, de estructura similar a la porcelana, a fin de que el desconchado aparezca fácilmente.

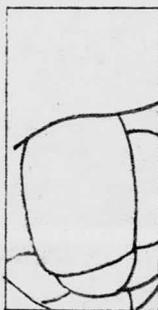


Figura 1  
Grietas que tienen lugar en un calentamiento repentino (J.Am.Ceram.Soc.)

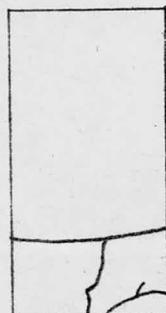


Figura 2  
Grietas que aparecen en un enfriamiento repentino (J.Am. Ceram. Soc.)

Las conclusiones que se han obtenido son las siguientes: El desconchado se debe a roturas por esfuerzo cortante en el calentamiento súbito y por tensiones longitudinales en el enfriamiento repentino, excepto en los cantos y vértices, donde las fuerzas de cizalladura pueden todavía producir roturas. La rotura por cizalladura ocurre repentinamen-

te, o sea que en cada calentamiento hay piezas completas - que se cuarteán.

Las grietas por tensión longitudinal rara vez ocurren en los vértices, pero dichas tensiones son máximas. - Los valores de esfuerzo cortante son aproximadamente iguales en el calentamiento o enfriamiento, pero al calentar rápidamente no aparecen fuerzas de tensión longitudinal. -

(12)

Roturas por desconchado en el funcionamiento.- Las roturas por desconchado cuando los ladrillos están en servicio, en la pared, son muy variados. La más típica es la que se indica en la figura 3 que consiste en dos grietas - por cizalladura y parten ambas del centro del ladrillo. A menudo aparecen unas pequeñas grietas por tensión, tal como lo indica la figura 4, este tipo de rotura no es tan -- grave, porque los fragmentos son tan grandes que continuarían permaneciendo en su lugar.

Otro tipo de rotura es la separación de una delgada capa de material de la cara del ladrillo como se ve en la figura 5, con frecuencia se descortezan capa a capa, dando así una duración considerable antes de que la pared se vuelva demasiado delgada.

El desconchado en la pared se aumenta enormemente -

con cargas de compresión debida a la expansión. Las juntas de expansión deben dejarse por lo menos cada 15 pies de longitud y deben tener un grosor de 0.5 a 1 pulgada. -- Otro factor que influye en el desconchado es la alteración en la estructura de la cara caliente del ladrillo producida por penetración de escorias, por sinterización o por -- reacciones gaseosas. La rotura debida al calentamiento repentino del ladrillo que aún está húmedo ha sido considerado a veces como un tipo especial de desconchado. (12)

4.- Resistencia a la escoria y vidrios.- Las esco-- rias y vidrios atacan activamente a los refractarios y, de hecho, en muchos procesos constituyen el factor destructivo más importante. Desgraciadamente, es difícil hacer un aná- lisis cuantitativo satisfactorio de las reacciones suscita das, a pesar de que se están realizando estudios con mate- riales puros bajo condiciones dinámicas, para dar alguna - idea sobre el mecanismo de corrosión. ]

En general, la acción de la escoria puede dividirse en efectos químicos y efectos físicos. En los efectos químicos los factores más importantes son las condiciones de equilibrio y la velocidad de reacción; en los efectos físi-cos los factores más importantes son la velocidad de flujo, penetración de la escoria y el mojado de la superficie del



Figura 3

Típica fractura de desconchado.



Figura 4

Grieta por tensión en el extremo de un ladrillo.



Figura 5

Separación de una capa delgada debida al fenómeno de vitrificación.

refractario por la escoria. (12)

5.- Resistencia a la abrasión.- Los refractarios -- utilizados en las soleras de los hornos o en otros lugares donde los objetos se deslizan por encima de ellos deben tener una buena resistencia a la abrasión. A menudo los refractarios se gastan debido al frotamiento de las partículas que se mueven con la rapidez del flujo gaseoso, por lo tanto los refractarios deben tener una estructura fuerte y bien enlazada y no deben volverse plásticos a la temperatura de trabajo. En general, se ha encontrado que un ladrillo que muestra una buena resistencia a la presión, resiste también la abrasión.

Los resultados obtenidos con las pruebas de Hancock y King para medir la abrasión, demuestran que la resistencia a la abrasión decrece con la temperatura. También se ha llegado a la conclusión de que una estructura finamente granular y una alta temperatura de cocción aumentan la resistencia a la abrasión. Dicha resistencia, para un ladrillo refractario aislante es naturalmente menor que para un refractario denso. (12)

6.- Dilatación y contracción.- Existen dos factores importantes en los cambios de volumen de los refractarios al calentarse. En primer lugar, se necesita un conocimien-

to de las expansiones y contracciones reversibles para diseñar juntas la expansión adecuadas, y también para predecir la resistencia al desconchado. En segundo lugar, los cambios irreversibles dan una buena idea de la temperatura máxima a la cual el refractario puede ser utilizado.

Los ladrillos pueden mostrar o una dilatación o bien una contracción cuando se calientan hasta la temperatura tan elevada en el proceso de fabricación, como alta es la temperatura de trabajo. Consecuentemente, con el tipo de arcilla normal el ladrillo disminuirá en volumen a las temperaturas de trabajo. Esto no es conveniente, sobre todo en bóvedas y arcos, porque las juntas abiertas que resultan constituyen una fuente de esquinas y bordes que pueden ser el inicio de desconchado y erosión por parte de la escoria. Una ligera expansión no es particularmente perjudicial en la pared o el arco, si se ha diseñado adecuadamente. (12)

Otras propiedades de los refractarios. - Existen otras propiedades de los refractarios que se necesitan conocer en la producción o uso de los refractarios. Estos incluyen tamaño de la partícula, macroestructura, permeabilidad, superficie específica, conductividad eléctrica, densidad real, resistividad eléctrica y muchas otras. (12)

### 3.4.- TERMOPARES

Existen dos clases generales de dispositivos que se emplean para medir temperaturas, a saber: 1).- los que dependen de cambios físicos de un sólido, un líquido o un gas, y 2).- los que dependen de fenómenos eléctricos.

Los termopares, también llamados pares termoeléctricos se encuentran dentro de los segundos y son los elementos termoeléctricos más importantes para medir tanto temperaturas elevadas como muy bajas inferiores a la ambiente y las comprendidas entre límites moderados. Un par termoeléctrico consiste en dos alambres metálicos de distintos materiales unidos por un extremo (figura 6), al que se llama junta de medición. Cuando cambia la temperatura de la junta soldada, mientras los extremos libres o terminales se mantienen a una temperatura conocida, se genera un potencial eléctrico en el sistema y que se manifiesta en las terminales. Este potencial se mide mediante un milivoltímetro o un potenciómetro graduado en temperaturas. Este efecto termoeléctrico se atribuye a dos causas: la f.e.m. de Thomson y la f.e.m. de Peltier. La f.e.m. de Peltier es la parte de la f.e.m. total originada por la diferencia de potencial en la unión de los dos alambres diferen-

tes. La de Thomson es la parte de la f.e.m. total debida al gradiente de temperatura en una sola sección de alambre homogéneo cuando sus extremos están a diferentes temperaturas.

Compensación en la junta de referencia.- Los pares termoeléctricos se usan para medir temperaturas poniendo los extremos soldados, o sea, la junta de medición en el punto de medida, mientras que los extremos libres, conocidos con el nombre de junta de referencia, se conectan por medio de conductos con el elemento medidor que cierra el circuito.

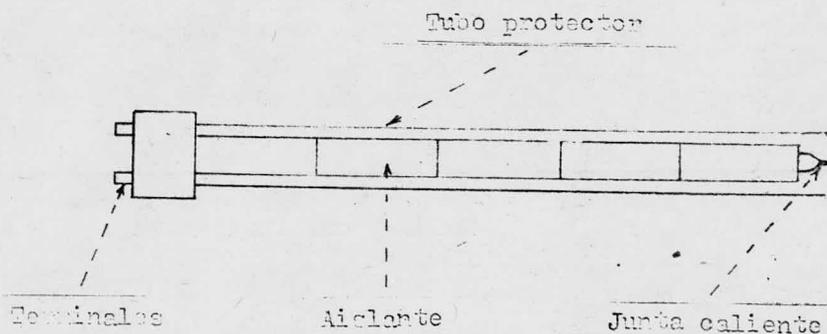


Figura 6  
Termopar

Es importante conocer la temperatura de la junta de referencia, ya que la f.e.m. desarrollada depende de la diferencia entre las temperaturas de la junta de medición y la de referencia. La f.e.m. generada es, aproximadamente, directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre ambas juntas. Para asegurar una temperatura constante en la junta de referencia, casi todas las instalaciones prolongan o extienden la junta de referencia hasta el instrumento de medida empleando conductores compensadores, que en el caso de los pares termoeléctricos de metales comunes suelen ser flexibles, de múltiples alambres y del mismo material que los elementos correspondientes del par termoeléctrico. En el caso de pares de metales nobles, se usan conductores de extensión que tienen casi las mismas características termoeléctricas que los metales nobles usados. Por este procedimiento es posible hacer las correcciones necesarias para la junta de referencia en la caja del instrumento, utilizando un elemento bimetalico para desplazar adecuadamente el cero del instrumento, empleando resistencias de níquel o cobre en un lado del circuito puente del potenciómetro, o bien por algún otro procedimiento quivalente. (16)

Características necesarias en un termopar de uso industrial:

- a).- Máxima f.e.m. en el rango de temperatura deseado
- b).- Bajo costo
- c).- Disponibilidad de obtención de los metales
- d).- Resistencia a la corrosión
- e).- Constancia en las propiedades termoeléctricas
- f).- Punto de fusión mayor al de la temperatura máxima que se espera
- g).- Función temperatura, f.e.m. lo más lineal posible

Considerando las características anteriores, en la tabla 2 se muestran los termopares de que se dispone comercialmente.

TABLA 2

Termopares comerciales				
Designación I.S.A.*	Elemento +	Elemento -	Rango Max. °C	Temp. °C
S	90% Pt, 10% Rh	Pt	0-1450	1700
R	87% Pt, 13% Rh	Pt	0-1450	1700
K	Chromel +	Alumel +	-200-1100	1200
J	Hierro	Constantano +	-200-750	1000
T	Cobre	Constantano +	-200-350	600

\* Instrument Society of America

+ Marcas registradas de aleaciones

Elección del par termoeléctrico.- Para elegir un --  
par termoeléctrico hay que tener en cuenta tres factores -  
principales(8):

1).- La rapidez de respuesta o de reacción a las va  
riaciones de temperatura que se necesita.

2).- La profundidad de inmersión, o sea, la distan  
cia que el par termoeléctrico tiene que penetrar en el ---  
equipo utilizado en el proceso.

3).- La vida o la duración, es decir, el tiempo pro

bable que el par termoeléctrico conservará una actitud aceptable.

En general, los pares hierro-constantano trabajan mejor en atmósferas reductoras. Los pares chromel-alumel trabajan mejor en las oxidantes. Los pares cobre-constantano se usan por lo general en los trabajos a bajas temperaturas, cuando las condiciones atmosféricas no son críticas y son preferibles cuando el contenido de humedad es elevado. (16)

Los pares platino-platino/rodio cuando están bien protegidos, pueden usarse en atmósferas oxidantes o reductoras.

Casi todos los pares termoeléctricos usados para medir temperaturas industriales exigen tubos protectores. Si no están protegidos pueden dar lugar a que el par termoeléctrico falle pronto, si bien impide el ataque químico y el daño mecánico al termopar, también disminuirá en forma considerable la velocidad de respuesta, por lo cual el tubo protector siempre será un mal necesario. (16)

La protección empleada es de tres clases: 1).- aislamiento de los alambres, 2).- tubo de protección primaria para evitar la contaminación y 3).- tubos de protección secundaria para proteger el tubo primario. Los materiales usados en este servicio, según las condiciones concretas -

de temperatura y de corrosividad del medio, comprenden el vidrio, la porcelana, el grafito, la arcilla, el níquel, - el acero, el hierro y otros materiales y aleaciones. (16)

Cuando se usa más de un termopar se conectan en serie o en paralelo. Cuando hay que medir intermitentemente varias temperaturas en un sistema, se conectan los pares - al instrumento por medio de un conmutador giratorio que -- permita leer rápidamente todas las temperaturas. (16)

Precauciones de instalación: Longitud de inmersión. Deberá ser tal que el extremo del termopar esté en contacto con la zona del proceso cuya temperatura se desea medir, además deberá estar a una profundidad suficiente como para que no haya conducción de calor o ésta sea despreciable a través del termopozo, del exterior al interior o viceversa. (8, 16).

Tipo de alambre.- Considerando el principio bajo el cual opera un termopar, el conectar el mismo al instrumento con alambre normal de cobre, provocaría en las dos unio nes de los metales del termopar con el conductor de cobre, la formación de otros dos termopares llamados parásitos, - los cuales introducen errores en la medición que pueden -- ser muy considerables. Por lo tanto nunca deberán interconectarse termopar con instrumento con alambre de cobre nor

mal. (16)

La conexión deberá hacerse con alambre de extensión adecuado al tipo de termopar que se esté usando. El alambre de extensión está hecho de metales de características termoeléctricas iguales a la temperatura ambiente, a aquellas del termopar con el que se van a usar, en forma tal que no se formen termopares parásitos.

Nunca se debe poner el termopar en la trayectoria directa de la llama; se pone donde mida la temperatura media, se procura colocar el termopar de modo que el extremo de medición pueda verse desde la puerta del horno, nunca debe introducirse bruscamente un tubo protector de porcelana dentro de un horno caliente, pues puede rajarse. (3,16)

### 3.5 FIBRAS METALICAS

En esta parte se verá la importancia que tienen algunos tipos de fibras que sirven también para el refuerzo de materiales, tales fibras tienen una similitud con las, del presente trabajo y por ello es que se les puede comparar con estas. Dichas fibras son: la fibra de acero y la fibra de aluminio, en el caso de ésta última lo que varía es el método de obtención el cual difiere notablemente al que se emplea en la presente.

Las fibras metálicas son productos fibrosos consistentes en un acero elástico fuerte u otro metal, de varios pies de longitud, sección transversal poligonal, principalmente triangular, terminados en puntas agudas. Esta última característica rinde un excelente abrasivo, muy útil en la industria del trabajo en madera.

Inicialmente se fabricaban fibras metálicas a partir de tiras, en lugar de hacerlo con hilo metálico como materia prima.

La primera aplicación de fibra metálica de acero, se atribuye a Galvani y Volta, que usaron "virutas metálicas" para eliminar herrumbre y manchas de metales en sus experimentos eléctricos. Estas "virutas metálicas" probablemente serían clasificadas por medio de standards comunes, como finas astillas metálicas. Sin embargo, la genuina fibra metálica no debe confundirse con el material metálico-filamentoso conocido como brocado, o con astillas metálicas.

El desarrollo de métodos modernos para fabricar -- fibras metálicas, tuvo sus inicios en 1889, cuando se patentó una máquina simple de hilo metálico. La operación consistía en pasar hilo metálico por un bloque gufa y una cortadora efectuaba el capillado por medio de cuchillas con -

extremos dentados. (5)

Se patentó, posteriormente, una máquina de hilo metálico múltiple, que aumentaba la producción considerablemente. En ésta máquina el hilo metálico se cortaba en forma de fragmentos fibrosos.

Las máquinas de hilo metálico múltiple presentaban varias desventajas, por ejemplo, la necesidad de emplear operadores expertos para ajustar las cuchillas y manejar la máquina, la separación manual al cortar la fibra y la dificultad al ajustar las cuchillas para obtener la fibra metálica del diámetro deseado. Estos inconvenientes fueron eliminados al patentarse en 1927, en Nueva York, una máquina de tipo continuo, que pudiera ser considerada como precursora de las máquinas actuales.

En dicha máquina se introdujeron cuchillas móviles o flotantes, capaces de efectuar automáticamente la operación de corte, para cualquier profundidad menor que la de los dientes, en las puntas filosas de las cuchillas. (5)

#### APLICACIONES DE FIBRAS METALICAS

FIBRA DE ACERO.- Tipo de fibra muy popular, ampliamente usada en limpieza y para pulir. Actualmente se emplea en el hogar para limpiar utensilios de aluminio, estufas--

de gas, refrigeradores, fregaderos, etc. Se emplea también para eliminar manchas de pintura sobre toda superficie.

Sirve también para quitar la rebaba de metales no ferrosos y plásticos laminados. En general, la fibra de acero tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria moderna.

Además de fibras de acero, son producidos en muchos países una gran variedad de metales en formas fibrosas. (5)

FIBRAS DE ALUMINIO.- Son generalmente de sección transversal triangular, tres veces más ligeras que las fibras de acero, inoxidable y no son afectadas por muchos productos químicos.

El productor más grande de fibras de aluminio es la Carey Electronic Engineering Co., de Springfield Ohio, en Estados Unidos.

Las fibras de aluminio se utilizan en la limpieza de carburadores de aire, limpieza de fundiciones o coladas de aluminio, para pulir alas y fuselajes de aluminio en aviones; también se emplean como agentes catalíticos, antifrictionantes, en intercambiadores de calor y en rellenos de prensado en lavadoras.

Las fibras de aluminio también se usan como medio -

filtrante en hornos de aire caliente y en unidades de aire acondicionado. (5)

NUEVAS FORMAS FIBROSAS DE METALES.- El descubrimiento hecho por la Armour Research Corporation, de un método mediante el cual las fibras metálicas pueden convertirse en productos semejantes al papel, ha abierto un futuro benigno para la industria.

Debido al hecho de que las fibras metálicas provocan enlaces fuertes, la resistencia a la tensión y al impacto del material fabricado con ellas, es muy superior a la resistencia obtenida con polvos metálicos compactos. Además, el costo de las fibras metálicas, puede competir con el de los polvos metálicos. (5)

Las fibras metálicas proporcionan, además de la alta resistencia y flexibilidad, un rango de porosidades que es muy adecuado en la filtración. Otra gran ventaja de las fibras metálicas estriba en el hecho de que pueden formarse de acuerdo a los requerimientos específicos. Luego, entonces, su sección transversal, diámetro, longitud y composición química, pueden modificarse fácilmente, preparando fibras metálicas especiales.

Las fibras metálicas también pueden utilizarse en productos tales como plásticos, masas activas de cataliza-

dores, masas activas de bacterías y materiales de fricción. Una de las nuevas posibilidades es la aplicación de fibras metálicas para reforzar refractarios. Existen ya patentes que cubren combinaciones de esto.

Actualmente, el trabajo experimental se está incrementando, con el fin de encontrar mayores aplicaciones de las fibras metálicas. Asimismo, se va a aumentar el número de productos metálicos fibrosos, con el desarrollo de técnicas más refinadas de fabricación. Algunas de las fibras producidas por el proceso de corte, son muy frágiles y varían en longitud y diámetro como para ser adecuadas en la metalurgia de fibras.

Existen metales con propiedades físicas deseables para productos compactos, pero que no pueden cortarse en forma de fibras.

La American Viscose Corporation se encuentra en las etapas finales de un proceso económico, para fabricar filamentos parecidos a cintas, a partir de metales fundidos. Esta compañía espera producir fibras finas a un costo de solo unos centavos arriba del precio por lingote del metal. Esto podría proporcionar importantes materiales para las industrias de plásticos, cerámica, eléctrica y aeronáutica.

Mientras que el proceso de la American Viscose Cor-

poration se encuentra todavía en etapas de planta piloto, otra compañía americana ya ha puesto en el mercado un número relativamente amplio de fibras metálicas comunes, de los tipos sencillo y rizado. Pueden procesarse en la maquinaria ortodoxa empleada en la manufactura de las fibras de algodón y lana. Aunque parecen ser primariamente fibras textiles, se les pueden encontrar aplicaciones en otras ramas de la industria moderna. (5)

### 3.6.- MATERIALES COMPUESTOS

Artículos recientes de libros y revistas se refieren a la tecnología de materiales compuestos, como una antigua tecnología de materiales. Se citan civilizaciones primitivas que usaron arcos laminados para resistencia extra, mezclas de paja (para el refuerzo de fibras) y matrices de barro para ladrillos de construcción; los incas que dispersaban platino en oro y plata, debido a que no podían obtener temperaturas altas para trabajar el platino, como las primeras que usaron materiales compuestos.

A pesar de que estos materiales antiguos pueden ser clasificados de una manera general, como un tipo de material compuesto, la ciencia moderna de los materiales compuestos se inició relativamente hace poco.

Un índice razonable de la investigación y actividad en el campo de los materiales compuestos, es el gasto anual del Departamento de Defensa de los Estados Unidos para la investigación de materiales compuestos fibrosos. En 1958 - este gasto fue de \$ 400,000 dólares; pero ocurrió un fenomenal incremento en interés y actividad, resultando en un gasto de aproximadamente \$ 14,000,000 en 1967.

Antes de continuar, se debe dar la definición de materiales compuestos. Naturalmente, en el sentido amplio de la palabra, prácticamente todo material empleado en la actualidad es un compuesto, ya que es raro encontrar un material usado en su forma pura. Por ejemplo, lubricantes, absorbedores de ultravioleta, etc., se añaden a plásticos -- por razones comerciales tales como economía y facilidad de procesamiento. Es raro igualmente, encontrar metales sin - impurezas, elementos de aleación y segundas fases no deseadas.

Aún más, si dichos metales, son considerados en la escala atómica o molecular, muchos materiales son simplemente compuestos de varios átomos o moléculas.

La definición de material compuesto, requiere considerar el siguiente criterio:

1.- El material compuesto debe ser hecho por el hombre (materiales compuestos, tales como la madera, pueden - encontrarse en la naturaleza, pero no son considerados como tales).

2.- El material compuesto debe ser una combinación de por lo menos dos materiales químicamente distintos con una interfase diferente separando a los componentes.

3.- Los materiales independientes que forman al compuesto deben ser combinados tridimensionalmente (no se consideran laminados, tales como metales revestidos o panales intercalados como materiales compuestos básicos).

4.- El material compuesto debe crearse para obtener propiedades que no podrían lograrse con cualquiera de los componentes actuando por separado.

Hasta la fecha, la mayor parte de los materiales -- compuestos han sido creados para mejorar propiedades mecánicas, tales como dureza o rigidez, tenacidad y resistencia a altas temperaturas. Por ésta razón, primeramente se tratan esos aspectos del comportamiento de materiales compuestos.

Se pueden describir 3 tipos básicos de materiales - compuestos:

a).- Materiales compuestos reforzados en dispersión.

b).- Materiales compuestos reforzados con partículas o granos.

c).- Materiales compuestos reforzados con fibras.

En los 3 tipos, una matriz elemental o mezcla, presenta una segunda fase repartida en su interior. La segunda fase (generalmente más dura o rígida que la matriz), se añade para lograr alguna mejora neta en la propiedad.

Las 3 clases de materiales compuestos se distinguen entre sí por su microestructura.

a).- Los materiales compuestos reforzados en dispersión, se caracterizan por una microestructura consistente en una matriz elemental o mezcla, dentro de la cual son -- uniformemente dispersadas partículas finas de 0.01 a 0.1 - micras de diámetro, con una concentración en volumen de 1- a 15%.

b).- Los compuestos reforzados con partículas o granos difieren de los reforzados en dispersión, en que el tamaño del dispersoide excede de 1.0 micra y la concentración del dispersoide sobrepasa del 25% en volumen.

c).- La fase reforzante en materiales compuestos con fibras rodea el rango absoluto en tamaño, de una fracción de un micrón a varias milésimas de pulgada de diámetro, y, el rango absoluto de concentración en volumen, de un 3% --

a uno mayor del 70% en volumen. La característica microestructural distintiva de fibras que refuerzan materiales, es que su refuerzo tiene un gran alcance, mientras que las partículas de refuerzo de los otros dos tipos de materiales compuestos no. (4)

### 3.6.1.- FIBRAS EMPLEADAS EN MATERIALES COMPUESTOS

Los tipos de fibras que se han utilizado para reforzar concreto, han sido de acero, vidrio, plásticas y materiales naturales en diversas formas y tamaños. Por otra parte, se sabe que al reforzar concreto con fibras se elabora un material compuesto. (1)

Las fibras que se han empleado son:

a).- Fibras de Acero.- Las fibras de acero usadas en concreto son generalmente de dos secciones transversales: circulares y rectangulares.

Las fibras circulares se fabrican por corte o doblando violentamente hilo metálico; tienen diámetros típicos entre 0.006 y 0.030 pulgadas, con una longitud que en la práctica varía entre 0.5 y 2.5 pulgadas.

Las fibras rectangulares se fabrican por corte de lámina o aplanando hilo metálico circular; tienen secciones transversales entre 0.006 y 0.016 pulgadas de espesor y entre 0.010 y 0.035 pulgadas de ancho. También se han fabri-

cado fibras de acero rizadas y deformes. (1), (7)

b).- Fibras de Vidrio.- Las fibras de vidrio típicas (de hebra cortada o doblada), tienen diámetros de 0.2 a -- 0.6 milésimas de pulgada, pero al mismo tiempo éstas fibras pueden unirse para formar elementos de fibra de vidrio con diámetros entre 0.5 y 50 milésimas de pulgada. Los álcalis del cemento atacan a las fibras de vidrio y causan su deterioro. (1), (7)

c).- Fibras Plásticas.- Las fibras plásticas tales como la de nylon, polietileno, polipropileno, saran, rayón acetato, orlon y dacrón, han sido empleadas como un medio de aumentar la resistencia al impacto y al astillado del concreto.

Estas fibras varían considerablemente en diámetro (3 a 630 denir) pero generalmente no son más largas de 3 - pulgadas. (1), (7).

d).- Otros tipos.- Existen otras fibras que han sido usadas en concreto, tales como cerámicas, de carbón o de materiales naturales como el algodón, sisal o yute, pero no son económicamente factibles o no satisfacen los requerimientos de larga durabilidad del concreto. (7)

### 3.6.2.- PROPIEDADES MECANICAS DE LAS FIBRAS QUE REFUERZAN CONCRETO

En una mezcla dada el contenido, geometría y distribución de las fibras, son factores importantes para determinar las propiedades de las fibras que refuerzan concreto.- Sin embargo, las variables de interés para la resistencia, durabilidad y capacidad de trabajo (relación agua/cemento, contenido de aire, densidad, etc.), también tienen una influencia significativa en tales propiedades. Las variables que influyen en la unión, afectan las propiedades de resistencia de las fibras que refuerzan concreto. (1)

Han sido propuestos dos mecanismos para predecir la "primera resistencia a la rotura" o el límite proporcional de fibras reforzando concreto. Un mecanismo relaciona la "primera resistencia a la rotura" con el espaciamiento de la fibra reforzante; mientras que el otro mecanismo relaciona el límite proporcional con el volumen, orientación y aspecto de relación de las fibras.

El mecanismo de espaciamiento está basado en la acción de llenar con fibras la rotura o grieta y en conceptos mecánicos de fractura lineal elástica. El otro mecanismo está basado en las leyes de mezcla de materiales propuestos. (1)

Generalmente se acepta que la resistencia final es relativamente insensible al espaciamento de fibra, y, que depende del volumen, aspecto de relación y características de unión de las fibras.

#### CONCEPTO DE ESPACIAMIENTO

La resistencia del concreto o mortero con una estructura interna defectuosa, puede incrementarse aumentando la resistencia a la fractura, disminuyendo el tamaño de los defectos o disminuyendo la intensidad de la fuerza, como el aviso de las roturas internas.

Se han hecho experimentos para determinar el espaciamento. Todas las pruebas fueron hechas a un contenido constante de fibras de acero al 2% en volumen. Las diferencias en espaciamento se lograron variando el diámetro de fibras, de acuerdo con la siguiente expresión para espaciamento promedio de fibra: (1)

$$S = 13.8 d \sqrt{\frac{1.0}{P}} \quad -8-$$

en donde S = espaciamento entre centroides de fibras

d = diámetro de fibra

p = por ciento de refuerzo en volumen

Mckee derivó una expresión para espaciamento de fibra que es ligeramente diferente a la expresión -8-. El es

paciamiento está dado por: (1)

$$S = 3 \sqrt{\frac{V}{P}}$$

-9-

en donde  $V \approx$  volumen de una fibra

$p$  = por ciento en volumen de la fibra

Cuando un mortero o una vigueta de concreto ordinario, se sujeta a incrementos de carga, la rotura de la zona en tensión, inmediatamente conduce al debilitamiento de la pieza. Mediciones cuidadosas han revelado que una fractura mayor provoca el debilitamiento de la vigueta y es precedida por una microfractura lentamente acrecentada.

Para fibras reforzando concreto, el límite proporcional se define como la carga abajo de la cual un material es linealmente elástico. Abajo de éste límite, la influencia de la matriz fracturada puede despreciarse. (1)

Se puede suponer que ambos, el concreto simple y las fibras, se comportan elásticamente arriba de dicha carga. A ese límite de carga también se le conoce como el límite elástico o la "primera resistencia a la rotura del compuesto".

Ya que el acero tiene un módulo de elasticidad aproximadamente 10 veces mayor que el concreto simple, aumentando el volumen de fibras aumenta la carga a la cual la

curva carga-deflexión de la vigueta compuesta se desvía de la linealidad. Sin embargo, si las fibras están fortuitamente distribuidas, la influencia de las fibras para el mismo volumen de acero, será menor que para el refuerzo continuo-convenicional. Para el volumen de fibras normalmente empleado, la influencia de las fibras en el límite proporcional o la "primera resistencia a la rotura" no es muy significativa. Esto se muestra en la tabla 3.

TABLA 3

Resistencia de fibras que refuerzan concreto.

Volumen de fibras Por ciento	Límite proporcional (lb/pulg <sup>2</sup> )	Carga máxima (lb/pulg <sup>2</sup> )
0.0	920	920
4.60	1060	1930
5.32	1200	2290
7.80	1600	3140
8.80	1860	3960

La adición del 4.6% de fibras por volumen de compuesto aumenta el límite elástico solo ligeramente, de 920 a - 1060 lb/pulg<sup>2</sup>. En contraste, la carga máxima es más del doble.

También se puede apreciar en la tabla 4, que aumentando el volumen de fibras, aumenta el límite proporcional más o menos linealmente.

Otros investigadores han observado que el efecto de fibras en "la primera resistencia a la rotura"; de compuestos reforzados con arriba del 4% de fibras y sujetos a - flexión, tensión y compresión, es pequeño y lineal.

Una idea aproximada de la influencia de fibras sobre las propiedades elásticas del compuesto, puede obtenerse - usando la siguiente ecuación: (1)

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

-10-

en donde  $E_c$ ,  $E_f$ ,  $E_m$  = módulos de elasticidad para el compuesto, fibras y matriz, respectivamente

$V_m$  = fracción en volumen de la matriz

$V_f$  = fracción en volumen de fibras, ajustada por el efecto al azar

La ecuación -10- es estrictamente válida para compuestos con fibras continuas y un comportamiento elástico de los componentes, sin deslizamiento entre fibras y matriz.

Ya que las fibras son finitas en longitud, puede haber una microfractura antes del límite proporcional debido a la desunión que causan las fibras. Como resultado, esta ecuación es una solución únicamente para módulos de elasticidad y límite proporcional, en el caso de fibras reforzando concreto. Algunos resultados experimentales, proporcionan esta conclusión.

Existen varias aproximaciones teóricas, que predicen la influencia de la orientación de las fibras sobre las propiedades elásticas del compuesto. El factor de eficiencia, que se define como el porcentaje del volumen total que contribuye en una dirección dada, varía del 17 al 41% y al 80%. Puesto que hay muy pocos datos experimentales disponibles, la validez de dichas aproximaciones teóricas es cuestionable. (1), (7)

La resistencia en el concreto simple se relaciona con el crecimiento de la fractura. El concreto tiene mayor resistencia que la pasta de cemento, debido al desarrollo más extenso de la microfractura en el concreto por la presencia de agregados. Cuando las fibras están presentes, las grietas no se pueden extender sin alargamiento y desunión de las fibras. Como resultado, se necesita una energía adicional considerable, para que ocurra la fractura com

pleta del material.

Varios investigadores han demostrado que la resistencia del concreto reforzado con fibras, es al menos, en orden de magnitud, mayor que la del concreto simple. Entonces, el aumento en resistencia, es una mejora significativa resultante de la adición de fibras.

Existen muy pocos datos cuantitativos disponibles - sobre la resistencia del concreto simple y del concreto reforzado con fibras, pero es razonable suponer que algunos de los parámetros que influyen en la carga máxima, también influirán en la resistencia. Estos parámetros son: orientación de las fibras, por ciento en volumen de fibras y el aspecto de relación. (1), (7)

### 3.6.3.- PREPARACION DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS

Mezclas.- El mezclado de fibras reforzando concreto, puede efectuarse mediante más de un método. La elección del método dependerá de los requerimientos del trabajo y facilidades disponibles; esto es, conjunto de la planta, rapidez de mezclado del concreto o mezclado manual de pequeñas cantidades en el laboratorio. Sobre todo, es necesario tener una dispersión uniforme de las fibras y prevenir la segregación u ovillamiento de las fibras durante el mezclado.

La segregación u ovillamiento durante el mezclado, - está relacionada a varios factores. El más importante parece ser el aspecto de relación (relación de longitud a diámetro equivalente). Otros factores que pueden afectar la - distribución de fibras son: por ciento en volumen, tamaño - del agregado áspero, graduación y cantidad, relación agua - cemento y método de mezclado. Aumentos en aspectos de rela - ción, por ciento en volumen y tamaño y cantidad de agrega - do áspero, intensifican las tendencias de ovillamiento.

(1)

Para mezclado uniforme, el aspecto de relación de fi - bras de acero de hilo metálico circular y plano en tiras, - debe ser alrededor de 100 máximo. El contenido de fibras - de acero en exceso del 2% en volumen, hacen difícil su mez - clado. Pueden emplearse los métodos de mezcla del concreto convencional, pero el requerimiento de pequeño espaciamen - to y facilidad de trabajo, hacen recomendable usar agregado de 3/8 de pulgada (9.53 mm) o de tamaño menor, o arena so - la.

Los mismos procedimientos de mezclado se aplican a - concretos refractarios, utilizando fibras de acero, las que deben ser de acero inoxidable debido a sus altas temperatu - ras de oxidación, en concentraciones del 1.5 al 2% en volu - men.

A causa de la adsorción, la cantidad de agua variará con el tipo y naturaleza de la fibra. Característicamente una fibra de acero mezclada, experimentará una disminución o desplome, con un incremento del por ciento en volumen de fibras. (1)

La plasticidad de la mezcla es importante para asegurar la dispersión correcta de las fibras. La experiencia sugiere relaciones agua-cemento entre 0.4 y 0.6 y contenidos de cemento de 550 a 950 lb de cemento por yarda cúbica (249 a 430 kg/m<sup>3</sup>), se requieren para un contenido de pasta adecuado y para cubrir la gran área superficial de las fibras.

En la tabla 4 se muestra una mezcla típica de concreto reforzado con fibras. (1)

TABLA 4

---

Proporción en peso normal de concreto reforzado con fibras.

---

Cemento	550-950 lb/yd <sup>3</sup>
Relación agua cemento	0.4-0.6
Porcentaje de arena para agregado	50 a 100 %
Tamaño máximo de agregado	3/8 de pulgada
Contenido de aire	6 a 9%
Contenido de fibras	0.5-2.5% en volumen de mezcla:
	(acero 1% = 132 lb/yd <sup>3</sup>
	vidrio 1% = 42 lb/yd <sup>3</sup>
	nylon 1% = 19 lb/yd <sup>3</sup>

---

METODOS DE MEZCLADO.- Es importante que las fibras sean dispersadas uniformemente por toda la mezcla. Esto puede efectuarse durante la fase de mezclado, preferiblemente antes de añadir el agua. Para mezclas pequeñas de laboratorio, es apropiado agitar las fibras por medio de una malla de alambre. Para mezclas de fibras de acero, en laboratorio,

usando una planta por lotes o mezclando rápidamente al concreto, las secuencias de mezclado en orden de preferencia-  
son:

1.- Entremezclar fibra y agregado, antes de cargar-  
el mezclador, tal como se hace en un transportador de ban  
da. Emplear procedimiento de mezclado standard.

2.- Entremezclar agregados fino y áspero en el mez-  
clador. En seguida, agregar las fibras con rapidez de mez-  
clado (típicamente 12 rpm). Posteriormente, agregar cemen-  
to y agua simultáneamente o cemento seguido de agua y adi-  
tivos.

3.- Añadir las fibras a los agregados y agua, pre-  
viamente cargados. Añadir cemento y agua faltantes.

4.- Añadir todos los ingredientes entremezclados en  
seco al mezclador, el cual ha sido cargado previamente con  
agua. (1).

Es muy recomendable que el método de introducir las  
fibras a la mezcla, sea ensayado antes.

La experiencia para mezclar grandes conjuntos de fi  
bras sintéticas, es limitada. Para mezclar pequeños grupos  
en el laboratorio, las fibras pueden añadirse en pequeñas-  
cantidad al tambor rotatorio cargado con cemento, agua y -  
agregados. El mismo procedimiento puede usarse para grupos

grandes, pero se prefiere el método de soplar las fibras - en el tambor rotatorio previamente cargado. Pueden lograrse mezclas adecuadas dispersando las fibras en todo el --- agregado fino y áspero, y, entonces, cargar el mezclador - mediante un transportador de banda. El cemento y el agua - se añaden al último. El tiempo de mezclado es el mismo que para el concreto ordinario. (1)

Para las fibras de vidrio, que presentan menor tendencia a ovillarse, comparadas con las fibras de acero, pueden utilizarse los siguientes procedimientos:

1.- Para mezclas de laboratorio, no es necesario -- agitar por medio de una malla de alambre. Las fibras de vidrio pueden añadirse directamente a la mezcla que contiene todos los otros ingredientes, incluyendo agua.

2.- Para plantas por lotes y concreto mezclado rápidamente, los métodos convencionales de mezclado, deben seguirse, añadiendo al último las fibras de vidrio. Las fibras de vidrio pueden descargarse directamente o ser sopladas al aparato. (1)

#### 3.6.4.- VENTAJAS DE LAS FIBRAS QUE REFUERZAN CONCRETO

Adiciones pequeñas de algunos tipos de fibras al concreto, producen mejoras sobre el concreto simple y algunas-

de éstas se indican a continuación: (1), (7)

Mejoras en las propiedades de:

Primera rotura en resistencia a la flexión

Módulo final de resistencia a la rotura

Resistencia final a la compresión

Resistencia final al esfuerzo cortante

Resistencia al impacto

Índice de resistencia al astillado por calor

Límite de tolerancia por fatiga en la flexión

Ventajas generales:

Mayor resistencia a la rotura

Resistencia superior al choque térmico

Eliminación o reducción de otros materiales de refuerzo

Secciones significativamente delgadas para un diseño dado

Incremento en la velocidad de producción con secciones delgadas

Menor mantenimiento y larga vida.

El buen funcionamiento del concreto conteniendo fibras de acero, depende de la concentración en volumen, aspecto de relación y tipo y clase de la fibra de acero.

Aspectos de relación de 30 a 150 han sido usados con éxito; sin embargo, son más prácticas relaciones de 50 a -- 70.

Los tipos y cantidades de fibras de plástico utilizadas en concreto han descansado sobre bases intuitivas y empíricas. (1), (7)

PUEBAS.- Ha habido poco control en las pruebas de -- elementos o fibras que refuerzan concreto, y, los datos publicados sobre la acción y propiedades de las mismas, deben ser cuidadosamente escudriñados antes de hacer comparaciones abiertas. Las diferencias en los datos pueden deberse -- al tamaño del espécimen a prueba, condiciones y velocidad -- de carga, y condiciones de cura. (1), (7)

APLICACIONES.- Debido a las amplias posibilidades de mercado, un trabajo considerable con respecto a las fibras que refuerzan concreto, se ha enfocado a la pavimentación de caminos, carreteras, en puentes y materiales para remiendo. (1), (7)

### 3.7.- TRANSFERENCIA DE CALOR

La Transferencia de calor es la relación de intercambio de calor entre un cuerpo caliente y un frío, llamados fuente y receptor. Existen tres formas en las que el calor puede pasar de la fuente a la carga y son: conducción, convección y radiación. (6,9,11)

CONDUCCION.- Es la transferencia de calor de una parte a otra de un mismo cuerpo o de un cuerpo a otro con el que está en contacto físico, sin que se produzca un desplazamiento apreciable de las partículas del cuerpo, es decir, la conducción tiene lugar a escala molecular. (6,9,11)

Existen dos formas de conducción: Conducción estacionaria y conducción no estacionaria.

Conducción Estacionaria.- La ecuación diferencial fundamental para la transmisión de calor por conducción es la ley de Fourier:

$$\frac{dQ}{d\theta} = - k A \frac{dt}{dx}$$

-11-

↑

PON UNOCE

en donde  $\frac{dQ}{d\theta}$  = flujo de calor

k= conductividad térmica

A= área normal a la dirección en que fluye el calor

$\frac{dt}{dx}$  = Rapidez con que varía la temperatura-

en función de la distancia.

Flujo Estacionario.- En el flujo estacionario de calor, el término  $dQ/d\theta$  de la ecuación -11- es constante y puede sustituirse por  $Q/\theta$ , o sea  $q$ .

Si  $k$  y  $A$  son independientes de  $t$  y  $x$ , la ecuación -11- puede expresarse como: (15)

$$\frac{q}{A} = -k \frac{dt}{dx} \quad -12-$$

Flujo de Calor a través de una pared compuesta.- Es de interés cuando la pared consiste de varios materiales colocados en serie, como las paredes de algunos hornos. Generalmente se emplean varios tipos de refractarios como ladrillos, concretos refractarios y otros materiales aislantes, que se usan de acuerdo a la capacidad de resistir altas temperaturas, coeficiente de dilatación y esfuerzos mecánicos a temperaturas elevadas. (15)

Refiriéndose a la figura 7, a continuación se discute la forma de calcular la transferencia de calor a través de una pared de este tipo.

Puesto que el calor que pasa a través de cada una de las tres paredes tiene que ser el mismo:

$$q = \frac{k_1 A_1 \Delta t_1}{x_1} = \frac{k_2 A_2 \Delta t_2}{x_2} = \frac{k_3 A_3 \Delta t_3}{x_3} \quad -13-$$

Por definición:

$$R = \frac{x}{kA} = \text{resistencia térmica individual} \quad -14-$$

Por lo tanto:

$$q = \frac{\Delta t}{R_T} = \frac{\Delta t_a}{R_a} = \frac{\Delta t_b}{R_b} = \frac{\Delta t_c}{R_c} \quad -15-$$

Es decir:

$$q = \frac{\sum \Delta t}{R_T} = \frac{t_1 - t_4}{R_T} \quad -16-$$

La ecuación -16- sirve únicamente cuando el calor fluye a través de una pared plana. (15)

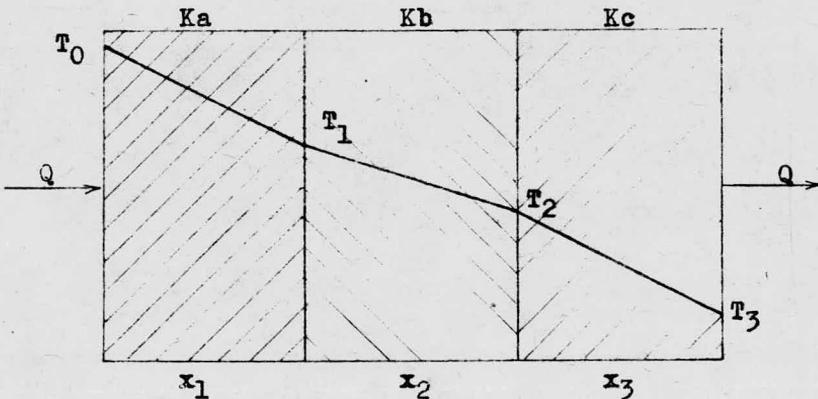


Figura 7  
Flujo de calor a través de una pared compuesta.

FIN

Cuando se trata de paredes cilíndricas, el cálculo de la transferencia de calor es como sigue. Refiriéndose a la figura 8, donde se muestran resistencias cilíndricas en serie.

(9)

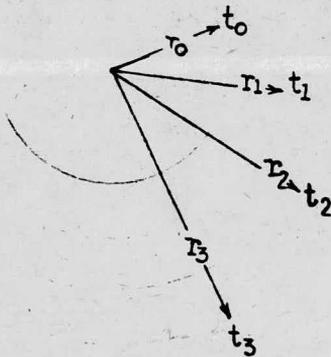


Fig. 8

Resistencia cilíndrica en serie

Las tres resistencias tendrán la siguiente ecuación:

$$q = \frac{2 \pi Kc}{2.3 \log \frac{D_{ext.}}{D_{int.}}} (t_{int.} - t_{ext.}) \quad -17-$$

en donde Kc = conductividad térmica

D ext. = diámetro exterior

D int. = diámetro interior

$t_{int.}$  = temperatura interior

$t_{ext.}$  = temperatura exterior

La radiación y convección al aire está dada por (9)

$$q = ha \pi D_{ext.} (t_{ext.} - t_a) \quad -18-$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$q = \frac{\pi (t_{int.} - t_a)}{\frac{1}{h_{int} D_{int}} + \left[ \frac{2.3}{2k_1} \log \frac{D_3}{D_2} + \frac{2.3}{2k_2} \log \frac{D_2}{D_1} + \frac{2.3}{2k_3} \log \frac{D_1}{D_0} \right] + \frac{1}{ha D_3}} \quad -19-$$

dado que  $ha \ll h_{int}$ , el término  $1/h_{int} D_{int}$  de la ecuación -19- se desprecia.

Estado No Estacionario.- En este caso se utiliza la ecuación general de Fourier, que se denota como sigue: (15)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad -20-$$

en donde T = temperatura

t = tiempo

$\frac{k}{\rho C_p}$  = difusividad térmica

CONVECCION.- Es la transmisión de calor por medio de paquetes de partículas. Es un fenómeno macroscópico y la transferencia de calor se lleva a cabo de un punto a otro en un fluido. Existen dos tipos de convección: la convección natural o convección libre y la convección forzada que es provocada por medios mecánicos. ( 9, 15)

La ecuación de la convección es la siguiente: ( 9 )

$$dQ = h A dT$$

-21-

en donde h = coeficiente de transferencia de calor por convección

A = área

T = temperatura

RADIACION.- Es la denominación que recibe la transferencia de calor mediante emisión y absorción de energía sin que intervenga un contacto físico. La radiación depende de las ondas electromagnéticas como medio para la transferencia de energía térmica, de una fuente caliente a un receptor que se encuentra a una temperatura más baja. En este caso la radiación si puede ser transmitida, absorbida o reflejada. Solamente la energía absorbida se transfor-

ma en calor, siendo ésta transformación cuantitativa. - ---

(6, 9, 15)

**Cuerpo Negro.**- El cuerpo negro se define como aquel - que absorbe toda la radiación de cualquier longitud de onda incidente sobre él, sin reflejar ni transmitir nada. Es decir, el poder absorbente "a" de un cuerpo negro, es la unidad para todas las longitudes de onda y temperaturas. ( 9,- 15)

**Superficies Grises.**- Se definen como aquellas cuya emi sividad  $\epsilon$ , es la misma para todas las longitudes de onda y temperaturas. (15)

**Factores en la transferencia de calor radiante.**- La - ecuación general para la transferencia de calor puede repre sentarse por: (9)

$$Q = \mathcal{F} \sigma A' ( T_1^4 - T_2^4 ) \quad -22-$$

en donde  $Q$  = flujo de calor por radiación, solamente hacia

$A'$ , BTU/h

$\mathcal{F}$  = factor que toma en cuenta la geometría del sistema y las emisividades del cuerpo gris, de los cuerpos calientes y fríos. Adimensional.

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann

$A'$  = superficie efectiva de transferencia de ca



lor del cuerpo receptor o frío,  $ft^2$

$T_1$  = temperatura de la fuente,  $^{\circ}R$

$T_2$  = temperatura de la superficie receptora,  $^{\circ}R$

QUIMICA

En general, un horno consiste de un receptor de calor o sumidero, una fuente de calor y superficie que los contiene.

Fuente de calor.- El calor de un horno se provee primariamente por una reacción de combustión y por el calor -- sensible del aire de combustión, si éste se ha procalentado. Los combustibles gaseosos, generalmente, generan llamas no luminosas. (9)

La radiación total de una masa de gas que contiene --  $CO_2$  y  $H_2O$ , dependerá de la temperatura del gas y del número de moléculas radiantes presentes. Al calcular las emisividades de una masa de gas, se deben tomar en cuenta las -- temperaturas tanto de la fuente como la del receptor. (9)

Para calcular la transferencia de calor a un cuerpo negro y cuando están presentes dos constituyentes radiantes  $CO_2$  y  $H_2O$ , se emplea la ecuación: (9)

$$Q = 0.173 \delta_b \left[ (\epsilon_c + \epsilon_w) \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - (\epsilon_c + \epsilon_w) T_b \left( \frac{T_b}{100} \right)^4 \right] A'b$$

en donde  $Q$  = transferencia de calor al cuerpo negro por radiación del gas, BTU/h.

$F_b$  = factor para considerar la geometría del sistema con un cuerpo negro receptor, adimensional

$\epsilon_c$  = emisividad del  $\text{CO}_2$  a  $P_{\text{CO}_2}$ ,  $L$  y  $T_g$

$\epsilon_w$  = emisividad del  $\text{H}_2\text{O}$  a  $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $L$  y  $T_g$

$(\epsilon_c + \epsilon_w)_{T_g}$  = emisividad del gas a  $T_g$

$(\epsilon_c + \epsilon_w)_{T_b}$  = emisividad del gas a  $T_b$

$\epsilon_c$  = emisividad del  $\text{CO}_2$  a  $P_{\text{CO}_2}$ ,  $L$  y  $T_b$

$\epsilon_w$  = emisividad del  $\text{H}_2\text{O}$  a  $P_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $L$  y  $T_b$

$T_g$  = temperatura del gas,  $^{\circ}\text{R}$

$T_b$  = temperatura del cuerpo negro,  $^{\circ}\text{R}$

$A'b$  = área efectiva de transferencia de calor del cuerpo negro,  $\text{ft}^2$

Los valores de emisividad son adimensionales.

Métodos de Diseño.- Los métodos comunes para el cálculo de absorción de calor en las cámaras de combustión de

los hornos, son los siguientes: (9)

1.- Método de Lobo y Evans

2.- Método de Wilson, Lobo y Hottel

3.- Ecuación de Ornok-Hudson

#### 4.- Método simplificado de Wohlenburg

Debido al diseño del horno de la presente tesis, el método que se seguirá para evaluar la transmisión de calor en la cámara de combustión es de acuerdo a (14). Esto se verá con detalle al calcular la transferencia de calor.

CAPITULO IV

4.- PROPUESTA EXPERIMENTAL

## 4.- PROPUESTA EXPERIMENTAL.

Los materiales seleccionados para llevar a cabo la fase experimental, la cual incluye la construcción del horno, son los siguientes:

1.- Aluminio puro

2.- Materiales refractarios; ladrillos, concretos y aislantes.

A continuación se darán las propiedades físicas y químicas del aluminio.

## 4.1. ALUMINIO

Propiedades Físicas.- En la tabla 5 se proporcionan las propiedades más importantes del aluminio técnico y del aluminio puro. (2)

TABLA 5

<u>Propiedades físicas del aluminio (2)</u>		
	Técnico (99.5%)	Puro (ley en %)
Peso atómico	26.97	26.97
Estructura cristalina: cúbica de caras centradas, distancia de malla (arista del cubo elemental)	cm $4.04 \times 10^{-8}$	$4.041 \times 10^{-8}$

TABLA 5 (continua)

		Técnico (99.5%)	Puro (ley en%)
Peso específico a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	2.70	2.6989
Peso específico a 700°C	"	2.38	
Compresibilidad a 20°C	dv/Vo.at.	1.45x10 <sup>-6</sup>	
Compresibilidad a 125°C	"	1.70x10 <sup>-6</sup>	
Conductividad térmica 0°C	cal/cm s°C	0.50	
Conductividad térmica 100 °C	"	0.51	
Conductividad térmica 200 °C	"	0.52	
Coeficiente de radiación laminado		0.51-0.1	
Coeficiente de radiación anodizado		0.5-0.8	
Coeficiente de temperatura de resistividad:			
de 0-100° para conductividad de 34-1/°C		0.00391-0.00401	
de 0-100° para conductividad de 35 "		0.00403-0.00413	
de 0-100° para conductividad de 37 "		0.00426-0.00437	
Equivalente electroquímico	g/amp/h	0.3354	
Equivalente electroquímico	mg/coul	0.09316	
Potencial frente al electrodo de H <sub>2</sub> a 20°C		volts -1.13	
Potencial de disolución en solución de NaCl al 2% con corriente de aire frente al			

TABLA 5

		Técnico (99.5%)	Puro (ley en %)
electrodo normal de calomel			
a 20°C	volts	-0.75	
Potencial termoeléctrico -			
frente al platino	<u>milivolts</u> 100°C	0.41	
Susceptibilidad Magnética a 18°		0.6x10 <sup>-6</sup>	
Coeficiente de Lorentz			
	<u>cal x ohms</u> seg (°K)	5.4 x 10 <sup>-8</sup>	
Indice de Poisson		0.33	0.33
Modulo elástico (E)	Kg/mm <sup>2</sup>	6500-7000	6500-7000
Módulo de elasticidad trans			
versal (G)		2500	2500
Conductividad eléctrica (SE)	m/mm <sup>2</sup>	34-36 blando 35 duro	37.7
Dilatación lineal de 20 a			
100°C	1/°C	24x10 <sup>-6</sup>	23.86x10 <sup>-6</sup>
Dilatación lineal de 20 a			
200°C	"	24.9x10 <sup>-6</sup>	24.58x10 <sup>-6</sup>
Dilatación lineal de 20 a			
500°C	"	27.9x10 <sup>-6</sup>	27.68x10 <sup>-6</sup>

TABLA 5 (continua)

		Técnico (99.5%)	Puro (ley en %)
Dilatación lineal de 20 a	1/°C		
600° C	"	28.5x10 <sup>-6</sup>	
Contracción	%	1.7-1.8	
Aumento de volumen al pasar de sólido a líquido	%	6.5	
Punto de fusión	°C	658	660
Calor específico a 20°C	cal/g°C	0.214	0.214
Calor específico a 300°C	"	0.245	
Calor específico a 500°C	"	0.266	
Calor específico a 700°C	"	0.25	
Calor específico medio de 0-658°C (Sólido)	"	0.25	
Calor latente de fusión	cal/g	92.4	94.6
Calor molecular de vapo rización (de 27g de Al)	cal	75630.	
Calor de combustión	Kcal/átomo g O <sub>2</sub>	133	
Calor de combustión	Kcal/átomo g Al	199	
Punto de ebullición	°C	2270	
Tensión de vapor a 659°C	(mmHg)	0.00062	
Tensión de vapor a 700°C	"	0.001	

TABLA 5 (fin)

		Técnico (99.5%)	Puro (ley en %)
Tensión superficial 700-800	dinas/cm	520	
Tensión superficial oxidada	"	840	

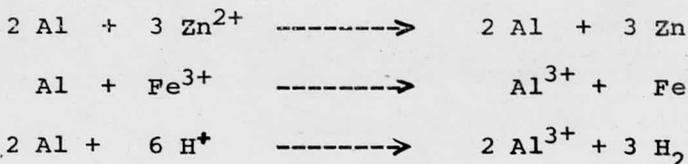
Propiedades de Radiación.- Las propiedades de radiación del aluminio tienen una importancia doble en la técnica. En primer lugar, este material posee un poder de reflexión extraordinario por lo que en muchos casos constituye el espejo casi ideal. Pero de acuerdo con la ley de Kirchoff válida para todos los materiales, este poder de reflexión va unido a una irradiación muy pequeña, es decir, el aluminio encontrará ventajosa aplicación allí donde deban evitarse las pérdidas por radiación calorífica. (2)

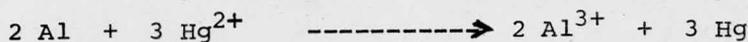
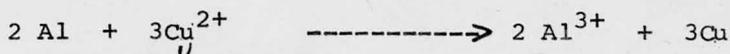
Propiedades Químicas.- Reacciones: Tiene un potencial de -1.6 volts y resiste al ataque de agentes atmosféricos y de muchos medios químicos. Esta resistencia se debe a la capa protectora de óxido que se forma por la acción del aire atmosférico, película que aparece inmediatamente en las superficies producidas por el corte. Aunque ésta película de óxido es delgada, es impermeable y muy protectora.

Cuando se funde el aluminio, se forma la película de óxido en la superficie del metal fundido y lo protege de la oxidación rápida. El metal se funde pero no arde, por esta razón no se puede cortar el metal con llama de oxiacetileno, como el hierro y el acero.

El calor de combinación del aluminio con el oxígeno es muy fuerte. En forma de polvo muy fino, el aluminio arde en el aire y cuando se dispersa en concentración adecuada - (más de 40 g por m<sup>3</sup>), forma con el aire una mezcla explosiva. Sin embargo, cuando se reduce la concentración de oxígeno a menos de 10%, no hay formación de mezcla explosiva.

En varios aspectos, las reacciones más importantes - del aluminio metálico son las que tiene con el oxígeno y con el agua. Muchas reacciones del aluminio metálico que son termodinámicamente posibles, solo se efectúan en grado mínimo - o limitado a causa de la existencia o formación de la película de óxido protectora y únicamente se pueden efectuar a temperaturas elevadas o en presencia de ciertos reactivos. Son posibles las reacciones de los siguientes tipos:





En solución de ácido fuerte (HCL) se producen libremente las reacciones; en solución alcalina el aluminio se reduce. El ácido clorhídrico concentrado ataca fácilmente al aluminio; las soluciones diluidas lo atacan más lentamente, el calor acelera la reacción. El ácido sulfúrico --frío no ataca al metal, pero caliente si reacciona. (10)

En la tabla 6 se ve la rapidez con que se efectúa la disolución en algunos de los ácidos comunes y de distintas concentraciones:

TABLA 6

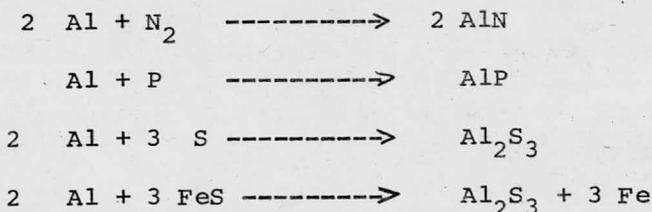
## Disolución en algunos ácidos comunes.

Acido	Penetración por año en milímetros, con concentraciones de ácido de los porcentajes en peso expresados.					
	1%	5%	10%	20%	50%	100%
Acético	0.0254	0.033	0.0279	0.0203	0.019	0.0025
Sulfúrico	0.2032	0.6096	1.016	1.905	4.064	0.508
Nítrico	0.254	1.016	1.905	2.8194	2.082	0.025
Fosfórico	0.0508	1.016	1.905	3.048	5.080	-----
Clorhídrico	0.4218	-----	-----	25.4	-----	-----

(aprox.)

El aluminio reacciona fácilmente con hidróxido de sodio o de potasio para formar aluminatos, una superficie -- de aluminio reacciona con agua y oxígeno para formar indicios de peróxido de hidrogeno. El aluminio metálico se combina directamente con los halogenuros o bien con los halógenos libres, las reacciones se efectúan en disolventes orgánicos o a temperaturas altas, con exclusión de compuestos -- que contengan oxígeno. En estas últimas circunstancias el -- ácido clorhídrico obra en forma similar. (10)

Otras reacciones del aluminio (10) solo se efectúan a altas temperaturas y con poco o nada de oxígeno o compuestos oxigenados:



A temperaturas altas el carbono y sus compuestos --- reaccionan con aluminio y forman carburos o carbono libre, -- o ambas cosas.

Análisis.- Se descubre el ión aluminio en análisis -- cualitativo por la formación de hidróxido de aluminio cuando el ión reacciona con hidróxido de amonio y cloruro de -- amonio. La determinación del aluminio por gravimetría se ha

ce calcinando el hidróxido y pesando el óxido ( $Al_2O_3$ ) (10)

Corrosión.- El aluminio y algunas de sus aleaciones resisten el ataque al aire atmosférico, el agua destilada, ni aún caliente, casi no produce efecto en las aleaciones. El vapor seco produce poco efecto químico en el aluminio - a temperaturas hasta de unos  $149^\circ C$ . Las aguas muy ácidas - o alcalinas son corrosivas, todos los ácidos inorgánicos - diluidos atacan de manera perceptible al aluminio. La película de óxido que se forma sobre el aluminio es menos resistente a la corrosión en medio alcalino y por lo general las soluciones alcalinas son corrosivas. (10)

La mayoría de los ácidos orgánicos, excepto el fórmico tienen poca acción sobre el aluminio a la temperatura ordinaria, aunque son un tanto corrosivos a temperaturas más altas. Los compuestos de aluminio son incoloros.

El aluminio tiene alto potencial de disolución (anódico). Otra clase de corrosión es la que resulta del contacto del aluminio con soluciones que contienen sales de metales pesados, como el cobre, níquel, cobalto y mercurio. En algunos casos el ataque químico se evita o se reduce al mínimo por medio de inhibidores. (10)

#### 4.2.- CALCULOS DEL HORNO

Las razones fundamentales que prevalecieron en la -- elección de un horno de crisol para el desarrollo de la fase experimental de la presente tesis son que el mismo proporciona una fusión limpia, es de construcción sencilla, de fácil operación y de costo inicial bajo. En consecuencia, -- por ser un horno de fusión mediante combustible, permite -- estudiar en forma práctica, el muy importante proceso de la combustión y todos los aspectos que de ella dependen.

Por otra parte, aún cuando su eficiencia térmica es baja puede funcionar económicamente con cargas tales como: -- cobre, aluminio, etc. y en determinadas ocasiones puede --- usarse para fundir materiales ferrosos y otros metales de - alto punto de fusión.

Básicamente el horno consiste de un cilindro de acero descansando sobre unas patas de canal de 4 pulgadas de - ancho con capas sucesivas hacia el interior de aislante tér- mico y ladrillo refractario; éste último delimita la cámara de combustión.

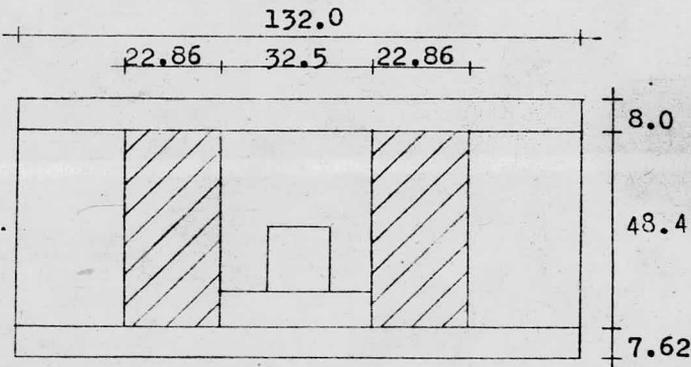
En la parte inferior, el horno cuenta con dos abertu- ras, una para el quemador y otra para desalojar el material fundido.

Además el horno presenta en la periferia del cilin--

dro, otras dos aberturas, una para entrada de aire y la otra para colocar el termopar con el cual se medirá la temperatura dentro de la cámara de combustión.

#### 4.2.1.- CALCULO DEL MATERIAL REFRACTARIO

Primera capa: Ladrillo refractario 42-M Puntas 3. -  
Calidad Superior.



acotación: cm

$$\varnothing \text{ int.} = 32.5 \text{ cm} = 12.80''$$

$$\varnothing \text{ ext.} = 78.2 \text{ cm} = 30.80'' = 2.57 \text{ ft}$$

$$h = 48.4 \text{ cm}$$

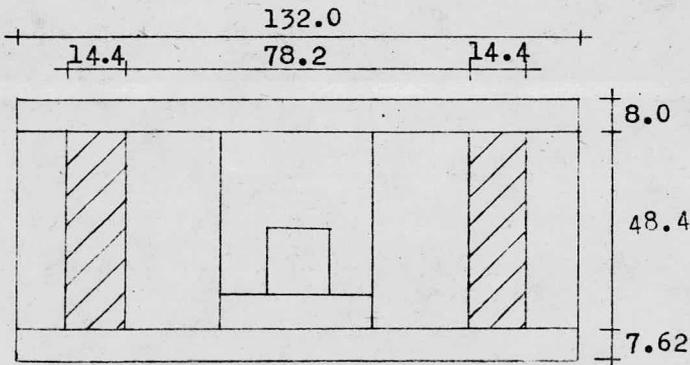
$$P = \pi \times \phi \text{ ext.} = 3.1416 \times 30.80 = 96.76''$$

$$\text{ladrillos por anillo} = \frac{96.76}{2.57} = 37.65 = 38 \text{ piezas}$$

$$\text{Número de anillos} = \frac{48.4 \text{ cm}}{11.43 \text{ cm}} = 4.2 \therefore 4 \text{ hileras}$$

$$\text{Número total de ladrillos} = 38 \times 4 = 152 \text{ ladrillos}$$

Segunda capa: Concreto refractario aislante APG-55



acotación: cm

$$\phi \text{ int.} = 78.2 \text{ cm}$$

$$\phi \text{ ext.} = 107 \text{ cm}$$

$$h = 48.4 \text{ cm}$$

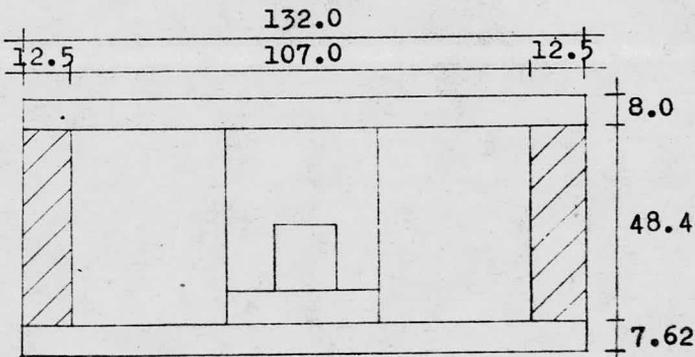
$$\rho = 55 \text{ lb/ft}^3 = 881.10 \text{ Kg/m}^3 \quad (\text{dato de A.P. Green})$$

$$V = \frac{\pi}{4} \left[ (\phi_{\text{ext.}})^2 - (\phi_{\text{int.}})^2 \right] h$$

$$V = \frac{3.1416}{4} \left[ (107)^2 - (78.2)^2 \right] 48.4 = 201080 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de APG-55} = \frac{201080 \text{ cm}^3 \times 881.10 \text{ Kg/m}^3}{10^6} = 177.2 \text{ Kg}$$

Tercera capa: Material aislante Green-block 19



acotación: cm

$$\phi_{\text{int.}} = 107 \text{ cm}$$

$$\phi_{\text{ext.}} = 132 \text{ cm} = 4.33 \text{ ft}$$

$$h = 48.4 \text{ cm} = 1.58 \text{ ft}$$

$$A = \pi \times \phi_{\text{ext.}} \times h$$

$$A = 3.1416 \times 4.33 \times 1.58 = 21.35 \text{ ft}^2$$

$$21.35 \text{ ft}^2 \times \frac{5 \text{ placas}}{\text{ft}^2} = 107 \text{ placas de Green-block 19}$$

Piso, base y tapa: Concreto refractario Mizzou

Sección I

$$\phi = 80.0 \text{ cm}$$

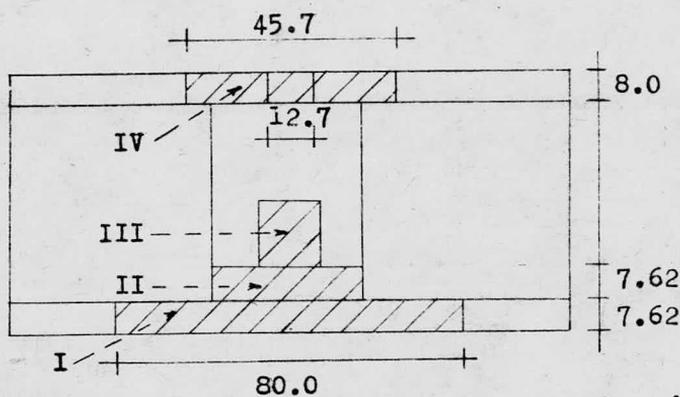
$$r = 40.0 \text{ cm}$$

$$h = 7.62 \text{ cm}$$

$$\rho = 140 \text{ lb/ft}^3 = 2242.8 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \pi r^2 h \therefore V = 3.1416 \times (40.0)^2 \times 7.62 = 38302.4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de Mizzou} = \frac{38302.4 \times 2242.8}{10^6} = 86 \text{ Kg.}$$



acotación: cm

## Sección II

$$\varnothing = 32.5 \text{ cm}$$

$$r = 16.25 \text{ cm}$$

$$h = 7.62 \text{ cm}$$

$$V = 3.1416 \times (16.25)^2 \times 7.62 = 6321.4 \text{ cm}^3$$

$$\text{Pesos de Mizzou} = \frac{6321.4 \times 2242.8}{10^6} = 14.17$$

## Sección III.- Base del crisol.

$$\varnothing = 15 \text{ cm}$$

$$r = 7.5 \text{ cm}$$

$$h = 16.5 \text{ cm}$$

$$V = 3.1416 \times (7.5)^2 \times 16.5 = 2915.8 \text{ cm}^3$$

$$\text{Pesos de Mizzou} = \frac{2915.8 \times 2242.8}{10^6} = 6.54 \text{ Kg.}$$

## Sección IV.- Tapa

$$\phi \text{ int.} = 12.7 \text{ cm}$$

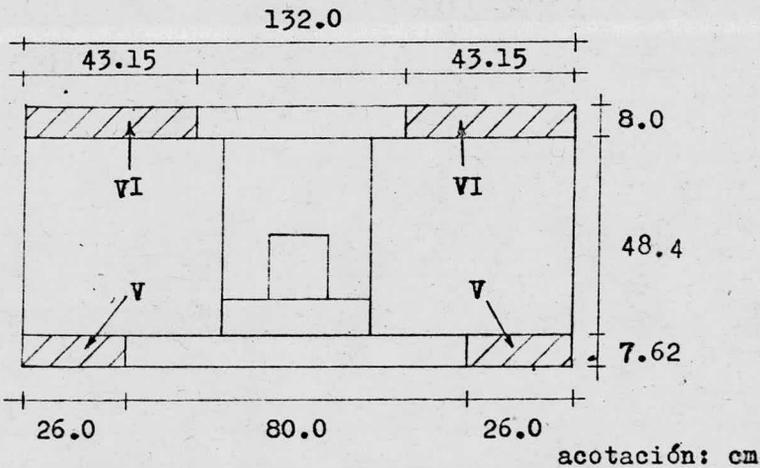
$$\phi \text{ ext.} = 45.7 \text{ cm}$$

$$h = 8.0 \text{ cm}$$

$$v = 0.7854 \left[ (45.7)^2 - (12.7)^2 \right] 8.0 = 12109 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de Mizzou} = \frac{12109 \times 2242.8}{10^6} = 27.16 \text{ Kg.}$$

Piso y tapa: Concreto refractario aislante APG-55



## Sección V

$$\phi \text{ int.} = 80.0 \text{ cm}$$

$$\phi \text{ ext.} = 132.0 \text{ cm}$$

$$h = 7.62 \text{ cm}$$

$$V = 0.7854 \left[ (132)^2 - (80)^2 \right] 7.62 = 65975.86 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de APG-55} = \frac{65975.86 \times 881.10}{10^6} = 58.13 \text{ Kg.}$$

## Sección VI

$$\phi \text{ int.} = 45.7 \text{ cm}$$

$$\phi \text{ ext.} = 132.0 \text{ cm}$$

$$h = 8.0 \text{ cm}$$

$$\rho = 881.10 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = 0.7854 \left[ (132)^2 - (45.7)^2 \right] 8.0 = 96356.0 \text{ cm}^3$$

$$\text{Peso de APG-55} = \frac{96356.0 \times 881.10}{10^6} = 85.0 \text{ Kg.}$$

De donde se obtiene:

$$\text{Peso total de Mizzou} = 86.0 + 14.17 + 6.54 + 27.16 = 133.87 \text{ Kg.}$$

$$\text{Peso total de APG-55} = 177.2 + 58.13 + 85.0 = 320.33 \text{ Kg.}$$

Lista de material refractario adquirido:

170 ladrillos tipo 42-M puntas 3. Calidad Superior

3 sacos de 50 Kg c/u de Concreto Refractario Mizzou

9 sacos de 40 Kg c/u de Concreto Refractario Aislante APG-55

2 cajas de 60 piezas c/u de Material Aislante Green-Block 19

2 latas de 40 Kg c/u de Mortero Sairset-M. Tipo Calidad Sup.

4.2.2.- COMBUSTIBLE Y AIRE NECESARIO PARA LA COMEUS-  
TION.

El combustible que se va a utilizar es gas L. P. de-  
las siguientes características:

COMPOSICION DEL GAS L.P.

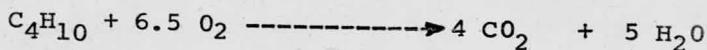
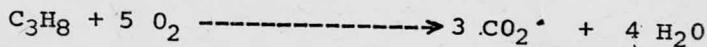
	% PESO	P.M. (kg/kg mol)
Propano	30	44
Butano	70	58

Estequiometría de la combustión:

Base: lkg de combustible

	kg	kg mol
$C_3H_8$	0.30	0.00681
$C_4H_{10}$	0.70	0.012

Reacciones de combustión:



Aire para combustión:

El aire necesario para la combustión se calcula de --  
acuerdo con las reacciones de combustión anteriores.

Oxígeno requerido para la combustión:

Elemento	Productos de combustión, (kg mol)	Oxígeno requerido para la combustión, (kg mol)
$C_3H_8$	0.00681	0.03405
$C_4H_{10}$	<u>0.012</u>	<u>0.078</u>
TOTAL	0.01881	0.11205

De donde se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Aire teórico requerido seco} &= \frac{0.11205}{0.21} \times 29 = \\ &= 15.46 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg combustible}} \end{aligned}$$

Debido a que se tiene un quemador gas-aire que trabaja -- con un 90% de aire en exceso; (dato del fabricante) Aire total seco para combustión =  $15.46 \times 1.9 = 29.37 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg combustible}}$

Humedad en el aire de combustión:

Suponiendo una humedad del 1% (0.01 kg agua/kg aire-seco), en base a las condiciones atmosféricas, la cantidad-total de aire húmedo será:

$$\begin{aligned} 29.37 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg combustible}} + 0.293 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}} &= \\ &= 29.663 \frac{\text{kg aire húmedo}}{\text{kg combustible}} \end{aligned}$$

Balace de Materia:

entrada, (kg)	salida, (kg)
Q comb.      0.8247	CO <sub>2</sub> 6.1068

H <sub>2</sub> Comb.	0.1753	H <sub>2</sub> O	1.2329
N <sub>2</sub> aire	23.2023	N <sub>2</sub>	23.2023
O <sub>2</sub> aire	6.1677	O <sub>2</sub>	0.1210
H <sub>2</sub> O aire	<u>0.2930</u>	TOTAL	<u>30.6630</u>
TOTAL	<u>30.6630</u>		

#### 4.2.3.- CAMARA DE COMBUSTION.

La cámara de combustión es de forma cilíndrica, debido a que ésta geometría presenta menores pérdidas de calor a través de las paredes, cuando se trabaja a régimen permanente y en consecuencia, para un volumen dado, el área interior del refractario es menor.

Las dimensiones de la cámara de combustión permiten que el horno puede operar con crisoles de 6 a 10 kg de cobre de capacidad, lo que posibilita ligeras variaciones en el peso de la carga cuando así se requiera.

Se sabe que la relación óptima entre la superficie expuesta de carga y la superficie interior del refractario es (17)  $R = 0.4$ . En este caso, el área de la carga se toma como el área externa del crisol más el área de la base del mismo, es decir:

$$R = \frac{\text{área lateral del crisol} + \text{base}}{\text{área lateral interior del refractario}} = \frac{A_{cb}}{A_r} = 0.4$$

Fijando las dimensiones de la cámara de combustión:

diámetro = 12.8" = 32.5 cm.

altura = 19" = 48.4 cm

que son medidas obtenidas al construir la cámara con refractarios standard.

En la tabla 7 se muestran las relaciones óptimas (R) para cada uno de los crisoles utilizados.

Se puede notar que los valores de R para los diferentes crisoles son un poco bajos, pero cercanos al valor óptimo, por lo que se consideran adecuados.

TABLA 7

Relación óptima (R).			
Capacidad del crisol (Kg de Cu)	$A_{cb}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_r$ (cm <sup>2</sup> )	R
6	1474.2	4929	0.30
8	1674.2	4929	0.34
10	1796.2	4929	0.37

En los hornos de crisol debe haber un espacio entre el crisol y el ladrillo refractario que delimita la cámara de combustión, con el objeto de permitir el paso de los productos de la combustión. Dicho espacio varía entre

dos y seis pulgadas ( 5.08 y 15.24 cm ), rango que se ha -  
determinado, produce las mejores condiciones de operación.

En la tabla 8 se proporcionan los espacios que gene-  
ran los crisoles anteriores.

Como se puede apreciar los valores son adecuados. --  
Por lo tanto, se consideran apropiadas para una operación -  
satisfactoria, las siguientes dimensiones de la cámara de-  
combustión:

diámetro= 12.8 pulg= 32.5 cm

altura = 19 pulg= 48.4 cm

área lateral = 764 pulg<sup>2</sup> = 4930 cm<sup>2</sup>

área total = 1021.4 pulg<sup>2</sup> = 6590 cm<sup>2</sup>

volumen= 2445 pulg<sup>3</sup> = 40098 cm<sup>3</sup>

TABLA 8

Espacios entre el crisol y la pared.			
Capacidad del crisol, (Kg de Cu)	6	8	10
Espacio, parte superior del crisol, (cm)	9.75	8.76	7.75
Espacio, parte inferior del crisol, (cm)	10.37	10.74	9.75
Espacio promedio, (cm)	10.06	9.75	8.75

## 4.2.4.- TRANSFERENCIA DE CALOR

El cálculo de la transferencia de calor en la cámara de combustión de un horno es uno de los problemas más complejos que existen, ya que el calor se transmite simultáneamente por todos o la mayoría de los mecanismos conocidos. Existen dos métodos para la resolución de éste problema: El teórico y el empírico. (14)

1.- Teórico.- Se intentan considerar los diversos factores, actuando cada uno de acuerdo con los principios descritos anteriormente y combinándolos.

2.- Empírico.- Se analizan los datos de ensayos de hornos, intentando descubrir el efecto de los factores que son de importancia.

En esta evaluación se empleará el teórico. El problema se puede resolver haciendo las siguientes suposiciones: (14)

a).- Las pérdidas externas procedentes de las paredes refractarias, son iguales a la convección de la llama al refractario.

b).- La llama es gris y tiene emisividad  $\epsilon_F$ .

c).- Todas las superficies refractarias tienen una temperatura promedio.

d).- Puede asignarse una temperatura promedio  $T_F$  a-

la llama y a los productos de la combustión de la cámara.

e).- El receptor final del calor (crisol), tiene una temperatura superficial uniforme  $T_C$ , es gris, con una emisividad  $\epsilon_C$  y un área  $A_C$ .

La ecuación que da el flujo neto de transferencia de calor,  $q_F$ , desde la llama, por todos los mecanismos, es:

(14)

$$q_F = q_1 + q_2 + q_3 \quad -24-$$

en donde

$$q_1 = \sigma (T_F^4 - T_C^4) A_C \mathcal{F}_{CF} \quad -24a-$$

Radiación al crisol

$$q_2 = h_C A'_C (T_F - T_C) \quad -24 b-$$

Convección al crisol

$$q_3 = U_R A_R (T_F - T_0) \quad -24 c-$$

Pérdida externa= (convección al refractario)

en las cuales  $\mathcal{F}_{CF} = \frac{1}{\frac{1}{\mathcal{F}_{CF}} + \frac{1}{\epsilon_C} - 1}$  -25-

$$\mathcal{F}_{CF} = \epsilon_F \left[ 1 + \frac{A_R/A_C}{1 + \frac{\epsilon_F}{1 - \epsilon_F} \cdot \frac{1}{\mathcal{F}_{RC}}} \right] \quad -26-$$

$$U_R = \frac{1}{\frac{1}{h_R} + \frac{x_w}{k} + \frac{1}{h_0}} \quad -27-$$

en donde  $\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann

$h_C, h_R, h_0$  = coeficientes de convección en el sùmidero ---  
(crisol), en el interior y en el exterior de las superficies refractarias, respectivamente

$x_w$  y  $k$  = espesor de la pared y conductividad tèrmica--  
del refractario

$T_0$  = temperatura exterior

$F_{RC}$  = flujo de radiaci3n

$\epsilon_F$  y  $\epsilon_C$  = emisividades de la llama y del crisol

$A_C$  y  $A_R$  = àreas del crisol y del refractario

$A'_C$  = àrea del crisol sin incluir la superficie --  
fría, o sea el àrea del receptor final, que--  
aunque en contacto con la llama y recibien--  
do la radiaci3n, no recibe calor por convec--  
ci3n procedente de los gases hasta que éstos  
abandonan la càmara.

Si se reemplaza el factor geométrico  $F_{RC}$  (fracci3n--  
de la radiaci3n que sale de las superficies refractarias --  
dirigida hacia la superficie fría del crisol), por -----

$$A_C/A_R + A_C,$$

se obtiene un valor muy aproximado cuando las superficies fría y la del refractario no están completamente separadas una de la otra. Por lo tanto:

$$q_F = \sigma (T_F^4 - T_C^4) A_C \left[ \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_C} + \frac{A_C}{A_C + A_R} \left( \frac{1}{\epsilon_F} - 1 \right)} \right] + h_C A'_C (T_F - T_C) + U_R A_R (T_F - T_0) \quad -28-$$

La ecuación -28- se empleará para calcular el flujo neto de transferencia de calor,  $q_F$ , en la cámara de combustión del horno. (14)

Los valores que se usarán son los siguientes:

$$\sigma = 0.173 \times 10^{-8} \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{R} = 4.92 \times 10^{-8} \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{hr } ^\circ\text{K}}$$

$$T_F = 1800^\circ\text{C} = 3732^\circ\text{R}$$

$$T_C = 1600^\circ\text{C} = 3372^\circ\text{R}$$

$$A_C = 0.52 \text{ ft}^2 = 483.1 \text{ cm}^2$$

$$A_R = 7.09 \text{ ft}^2 = 6586.8 \text{ cm}^2$$

Cálculo de  $\epsilon_F$ : Se efectúa por medio de gráficas que dan las emisividades del  $\text{CO}_2$  y del  $\text{H}_2\text{O}$ , para valores determinados de temperatura y de  $P_G L$ , a presión atmosférica. (14) en donde  $P_G$  = presión parcial del gas

L = espesor de la capa de gas = espacio entre crisol y refractario.

Emisividad del  $\text{CO}_2$ . - A  $3732^\circ\text{R}$  ( $2073^\circ\text{K}$ )

$$P_{\text{CO}_2} = 0.13 \text{ atm}$$

$$L = 4.23 \text{ pulg} = 0.35 \text{ ft} = 10.74 \text{ cm}$$

$$P_{\text{CO}_2} L = 0.045 \text{ atm-ft} = 1.396 \text{ atm-cm}$$

$$\epsilon_{\text{CO}_2} = 0.022$$

Emisividad del  $\text{H}_2\text{O}$ . - A  $3732^\circ\text{R}$  ( $2073^\circ\text{K}$ )

$$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0.113 \text{ atm}$$

$$L = 0.35 \text{ ft} = 10.74 \text{ cm}$$

$$P_{\text{H}_2\text{O}} L = 0.039 \text{ atm-ft} = 1.214 \text{ atm-cm}$$

$$\epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.007$$

Estos valores de emisividad son válidos para 1 atm - de presión atmosférica.

$$\epsilon_{\text{CO}_2} + \epsilon_{\text{H}_2\text{O}} = 0.022 + 0.007 = 0.029$$

La emisividad combinada se debe corregir también, ya que cada gas es opaco a la radiación del otro. Dicha corrección se puede despreciar en éste caso. (14)\*

Se debe sumar un factor igual a 0.10 para considerar la luminosidad de la llama. Entonces:

$$\epsilon_F = 0.029 + 0.10 = 0.129$$

$$\epsilon_F = 0.129$$

Sustituyendo valores en la ecuación -24 a-, se obtie

ne:

Radiación al crisol

$$q_1 = 34338 \text{ BTU/hr} = 8653.2 \text{ Kcal/hr}$$

Los valores para calcular la convección al crisol, -

(ecuación -24 b-) son:

$$h_C (19) = 3.0 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} = 1.465 \text{ cal/hr cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A'_C = 0.52 \text{ ft}^2 = 483.1 \text{ cm}^2$$

$$\Delta T = T_F - T_C = 3272 - 2912 = 360^\circ\text{F} = 182.2^\circ\text{C}$$

Por lo tanto:

Convección al crisol

$$q_2 = 561.6 \text{ BTU/hr} = 141.5 \text{ Kcal/hr}$$

Los valores para calcular  $q_3$  (ecuación -24 c-), -

son:

$$U_R = 0.224 \text{ BTU/hr ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F} = 0.109 \text{ cal/hr cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$A_R = 7.09 \text{ ft}^2 = 6586.8 \text{ cm}^2$$

$$T_F = 3272^\circ\text{F} = 1800^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 104^\circ\text{F} = 40^\circ\text{C}$$

Por lo tanto:

Pérdida externa = (convección al refractario)

$$q_3 = 5031.3 \text{ BTU/hr} = 1267.8 \text{ Kcal/hr}$$

Sumando los tres términos anteriores se obtiene el-

flujo neto de transferencia de calor,  $q_F$ , es decir:

$$q_F = 39930.9 \text{ BTU/hr} = 10062.5 \text{ Kcal/hr}$$

Pérdidas de calor a través de las paredes del horno:

Se evalúan de acuerdo con las siguientes ecuaciones.

(9)

$$q = \frac{2\pi k_{42-M}}{2.3 \log \frac{D_1}{D_0}} (t_0 - t_1) \quad -29-$$

$$q = \frac{2\pi k_{APG-55}}{2.3 \log \frac{D_2}{D_1}} (t_1 - t_2) \quad -30-$$

$$q = \frac{2\pi k_{G-B}}{2.3 \log \frac{D_3}{D_2}} (t_2 - t_3) \quad -31-$$

$$q = ha\pi D_{ext} (t_{ext} - t_a) \quad -18-$$

Combinando las ecuaciones anteriores, se tiene:

$$\frac{\pi (t_0 - t_a)}{\frac{2.3}{2 k_{G-B}} \log \frac{D_3}{D_2} + \frac{2.3}{2 k_{APG-55}} \log \frac{D_2}{D_1} + \frac{2.3}{2 k_{42-M}} \log \frac{D_1}{D_0} + \frac{1}{haD_3}}$$

-32-

En la figura 9 se indican los diámetros y temperaturas del horno estimado.

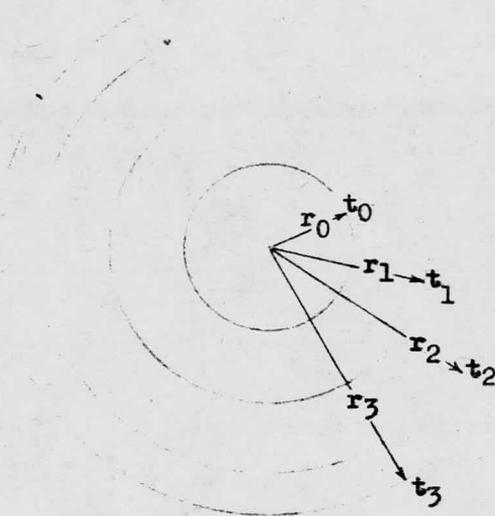


Fig. 9

Diámetros y temperaturas del horno.

La solución de este problema implica el empleo de tan teos, debido a que se tienen 4 ecuaciones con 6 incógnitas, lo cual no puede resolverse mediante métodos tradicionales.

El método es el siguiente: Se le da un valor a  $t_1$  y se obtiene la temperatura media para la primera hilera. Con esa temperatura media se busca la conductividad media en dicha hilera. El mismo procedimiento se sigue para las otras dos capas. Con los valores de  $k$  y  $t$  se procede a calcular  $q$  por medio de la ecuación -32-

Con el valor de  $q$  y usando las ecuaciones -29-, -30-

y -31- se obtienen  $t_1$  y  $t_2$ . Si estos valores son iguales a los supuestos, entonces el problema está resuelto.

TABLA 9

Pérdidas de calor a través de las paredes.			
$t_0$	1600°C	1600°C	1600°C
$t_1$ sup.	1365°C	1365°C	<u>1365°C</u>
$t_{m1}$	1482.5°C	1482.5°C	1482.5°C
$km_1$	0.983	0.983	0.983
$t_2$ sup.	773°C	787.7°C	<u>798°C</u>
$t_{m2}$	1069°C	1076.3°C	1081.5°C
$km_2$	0.15	0.1512	0.1519
$t_3$	40°C	40°C	40°C
$t_{m3}$	406.5°C	413.8°C	419°C
$km_3$	0.0487	0.0494	0.0498
	2918.3 BTU/hr	2942.4 BTU/hr	2958.06 BTU/hr
$q$	735.4 Kcal/hr	741.5 Kcal/hr	745.43 Kcal/hr
$t_1$ calc.	1370.4°C	1368.5°C	<u>1367.2°C</u>
$t_2$ calc.	798.9°C	798.9°C	<u>798°C</u>

Como se puede apreciar,  $t_1$  y  $t_2$  supuestas son semejantes a  $t_1$  y  $t_2$  calculadas; por lo tanto el problema está resuelto, obteniéndose.

Pérdidas de calor a través de las paredes del horno:

$$q = 2958.06 \text{ BTU/hr} = 745.43 \text{ Kcal/hr}$$

En la figura 10 se muestra el perfil de temperaturas para el aislante.

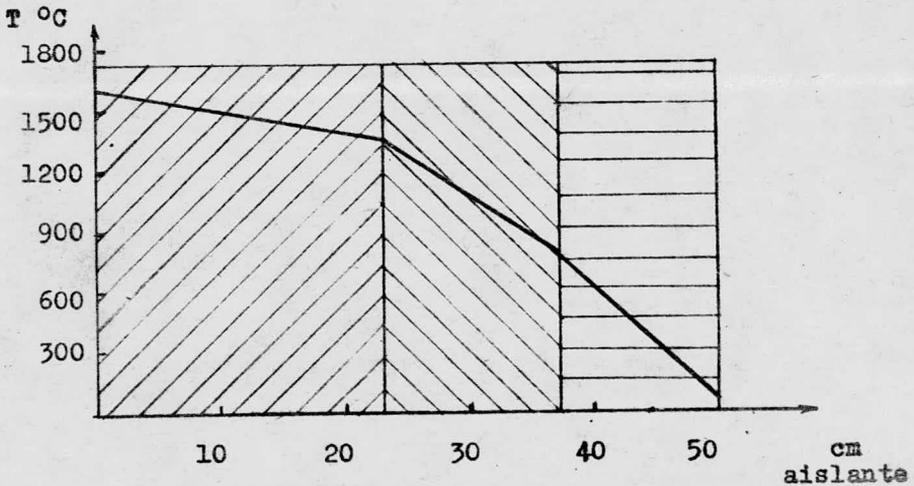


Fig. 10

Perfil de temperaturas.

Las pérdidas de calor por el piso se evalúan por medio de la ecuación siguiente: (9)

$$q = \frac{k A (\Delta T)}{\Delta x} \quad -33-$$

en donde k= conductividad del material

A= área del piso

$\Delta T$ = diferencia de temperaturas

$\Delta x$ = espesor del piso

Los valores usados para resolver la ecuación -30- son los siguientes:

$$\begin{aligned} k_{\text{MIZZOU}} &= 0.454 \text{ BTU ft/hr ft}^2 \text{ }^\circ\text{F} = \\ &= 6.756 \text{ Cal cm/hr cm}^2 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$A = 0.897 \text{ ft}^2 = 833.34 \text{ cm}^2$$

$$\Delta T = 2912^\circ\text{F} - 400^\circ\text{F} = 2512^\circ\text{F} = 1377.7^\circ\text{C}$$

$$\Delta x = 6 \text{ pulg} = 0.5 \text{ ft} = 15.24 \text{ cm}$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$q = 2045.9 \text{ BTU/hr} = 515.6 \text{ Kcal/hr}$$

por lo tanto:

Pérdidas hacia el exterior a través de las paredes:

$$q = 2958.06 + 2045.9 = 5003.96 \text{ BTU/hr}$$

$$q = 5003.96 \text{ BTU/hr} = 1261 \text{ Kcal/hr}$$

Por otra parte, se había calculado la convección al refractario,  $q_3$  (ecuación -24 c-), con el siguiente resultado:

$$q_3 = 5031.3 \text{ BTU/hr} = 1267.8 \text{ Kcal/hr}$$

Como se puede apreciar, los dos términos anteriores son semejantes y por consiguiente la suposición a), hecha al principio del cálculo de la transferencia de calor, debe aceptarse. (14)

#### 4.2.5.- CALCULO DE LA CAPACIDAD DEL QUEMADOR

Esta evaluación se lleva a cabo utilizando las ecuaciones -6- y -7-. (14)

Para este cálculo se tomó como base el fierro, cuyo punto de fusión es igual a 1535°C.

$$q_1 = m C_p \Delta T \quad -6-$$

en donde  $m = 0.5 \text{ Kg/hr} = 8.95 \text{ g mol/hr}$

$$C_p (14) = 10 \text{ cal/}^\circ\text{K mol}$$

$$\Delta T = 1908^\circ\text{K} - 1808^\circ\text{K} = 100^\circ\text{K}$$

sustituyendo en -6-, se tiene:

$$q_1 = 8.95 \text{ Kcal/hr} = 35.5 \text{ BTU/hr}$$

Además con la ecuación -7- :

$$q_2 = 0.172 A \sigma \left[ \left( \frac{T_g + 460}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_f + 460}{100} \right)^4 \right] \quad -7-$$

en donde 0.172 = constante de Stefan-Boltzmann

$$A = 7.9 \text{ ft}^2 = 6586.8 \text{ cm}^2$$

$$\sigma = 0.64$$

$$T_g = 1635^\circ\text{C} = 2975^\circ\text{F}$$

$$T_f = 1535^\circ\text{C} = 2795^\circ\text{F}$$

Sustituyendo valores, se obtiene:

$$q_2 = 234344.5 \text{ BTU/hr} = 59054.8 \text{ Kcal/hr}$$

y como:

$$Q = q_1 + q_2$$

-5-

Se tiene que  $Q = 35.5 + 234344.5 = 234380 \text{ BTU/hr}$

Por tanto, se sabe que la capacidad total del quemador es:

$$Q = 234380 \text{ BTU/hr} = 59063.76 \text{ Kcal/hr}$$

42 - M CALIDAD SUPERIOR  
LADRILLO REFRACTORIO

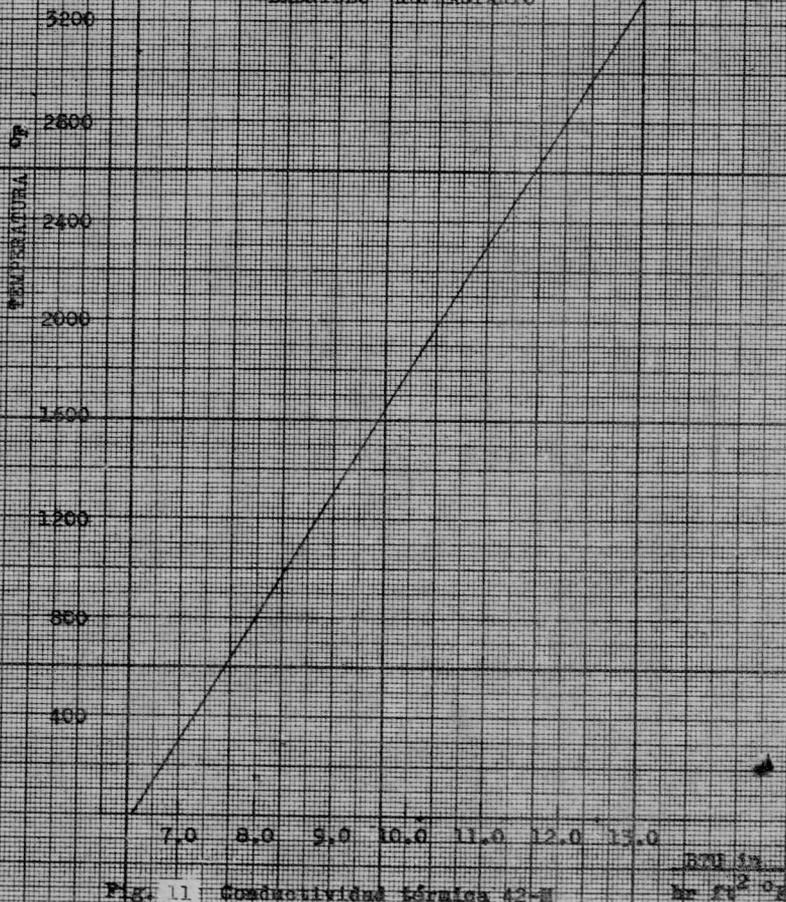


Fig. 11 Conductividad térmica 42-M  
( cortesía I.P.Green )

U. N. A. M. F E S I S C. I. M.

ESTIMACION Y CONSTRUCCION DE UN HORNO  
PARA OBTENCION DE FIBRAS METALICAS

A P G - 55  
CONCRETO REFRACTARIO AISLANTE

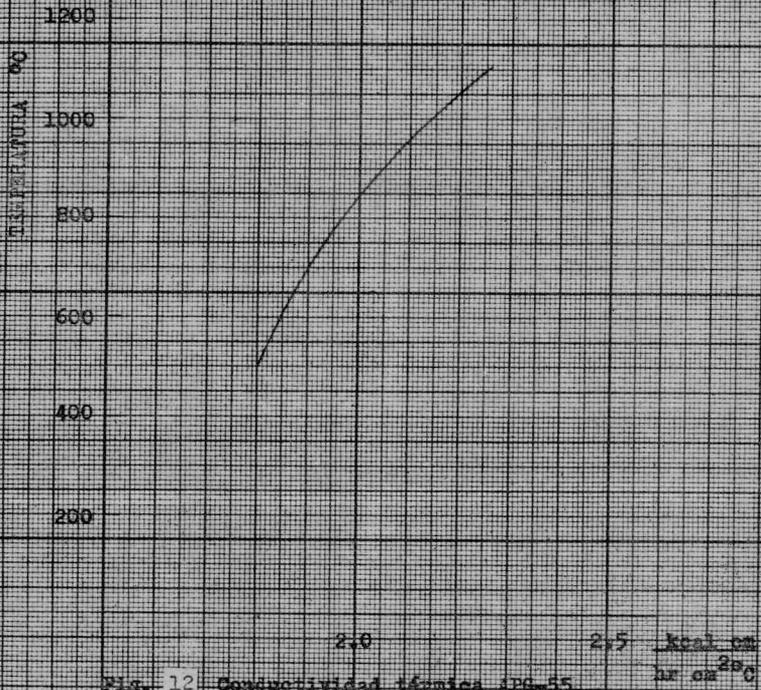


Fig. 12 Conductividad térmica A.P.G-55  
(serie A.P.Green)

U. N. A. M. T E S I S S. I. N.  
ESTIMACION Y CONSTRUCCION DE UN HORNO  
PARA OBTENCION DE FIBRAS METALICAS



## CONCRETO PNEUMÁTICO MITZOH



Fig. 14. Conductividad térmica C.R.M.  
(serie A.P. Green)

C. I. A. S. I. S. E. I. S.

ESTIMACION Y CONSTRUCCION DE UN HORNO  
PARA OBTENCION DE FIBRAS METALICAS

#### 4.3.- CONSTRUCCION DEL HORNO

Una vez efectuados los cálculos y conociendo que tipo de materiales refractarios se requerían, se procedió a la construcción del horno. Primeramente se construyó la estructura, la cual se muestra en la ilustración 1.



Ilustración 1

Estructura del horno

Posteriormente se colocó el piso el cual consta de dos materiales: concreto refractario mizzou y concreto refractario aislante APG-55 (ilustración 2).

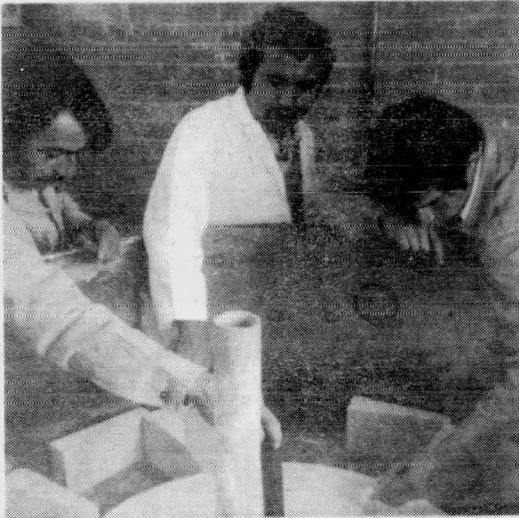


Ilustración 2

Colocación del piso

Después se colocaron los ladrillos refractarios que forman la primera capa; cada 5 ladrillos se colocó una jun

ta de asbesto con el fin de prevenir los efectos de la expansión térmica de los ladrillos (ilustración 3).

A continuación se instaló la tercera capa con placas de material aislante Green-block 19 (ilustraciones 4,5,6 y7)

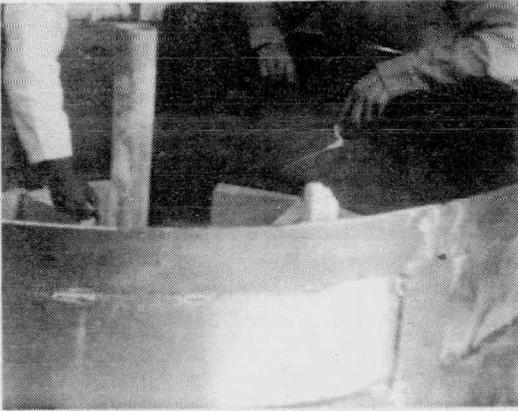
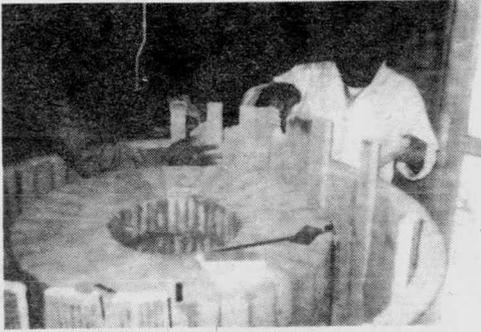


Ilustración 3

Colocación de la Junta de  
asbesto en los ladrillos



Ilustracion 4

Colocación de la tercera  
capa



Ilustracion 5

Colocación de la tercera capa

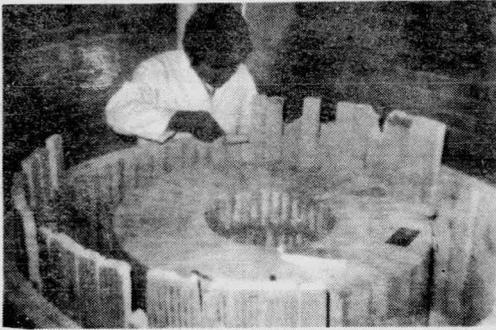


Ilustración 6  
Colocación de la tercera  
capa

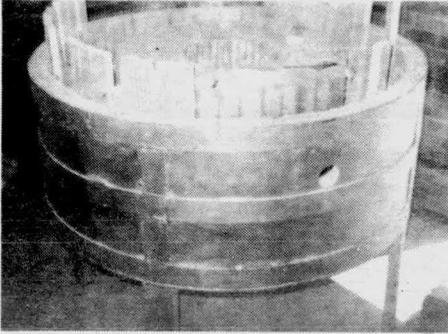


Ilustración 7

Colocación de la tercera capa

Ya instalada la tercera capa, quedo un espacio central para colocar la segunda capa con concreto refractario aislante APG-55 (ilustración 8).

Finalmente se construyó la tapa, que al igual que el piso consta de dos materiales diferentes: concreto refractario mizzou y concreto refractario aislante APG-55 (ilustración 9).

Es importante hacer notar, que al colocar los dos tipos de concreto (mizzou y APG-55), estos se debían "curar" durante 24 horas, con el objeto de evitar fracturas y grietas.

tas en el refractario.

En la ilustración 10 se muestra el horno construido - totalmente. La cámara de combustión se puede observar en la

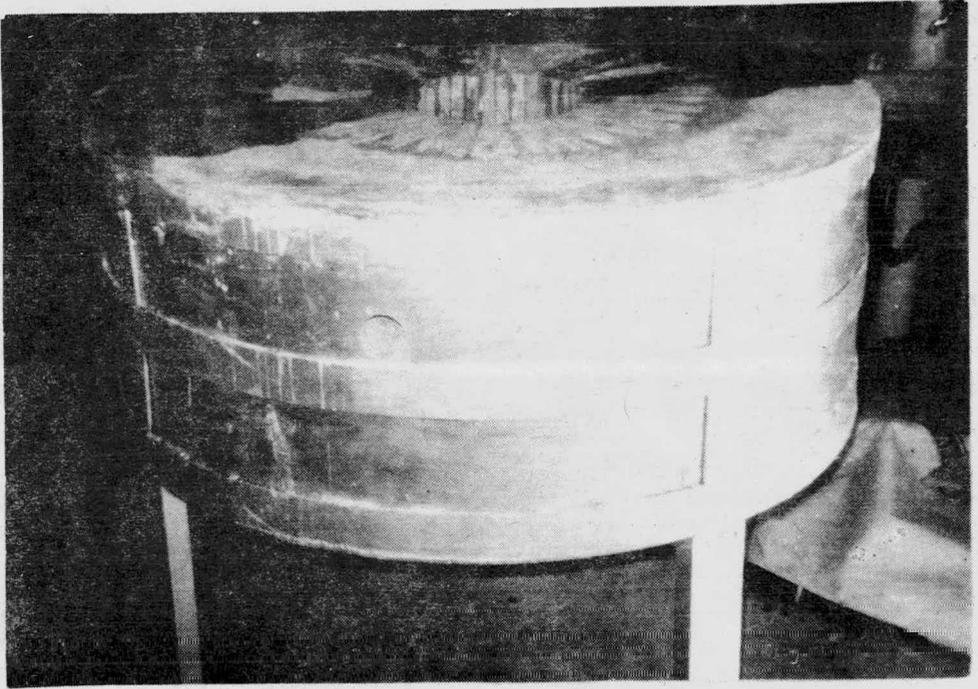


Ilustración 8

Vista del horno con los tres aislantes

ilustración 11.

Concluida la construcción del horno, se instaló el --  
termopar (el cual se puede observar en la ilustración 11),--  
se instaló el quemador gas-aire. (ilustración 12) y se proced  
dio a la cocción con el fin de dejarlo listo para la etapa-  
experimental.



Ilustración 9

Construcción de la tapa

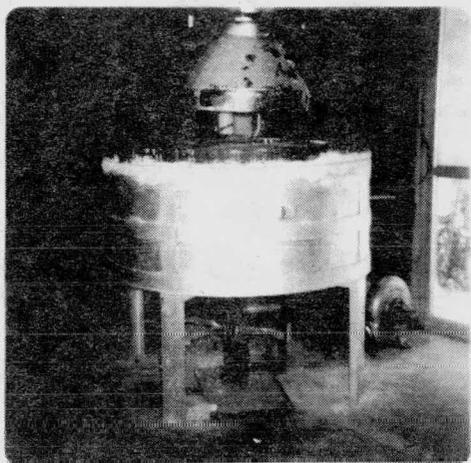


Ilustración 10

Horno totalmente construído

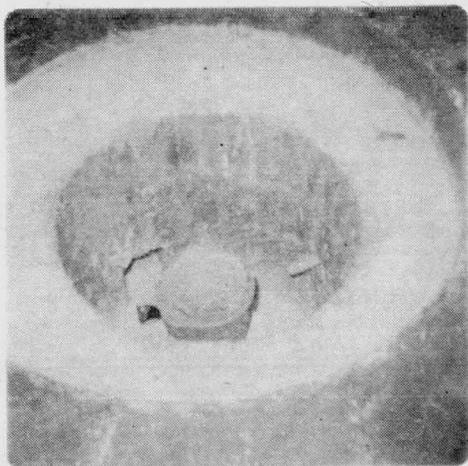


Ilustración 11

Cámara de combustión



Ilustración 12

Instalación del quemador

#### 4.4.- DESCRIPCION DEL EQUIPO E INSTRUMENTOS

##### 4.4.1.- EQUIPO

HORNO.- Se trata de un horno de crisol de forma cilíndrica de las siguientes dimensiones:

altura = 25 pulgadas = 63.5 cm

diámetro = 52 pulgadas = 132 cm.

Presenta capas sucesivas hacia el interior, de aislante y ladrillo refractario. Este último delimita la cámara de combustión.

En la parte inferior el horno cuenta con dos aberturas, una para la entrada del quemador y otra en el centro de una pulgada de diámetro para desalojar el material fundido.

Además el horno presenta en la periferia del cilindro otras dos aberturas, una para entrada de aire y la segunda para colocar el termopar que se conecta al indicador de temperatura, para medir ésta última en la cámara de combustión.

Con respecto a los refractarios y aislantes que se utilizaron en la construcción del horno, se eligieron tomando en consideración la temperatura a que el horno va a trabajar, y así se tiene:

Ladrillo refractario calidad superior, tipo 42-M puntas 3, con cono pirométrico Orton 33-34, cuya equivalencia

en grados es de 1741 y 1759°C.

Concreto refractario aislante APG-55, de datos de tablas (3) del fabricante se tiene que la temperatura máxima recomendada es 1500°C.

El material aislante Green-block 19 se recomienda ser utilizado para una temperatura máxima de 1040°C

El mortero Sairset-M que se utiliza para las juntas se recomienda para una temperatura máxima de operación de 1650°C.

Como se puede apreciar, los refractarios y aislantes son adecuados para el buen funcionamiento del horno a temperaturas elevadas.

QUEMADOR.- Se eligió un quemador gas aire. Es un sistema de combustión marca TISA-PACK, modelo TC-MM-250-DO-B-SP con capacidad de 250,000 BTU/hr (63,000 Kcal/hr), consistente en: Premezclador con motor eléctrico, obturador de aire, boquilla retentora de flama, piloto, switch de presión, válvula de corte en línea principal, regulador de presión, válvula de seguridad Basso con termocople, válvula solenoide, válvula de ajuste de gas, interruptor eléctrico de palanca y tablilla de conexiones eléctricas.

Este quemador puede alcanzar una temperatura de flama de 1800°C.

4.4.2.- INSTRUMENTACION.- Los instrumentos indispensables para el buen funcionamiento del horno son:

a).- TERMOPAR.- Se emplea un termopar standard marca-EIM modelo TCR-R-SIC-24-3/4-30-00 (CS-U), calibración R -- (platino-platino/rhodio (13%)), con rango de 0-1700°C, de 30" de longitud con cabeza y block de conexiones de fierro-vaciado.

b).- ALAMBRE DE EXTENSION PARA TERMOPAR.- Marca EIM, modelo S-16-RSX-AA, calibración R, calibre 16 con forro de asbesto.

c).- INDICADOR DE TEMPERATURA.- Marca West, modelo I, con rango de 0-1700°C, calibración R (Pt-Pt/Rh (13%)).

d).- VALVULA REGULADORA DE PRESION.- Marca Fisher para gas L.P. a alta presión, con rango de 5 a 35 lb/plg<sup>2</sup> --- (0.352 a 2.463 Kg/cm<sup>2</sup>). Entrada y salida de 13 mm, modelo - 64-I.

e).- MANOMETROS.- Para presión con rango de 0-4 Kg/cm<sup>2</sup> con carátula de 3.5 pulgadas de diámetro.

4.5.- COSTO DE MATERIAL, EQUIPO E INSTRUMENTOS:

4.5.1.- MATERIAL:

ESTRUCTURA METALICA DEL HORNO.- En la estructura del horno se empleó el siguiente material:

	COSTO
a).- 3 hojas de lámina negra calibre 16	\$ 1,000.00
b).- 1 placa de fierro (1/4" de espesor)	\$ 800.00
c).- 16 m de solera (" de ancho	\$ 425.00
d).- 2 tramos de canal de fierro (4" de ancho)	<u>\$ 499.70</u>
TOTAL	2,724.70

## TUBERIA PARA GAS Y ACCESORIOS:

	COSTO
a).- 30 m de tubería de cobre de 3/4" para gas a alta presión.	\$ 1,338.70
b).- Accesorios (codos, coples, llaves, etc.)	\$ 300.00
	-----
TOTAL	\$ 1,638.70

## REFRACTARIOS Y AISLANTES:

a).- 170 ladrillos refractarios tipo 42-M puntas 3, calidad superior (\$8.40/ladrillo)	\$ 1,428.00
b).- Concreto refractario Mizzou. 3 sacos de 50 Kg c/u (\$ 242.50/saco)	\$ 727.50
c).- Concreto refractario aislante APG-55, 9 sacos de 40 Kg c/u ( \$ 172.00/saco)	\$ 1,548.00
d).- Material aislante Green-block 19, 2 cajas de 60 piezas c/u (\$ 477.00/caja)	\$ 954.00
e).- Mortero Sairset-M. Calidas superior, 2 latas de 40 Kg c/u (\$ 156.00/lata)	\$ 312.00
	-----
TOTAL	\$ 4,969.50

Siendo el costo del material:

\$ 2,724.70

+ \$ 1,638.70

\$ 4,969.50

COSTO TOTAL \$ 9,332.95

## 4.5.2.- EQUIPO:

a).- Quemador gas-aire. Sistema de combustión marca TISA-PACK, con motor de 3/4 H.P.	\$ 8,416.90
--	-------------

## 4.5.3.- INSTRUMENTOS:

	COSTO
a).- Termopar Pt-Pt/Rh (13%), 30" de longitud con cabeza y block de conexiones de fierro vaciado.	\$ 3,020.00
b).- 10m de alambre de extensión para termopar	\$ 215.00
c).- Indicador de temperatura marca West, con rango de 0-1700°C.	\$ 1,350.00
d).- Válvula reguladora de presión marca Fisher para gas L.P. a alta presión.	\$ 643.00
e).- 2 manómetros para presión con rango de 0-4 Kg/cm <sup>2</sup> (\$ 180.00 c/u)	\$ 360.00
TOTAL	<u>\$ 5,588.00</u>

## 4.6.- COSTO DE MANO DE OBRA:

Se requirieron 2 obreros calificados durante un mes, a razón de \$ 3,452.80 mensuales cada uno. TOTAL \$ 6,905.60.

Dicha cantidad se debe multiplicar por un factor igual a 1.4 con el fin de considerar las prestaciones a que el -- trabajador tiene derecho, por lo tanto:

COSTO TOTAL MANO DE OBRA	\$ 9,667.84
--------------------------	-------------

De lo que se deduce el costo total del horno es:

MATERIAL	\$ 9,332.95
EQUIPO	\$ 8,416.90
INSTRUMENTOS	\$ 5,588.00
MANO DE OBRA	<u>\$ 9,667.84</u>
COSTO TOTAL DE HORNO	<u>\$33,005.69</u>

## 4.7.- ETAPA EXPERIMENTAL.

Concluida la construcción del horno se procedió a la instalación del termopar, del quemador y se efectuó el recocido del material refractario, que consiste en calentar lentamente el horno, aumentando 100°C cada hora con el objeto de eliminar la humedad contenida en el refractario, puesto que si la temperatura se eleva bruscamente se producen tensiones de magnitud tal que causan la fractura del material. La temperatura se elevó hasta 1600°C satisfactoriamente.

Posteriormente se efectuaron 30 corridas experimentales, con el propósito de determinar los parámetros que inbluyen en el flujo continuo y en la formación de gotas de metal fundido.

El metal que se eligió para la etapa experimental fue el aluminio, por su bajo punto de fusión (660°C) y consecuentemente por su fácil manipulación.

La tabla 10 muestra los resultados obtenidos en la corrida experimental que se llevó a efecto.

TABLA 10

Etapa experimental.

Corrida Experim.	Masa (g)	Tiempo calent. (min.)	Temp. max. (°C)	Diam. orif. (cm)	Material	Fluidi- zación.
1	350	30	800	0.4	Chatarra de Al	no
2	350	30	800	0.4	Chatarra de Al	no

TABLA 10 (cont.)

Etapa experimental.						
Corrida experim.	Masa (g)	Tiempo calent. (min.)	Temp. máx. (°C)	Diam. orif. (cm)	Material	Fluidi- zación
3	350	60	900	0.4	Chatarra de Al	no
4	350	60	900	0.4	Chatarra de Al	no
5	350	60	900	0.4	Chatarra de Al	no
6	550	90	1100	0.4	Aluminio 99.99	no
7	550	90	1100	0.4	Aluminio 99.99	no
8	550	90	1100	0.4	Aluminio 99.99	no
9	550	90	1100	0.4	Aluminio 99.99	no
10	550	25	800	0.4	Aluminio 99.99	si
11	550	25	800	0.4	Aluminio 99.99	si
12	550	25	800	0.4	Aluminio 99.99	si
13	550	25	800	0.4	Aluminio 99.99	si
14	550	28	810	0.24	Aluminio 99.99	si
15	550	28	810	0.24	Aluminio 99.99	si
16	550	28	810	0.24	Aluminio 99.99	si
17	550	28	810	0.24	Aluminio 99.99	si
18	550	30	820	0.24	Aluminio 99.99	si
19	550	30	820	0.24	Aluminio 99.99	si
20	550	30	820	0.24	Aluminio 99.99	si
21	550	30	820	0.24	Aluminio 99.99	si
22	550	90	1100	0.16	Aluminio 99.99	no

TABLA 10 (cont.)

Etapa experimental.						
Corrida experim.	Masa (g)	Tiempo calent. (min.)	Temp. máx. (°C)	Diam. orif (cm)	Material	Fluidi- zación
23	550	90	1100	0.16	Aluminio 99.99	no
24	550	90	1100	0.16	Aluminio 99.99	no
25	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si
26	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si
27	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si
28	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si
29	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si
30	550	25	800	0.24	Aluminio 99.99	si

De la corrida experimental anterior, se determinó que los parámetros que afectan el proceso de fluidización para formar gotas son:

- la masa del material a fundir
- el diámetro del orificio en el crisol y
- la pureza del material a fundir.

## CAPITULO V

### 5.- RESULTADOS

## 5.- RESULTADOS

Los resultados obtenidos son los siguientes:

1.- Se logró el diseño, estimación y construcción de un horno para fundir metales de alto punto de fusión. *y cobina*

2.- Se logró <sup>de</sup> determinar experimentalmente algunos parámetros que permiten un flujo continuo y goteo del material fundido. }

**CAPITULO VI**

**6.- CONCLUSIONES**

## 6.- CONCLUSIONES

### 1.- Estimación y construcción

Se logró el diseño, estimación y construcción de un horno para fundir metales de alto punto de fusión. Este permite el flujo continuo del metal fundido y su goteo: permi-  
tiendo así la obtención de fibras metálicas.

### 2.- Influencia de las variables

Pueden llegarse a controlar teórica y experimentalmen-  
te, de acuerdo con las pruebas realizadas, los parámetros -  
que afectan el flujo del material para obtención de fibras.

### 3.- Proyección al futuro

Con las conclusiones anteriores, es enteramente facti-  
ble el seguir el estudio y experimentación más a fondo tan-  
to en el aspecto de producción de este tipo de fibras así -  
como en el estudio de los materiales reforzados con fibras-  
de alto módulo, pues como se ha dicho la importancia de es-  
tos es vital. Ello podrá ser de utilidad en nuestro país --  
donde las tecnologías son aún incipientes y comercialmente  
se sabe nada de ellas. Por lo anterior es de interés difun-  
dir las características que puedan tener los materiales com-  
puestos que utilicen fibras de alto módulo para su penetra-  
ción paulatina en el mercado nacional.

CAPITULO VII

7.- BIBLIOGRAFIA

## 7.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- ACI - Committee 544; "FIBER REINFORCED CONCRETE STATE - OF THE ART"; S/pag; Proceedings, Journal of the American Concrete Institute; 1973.
- 2.- Aluminium-Zentrale E.B.; "MANUAL DEL ALUMINIO"; pags. - 52-54 y 105; Editorial Reverté S.A.; 1969.
- 3.-A.P. Green; "MANUAL DE REFRACTARIOS"; s/pag; editado por A.P. Green, Tlalnepantla, México; 1975.
- 4.-Broutman L.J.- Croock N.H.; "MODERN COMPOSITE MATERIALS" capitulo I, pags 3-20; Ed. Addison-Wesley Publishing Company; 1967.
- 5.- Carroll-Porczynski; "INORGANIC FIBRES"; Capitulo XVII - pags. 306-317; Ed. London National Trade Press Limited; 1958.
- 6.- Foust A.F.-Wenzel L.A.- Clump C.W.; "PRINCIPIOS DE OPERACIONES UNITARIAS"; pags. 291 y 292; Ed. C.E.C.S.A.; 1972.
- 7.- Gray G.H. et Al; "FIBROUS CONCRETE-CONSTRUCTION MATERIAL FOR THE SEVENTIES"; s/pag; Conference Proceedings M-28, U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois; 1972.
- 8.- Honeywell Manual; "MEDICION DE TEMPERATURAS"; Pags. -- 20-30; Editado por Cia. Honeyell, México; 1970.
- 9.- Kern D. Q.; "PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR"; pags. 14-36; y 783-793; Ed. C.E.C.S.A.; 1974.
- 10.- Kirk R.E.- Othmer D.F.; "ENCICLOPEDIA DE TECNOLOGIA - QUIMICA"; Tomo II, pags. 56-62, Tomo VII, pag 5; Ed.- UTEHA; 1961.
- 11.- Mc Cabe W.L.- Smith J.C.; "OPERACIONES BASICAS DE ING. QUIMICA"; pags. 291-296, 298-301; EDITORIAL. Reverté, S. A.; 1972
- 12.- Norton F.H.; "REFRACTARIOS"; pags 40,41, 243-248 249-310 y 333-346; Ed. BLUME, 4ª Edición ; 1972.

- 13.- Pastrana T.; "HORNOS RECALENTADORES DE LINGOTES"; pag. 30-35; Tesis I.Q., I.P.N.; 1965.
- 14.- Perry J.H.; "CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK"; pags. 3-118, 9-42, 9-43, 10-45, 10-46 y 10-47; Ed. Mc. Graw Hill, Chemical Engineering series. 4ª Edición; 1969.
- 15.- Perry J.H.; "MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO"; Vol. I, - pags. 703, 707, 709, 712, 742 y 753; Ed. UTEHA, 3ª -- edición ; 1963.
- 16.- Perry J.H.; "MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO"; Vol II, pag 1981, 1984, 2519, 2522, 2529-2531; Ed. UTEHA, 3ª edición 1963.
- 17.- Reyes L.J.A.; "DISEÑO DE UN HORNO DE CRISOL PARA FINES EXPERIMENTALES"; pags 76,77, 81 y 82; Tesis I.Q., ---- U.N.A.M. -1973.
- 18.- Singer F.- Singer S.S.; "CERAMICA INDUSTRIAL"; Vol. I, pags. 468 y 469; Edit. URMO; 1971
- 19.- Trincks W.- Mawhinney M.H.; "HORNOS INDUSTRIALES"; Vol I, pags. 128 y 129; Ed. URMO; 1971.