

73.

Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

**Diseño de un Horno para la fabricación de Anodos
Galvánicos de Zinc y Aluminio, para la
Protección Catódica**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
JOSE LUIS MARAVILLA MONDRAGON



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.

INDICE

	Página
I INTRODUCCION.....	7
II ANTECEDENTES DE CORROSION.....	10
III GENERALIDADES PARA LA CONSTRUCCION DE UN HORNO.....	32
IV TRANSMISION DE CALOR.....	45
V DISEÑO DEL HORNO.....	60
VI TIPOS, FORMAS Y MOLDES DE ANODOS - DE SACRIFICIO.....	107
VII ESTIMACION DE LAS PARTES QUE INTE- GRAN EL HORNO.....	116
VIII CONCLUSIONES.....	120
IX BIBLIOGRAFIA.....	121

CAPITULO I

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

Las sociedades modernas, complejas en su organización y tan llenas de problemas de naturaleza diversa, son el resultado del siglo técnico-científico en que vivimos. No obstante, que el hombre es parte minúscula del universo, ha hecho un gran esfuerzo creador; que lo ha llevado a desarrollar las ciencias y técnicas para un mejor aprovechamiento de los recursos que tiene a su alrededor.

En los últimos años, nuestro país se ha orientado hacia el desarrollo industrial. Cada día se establecen nuevas industrias y se amplian otras, todas con la finalidad de aumentar básicamente su producción.

Producir es desde el punto de vista de la Ciencia Económica, la creación de satisfactores. Es decir la transformación de elementos que existen en la naturaleza, en objetos y cosas útiles para satisfacer las necesidades del ser humano. Producir es incorporar utilidad a las cosas que nos proporciona el medio natural.

A medida que el hombre evoluciona y desarrolla su cultura, adquiere nuevas formas de vida y como consecuencia, crea nuevas necesidades que lo impulsan a desarrollar su intelecto; sus capacidades y a intensificar su actividad para crear o encontrar todo lo que requiere para dar satisfacción a sus necesidades, cada día más numerosas.

Después de realizar el proceso llamado producción, interviene un segundo proceso que se llama circulación; que comprende el transporte de satisfacto--

res de los centros que han sido producidos a los lugares en que se ponen a la venta para su consumo y los cambios que con ellos se efectúan, para llegar del productor al consumidor.

Cuando un producto es de Producción Nacional, se hace llegar al consumidor a un costo óptimo de mercado. En cambio, cuando necesitamos de un producto -- que no es de producción nacional, tenemos que recurrir a la compra de importación, esto origina que tengamos que adquirirlo a un costo mayor al óptimo de mercado.

El presente trabajo, trata del diseño de un equipo que puede reducir parcial o totalmente la importación de Anodos de Sacrificio de Zinc y Aluminio para la Protección Catódica.

La Protección Catódica, es un método para la prevención de la corrosión de los metales. La técnica opera mediante el paso continuo de corriente directa de una fuente externa o de unos ánodos o electrodos al sistema que se desea proteger. La corrosión se atenúa, cuando se tiene una cantidad de corriente directa que se distribuye apropiadamente en todo el sistema.

O B J E T I V O S

El objetivo principal del presente trabajo tiene como finalidad, conocer todas las consideraciones que se deban tomar en cuenta, para el diseño de un equipo que puede reducir parcial o totalmente la importación de Anodos de Sacrificio de Zinc y Aluminio para la Protección Catódica.

Los objetivos particulares que se conside
ran para el diseño del equipo, son los siguientes:

- I) Informe de los principales factores -
que intervienen en el proceso de la co
rrosión.
- II) Exposición de las generalidades más im
portantes para la construcción de un -
horno.
- III) Presentación de los principales meca--
nismos de transmisión de calor en un -
horno.
- IV) Diseño teórico del horno, como resultado
de las consideraciones anteriores.
- V) Descripción de los tipos y formas de -
los Anodos de Sacrificio para la Pro--
tección Catódica.

Una vez presentados los objetivos, pasamos
al desarrollo de los mismos.

CAPITULO II

FALLA

DE

ORIGEN.

SERVICIOS DE
MICROFILMACIÓN

ANTECEDENTES DE CORROSION.

En general podemos decir que la corrosión consiste en la destrucción de un metal por el medio ambiente al que se encuentra expuesto.

La corrosión ocurre en muchas y variadas formas, pero su clasificación se basa en los siguientes factores:

a) Naturaleza de la sustancia corrosiva.

La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Para la primera se requiere un líquido o humedad, mientras que para la segunda las reacciones se desarrollan con gases a alta presión.

En este capítulo nos ocuparemos únicamente de la corrosión húmeda.

b) Mecanismo de corrosión.

Comprende las reacciones electroquímicas. Esta parte la desarrollaremos posteriormente.

c) Apariencia del metal corroído.

Dependiendo de la apariencia que presente un metal, la corrosión puede ser:

- 1) Corrosión uniforme.
- 2) Corrosión localizada.

Si la corrosión es uniforme, el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie. Esta

corrosión se presenta en grandes áreas metálicas, puede ser húmeda o seca y dependiendo de ésto, serán los métodos de protección. Para grandes superficies lo más común es utilizar pinturas anticorrosivas.

La corrosión localizada se presenta en zonas específicas de la superficie de un metal. Este tipo de corrosión ocurre por diferentes fenómenos. Para comprender mejor la corrosión localizada la subdividiremos en:

I) Corrosión localizada macroscópica:

Corrosión galvánica.

Corrosión por erosión.

Corrosión por agrietado.

Corrosión por picadura.

Corrosión por exfoliación.

Corrosión por ataque selectivo.

II) Corrosión localizada microscópica:

Corrosión intergranular.

Corrosión por fractura.

Corrosión galvánica.- Este tipo de corrosión se presenta cuando se tienen diferentes metales, - que se encuentran entre electrolitos conductores. Depen- diendo del potencial entre ellos será el grado de corro- sión. Al metal con menor potencial eléctrico se le cono- ce como metal noble y al de mayor potencial como metal - activo. Es muy importante tener en cuenta la relación de áreas, puesto que a una mayor área del metal noble, el - metal activo se corroerá más rápidamente. Un método de - protección contra la corrosión consiste en evitar en lo

posible la presencia de grandes áreas y además que los metales no se encuentren muy separados de la serie electromotriz de los metales.

Corrosión por erosión.- A este tipo de corrosión también se le conoce como corrosión mecánica. - Porque consiste en una fuerza mecánica sobre la superficie de un metal. Esta fuerza puede ser causada por el frotamiento excesivo de un metal sobre otro o de un fluido líquido o gaseoso, que esta golpeando al metal. Esta fuerza produce orificios que son característica de la dirección del fluido. El control para evitar esta corrosión es la de seleccionar materiales más resistentes o cambiar el diseño.

Corrosión por agrietamiento.- Las superficies, los traslapes, los tornillos, remaches y aún las superficies metálicas presentan grietas superficiales o un determinado grado de agrietamiento y cuando son ex-puestas a medios muy corrosivos, se incrementa la corrosión por agrietamiento. Un control de este tipo de corrosión sería mejorar la aleación de los materiales, para así darles mejor resistencia.

Corrosión por picadura.- Este tipo se pre-senta en la formación de orificios en una superficie re-lativamente inatacada. La forma de la picadura es a menu-do responsable de su propio avance. Una picadura es con-siderada como grieta o hendidura formada por si misma. - Esta forma de corrosión es un proceso lento que tarda me-ses o inclusive años en ser detectada, pero que natural-mente causa fallas inesperadas.

Corrosión por fractura.- Para que se mani-

fieste este tipo de corrosión, se requiere la acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo.

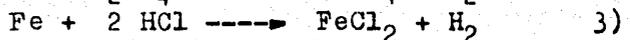
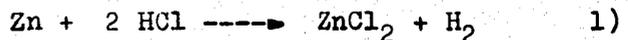
La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones que causan este problema son pocas. Hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios y se necesita un estudio por separado de las influencias que la afectan.

LA CORROSION COMO UNA REACCION QUIMICA.

El químico define a la corrosión, como una reacción química entre un metal y una sustancia corrosiva; tal como un ácido, una solución neutra o alcalina, o una sustancia oxidante.

Un ejemplo sencillo que nos demuestra el fenómeno de la corrosión, es el siguiente:

a) En ácidos débiles o fuertes.



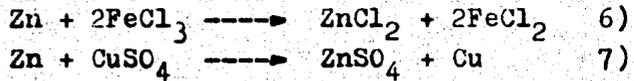
b) En soluciones neutras o alcalinas. Dentro de este tipo, tenemos el agua potable y el agua de mar.



Las soluciones acuosas tienen la facultad de poder disolver el oxígeno del aire, y eso facilita el proceso de corrosión.

c) En sustancias oxidantes.

Un grupo de este tipo de sustancias lo componen las sales férricas y los compuestos cúpricos.



Producto de la corrosión.

En toda reacción química entre un metal y un medio corrosivo, existirán productos de la corrosión. Estos pueden o no ser nocivos para el metal en proceso de corrosión.

Un caso práctico de protección, es aquel que se presenta cuando el aluminio se encuentra en un medio atmosférico corrosivo. Se forma una finísima capa de óxido sobre la superficie, impidiendo que se propague la corrosión.

Por el contrario, cuando se expone el metal hierro a un medio corrosivo, se forma hidróxido férrico y si este permanece en un medio atmosférico, se deshidrata pasando a óxido férrico que es una sustancia insoluble y puede ser removida y así continuar la corrosión.

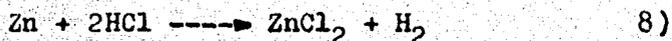
Electroquímica de la corrosión.

Reacciones electroquímicas.

Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la que existe una transferencia de electrones y además comprende el fenómeno de oxidación y reducción.

Para comprender mejor lo anterior analicemos una reacción electroquímica.

Sea la reacción general entre el Zn y el HCl diluido.

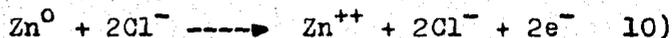


Ahora, desarrollemos el mecanismo de la reacción:

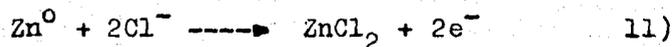
1) El ácido clorhídrico diluido se encuentra en solución acuosa, por lo que se disocia en su forma iónica, esto lo podemos observar en la siguiente ecuación.



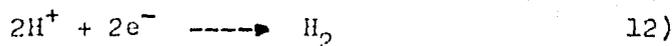
2) El ión cloro tiene afinidad por el Zn en estado elemental y lo obliga a pasar a un estado de valencia mayor, cediendo electrones.



Esta reacción ocurre en fracciones de segundo por lo que se forma.



Los dos electrones son recibidos por los iones hidrógeno que se encuentran en solución acuosa. De la manera siguiente.



En electroquímica a toda reacción química

que ceda electrones con un aumento en su valencia, como en la ecuación 11), se le conoce con el nombre de reacción anódica o reacción de oxidación.

Y a toda reacción química que acepte electrones con una disminución en su valencia, como la ecuación 12), se le conoce con el nombre de reacción catódica o reacción de reducción.

De lo anterior se ve que todo proceso de corrosión es una combinación de dos reacciones, una anódica y otra catódica.

Polarización en electroquímica.

Cuando una reacción electroquímica se retarda, se dice que esta polarizada o que ha sufrido el fenómeno de la polarización. Se conocen dos tipos de polarización.

a) Polarización por activación.

Son aquellos factores que retardan la velocidad de reacción, pero que son inherentes a ella misma. Como ejemplo tenemos la rapidez a la que los iones hidrógeno se reducen a gas hidrógeno. Uno de los factores que afectan lo anterior es la velocidad de transporte del electrón al ión hidrógeno en la superficie metálica.

b) Polarización por concentración.

Se refiere al retardo de la reacción electroquímica como un resultado de los cambios de concentración en la solución adyacente a la superficie metálica.

Es muy importante en electroquímica conocer la velocidad a la cual se llevan a cabo las reacciones anódicas y catódicas y se pueden determinar por varios métodos físicos y químicos. Estos están fuera del alcance de este trabajo.

Potencial de corrosión.

Una celda electrolítica es aquel dispositivo formado por dos electrodos, una solución electrolítica y un alambre que permite el paso de la corriente.

Los electrodos son generalmente metales. Así, en una celda electrolítica donde se utilizan metales diferentes como electrodos en una solución electrolítica que contenga iones de uno de los metales, uno de ellos se corroerá, mientras el otro se protegerá.

Es muy importante conocer el potencial de un metal que se corroe. Este potencial se mide determinando la diferencia de potencial existente entre un metal sumergido en un medio corrosivo y un electrodo de referencia. Los más usados son los siguientes:

Electrodo saturado de calomel.

Electrodo cobre-sulfato de cobre.

Electrodo de platino-hidrógeno.

La medición se hace con un potenciómetro, donde la magnitud y el signo del potencial de corrosión es una función del metal, composición del electrolito, temperatura y agitación del mismo.

Es de interés conocer los potenciales de

óxido-reducción o potenciales red-ox ya que ellos nos pueden predecir si un metal puede o no ser corroído en un medio ambiente dado.

Los potenciales red-ox consisten de un potencial relativo de una reacción electroquímica en condiciones de equilibrio, en donde la velocidad de reacción es la misma en ambas direcciones.

Una celda electroquímica se puede dividir en dos medias celdas. Para que exista corrosión una media celda debe ser más negativa que la otra.

Para saber cual de las celdas se corroe y cual se protege, nos basamos en la siguiente ley de la electroquímica, que dice:

En cualquier reacción electroquímica, la media celda más negativa tiende a oxidarse, mientras que la media celda más positiva tiende a reducirse.

Así, podemos observar que los metales que tienen potenciales red-ox más negativos que la media celda iones hidrógeno-gas hidrógeno, serán corroídos por soluciones ácidas. Y por otra parte los metales con potenciales más positivos que la media celda iones hidrógeno-gas hidrógeno, no serán corroídos por soluciones ácidas.

PROTECCION CATODICA.

La protección catódica es un método eléctrico de prevención contra la corrosión. Se usa en una gran variedad de estructuras metálicas, barcos, tanques de almacenamiento, intercambiadores de calor que se encuentran en contacto con electrolitos tales como el sue

lo o el agua.

El procedimiento consiste en el paso continuo de corriente directa de unos electrodos que estan colocados en el electrolito, a la estructura que se quiere proteger. La corrosión se atenúa, cuando se tiene una cantidad de corriente eléctrica que se distribuye apropiadamente en la estructura.

Cuando los metales se encuentran en contacto con electrolitos, pueden ocurrir dos tipos de corrosión.

a) Corrosión electrolítica.

Este tipo de corrosión, consiste en el paso de una corriente directa a través del electrolito - hasta la superficie metálica. La zona donde llega la corriente directa queda protegida, mientras que en la zona donde sale se corroe.

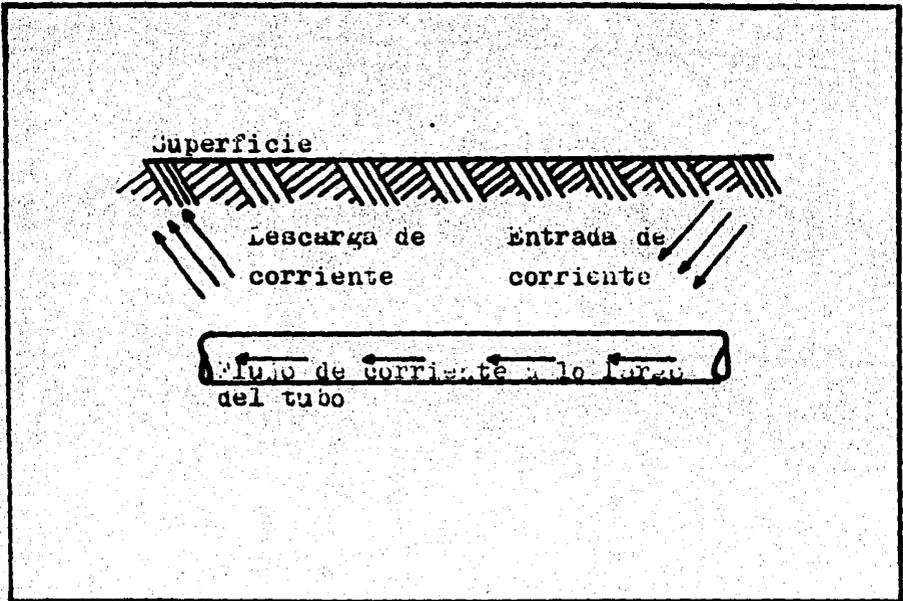
Esta corriente directa proviene de generadores tales como: ferrocarriles, barcos, etc. A la corrosión electrolítica se le conoce también como corrosión - por corrientes parásitas.

b) Corrosión galvánica.

Cuando un metal se encuentra con un electrolito se desarrolla una diferencia de potencial.

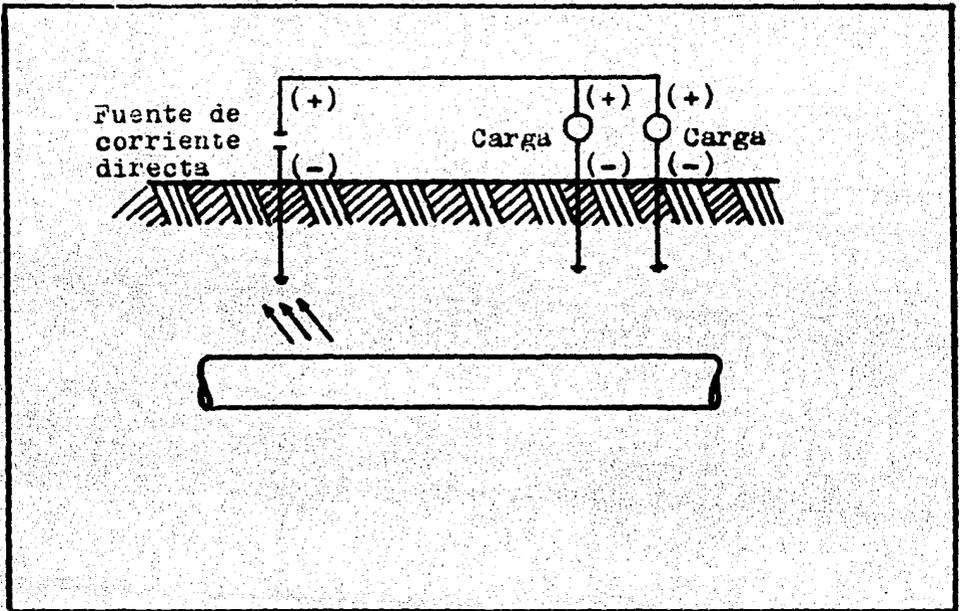
Esta diferencia de potencial puede resultar del acoplamiento de metales diferentes o bien puede resultar de las variaciones en las condiciones que exis-

ten sobre la superficie de un metal sencillo. Estas variaciones pueden provenir de un metal homogéneo, así como también de las diferencias de composición del electrolito.

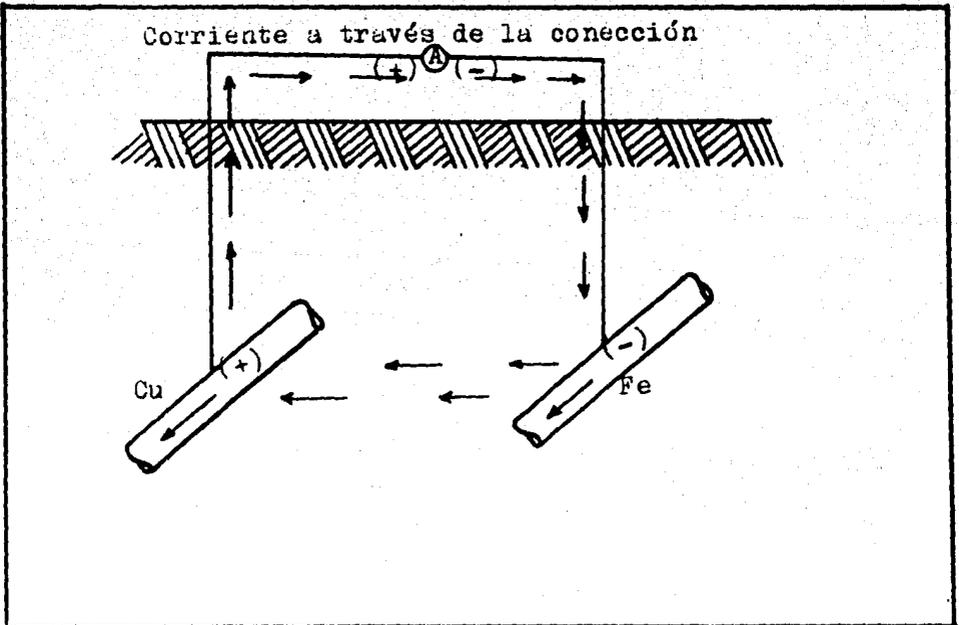


Corrientes parásitas en tubería enterrada

Quando dos metales diferentes se conectan eléctricamente y se depositan en un electrolito, se genera una corriente eléctrica, que consiste en un movimiento electrónico del metal que se corroe a través de un conductor eléctrico al metal que no se corroe. Simultáneamente a la producción de electrones en el metal que se corroe habrá una formación de iones positivos que via



Corrientes parásitas en tubería enterrada



Corrosión galvánica en metales diferentes

jarán al metal que no se corroe, para así formarse los productos de la corrosión.

La corrosión electrolítica y galvánica son similares desde el punto de vista que la corrosión siempre sucede en las zonas anódicas y la diferencia radica en que la corrosión electrolítica es una fuente de corriente eléctrica la que produce corrosión, mientras que en la corrosión galvánica es la actividad de los metales la que genera corriente.

Así, podemos concluir que la corriente eléctrica puede generar la corrosión y que a su vez la corrosión puede generar corriente eléctrica.

Como resultado de este fenómeno se puede ver que es posible prevenir la corrosión mediante el uso de la corriente eléctrica; siendo este el fundamento de la protección catódica.

Cuando la corriente eléctrica directa se aplica con una polarización, que se opone al mecanismo natural de la corrosión y en suficiente magnitud para polarizar todas las áreas catódicas, la corrosión se detiene. Finalmente las consideraciones teóricas indican que las bases de la protección catódica son relativamente simples, sin embargo los diseños prácticos para diferentes aplicaciones de estos, pueden diferir considerablemente, ya que estas dependen del tipo de la estructura que se quiere proteger y del medio ambiente en que se encuentra.

Para diseñar protección catódica se requiere del conocimiento de:

- a) El potencial de la estructura con respecto al medio ambiente.
- b) La resistencia del medio ambiente.

Las mediciones de potencial se toman al e valuar un problema de corrosión, antes de que la protección se aplique y para determinar el grado de protección después de que la protección catódica se aplica.

Cuando la corrosión electrolítica se presenta, las porciones de la estructura que van a sufrir - corrosión, son aquellas donde los potenciales son más ne gativos o más positivos.

Al aplicar protección catódica el poten-- cial de toda la instalación se hace más negativo y se - considera que se tiene protección completa cuando el sig tema adquiere por lo menos un potencial de -0.85 volts - con respecto a la media celda de cobre.

Las mediciones de resistividad sirven pa- ra determinar la corrosividad relativa del medio ambien- te y son muy importantes para el diseño del sistema de - protección catódica.

A pesar de que la resistividad no es el - único factor que gobierna la corrosión, en la mayoría de los casos, mientras más baja es la resistividad mayor es la corrosividad del medio ambiente. Por ejemplo, el agua de mar tiene una resistividad de 15 a 35 ohm-cm, mientras que la arena limpia de tierra desértica, tiene una resis tividad de 1,000,000 de ohm-cm.

MÉTODOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Existen fundamentalmente dos métodos para la protección catódica, aunque hay una numerosa combinación de estos dos procedimientos.

I) Método por corriente impresa.

Este método utiliza ánodos que son energizados por medio de un sistema externo de corriente directa, en este tipo de protección catódica los ánodos se instalan en el electrolito y se conectan al polo positivo de la fuente externa de corriente directa, mientras la estructura que se quiere proteger se conecta a la terminal negativa de esa fuente.

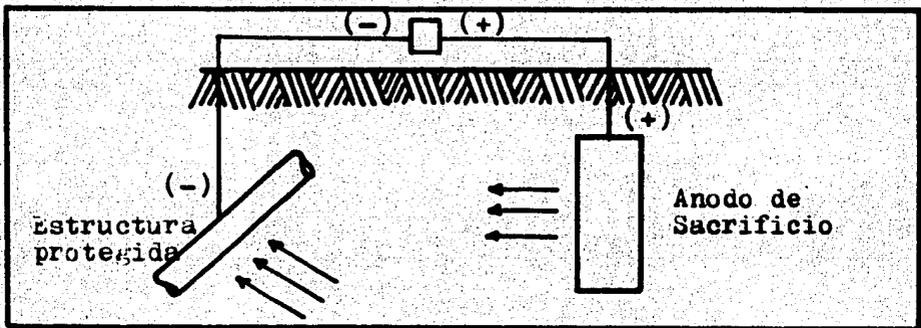
El uso de una fuente de corriente directa imparte su nombre al sistema, así se conoce con el nombre de sistema de protección catódica por corriente impresa.

II) Método de ánodos de sacrificio.

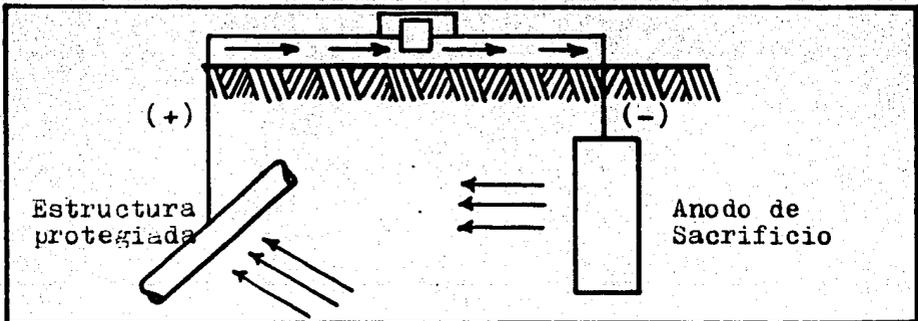
Este método de protección catódica, utiliza ánodos galvánicos que se fabrican de materiales como: Zinc, Aluminio y Magnesio. Una característica de estos ánodos es que se consumen ellos mismos durante la generación de la corriente protectora. Este método recibe el nombre de protección catódica con ánodos de sacrificio.

Los ánodos galvánicos se conectan directamente a la estructura que se desea proteger, por medio de un conductor eléctrico.

En la mayoría de los casos el sistema de corriente impresa se diseña para entregar grandes cantidades de corriente a partir de un número limitado de ánodos, mientras que el sistema de ánodos de sacrificio entrega pequeñas cantidades de corriente a partir de una gran cantidad de ánodos.



Protección catódica con rectificador



Protección catódica con ánodos de sacrificio

Anodos para corriente impresa.

Cuando la protección catódica se aplica mediante corriente impresa con una fuente externa de energía eléctrica es necesario utilizar materiales anódicos diferentes a los galvánicos.

Los materiales más comúnmente usados para

este tipo de protección catódica son el grafito y el acero fundido con alto contenido de silicio, que se consu--men mucho más lentamente que los ánodos galvánicos.

El medio ambiente con cloruros, tales como el agua salada; el material que se comporta mejor es el grafito, en donde durante la aplicación de la corriente eléctrica se libera cloro. En cambio si no existen -cloruros y se libera oxígeno en el ánodo, el material - más recomendable es el fierro fundido con alto contenido de silicio.

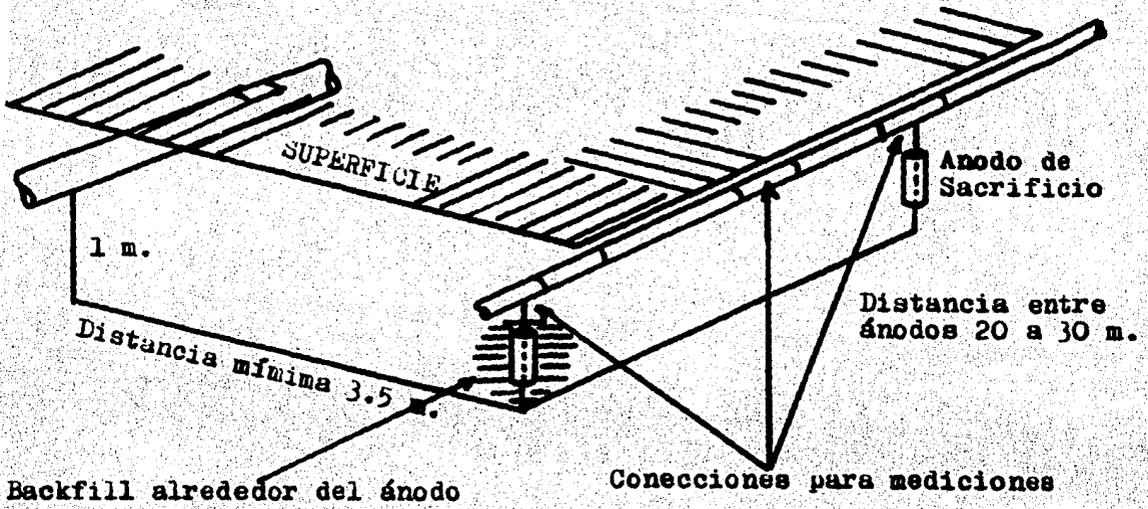
Corriente drenada para ánodos de sacrificio.

Los ánodos de sacrificio que se emplean - en la protección catódica son el aluminio, magnesio y el zinc. A continuación daremos algunas de sus características.

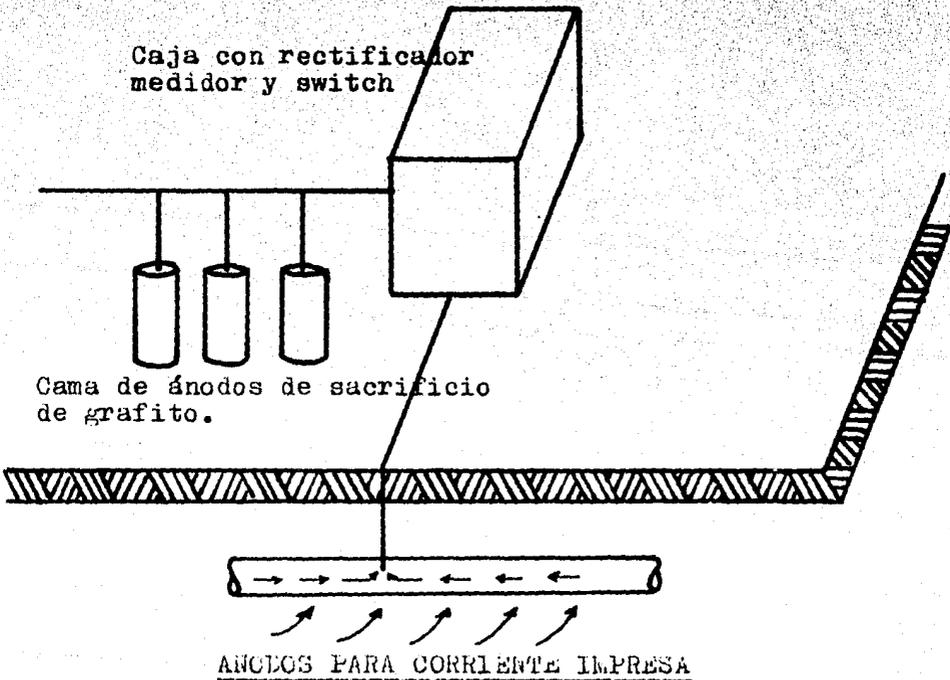
ELEMENTO	ION	PESO ATOMICO.	$\frac{\text{Amp-h}}{\text{Kg}}$	$\frac{\text{Kg}}{\text{Amp-año}}$	POTENCIAL EN CIRCUITO -- ABIERTO.
Al	Al ⁺³	26.982	2980	2.930	-1.05
Mg	Mg ⁺²	24.312	2205	3.972	-1.75
Zn	Zn ⁺²	65.37	820	10.60	-1.10

Rellenos (Backfill).

Los ánodos tanto galvánicos como para corriente impresa requieren ser colocados en un medio am-



ANODOS GALVANICOS



biente de relleno, que suministra buen contacto eléctrico entre la tierra y los ánodos, reduciendo la resistencia de contacto entre ánodos y medio ambiente. Además - que aísla químicamente el ánodo del medio ambiente y actúa como un puente electrolítico para transportar la electricidad del ánodo a la tierra. Aún más, el material de relleno debido a sus propiedades coloidales retiene el agua necesaria para mantener funcionando correctamente los ánodos, independientemente de las condiciones climatológicas.

ANODOS DE SACRIFICIO.

Los requisitos básicos de un ánodo de sacrificio son:

a) Un potencial suficientemente electro-negativo para suministrar un flujo adecuado de corriente.

b) La cantidad de electricidad drenada debe ser suficientemente elevada por unidad de masa, que se expresa como eficiencia de corriente ó número de amp-hora útiles obtenidos por kilo de material anódico consumido.

c) Bajo costo del metal empleado como ánodo de sacrificio.

El magnesio tiene el potencial teórico - de -2.61 volts y el potencial de operación más alto -- -1.5 volts. Por lo que se recomienda cuando la resistividad del electrolito es elevado o cuando se requiere una alta densidad de corriente para polarizar la estructura.

El zinc trabaja en la práctica con su potencial y drenaje de corriente teóricos, por lo que puede usarse satisfactoriamente en electrolitos de baja resistencia.

El aluminio presenta valores teóricos adecuados y debido a la elevada cantidad de corriente drenada presenta ventajas. Sin embargo la utilidad del aluminio puro es nula como ánodo de sacrificio; debido a que la película de óxido superficial formada limita su potencial práctico de soluciones a valores de -0.107 volts.

De lo afirmado anteriormente podemos darnos cuenta que un ánodo de sacrificio no puede utilizarse como material puro.

La investigación ha podido demostrar que la adición de elementos al zinc, aluminio y magnesio mejoran en algunas ocasiones sus propiedades electroquímicas, pero en otras las perjudican.

En estas condiciones la bibliografía especializada presenta un análisis químico recomendable para la fabricación de ánodos de sacrificio.

Anodos de zinc

Al	-----	0.625 %
Si	-----	0.640
Pb	-----	0.001
Cu	-----	0.001
Fe	-----	0.001
Zn	-----	98.732

100.000 %

Propiedades electroquímicas.

Corriente drenada teórica.....	168.74	$\frac{\text{amp-hora}}{\text{kg}}$
Eficiencia de co- rriente.....	96 %	
Corriente drenada real.....	162.00	$\frac{\text{amp-hora}}{\text{kg}}$
Potencial de cir- cuito abierto, re- ferido a un elec- trodo de Cu-CuSO ₄	-1.10	volts.

Anodo de aluminio

Hg	-----	0.045 %
Zn	-----	0.045
Al	-----	99.910

100.000 %

Propiedades electroquímicas.

Corriente drenada teórica.....	612.27	$\frac{\text{amp-hora}}{\text{kg}}$
Eficiencia de co- rriente.....	95 %	

Potencial de cir-
cuito abierto, re-
ferido a un elec-
trodo de Cu-CuSO_4
saturado.....

-1.10

volts.

Hasta la presente hoja corresponde el ca-
pítulo I y trató únicamente de las generalidades más im-
portantes que tiene la corrosión y sus métodos para ate-
nuarla.

CAPITULO III

GENERALIDADES PARA LA CONSTRUCCION DE UN HORNO.

Existen en la industria metalúrgica una gran variedad de hornos, su selección depende de la operación a la que esten destinados.

El trabajo que aquí se presenta trata del diseño de un horno de fusión. En lo sucesivo solo se tratará con lo que respecta a este tipo de hornos.

HORNOS DE FUSION

La base para el diseño de un horno de fusión son:

a) Fuente de la cual se obtiene la energía calorífica.

b) Costo del horno.

Existen muchas formas de seleccionar un horno, pero la que más se adapta a los propósitos de diseño, es la forma como se obtiene la energía calorífica para la operación. En base a la forma en que se aplica la energía calorífica, encontramos dos grupos que son:

I) Hornos de combustible.

1) Con calentamiento directo.

2) Con calentamiento indirecto.

II) Hornos eléctricos.

1) De arco

2) De resistencia.

3) De inducción.

En los hornos de combustible, la energía calorífica se obtiene de un combustible; este puede ser sólido, líquido o gaseoso.

Hornos de combustible con calentamiento directo.

Los hornos de esta clase se caracterizan porque el combustible y/o los productos de la combustión están en contacto directo con el material a fundir. En este grupo se encuentran los hornos de cuba y los hornos de reverbero.

Hornos de combustible con calentamiento indirecto.

Para esta clase de hornos, ni el combustible, ni los productos de la combustión están en contacto con la carga. Esta se coloca en un recipiente que es caldeado por los gases de la combustión.

Los ejemplos típicos son los hornos de mufla, de retorta y de crisol.

Los hornos de mufla no se utilizan para la fusión. Los hornos de retorta encuentran su utilidad principal en la destilación de metales de bajo punto de ebullición, como el mercurio y el zinc. Los hornos de crisol se utilizan para la obtención de fundiciones no ferrosas, ya que en el campo de las fundiciones ferrosas no son económicamente operables.

Los hornos de crisol pueden ser de fosa, fijos o basculantes. Esencialmente consisten de: Una -
camisa exterior de acero recubierta de refractario, el -
cual delimita la cámara de combustión, donde se coloca -
el crisol. En los hornos fijos y basculantes se emplean
además entre el refractario y la cubierta metálica, ais-
lante térmico, ya que por sus características de cons-
trucción, se reducen las pérdidas de calor.

El combustible empleado puede ser de cualu
quier clase, siempre y cuando su poder calorífico sea -
alto. Los quemadores en un horno de crisol se sitúan de
manera que la flama sea tangencial al crisol.

Debido al tipo de calentamiento, se asegu
ra una gran limpieza en la fusión, obteniéndose así pro-
ductos de máxima pureza, por no haber causas de contami-
nación. Sin embargo, este tipo de calentamiento determi-
na una eficiencia térmica baja. La transmisión de calor
la veremos posteriormente.

Hornos eléctricos.

En general el calentamiento eléctrico pre
senta algunas ventajas sobre el calentamiento por combus-
tión, por ejemplo el calor puede desarrollarse más rápi-
damente en el punto que se necesita o en sus inmediacio-
nes; se pueden obtener temperaturas más altas; se elimi-
na la combustión y sus productos, evitándose así, causas
de contaminación; es de rendimiento relativo más alto. -
pero a menos que el precio de la energía eléctrica sea -
bajo, resulta muy costoso.

COMBUSTIBLES.

El calor necesario para la fusión de un metal, se obtiene de la combustión de un combustible o bien por la conversión de la energía eléctrica a energía calorífica, como sucede en los hornos eléctricos.

Un combustible puede definirse como una sustancia cuya reacción de oxidación produce calor. En sentido de la combustión general, solo el carbono, el azufre y el hidrógeno son elementos combustibles. Un combustible industrial contiene además oxígeno, nitrógeno, humedad y cenizas minerales.

Combustibles sólidos.

En esta clase de combustibles, encontramos a la madera, carbón mineral, coque y carbón vegetal.

Combustibles gaseosos.

Estos combustibles están constituidos por uno o más gases simples en proporciones variadas y también pueden incluir algunos gases inertes y oxígeno. Los gases combustibles simples son: hidrógeno, monóxido de carbono, metano, etano, propano, propileno, etc. Los gases inertes son generalmente: nitrógeno, dióxido de carbono y agua. Además de estos constituyentes principales, pueden estar presentes pequeños porcentajes de otros compuestos orgánicos volátiles, compuestos de azufre, etc.

Combustibles líquidos.

La mayoría de los combustibles líquidos -

usados industrialmente se derivan del petróleo crudo. Los petróleos combustibles son aquellas fracciones que quedan después que las fracciones más ligeras, tales como las gasolinas, nafta y querosina, han sido removidas del petróleo crudo. Por consiguiente, desde el punto de vista industrial pueden considerarse como petróleos combustibles, aquellas fracciones más pesadas que la querosina. Pueden ser destilados como el diesel o residuales como el combustóleo.

El poder calorífico de los petróleos combustibles varía de 10,000 a 10,900 Kcal/Kg de combustible, medido a una temperatura de 15.6°C y a una presión de una atmósfera.

El poder calorífico bruto de un combustible, es el siguiente:

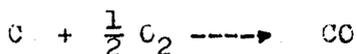
$$18,650 + 40(^{\circ}\text{API} - 10) \quad \text{BTU/Lb}$$

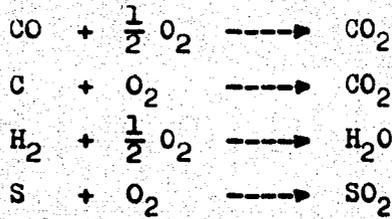
$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\text{Peso específico} - 60^{\circ}\text{F}/60^{\circ}\text{F}} - 131.5$$

COMBUSTION.

La combustión es un proceso químico de combinación de elementos combustibles con el oxígeno, con generación de calor y luz.

El carbón, hidrógeno y el azufre son los elementos combustibles y reaccionan con el oxígeno de la manera siguiente:





La mayoría de los combustibles industriales contienen estos elementos en forma de compuestos. Un análisis del combustible nos proporciona los porcentajes de C, H y S; en base a esto se puede calcular la cantidad de oxígeno necesario para quemarlos a CO_2 , H_2O y SO_2 .

El aire proporciona la cantidad de oxígeno necesaria para la combustión completa y recibe el nombre de aire teórico para la combustión.

Aire para la combustión.

La cantidad de aire teórico o estequiométrico necesario para la combustión es fácilmente calculado de las ecuaciones básicas de combustión; a partir del análisis del combustible. Sin embargo, en la práctica es necesario usar un exceso de aire para asegurar la combustión completa. La cantidad en exceso se expresa como un porcentaje del requerimiento teórico.

$$\% \text{ aire en exceso} = \frac{\text{Peso del aire suministrado.} - \text{Peso del aire teórico.}}{\text{Peso del aire teórico.}} \times 100$$

La cantidad de aire en exceso usada en la combustión depende del tipo de combustible y del diseño del horno y debe ser óptima.

Un exceso demasiado grande se traduce en una menor temperatura alcanzada en la combustión y el calor desperdiciado acarreado fuera del horno, como calor sensible de ese exceso de aire en los gases de la combustión.

El exceso demasiado bajo o inexistente de aire ocasiona que aparezca CO en los gases de combustión, acompañado de gas hidrógeno H_2 . Si eso sucede, la combustión es incompleta y no se aprovecha todo el poder calorífico del combustible.

Efecto de la humedad en el aire y en el combustible.

La presencia de humedad en el aire y combustible reducen el rendimiento de calor disponible, con la que cuenta un combustible. La explicación es la siguiente: El agua tiene que ser calentada para que deje el horno a la temperatura de los gases de combustión. La humedad del aire no es de ordinario un factor serio en la reducción del calor disponible, como puede serlo un alto contenido de humedad en el combustible. La humedad del combustible generalmente se da en las especificaciones del mismo. La humedad del aire debe ser determinada por métodos Psicrométricos.

Temperatura adiabática de flama TAF.

La temperatura adiabática de flama es la temperatura máxima que se obtiene cuando un combustible se quema con aire, bajo determinadas condiciones. En otras palabras es la temperatura de los productos de la combustión, cuando esta se realiza adiabáticamente.

La TAF no es una característica específica del combustible, sino que depende de las condiciones de la combustión. Afectan al cálculo, las temperaturas del combustible y del aire alimentados a la combustión, y la relación combustible-aire. Sin embargo se obtiene un criterio importante para comparar unos combustibles con otros, cuando se calcula la TAF para combustión completa, utilizando la cantidad de aire seco teórica y las temperaturas de referencia para el aire y el combustible.

La TAF es una temperatura máxima teórica que no se alcanza nunca en una flama real. La eficiencia de una flama real, varía de 60 a 90 % y tiene un promedio de 77 %.

QUEMADORES PARA COMBUSTIBLES LIQUIDOS.

Un combustible líquido no se quema como tal, sino que la reacción real de combustión es entre el vapor del combustible y el oxígeno del aire. Para favorecer la evaporación de un combustible líquido es necesario aumentar el área superficial de una determinada cantidad del mismo.

La formación de gotas extremadamente pequeñas en forma de un fino rocío de combustible se denomina comunmente atomización o pulverización.

La finalidad principal de los quemadores es atomizar el combustible para lograr una rápida y eficiente vaporización.

Existen una gran variedad de quemadores -

que varían en sus características de trabajo y diseño. Se conocen dos clases generales de quemadores de combustibles líquidos, estos son:

a) Quemadores que vaporizan el líquido dentro del quemador, llamados quemadores vaporizadores.

b) Quemadores que atomizan el líquido, de tal forma que la vaporización se lleva a cabo en la cámara de combustión. Este tipo son los llamados quemadores atomizadores.

Los quemadores vaporizadores se utilizan bastante para combustibles líquidos ligeros.

Los quemadores atomizadores en general utilizan una fuerza mecánica para atomizar el líquido y son los más comúnmente utilizados.

REFRACTARIOS.

Para la fabricación de hornos, se utilizan materiales refractarios que reúnan determinadas características para un proceso determinado.

Así, en ocasiones un refractario debe ser resistente al ataque químico, por la escoria; en otras el refractario debe tener resistencia a la compresión, a la abrasión, infusibilidad a altas temperaturas. En ciertas operaciones se requiere una conductividad térmica baja, mientras que en otras debe ser alta. En conclusión, para la mayoría de las aplicaciones se debe considerar una serie de combinaciones y requerimientos para así obtener el refractario más adecuado, para el proceso

en cuestión.

Los materiales refractarios están forma
dos principalmente por óxidos de Si, Mg, Al, Cr, etc.

De acuerdo a la composición química, los
refractarios se clasifican en:

Refractarios arcillosos.

Refractarios silicosos.

Refractarios con alto contenido de alúmina.

Refractarios básicos.

Refractarios aislantes.

Refractarios especiales.

Refractarios arcillosos.

Están constituidos por arcillas, cuyos com
ponentes químicos principales son la sílice y la alúmina.
A este tipo de refractarios se les conoce también con el
nombre de refractarios sílico-aluminosos.

Se emplean en todo tipo de hornos, excep-
to en donde las temperaturas son muy elevadas o el ata--
que químico por escorias u otros agentes, sea severo. -
Los refractarios arcillosos reciben un tratamiento de co
cción, que desarrolla una fase vítria que une a la masa,
dándole dureza y resistencia mecánica. Se conocen cuatro
calidades de refractarios arcillosos: Calidad superior,
calidad alta, calidad intermedia y calidad moderada.

Refractarios silicosos.

A este refractario se le conoce también -

con el nombre de alta sílice, ya que están constituidos fundamentalmente por este óxido. Son baratos, ligeros, soportan la carga a temperaturas altas. A temperaturas menores de 650°C , sufren desconchamiento. Son los refractarios más usados para contener escórias ácidas. En el mercado se encuentran como: refractarios silicosos especiales y refractarios arcillosos regulares.

Refractarios con alto contenido de alúmina.

Estos refractarios son conocidos también como alúmino-silicosos, debido a que su contenido, en alúmina es superior al 50 %. Sus propiedades son muy buenas, tiene buena resistencia a las escórias básicas, buena capacidad para soportar carga a altas temperaturas.

Refractarios aislantes.

A este tipo de refractarios se les emplea generalmente como capas adicionales al refractario del horno. Con el fin principal de ahorrar calor. Este tipo de aislantes tienen baja conductividad térmica, debido a una alta y bien distribuida porosidad y una baja densidad. La composición química no importa mucho en los refractarios aislantes.

Refractarios especiales.

Dentro de esta clase, encontramos los refractarios llamados: Morteros, que se emplean en las uniones de ladrillos refractarios; los plásticos y concretos, que se utilizan para construcciones monolíticas, recubrimientos, parchado, etc. Evidentemente, cada uno -

de estos materiales debe poseer características físicas y químicas compatibles con los materiales refractarios a que estan destinados. Dentro de este tipo encontramos a los refractarios especiales: carburo de silicio y grafito.

Propiedades de los refractarios.

Las propiedades más importantes de un refractario son aquellas que tienen influencia sobre su comportamiento en servicio. Las más importantes son:

a) Cono pironétrico.- Esta propiedad se refiere a la temperatura que soporta un refractario antes de ablandarse o fundirse, cuando esta en servicio.

b) Porosidad.- El tamaño de los poros influye en el comportamiento del refractario, cuando este se encuentra en servicio. Un poro grande ayuda al material a resistir los choques térmicos, mientras que un poro chico ayuda a detener los ataques químicos y la penetración de sustancias fundidas en el seno del refractario.

c) Contracciones y expansiones.- Son las ocasionadas por el peso de la carga y las variaciones de temperaturas. Esto origina que los refractarios se expandan o contraigan y si no se tiene en cuenta, pueden ocasionar averias en el horno.

d) Resistencia al desconchamiento térmico.- Este fenómeno consiste en el desprendimiento de fragmentos de la cara de un refractario por la fragmentación o fractura que se producen en la vecindad de la superficie, debido a los gradientes de temperatura, que ocasionan la

aparición de esfuerzos internos entre capas de diferente temperatura.

e) Resistencia a la compresión.- Es la presión o compresión que generalmente soporta un ladrillo refractario, cuando se encuentra en servicio.

f) Resistencia al ataque químico.- Cuando los refractarios se encuentran en contacto con escorias y estas contienen óxidos con que están hechos los refractarios, se lleva a cabo la corrosión.

CAPITULO IV

TRANSMISION DE CALOR.

Uno de los objetivos más importantes de un horno, es aprovechar al máximo posible la cantidad de calor que se genera en la combustión o durante la conversión de la energía eléctrica, para calentar la carga. Cuando el calor se emplea en su máxima capacidad, se tiene la más alta economía; pero esto no sucede en la realidad, por tal motivo es importante conocer los mecanismos de la transmisión de calor.

El calor se transfiere en las siguientes formas:

- a) Conducción.
- b) Convección.
- c) Radiación.

Conducción.

Este tipo de transmisión de calor, necesita de un medio y se lleva a efecto por una diferencia de temperaturas entre la superficie caliente y la fría.

La cantidad de calor que se transmite por el mecanismo de conducción, se obtiene por la siguiente expresión:

$$\frac{dq}{dA} = - k \frac{\delta T}{\delta x} \quad 1)$$

A la ecuación 1) se le conoce con el nombre de ecuación de Fourier, la cual establece que: la velocidad de flujo térmico, es proporcional al gradiente, perpendicular a la superficie. O sea que el área A, es -

una superficie perpendicular al flujo de calor y x es la longitud de trayecto de flujo, medida perpendicularmente al área A . La constante de proporcionalidad k , es la conductividad térmica, que es una propiedad física del material a través del cual ocurre el flujo de calor.

La derivada parcial de la ec. 1), indica que la temperatura puede variar con la posición y con el tiempo. Debido a esta variación, se consideran dos tipos de flujo térmico por conducción.

1) Conducción a régimen permanente: Cuando la temperatura es función de la posición.

2) Conducción a régimen no permanente: Cuando la temperatura es función, tanto del tiempo como de la posición.

Conducción a régimen permanente.

Es el caso más simple de la conducción, - es aquel en que no hay ni acumulación, ni disipación de calor dentro del cuerpo. Por tanto, el flujo es constante a través del trayecto de flujo de calor y el gradiente de temperatura es independiente del tiempo, solo varía la posición. Por lo tanto la ec. 1) queda escrita como:

$$\frac{q}{A} = - k \frac{dT}{dx} \quad 2)$$

Ordenando e integrando la ec. 2) tenemos:

$$q = - kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad 3)$$

Donde:

Δx = Longitud del trayecto de flujo térmico.

ΔT = Caída de temperatura a través del trayecto.

Conducción a régimen no permanente.

Cuando en el flujo de calor a través de un cuerpo hay acumulación o disipación de calor, la temperatura dentro del cuerpo varía con el tiempo y con la posición, es decir $T=f(\theta, x)$. Este fenómeno lleva a considerar la conducción a régimen no permanente; concepto básico en el estudio del tratamiento térmico de los metales, el cual envuelve calentamientos y enfriamientos controlados.

La cantidad de calor que se transmite por el mecanismo de conducción a régimen no permanente, se obtiene por la siguiente expresión.

$$\frac{\partial T}{\partial \theta} = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad 4)$$

La solución de la ec. 4), depende en general de la configuración geométrica del cuerpo considerado. Existen métodos gráficos y analíticos para llevar a cabo la solución. (Heat transmission, William H. Mc Adams, 3a. Edición, capítulo 30)

Convección.

Convección es la transmisión de calor desde una parte de un fluido en movimiento a otra, por la

mezcla de las partículas más calientes del fluido con las más frías.

La convección en el seno de un fluido por la transmisión de calor sensible entre partículas calientes y frías, no es de importancia práctica en la industria. En la mayoría de los sistemas de ingeniería en los que se considera a la convección, es de interés primordial el flujo de calor entre un fluido y una superficie sólida.

Para tener un flujo de calor adecuado, según el caso que nos concierne, podemos distinguir dos tipos de convección, dependiendo de la forma de dar movimiento al fluido.

a) Convección natural.- Cuando el movimiento del fluido es ocasionado por diferencias de densidades, y estas a su vez son el resultado de diferencias de temperaturas ó bien el régimen de flujo es laminar.

b) Convección forzada.- Cuando el movimiento del fluido es producido por medios mecánicos. -- (bombas, agitadores, compresores, etc.)

La transferencia de calor por convección, puede ser evaluada por medio de la siguiente expresión.

$$q = h_c A \Delta T \quad 5)$$

Donde:

q = Velocidad de transmisión de calor por convección ó velocidad de flujo térmico

co.

h_c = Coeficiente de transmisión de calor, por el mecanismo de convección.

A = Area de la superficie, donde se lleva a cabo la transmisión de calor.

ΔT = Diferencia entre la temperatura de la superficie y la temperatura del fluido.

El coeficiente de transmisión de calor k , se define como la velocidad de transmisión de calor entre la pared sólida de contención y el fluido, por unidad de superficie de la pared y por grado de diferencia de temperatura entre la superficie de la pared y el cuerpo principal del fluido.

Convección natural.

La transmisión de calor por convección natural la podemos calcular a partir de la ec. 5). Como podemos observar, tenemos todos los datos a excepción del coeficiente de transmisión de calor h_c . A continuación daremos algunos coeficientes de transmisión de calor, obtenidos por medio del análisis dimensional o experimentalmente.

Por ejemplo, para placas verticales no más de 65 cm de altura, Schmidt y Beckmann basados en mediciones de temperaturas del aire en varias localidades, encontraron experimentalmente los valores de las constantes $c=0.52$ y $n=0.25$ de la siguiente expresión.

$$\frac{h_c L}{k} = c \left[\frac{L^3 \rho^2 \beta g \Delta T}{\mu^2} \frac{C_p \mu}{k} \right]^n \quad 6)$$

Donde:

- L = Una dimensión lineal (coeficiente geométrico) característica del sistema.
- k = Conductividad térmica del fluido.
- C_p = Calor específico del fluido.
- μ = Viscosidad del fluido.
- ρ = Densidad del fluido.
- β = Coeficiente de expansión volumétrica del fluido.

Para gases calentados dentro o fuera de tubos verticales o en placas verticales, en convección natural, suponiendo que los gases obedecen la ley de los gases ideales, se tiene la siguiente ecuación.

$$h_c = 0.128 \left(\frac{k^3 \rho^2 C_p \beta \Delta T}{\mu} \right)^{0.333} \quad 7)$$

Para un gas en contacto con una área receptora de calor, se tiene la siguiente expresión.

$$h_{G1} = \frac{1.507 + 0.1034V}{\Delta T/180} \quad 8)$$

Donde:

- h_{G1} = Coeficiente de transmisión de calor por convección, entre el gas y el área receptora.
- V = Velocidad media de los gases.
- ΔT = Diferencia media logarítmica de temperaturas entre los gases y el área receptora.

Convección forzada.

La convección forzada, no hace caso de las fuerzas ascensionales, debido a que el fluido que pasa cerca de la superficie, lleva un movimiento o flujo turbulento, ocasionado por la acción mecánica de algún dispositivo. La velocidad en este tipo de convección juega un papel importante y debe considerarse para calcular el coeficiente de transmisión de calor h_c .

La transmisión de calor por convección forzada la podemos calcular a partir de la ec. 5). Como podemos observar nuevamente tenemos todos los datos a excepción del coeficiente de transmisión de calor. A continuación mencionaremos algunos.

Para gases calentados o enfriados fuera de tubos únicos, dirección del flujo normal al tubo, para valores del número de Reynolds mayores de 100, se tiene la ecuación siguiente.

$$\frac{h_c D}{k} = 0.385 \left(\frac{Dv\rho}{\mu} \right)^{0.56} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0.3} \quad 9)$$

También existen ecuaciones simplificadas para algunos sistemas, por ejemplo para convección forzada entre gases y la superficie de los conductos en los cuales se mueven, se tiene.

$$h_c = 0.027 \frac{C_p (v\rho)^{0.8} \mu^{0.2}}{D^{0.2}} \quad 10)$$

Donde:

h_c = Coeficiente de transmisión por convección forzada.

D = Diámetro del tubo.

- v = Velocidad del fluido.
- k = Conductividad térmica del fluido.
- μ = Viscosidad del fluido.
- ρ = Densidad del fluido.
- C_p = Capacidad calorífica del fluido.

Radiación.

La radiación es el tercer medio de transmisión de energía. La transferencia de calor radiante no requiere la intervención de un medio y el calor puede ser transmitido por radiación a través del vacío absoluto.

La energía radiante es de la misma naturaleza que la luz visible ordinaria. Se considera de acuerdo con la teoría electromagnética de Maxwell, como consistente de un campo eléctrico oscilante acompañado por un campo magnético también oscilante en fase con él.

La potencia emisiva, o sea la cantidad total de energía radiante de todas las longitudes de onda emitida por un cuerpo, por unidad de área y unidad de tiempo, se expresa por la siguiente ecuación.

$$E = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda \quad 11)$$

Donde:

- E = Potencia emisiva, Btu/h pie²
- I_{λ} = Intensidad de emisión monocromática, Btu/h pie² micrón.
- λ = Longitud de onda, micrón.

La intensidad de emisión monocromática, - se calcula por medio de la expresión siguiente.

$$I_{\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad 12)$$

Donde:

C_1 = Constante con valor de 1.16×10^8 .

C_2 = Constante con valor de 25,740.

Incidencia de la energía radiante, el -- cuerpo negro.

Hasta aquí nos hemos referido a la generación de energía radiante. Nos preguntamos que pasa cuando la energía radiante cae sobre un cuerpo. En el caso simple de la luz, puede ser parcial o totalmente absorbida o reflejada. Si el medio que la recibe es transparente a la radiación, transmitirá algo de la energía a través del cuerpo mismo. Los mismos efectos son aplicables a la energía radiante y un balance de energía respecto a un receptor en el cual la energía incidente total es la unidad, esta dado por:

$$a + r + \tau = 1 \quad 13)$$

Donde:

a = Es la fracción absorbida o la absor-- bancia.

r = Es la fracción reflejada o la reflexi vilidad.

τ = Es la fracción transmitida o la trans misividad.

La mayoría de los materiales en ingeniería, son sustancias opacas que tienen transmisividad cero, pero no hay ninguna que absorba o refleje completamente la energía incidente. Las sustancias que tienen absorbencias casi completas son el negro de humo, el negro de platino y el negro de bismuto, que absorben de 0.98 a 0.99 de toda la radiación incidente.

Si un cuerpo ordinario emite radiación a otro cuerpo, parte de la energía emitida es retornada al cuerpo por reflexión. Cuando Planck desarrolló la ec. de intensidad de emisión monocromática, supuso que nada de la energía emitida era devuelta. Esto fué equivalente a suponer que los cuerpos que tienen transmisividad cero, también tienen cero de reflexividad. Este es el concepto del cuerpo negro perfecto, para el cual $a=1$.

El cuerpo negro es usado como un estandar, al cual estan referidos todos los otros cuerpos radiadores. La relación entre la potencia emisiva total E de un cuerpo cualquiera a una temperatura dada y la potencia emisiva total E_b del cuerpo negro a la misma temperatura, se denomina emisividad del cuerpo, o sea:

$$\frac{E}{E_b} = \text{Emisividad} = \epsilon \quad 14)$$

Ahora, bien, la potencia emisiva total del cuerpo negro, esta dada por la ecuación de la ley de Stefan-Boltzmann y se expresa de la siguiente manera.

$$E_b = \sigma T^4 \quad 15)$$

Donde:

E_b = Potencia emisiva del cuerpo negro.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, y es igual a 0.173×10^{-8} Btu/h pie² °R⁴.

T = Temperatura, °R.

Sustituyendo la ec.15) en la ec.14), obtenemos la potencia emisiva total o poder emisivo de un cuerpo cualquiera.

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad 16)$$

Donde:

ϵ = La emisividad del cuerpo.

Radiación entre dos superficie sólidas negras, separadas por un medio no absorbente.

Considérense dos superficies negras de áreas A_1 y A_2 . El área A_1 esta emitiendo energía a una velocidad proporcional a σT_1^4 y una determinada fracción de esta radiación es interceptada eventualmente y absorbida por A_2 . De idéntica manera A_2 emite energía a una velocidad proporcional σT_2^4 y una fracción de esta energía incide sobre A_1 y es absorbida. Entonces, el intercambio neto de calor entre A_1 y A_2 esta dado por la siguiente expresión.

$$E = \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \quad 17)$$

Donde:

F = Factor geométrico adimensional.

El factor de vista, factor de ángulo o - factor geométrico F , depende de la geometría de las dos superficies, de la relación espacial de una con respecto a otra y de la superficie escogida para la área. Si se - escoge A_1 para la área en la ecuación anterior, esta pue de ser escrita como.

$$E_{12} = \epsilon A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad 18)$$

Si la superficie considerada es A_2 , entonces tenemos.

$$E_{21} = \epsilon A_2 F_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad 19)$$

De las ecuaciones anteriores, podemos deducir.

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad 20)$$

El factor F_{12} puede ser considerado como la fracción de radiación emitida por A_1 que es interceptada por A_2 . Si la superficie A_1 lo único que ve es la superficie A_2 , entonces F_{12} es igual a la unidad.

En los hornos metalúrgicos, los refractarios influyen en la transferencia de calor por radiación, ya que incrementan la proporción de intercambio entre - dos superficies, reflejando la radiación que incide de - la o las fuentes de calor, hacia el o los vertederos. Pa - ra evaluar el intercambio de calor entre dos superficies en presencia de superficies refractarias, se pueden utilizar las ecuaciones 18) y 19), remplazando los factores F_{12} y F_{21} por los factores \bar{F}_{12} y \bar{F}_{21} llamados factores -

de intercambio.

Si el recinto de un horno puede dividirse en varias fuentes y vertederos, y el resto del recinto - lo constituyen las superficies refractarias a una temperatura uniforme T_R , entonces el factor F_{12} en función de los factores geométricos directos lo da la siguiente expresión.

$$F_{12} = F_{12} + F_{1R} \frac{F_{R2}}{1 - F_{RR}} \quad 21)$$

Donde:

F_{1R} = Factor geométrico entre A_1 y A_R .

A_R = Area del refractario.

F_{R2} = Factor geométrico entre A_R y A_2 , - por reflexión o reirradiación.

F_{RR} = Factor geométrico del A_R de si mismo por reflexión y reirradiación a A_1 y los demas vertederos.

T_R = Temperatura del refractario.

Si las superficies no son negras, sino grises, se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$E_{12} = \sigma A_1 \bar{F}_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad 22)$$

$$E_{21} = \sigma A_2 \bar{F}_{21} (T_1^4 - T_2^4) \quad 23)$$

Donde:

\bar{F}_{12} y \bar{F}_{21} son factores geométricos, llamados factores de intercambio en función de ϵ_1 y ϵ_2 .

- ϵ_1 = Emisividad del área receptora.
- ϵ_2 = Emisividad del gas de combustión, -
evaluada para una longitud de trayec-
toria de radiación L.

Para algunos casos simples, el factor -
puede ser calculado directamente. Por ejemplo.

Para dos grandes planos paralelos, tene-
mos:

$$\bar{\sigma}_{12} = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \quad (24)$$

En general, para dos superficies grises y
"n" número de superficies refractarias, en forma concén-
trica, tenemos:

$$A_1 \bar{\sigma}_{12} = \frac{X}{\frac{1}{A_1}(\epsilon_1 - 1) + \frac{1}{\frac{\epsilon_2}{X} A_1 + \frac{A_R}{1 + \frac{\epsilon_2/X}{1 - \epsilon_2/X} \frac{1}{F_{R_1}}}}} \quad (25)$$

Donde:

F_{R_1} = Factor de vista.

A_1 = Área receptora de calor.

A_R = Área de refractario.

$$X = \frac{\epsilon_2^2}{\epsilon_2 - \epsilon_{22}}$$

ϵ_{22} = Emisividad del gas de combustión, evaluada considerando una trayectoria de radiación de doble longitud.

Hasta la presente página, hemos comentado todo lo relacionado para la construcción de un horno; - por lo tanto hemos cubierto el primer objetivo de esta - tesis.

CAPITULO V

DISEÑO DE UN HORNO PARA LA FABRICACION DE ANODOS GALVANICOS DE ZINC Y ALUMINIO, PARA LA PROTECCION CATODICA.

El diseño de un horno no es muy complicado, sin embargo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

a) Volumen y masa del metal a fundir.

Para esto existen tablas diferentes de proveedores de crisoles, que permiten determinar el tamaño del crisol, para el volumen del metal que se desea fundir.

b) Temperatura de fusión del metal.

Los tipos de hornos diseñados para fundir aluminio y zinc, requieren temperaturas de fusión de 700 a 125 °C. Para alcanzar esta temperatura, se cuenta con dos tipos de combustibles principalmente; que son butano-propano y aceite diesel.

c) Posición del quemador.

Es muy importante colocar el quemador tangencialmente al crisol, con objeto de dar una orientación al flujo de la flama, la cual pegará contra la pared del refractario de forma circular y envolverá al crisol para calentarlo uniformemente, hasta la parte superior.

d) Cámara de combustión.

Todos los hornos de crisol, deben tener una cámara de combustión proporcionada al tamaño del crisol, para que la combustión proporcione al máximo el calor en la base del crisol. En general, será suficiente un espacio entre la pared del horno y el crisol de 50 a 100 cm.

La base que se toma para la construcción del presente horno, es la capacidad de material fundido por ciclo de operación.

La experiencia en fundición ha demostrado que un ciclo de operación, que utiliza un crisol con la capacidad del modelo AF250, utiliza un tiempo de 60 a 90 minutos.

Un crisol de grafito marca Morganite -- AF250 con capacidad de 86.7 Kg de aluminio, nos da la base para el inicio del diseño del horno.

La casa Morganite de México, S.A. ubicada en la calle Negra Modelo, en Naucalpan, Edo. de México; proporcionó los datos de los siguientes materiales:

a) Crisol de grafito AF250.

Diámetro exterior superior, 429 mm.

Diámetro exterior inferior, 280 mm.

Altura, 254 mm.

Area externa, 0.6363 m^2 .

Emisividad, 0.8

b) Corona de grafito XMCl22.

Diámetro exterior superior, 429 mm.

Diámetro exterior inferior, 429 mm.

Altura, 254 mm.

Area externa, 0.3423 m^2

Emisividad, 0.8

c) Base de grafito para el crisol AF250.

Diámetro exterior superior, 250 mm.

Diámetro exterior inferior, 200 mm.

Altura, 125 mm.

Area externa, 0.7247 m²

Emisividad, 0.8

Una vez conocidas las dimensiones anteriores, podemos determinar el tamaño de la cámara de combustión.

I DIMENSION DE LA CAMARA DE COMBUSTION.

Generalmente el fabricante del crisol especifica la dimensión del claro que debe dejarse, entre la superficie exterior del crisol y la pared del revestimiento interior de material refractario. Cuando se utiliza un crisol AF250 marca Morganite con capacidad de 86.7 Kg de aluminio, este espacio debe ser de 63.5 mm y la distancia entre la base del crisol y el fondo de la cámara de combustión, debe ser de 138 mm.

La figura No. 1 nos da una idea la forma y tamaño de la cámara de combustión; entendiéndose como tal, el lugar donde se lleva a cabo la combustión y la transmisión de calor a través del crisol, hacia el material por fundir.

En la parte superior de la cámara de combustión, se encuentran cuatro orificios, por donde salen los gases producto de la combustión. En la parte inferior, se encuentra un ducto por donde se introduce el combustible en condiciones para ser quemado, en la cámara de combustión.

En la parte inferior, se encuentra un segundo ducto, por donde se retiran los residuos del combustible que no llegó a quemarse completamente.

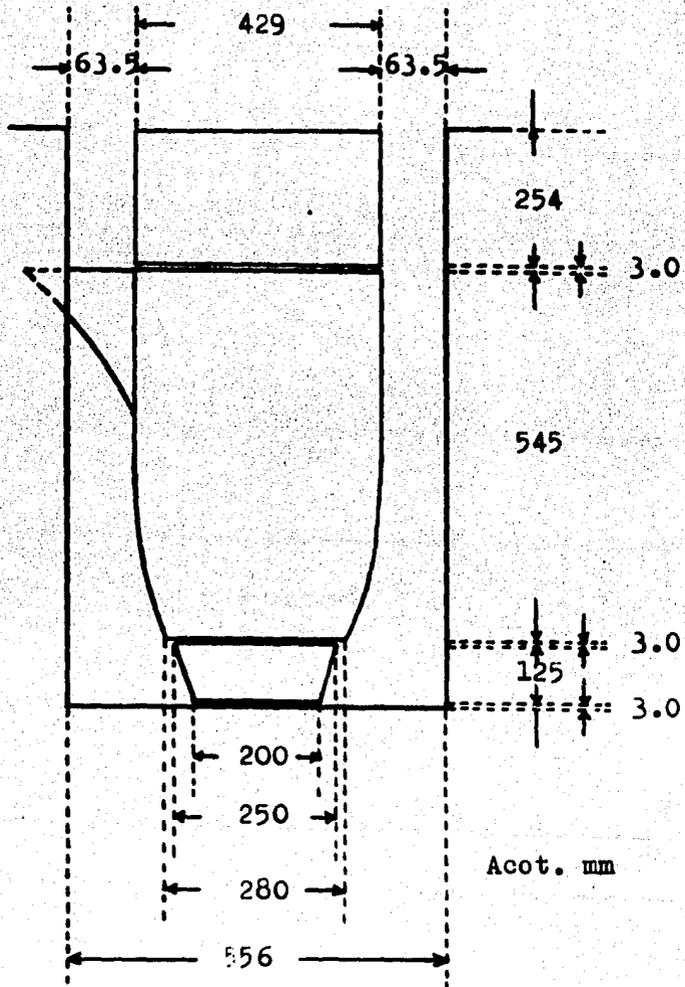


FIGURA No. 1

II COMBUSTIBLE DIESEL.

El horno que se diseña en el presente trabajo, utiliza combustible diesel y tiene las siguientes características: (datos proporcionados por el Instituto Mexicano del Petróleo)

a) Análisis.

C	-	86.0 %
H	-	10.9
S	-	1.1
N	-	0.1
Otros	-	1.9
		<hr/>
		100.0 %

b) Poder calorífico.

Diesel = 10,046.7 Kcal/Kg comb.

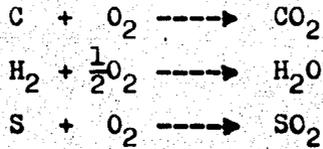
°API = 35.2

c) Estequiometría de la combustión.

Base: 1 Kg de combustible.

Elemento	Combustible	Peso Atómico	Moles
C	0.860 Kg	12.011 Kg/Kg mol	0.07160
H ₂	0.109	1.008	0.05406
S	0.011	32.064	0.00034
N ₂	0.001	14.006	0.00004

d) Reacciones de combustión.



e) Aire para la combustión.

El requerimiento de aire para la combustión, se calcula de acuerdo con las reacciones de combustión anteriores. El siguiente cuadro, muestra las cantidades de productos de la combustión y oxígeno requerido para la misma.

Elemento	Moles presentes - en la combustión.	oxígeno requeri- do para la com- bustión.
C	0.07160	0.07160
H ₂	0.05406	0.02703
S	0.00034	0.00034
	<hr/>	<hr/>
	0.12600	0.09897

Aire teórico requerido, seco:

$$\frac{0.09897 \times 29}{21} = 13.67 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{Kg de combustible}}$$

Usando un 10% de aire en exceso, para una buena combustión.

Aire total seco para la combustión.

$$13.67 + 1.37 = 15.04 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{Kg de combustible}}$$

El aire que se utiliza en la combustión, generalmente es el del medio ambiente, y este tiene un cierto grado de humedad. Dadas las condiciones atmosféricas variables, se supone una humedad de 0.01 Kg de agua/Kg de aire seco. Entonces la cantidad total de aire húmedo será:

$$15.04 + 0.15 = 15.19 \frac{\text{Kg de aire húmedo}}{\text{Kg de combustible}}$$

f) Balance de materia.

Entrada:

C del combustible	=	0.860 Kg
H del combustible	=	0.109
S del combustible	=	0.011
N del combustible	=	0.001
O del aire	=	3.158
N del aire	=	11.880
H ₂ O del aire	=	<u>0.150</u>
		16.169 Kg

Salida:

CO ₂ gases de combustión	=	2.0055 Kg
SO ₂ gases de combustión	=	0.0163
H ₂ O gases de combustión	=	0.6328
N gases de combustión	=	11.8816
O gases de combustión	=	<u>1.5650</u>
		16.1012 Kg

III PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES PARA EL CALCULO DEL CALOR TRANSMITIDO EN LA CALARA DE COMBUSTION.

Los diversos mecanismos de transmisión de calor de un cuerpo a otro cuerpo, dependen en gran parte de las temperaturas de dichos cuerpos. Los mecanismos de conducción y convección, dependen principalmente de la diferencia de temperatura y el nivel de temperatura no es de importancia en estos casos.

Se ha observado que el intercambio de la energía por el mecanismo de radiación aumenta considerablemente al incrementarse el nivel de temperaturas. Consecuentemente a bajas temperaturas, la transmisión total de calor depende casi por completo de los mecanismos de conducción y convección, a altas temperaturas la cantidad de energía transmitida depende principalmente del mecanismo de radiación.

Considerando los tres mecanismos de transmisión de calor, podemos establecer la siguiente ecuación para el cálculo del calor transmitido en la cámara de combustión.

$$q_{\text{neto}} = q_{\text{radiación}}(\text{combustible al crisol}) \\ + q_{\text{convección}}(\text{combustible al crisol}) \\ + q_{\text{conducción}}(\text{combustible al crisol})$$

Donde:

$$q_{\text{neto}} = \text{Calor transmitido en la cámara de combustión.}$$

q_{rad} = Calor transmitido por el mecanismo de radiación.

q_{conv} = Calor transmitido por el mecanismo de convección.

q_{cond} = Calor transmitido por el mecanismo de conducción.

En forma desarrollada tenemos:

$$q_{\text{rad}} = A_1 \epsilon_1 \sigma_1 (T_G^4 - T_1^4) \quad 2)$$

Esta ecuación se obtuvo en la página 72 - de la referencia bibliográfica 10.

$$q_{\text{conv}} = h_1 A_1 (T_G - T_1) \quad 3)$$

Esta ecuación se obtuvo en la página 45 - de la referencia bibliográfica 13.

$$q_{\text{cond}} = \frac{k}{L} A_1 (T_G - T_1) \quad 4)$$

Esta ecuación se obtuvo en la página 20 - de la referencia bibliográfica 13.

Donde:

A_1 = Área afectada por la radiación del combustible, m^2 .

A_1 = Área en que se tiene transmisión de calor por el mecanismo de convección, m^2 .

T_G = Temperatura media de los gases producto de la combustión, dentro de la

cámara de combustión, °K.

T_1 = Temperatura media del área de recepción de calor, °K.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann, 4.88×10^{-8} Kcal/h m² °K⁴.

$\bar{\delta}_{1G}$ = Factor de intercambio de energía por radiación. (radiación que parte del gas y es absorbida por A_1 directamente e indirectamente, debido a la reflexión y reradiación)

h_1 = Coeficiente de transmisión de calor, por el mecanismo de convección, para el área A_1 , Kcal/h m² °C.

k = Conductividad térmica de la masa de gas, Kcal/h m² °C/m.

L = Espesor de la masa de gas, m.

A continuación nos dedicaremos a calcular los valores de las temperaturas, áreas y constantes; para encontrar la cantidad de calor por los diferentes mecanismos de transmisión.

IV CALCULO DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL CRISOL, T_1 .

a) Para la fusión del aluminio.

La temperatura del crisol de un horno destinado a la fusión de aluminio, varía durante un ciclo de operación de 200 a 750 °C. Un ciclo de operación ocurre aproximadamente en un tiempo de 60 a 80 minutos. En este tiempo el aluminio alcanza su temperatura de fusión.

Un ciclo de operación consiste en el tiem

po que se ocupa para:

- 1) Llenar el crisol de aluminio.
- 2) Alcanzar la temperatura de fusión.
- 3) Llegar a la temperatura de colada.
- 4) Hacer la colada sobre moldes para anodos de sacrificio.
- 5) Hacer limpieza del crisol.

Con el objeto de poder obtener un valor de la temperatura media durante un ciclo de trabajo, se considerará que el suministro de calor es directamente - proporcional al tiempo. Con aproximación bastante a la - realidad. (comprobación experimental)

Cálculo del contenido de calor, calor absorbido o entalpia.

Debido a que el proceso se hace a presión constante utilizamos la definición de capacidad calorífica a presión constante.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = C_p \quad 5)$$

Despejando e integrando entre los límites T_1 y T_2 , tenemos:

$$\int_{H_1}^{H_2} dH = \Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad 6)$$

Donde:

ΔH = Entalpia o contenido de calor.

El Cp del aluminio esta dado por la siguiente ecuación. (dato obtenido del Chemical Engineer - Handbook, 3a. Edición.)

$$C_p = 4.8 + 0.00322T \frac{\text{calorias}}{\text{g mol } ^\circ\text{K}} \quad \text{de } 273 \text{ a } 931 \text{ } ^\circ\text{K} \quad 7)$$

$$C_p = 7.0 + 0.00 \frac{\text{calorias}}{\text{g mol } ^\circ\text{K}} \quad \text{de } 931 \text{ a } 1273 \text{ } ^\circ\text{K} \quad 8)$$

La cantidad de calor que se necesita para alcanzar la temperatura de fusión del aluminio, esta dado por:

$$q = \text{Calor sensible} + \text{Calor de fusión.} \quad 9)$$

En la tabla siguiente podemos encontrar - los valores anteriores:

Temperatura		Contenido de calor.	Calor - específico
$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{K}$	Kcal/Kg mat.	cal/g $^\circ\text{C}$
0	273	-----	0.2104
100	373	22.24	0.2224
200	473	46.86	0.2343
300	573	73.86	0.2462
400	673	103.28	0.2582
500	773	135.05	0.2701
600	873	169.20	0.2820
(s) 657	930	189.74	0.2888
(l) 657	930	284.34	0.2888
700	973	295.19	0.2594
800	1073	321.17	0.2594

El calor sensible del aluminio es de --
189.74 Kcal/Kg de material.

El calor de fusión del aluminio es de --
94.60 Kcal/Kg de material.

Sustituyendo valores en la ec. 9) tene-
mos:

$$q = 284.34 \text{ Kcal/Kg de material fundido.}$$

Tomando como base 80 minutos de un ciclo de operación para el aluminio, encontramos experimentalmente que a 40 minutos del ciclo de operación, la temperatura media coincide con la temperatura de fusión del material fundido, por tanto:

$$T_1 = 657 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ (930 } ^\circ\text{K)}$$

V CALCULO DE LA TEMPERATURA ADIABATICA - DE FLAMA, TAF.

Para el cálculo de la temperatura adiabática de flama TAF, utilizamos la siguiente expresión: - (dato obtenido en el texto Ingeniería Metalúrgica, Schumann Reinhart Jr. Cecsca, México 1968. Página 371)

$$\sum (H_T - H_{298})_p = \sum (H_T - H_{298})_r - \sum \Delta H_{298} \quad (10)$$

Donde:

$\sum (H_T - H_{298})_p$ = Entalpia de los productos de la combustión.

$\sum (H_T - H_{298})_r$ = Entalpia de los reactivos (combustible y aire).

$\sum \Delta H_{298}$ = Entalpia de la reacción - de combustión.

La tabla A-3 de la anterior referencia, - proporciona en forma directa los valores de $\sum (H_T - H_{298})_p$ en Btu/lb mol, para cada uno de los gases de combustión, a temperaturas determinadas.

Los datos empleados en el cálculo de la - TAF del combustible recomendado, son los siguientes:

Temperatura de referencia 77°F.

Poder calorífico neto 10,046.70 Kcal/Kg - de combustible.

Base: 1 Kg de combustible (10% exceso de aire).

El problema de calcular la TAF se reduce

a un cálculo por tanteos. Asignando diferentes temperaturas a los productos de la combustión, hasta resolver la ec. 10). Se realizaron las siguientes tentativa:

a) Temperatura supuesta 3400 °F.

$$(H_{3400} - H_{77})_p = 4,153.97 \text{ Kcal}$$

b) Temperatura supuesta 3500 °F.

$$(H_{3500} - H_{77})_p = 4,288.28 \text{ Kcal}$$

c) Temperatura supuesta 3700 °F.

$$(H_{3700} - H_{77})_p = 4,566.74 \text{ Kcal}$$

Interpolando gráficamente, se tiene:

$$\text{TAF} = 2040 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4704 \text{ }^{\circ}\text{K})$$

Esta temperatura TAF no es la correcta, - se necesita corregir por disociación.

Cálculo de la temperatura adiabática de flama TAF, corregida por disociación.

Este cálculo se hace con ayuda de gráficas que dan el % de disociación del CO_2 y del H_2O . (obtenidas en Chemical Engineer's Handbook, John Perry. McGraw Hill, New York. Edición 4a.)

Estas gráficas dan el contenido de calor por metro cúbico de gas de combustión. Debido a que las

gráficas estan referidas a 60 °F y 29.92 pulgadas de mercurio. Los volúmenes de los productos de combustión se corrigen a estas condiciones.

Tentativas realizadas:

Base: 1 Kg de combustible (10% de aire en exceso).

a) Temperatura supuesta, 3300 °F.

% de disociación CO₂ - 6.0

H₂O - 2.0

El contenido de calor en los gases de combustión es de 4,064.26 Kcal.

Calor disponible 4,395.63 Kcal, por lo tanto se supone una temperatura mayor.

b) Temperatura supuesta, 3400 °F.

% de disociación CO₂ - 7.5

H₂O - 2.5

El contenido de calor en los gases de combustión es de 4,279.47 Kcal.

Calor disponible 4,353.80 Kcal, por lo tanto se supone una temperatura mayor.

c) Temperatura supuesta, 3500 °F.

El contenido de calor en los gases de combustión es de 4,452.08 Kcal.

Calor disponible 4,031.64 Kcal, por lo tanto la temperatura de flama TAF se encuentra por una interpolación gráfica.

De esta manera se obtiene la TAF corregida por disociación.

$$TAF = 1895 \text{ } ^\circ\text{C}$$

VI CALCULO DE LA TEMPERATURA MEDIA DE LOS GASES PRODUCTO DE LA COMBUSTION CONTENIDOS EN LA CAMARA DE COMBUSTION.

La temperatura de flama producida en la combustión de combustible líquido diesel, utilizando 100% de aire teórico, más un 10% en exceso necesario para lograr una combustión completa y con una presión de una atmósfera, es de 1895 °C.

En este tipo de hornos la temperatura de los gases producto de la combustión a la salida del horno es de 982 °C. (dato obtenido experimentalmente)

Debido a la variación de temperaturas en la área de recepción de calor, la flama y los gases de combustión a la salida del horno, utilizamos la siguiente ecuación para el cálculo de la temperatura media de los gases producto de la combustión T_G , contenidos en la cámara.

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_y - \Delta t_x}{\ln \Delta t_y / \Delta t_x} \quad 12)$$

Donde:

Δt_m = Diferencia media logarítmica de temperaturas.

Δt_y = Diferencia existente entre la temperatura de flama y la temperatura me

media del crisol.

Δt_x = Diferencia existente entre la temperatura de los gases de combustión a la salida del horno y la temperatura media del crisol.

$$\Delta t_y = 1895 - 657 = 1238 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_x = 982 - 657 = 325 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_m = \frac{1238 - 325}{\ln 1238/325} = 672.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La diferencia media de temperaturas también se expresa de la siguiente manera:

$$T_G - T_1 = \Delta t_m \quad 13)$$

Donde:

T_G = Temperatura media de los gases de combustión.

T_1 = Temperatura media del crisol durante un ciclo de operación, igual a 657°C .

Sustituyendo valores en la ec. 13) y despejando T_G , tenemos:

$$T_G = 1329.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

VII CALOR TRANSMITIDO POR RADIACION.

A los niveles de temperatura encontrados en hornos destinados a la fusión del aluminio, zinc y sus respectivas aleaciones, el mecanismo de transferen--

cia de calor por radiación es de trascendental importancia.

La cantidad de energía calorífica transmitida por radiación dentro de la cámara de combustión, - puede ser calculada mediante la ecuación 2) de este mismo capítulo.

$$q_{G-1} = A_1 \bar{\sigma}_{1G} \sigma (T_G^4 - T_1^4) \quad 2)$$

Esta ecuación corresponde al caso de una envolvente de superficies grises, en la cual se tiene un combustible líquido gris (dentro de la cámara de combustión, tenemos un gas gris).

Antes de resolver la ecuación anterior, - es necesario evaluar el factor $A_1 \bar{\sigma}_{1G}$. Para ello se puede aplicar la siguiente expresión:

$$A_1 \bar{\sigma}_{1G} = \frac{x}{\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{\frac{\epsilon_G}{x} \left(A_1 + \frac{1}{1 + \frac{\epsilon_G/x}{1 - \epsilon_G/x}} \frac{A_R}{F_{R_1}} \right)}} \quad 14)$$

Esta ecuación se obtuvo de la página 115, capítulo IV de la referencia bibliográfica 10.

Donde:

F_{R_1} = Factor de vista.

A_1 = Área receptora de calor, m^2 .

ϵ_1 = Emisividad del área receptora.

A_R = Área del refractario, m^2 .

ϵ_G = Emisividad del gas, evaluada para una longitud de trayectoria de radiación L .

$$x = \frac{\epsilon_G^2}{2\epsilon_G - \epsilon_{2G}} \quad 15)$$

ϵ_{2G} = Emisividad del gas, evaluada considerando una trayectoria de radiación de doble longitud.

La ecuación 15) se obtuvo de la página 114, capítulo IV de la referencia bibliográfica 10.

A continuación calcularemos los valores de las anteriores consideraciones:

a) Cálculo de la área receptora de calor.

$$A_1 = 0.6363 \text{ m}^2.$$

Dato obtenido en la página 61 de este mismo capítulo.

b) Cálculo de la emisividad del área receptora de calor.

$$\epsilon_1 = 0.8$$

Dato obtenido en la página 61 de este mismo capítulo.

c) Cálculo de la área del material refractario.

Con los datos de la cámara de combustión, de la página 63 podemos calcular la área del material refractario.

$$A_R = A_{R_1} + A_{R_2} \quad 16)$$

$$A_{R_1} = \pi Dh = 1.6349 \text{ m}^2$$

$$A_{R_2} = \pi/4(D^2 - d^2) = 0.2113$$

Sustituyendo los anteriores en la ec. 16),
tenemos:

$$A_R = 1.6462 \text{ m}^2$$

d) Cálculo del factor de vista F_{R_1} .

$$F_{R_1} = 0.62$$

Este dato se obtuvo en la página 78 de la referencia bibliográfica 17.

e) Cálculo de las emisividades ϵ_G y ϵ_{2G} .

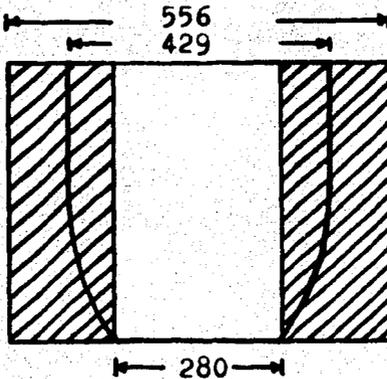
Los gases producto de la combustión están principalmente constituidos por bióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno. A las temperaturas encontradas en una cámara de combustión de un horno para la fusión de aluminio y zinc, únicamente el bióxido de carbono y el vapor de agua, presentan bandas de absorción de energía en regiones de longitud de onda pertenecientes al ex spectrum infrarrojo.

Se ha observado que tanto la emisividad del vapor de agua ϵ_w , como la emisividad del dióxido de carbono ϵ_c , son función de la longitud media de la tra--

yectoria de la radiación L. de la presión total P_t y de la temperatura de los gases producto de la combustión T_G .

i) Cálculo de la longitud media de la trayectoria de radiación L.

La forma irregular de la cámara de combustión, la podemos sustituir por una gran cantidad de paralelepípedos rectangulares que rodean a la cámara de combustión y cuya dimensión característica es X' .



X' se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$X' = \frac{d_c - \frac{d_{sup\ c} + d_{inf\ c}}{2}}{2} \quad (17)$$

Esta ecuación se obtuvo en la página 44 de la referencia bibliográfica 17.

Donde:

d_c = Diámetro de la cámara de combustión.

$d_{sup\ c}$ = Diámetro superior del crisol.

$d_{inf c}$ = Diámetro inferior del crisol.

sustituyendo valores en la ec. 17) tenemos:

$$X' = 0.1008 \text{ m (0.287 ft)}$$

El valor por el cual debe de multiplicarse X' para obtener un valor de L representativo es aproximadamente 0.87, si se considera un paralelepípedo rectangular 1:2:6 y dentro del cual se radia hacia todas las caras.

El anterior valor se obtuvo en la página 88 de la referencia bibliográfica 10.

Multiplicando X' por dicho valor, tenemos:

$$L = 0.0877 \text{ m (0.2496 ft)}$$

ii) Cálculo de las presiones parciales - del dióxido de carbono y del vapor de agua, contenidos en los gases producto de la combustión.

De los datos del balance de materia obtenidos en la página 66 de los gases producto de la combustión a la salida del horno, tenemos:

CO_2	= 2.0055 Kg	ó	0.0455 Kg mol
H_2O	= 0.6328		0.0351
N_2	= <u>11.8816</u>		<u>0.4243</u>
	14.5199 Kg		0.5049 Kg mol

La ley de Dalton de las presiones parciales para una mezcla de gases, puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{P_t}{n_t} = \frac{P_w}{n_w} = \frac{P_c}{n_c} \quad 18)$$

Donde:

P_t = Presión total.

P_w = Presión del vapor de agua.

P_c = Presión del dióxido de carbono.

n_t = Número de moles totales.

n_w = Número de moles de vapor de agua.

n_c = Número de moles de dióxido de carbono.

$P_t = 0.7951 \text{ Kg/cm}^2$, en la Ciudad de México.

Despejando P_w y P_c en la ec. 18) y sustituyendo valores tenemos:

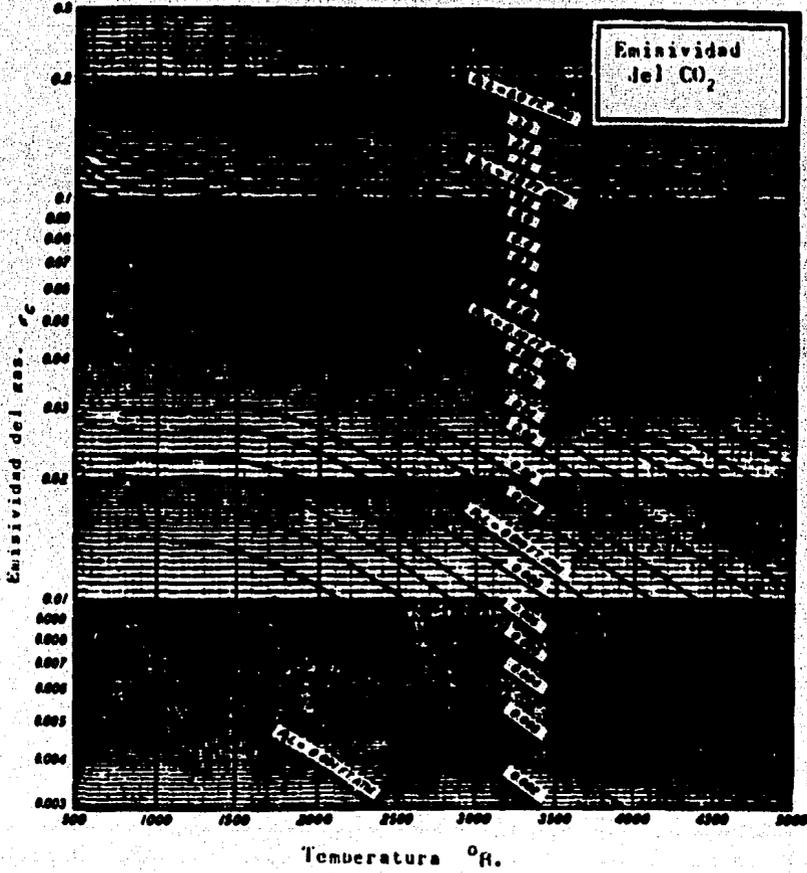
$$P_w = \frac{P_t}{n_t} \times n_w = 0.0552 \text{ Kg/cm}^2 \quad (0.0534 \text{ atm})$$

$$P_c = \frac{P_t}{n_t} \times n_c = 0.0716 \text{ Kg/cm}^2 \quad (0.0693 \text{ atm})$$

La gráfica A de la siguiente hoja, nos da el valor de la emisividad del dióxido de carbono ϵ_c en función de $P_c L$ y de la temperatura de los gases producto de la combustión T_G .

$$P_c L = 0.0693 \times 0.2496 = 0.0173 \text{ ft atm}$$

$$T_G = 2,884.29 \text{ }^\circ\text{R}$$



Gráfica A
Emissividad del CO₂

$$\epsilon_c = 0.023$$

La gráfica B de la hoja 86 , nos da el valor de la emisividad ϵ_w en función de $P_w L$ y T_G .

$$P_w L = 0.0552 \times 0.2496 = 0.0137 \text{ ft atm}$$

$$T_G = 2,884.29 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\epsilon'_w = 0.007$$

Como la presión de vapor del agua no es -
cero, tenemos que hacer la siguiente corrección; en fun-
ción de $P_w + P_t/2$ y de $P_w L$. De la gráfica C de la página
38. tenemos:

$$P_w + P_t/2 = 0.4115$$

$$P_w L = 0.0137 \text{ ft atm}$$

$$C_w = 0.9$$

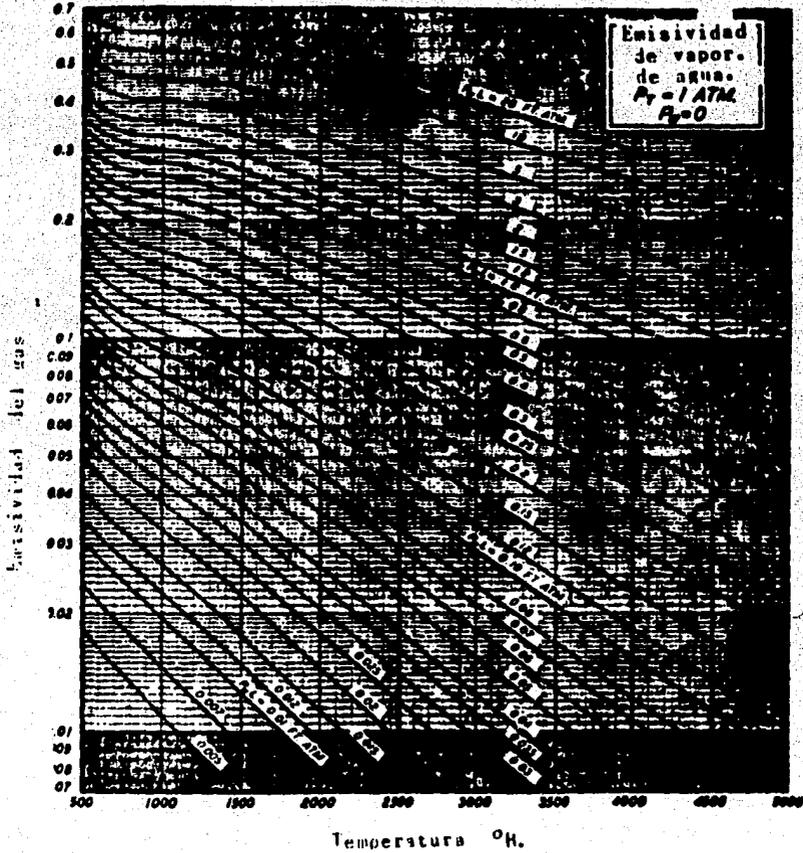
Añadiendo el valor de C_w al valor de ϵ'_w ,
tenemos que multiplicar C_w por ϵ'_w .

$$\epsilon_w = 0.0063$$

La gráfica D de la hoja 88 , nos da el valor de la corrección de la emisividad debida a la presen-
cia de dióxido de carbono y vapor de agua, en función de:

$$P_w L + P_c L = 0.0310$$

$$\frac{P_w}{P_c + P_w} = 0.4352$$



Gráfica B

Emissividad del vapor de agua

$$\Delta \epsilon = 0.0000$$

La emisividad del gas evaluada para una longitud de trayectoria de radiación L, es:

$$\epsilon_G = \epsilon_w + \epsilon_c + \Delta \epsilon = 0.0293$$

Al valor de ϵ_G debe añadirse 0.075 para tomarse en consideración la luminosidad de la flama. (este valor se obtuvo en la página 103 de la referencia 10)

El valor final de ϵ_G es el siguiente:

$$\epsilon_G = 0.1043$$

iii) Cálculo de ϵ_{2G} para una trayectoria doble.

Para la determinación de ϵ_{2G} se siguen exactamente los mismos pasos que en el caso anterior. Por lo que solo indicaremos los valores con que se entran en las gráficas A, B, C y D.

$$P_c 2L = 0.0346 \text{ ft atm}$$

$$T_G = 2,884.29 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\epsilon_{2G_c} = 0.034$$

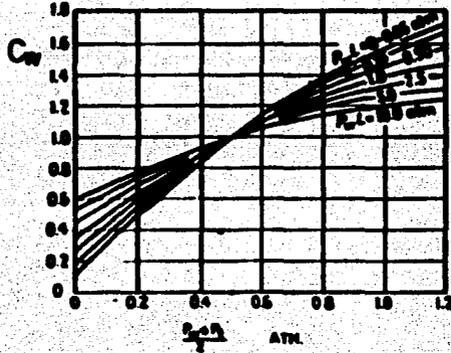
$$P_w 2L = 0.0266 \text{ ft atm}$$

$$T_G = 2,884.29 \text{ } ^\circ\text{R}$$

$$\epsilon_{2G_w} = 0.0270$$

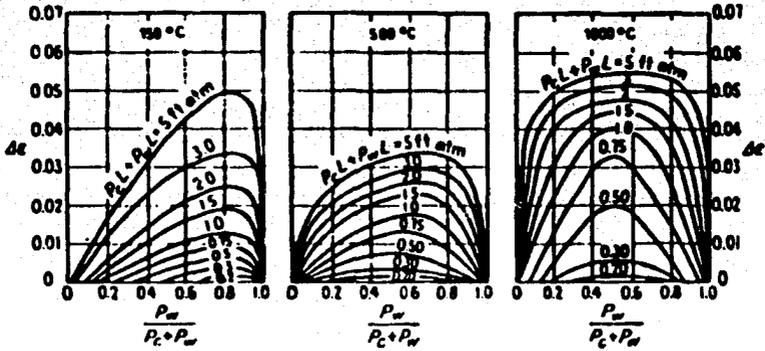
$$P_w / P_c + P_w = 0.4352$$

$$P_w 2L + P_c 2L = 0.0612$$



Gráfica C

Factor de corrección para la emisividad del vapor de agua para valores de P_w diferentes a cero.



Gráfica D

Corrección de la emisividad debida a la presencia de bióxido de carbono y de vapor de agua.

$$\Delta \epsilon = 0.000$$

$$\epsilon_{2G} = \epsilon_{2G_w} + \epsilon_{2G_c} + \Delta \epsilon = 0.0610$$

Al valor de ϵ_{2G} debe añadirse $1 - 0.92$ para tomar en consideración la luminosidad de la flama. (este valor se obtuvo en la página 102 de la referencia bibliográfica 10)

El valor final de ϵ_{2G} es el siguiente:

$$\epsilon_{2G} = 0.2054$$

$$f) \text{ Cálculo de } x = \frac{\epsilon_G^2}{2\epsilon_G - \epsilon_{2G}}$$

$$x = 3.3995$$

El valor de $A_1 \overline{\sigma}_{1G}$ se obtiene de la ec. 14) de la página 78 .

$$A_1 \overline{\sigma}_{1G} = 0.3901$$

Este resultado es válido únicamente si la emisividad del material refractario es cero. Pero si este material es gris, la ecuación que deberá aplicarse será la siguiente: (esta ecuación se obtuvo en la página de la referencia bibliográfica 17)

$$A_1 \overline{\sigma}_{1G} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\epsilon_{R1}} - 1 \right) + \frac{1}{\epsilon_G \left(A_1 + \frac{A_R}{1 + \frac{\epsilon_G}{1 - \epsilon_G} \frac{1}{F_{R1}}} \right)}}$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior, tenemos:

$$A_1 \bar{\sigma}_{1G} = 0.2474$$

Para fines teóricos, se recomienda un valor promedio de $A_1 \bar{\sigma}_{1G}$. Por lo tanto tenemos:

$$A_1 \bar{\sigma}_{1G} = 0.3187$$

Conocido el valor del factor $A_1 \bar{\sigma}_{1G}$ podemos aplicar la ec. 2) de este mismo capítulo, para el cálculo de calor transmitido por radiación dentro de la cámara de combustión del horno.

$$q_{\text{rad}} = A_1 \bar{\sigma}_{1G} \sigma (T_G^4 - T_1^4) \quad 2)$$

Sustituyendo valores en la ecuación anterior, tenemos:

$$q_{\text{rad}} = 102\,419.64 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

VIII CALOR TRANSMITIDO POR CONVECCION.

La cantidad de calor transmitido por el mecanismo de convección, entre los gases de combustión y el crisol, puede ser calculado utilizando la ecuación 3).

$$q_{\text{conv}} = h_{G1} A_1 (T_G - T_1) \quad 3)$$

El término h_{G1} , representa el coeficiente de transmisión de calor por convección, entre el gas y el área A_1 , puede ser evaluado mediante la expresión si-

guiente, de origen empírico: (dato obtenido del texto - Criswold Fuels Combustion And Furnaces. 1a. Edición, capítulo 13, página 355)

$$h_{G1} = \frac{1.507 + 0.1034V}{\Delta T/180} \quad (20)$$

Donde:

h_{G1} = Coeficiente de transmisión de calor por convección, entre el gas y el área receptora de calor A_1 , Kcal/h m^2 °K.

V = Velocidad media de los gases de combustión, dentro de la cámara.

ΔT = Diferencia media logarítmica de temperaturas, entre los gases de combustión y el crisol.

$$\Delta T = 672.05 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (945.05 \text{ } ^\circ\text{K})$$

$$V = 60 \text{ m/seg}$$

El dato anterior de velocidad media de los gases, se obtuvo experimentalmente en la Fundición - Rayo, ubicada en Naucalpan Edo. de México.

Sustituyendo valores en la ec. 20), tenemos:

$$h_{G1} = 1.4687 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$A_1 = 0.6363 \text{ m}^2$$

$$T_G = 1602 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$T_1 = 930 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Sustituyendo los anteriores valores en la ec. 3), tenemos:

$$q_{\text{conv}} = 628.00 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

De lo anterior, podemos observar que la cantidad de energía transmitida por convección dentro de la cámara de combustión, es despreciable comparada con la transmitida por radiación.

La cantidad de calor transmitida por convección, entre la pared interior del revestimiento del material refractario y el crisol, es todavía menor que aquella que se transmite, entre los gases de combustión y el crisol. Por tal consideración lo despreciaremos en el balance final de calor.

IX CALOR TRANSMITIDO POR CONDUCCION.

La energía transmitida por el mecanismo de conducción, entre los gases producto de la combustión y el crisol, puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$q_{\text{cond}} = \frac{k}{L} A_1 (T_G - T_1) \quad 4)$$

Donde:

L = Espesor medio de la masa de gas a través del cual se transmite el calor por conducción, m.

k = Conductividad térmica de la masa de gas, Kcal/h m² °C/m.

A_1 = Area receptora de calor, m^2 .

T_1 = Temperatura media del área receptora de calor, $^{\circ}C$.

T_G = Temperatura media de los gases producto de la combustión, $^{\circ}C$.

El valor de la conductividad térmica de la masa de gas es aproximadamente:

$$k = 0.0193 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^{\circ}C/m$$

Este dato se obtuvo de la referencia bibliográfica 11.

Sustituyendo valores en la ec. a), tenemos:

$$q_{\text{cond}} = 94.10 \frac{\text{Kcal}}{h}$$

X CALCULO DE LAS PERDIDAS DE CALOR.

Las más importantes de las pérdidas de calor, que deben ser consideradas en el balance térmico de un horno de crisol son:

- 1) Pérdida de calor en los gases de combustión, que salen al exterior del horno.
- 2) Pérdida de calor a través de las paredes del horno.
- 3) Pérdida del calor por radiación de la superficie de metal fundido expuesta al aire.

1) Cálculo de la pérdida de calor en los gases de combustión que salen del horno:

Esta pérdida de calor se puede calcular utilizando la expresión siguiente:

$$q = m_g C_p (T_{GS} - T_o) G \quad 21)$$

Esta ecuación se obtuvo en la página de la referencia bibliográfica 17.

Donde:

m_g = Masa de los gases producto de la combustión, Kg.

C_p = Calor específico de los gases de combustión, kcal/Kg °C.

T_{GS} = Temperatura de los gases producto de la combustión, al salir del horno, °C.

T_o = Temperatura del medio ambiente exterior, °C.

G = Gasto de combustible requerido por el horno, m³/h.

a) Cálculo de m_g .

$$m_g = 16.1012 \frac{\text{Kg de gases de combustión}}{\text{Kg de combustible}}$$

Dato obtenido en la página 66 de esta tesis.

b) Cálculo de C_p .

El cálculo del calor específico de la mezcla de gases producto de la combustión, lo hacemos utilizando la siguiente expresión:

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{p_i} m_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (22)$$

Donde:

C_{p_i} = Capacidad calorífica de cada elemento de los gases producto de la combustión.

m_i = masa de cada elemento de los gases producto de la combustión.

Sustituyendo valores obtenemos la siguiente tabla:

		1000 °C		900 °C		800 °C	
Elemento	m_i Kg	C_{p_i}	$C_{p_i} m_i$	C_{p_i}	$C_{p_i} m_i$	C_{p_i}	$C_{p_i} m_i$
CO ₂	2.0055	0.310	0.6217	0.305	0.6267	0.300	0.6016
H ₂ O	0.6328	0.595	0.3765	0.575	0.3638	0.550	0.3480
N ₂	11.8816	0.291	3.4575	0.287	3.4100	0.283	3.3624
SO ₂	0.0163	0.168	0.0027	0.160	0.0026	0.154	0.0025
O ₂	1.5650	0.248	0.3870	0.245	0.3836	0.243	0.3799

Utilizando los valores correspondientes a 1000 °C en la ec. 22), tenemos:

$$C_p = 0.3009$$

c) Cálculo de T_{GS} .

$$T_{GS} = 982 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dato obtenido en la página 76 de esta tesis.

d) Cálculo de G.

El gasto de combustible requerido por el horno, es incognita en la ec. 21).

Sustituyendo los valores conocidos en la ec. 21), tenemos:

$$q = 4\ 660.74\text{G}$$

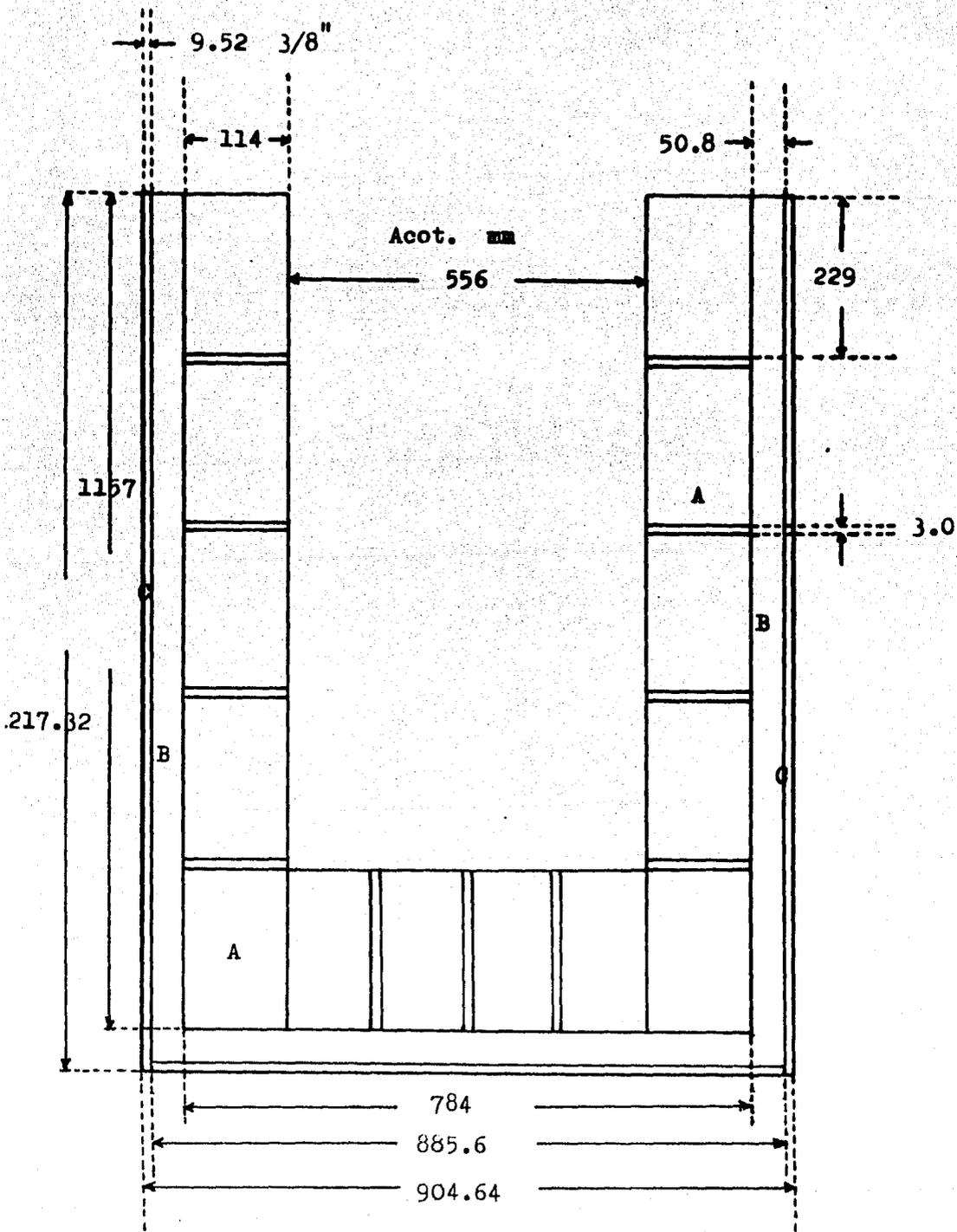
2) Pérdida de calor a través de las paredes del horno.

Para evaluar la pérdida de calor a través de las paredes del horno, es necesario conocer los espesores adecuados de: Material refractario, material aislante y envolvente.

En la hoja siguiente, podemos encontrar los valores correspondientes a las dimensiones del horno.

El calor transmitido al exterior, por las paredes del horno, puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{T_R - T_o}{\frac{\text{Esp}_A}{k_{A A}} + \frac{\text{Esp}_B}{k_{B B}} + \frac{\text{Esp}_C}{k_{C C}}} \quad 23)$$



Donde:

- T_R = Temperatura del material refractario, °C.
 T_O = Temperatura del medio ambiente, °C.
 A_A = Area del material refractario, m².
 A_B = Area del material aislante, m².
 A_C = Area de la envolvente metálica, m².
 k_A = Conductividad térmica del material refractario, Kcal/h m² °C/m.
 k_B = Conductividad térmica del material aislante, Kcal/h m² °C/m.
 k_C = Conductividad térmica de la envolvente metálica, Kcal/h m² °C/m.
 Esp_A = Espesor del material refractario, m.
 Esp_B = Espesor del material aislante, m.
 Esp_C = Espesor de la envolvente metálica, m.

a) Cálculo de T_R .

La temperatura del material refractario, se puede calcular mediante la ecuación siguiente:

$$T_R^4 = T_G^4 - \frac{T_G^4 - T_1^4}{1 + \frac{\epsilon_G}{F_{R1}(1-\epsilon_G)} + \frac{\epsilon_G(1-\epsilon_1)}{\epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_G}{F_{R1}(1-\epsilon_G)} + \frac{A_R}{A_1} + 1 \right)}$$

24)

Esta ecuación se obtuvo en la página 110 de la referencia bibliográfica 10.

Donde:

$$T_G = 1602 \text{ } ^\circ\text{K.}$$

$$T_1 = 930 \text{ } ^\circ\text{K.}$$

Donde:

T_R = Temperatura del material refractario, °C.

T_O = Temperatura del medio ambiente, °C.

A_A = Area del material refractario, m².

A_B = Area del material aislante, m².

A_C = Area de la envolvente metálica, m².

k_A = Conductividad térmica del material refractario, Kcal/h m² °C/m.

k_B = Conductividad térmica del material aislante, Kcal/h m² °C/m.

k_C = Conductividad térmica de la envolvente metálica, Kcal/h m² °C/m.

Esp_A = Espesor del material refractario, m.

Esp_B = Espesor del material aislante, m.

Esp_C = Espesor de la envolvente metálica, m.

a) Cálculo de T_R .

La temperatura del material refractario, se puede calcular mediante la ecuación siguiente:

$$T_R^4 = T_G^4 - \frac{T_G^4 - T_1^4}{1 + \frac{\epsilon_G}{F_{R1}(1-\epsilon_G)} + \frac{\epsilon_G(1-\epsilon_1)}{\epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_G}{F_{R1}(1-\epsilon_G)} + \frac{A_R}{A_1} + 1 \right)}$$

24)

Esta ecuación se obtuvo en la página 110 de la referencia bibliográfica 10.

Donde:

$T_G = 1602$ °K.

$T_1 = 930$ °K.

$$\begin{aligned} \epsilon_G &= 0.1043 \\ \epsilon_1 &= 0.8000 \\ F_{R1} &= 0.6200 \\ A_R &= 1.8638 \text{ m}^2. \\ A_1 &= 0.6363 \text{ m}^2. \end{aligned}$$

Sustituyendo valores en la ec. 24), tenemos:

$$T_R = 1137 \text{ }^\circ\text{C} \quad (1410 \text{ }^\circ\text{K})$$

b) Cálculo de T_o .

$$T_o = 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

Esta temperatura corresponde a la del medio ambiente.

c) Cálculo de Esp_A , k_A y A_A .

$$\text{Esp}_A = 0.114 \text{ m}$$

Ver dibujo de la página 97 de esta misma tesis.

$$k_A = 13.7 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ }^\circ\text{C/m.}$$

Este dato lo proporcionó la casa A.P. -- Green de México.

$$A_A = \pi Dh + \pi r^2 = 1.8638 \text{ m}^2$$

d) Cálculo de Esp_B , k_B y A_B .

$$Esp_B = 0.0508 \text{ m (2 pulgadas)}$$

Ver dibujo de la página 97 de esta misma tesis.

$$k_B = 0.496 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/m.}$$

Este dato lo proporcionó la casa A.P. -- Green de México.

$$A_B = \pi Dh + \pi r^2 = 3.3324 \text{ m}^2$$

e) Cálculo de Esp_C , k_C y A_C .

$$Esp_C = 0.00952 \text{ m (3/8 de pulgada)}$$

Ver dibujo de la página 97 de esta misma tesis.

$$A_C = \pi Dh + \pi r^2 = 3.9763$$

$$k_C = 11.48 \text{ Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/m.}$$

Este dato lo proporcionó la casa A.P. -- Green de México.

Una vez obtenidos los valores anteriores, los sustituimos en la ec. 23) y tenemos:

$$q = 31\,643.06 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

3) Pérdida del calor por radiación de la superficie de metal fundido, expuesta

Al aire.

El cálculo lo hacemos utilizando la siguiente ecuación:

$$q_{mf} = \sigma A_1 F_{12} \epsilon_1 \epsilon_2 (T_2^4 - T_1^4) \quad (25)$$

Donde:

q_{mf} = Pérdida de calor por radiación de la superficie expuesta, Kcal/h.
 $= 4.88 \times 10^{-8} \text{Kcal/h m}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4$.

A_1 = Area de la superficie expuesta, 0.117 m^2 .

F_{12} = Factor de vista, 1 ya que no hay re irradiación del aire a la superficie expuesta.

ϵ_1 = Emisividad de la superficie expuesta, 0.06

ϵ_2 = Emisividad del aire, 1.

T_2 = Temperatura de la superficie de metal fundido, $930 \text{ } ^\circ\text{K}$.

T_1 = Temperatura ambiente, $293 \text{ } ^\circ\text{K}$.

Sustituyendo valores en la ec. 25), tenemos:

$$q_{mf} = 203.03 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

XI BALANCE TERMICO DEL HORNO

a) Calor utilizado:

Calor transmitido por ra

diación, dentro de la -
cámara de combustión.----- 102 419 .64

Calor transmitido por -
convección, entre los -
gases y el crisol.----- 628 .00

Calor transmitido por -
conducción, entre el -
crisol y el metal fundi
do.----- 94 .10

Total 103 141 .74

b) Pérdidas de calor:

Pérdida de calor de los
gases producto de la --
combustión, que salen -
al exterior del horno.----- 4 660.74G

Pérdida de calor a tra-
vés de las paredes del
horno.----- 31 643.06

Pérdida de calor por -
radiación de la super-
ficie de metal fundida,
expuesta al aire.----- 203.03

Total 31 846.09 + 4 660.74G

c) Calor cedido por el combustible:

gasto de diesel por el
poder calórico del mis
mo.----- 10 046.70G

Total 10 046.70G

El balance térmico del horno durante la combustión, es el siguiente:

Calor cedido por el combustible = Calor utilizado + Pérdidas de calor.

Sustituyendo valores en el anterior balance, encontramos el gasto en masa del combustible diesel.

$$G = 25.0629 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

XII CALCULO DEL COMBUSTIBLE LIQUIDO DIESEL, REQUERIDO POR EL HORNO DURANTE LA FUSION.

Para el cálculo del combustible diesel, utilizamos la siguiente ecuación:

$$V = \frac{G}{\rho_c} \quad 26)$$

Donde:

V = Gasto en volumen del combustible diesel, litros/h.

G = Gasto en masa del combustible diesel, Kg/h.

ρ_c = Densidad del combustible diesel, -- Kg/litro

a) Cálculo de la densidad del combustible diesel.

La densidad del combustible diesel la podemos calcular con la siguiente ecuación:

$$\rho_C = P.e.C \rho_{Ag} \quad 27)$$

Donde:

ρ_C = Densidad del combustible diesel, --
Kg/litro.

P.e.C = Peso específico del combustible diesel, sin unidades.

ρ_{Ag} = Densidad del agua, 1 Kg/litro.

b) Cálculo del peso específico del combustible diesel, P.e.C.

El cálculo del peso específico del combustible diesel, lo hacemos mediante la siguiente ecuación:

$$P.e.C \frac{60 \text{ } ^\circ\text{C}}{60 \text{ } ^\circ\text{C}} = \frac{141.5}{\text{ } ^\circ\text{API} + 131.5} \quad 28)$$

Donde:

$$\text{ } ^\circ\text{API} = 35.2$$

Este dato se obtuvo en la página 64 de esta misma tesis.

Sustituyendo el valor en la ec. 28), tenemos:

$$P.e.C \frac{60 \text{ } ^\circ\text{C}}{60 \text{ } ^\circ\text{C}} = 0.8488$$

Sustituyendo este valor en la ec. 27), tenemos:

$$\rho_C = 0.8488 \frac{\text{Kg}}{\text{litro}}$$

Sustituyendo en anterior valor en la ec. 26), tenemos:

$$V = 29.52 \frac{\text{litros}}{\text{h}}$$

XIII EFICIENCIA TERMICA TEORICA DEL HORNO.

La eficiencia térmica teórica del presente horno, la obtenemos utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Eficiencia teórica} = \frac{\text{Calor utilizado}}{\text{Calor cedido por el combustible.}} \quad 29)$$

Sustituyendo los valores en la ec. 29), -
tenemos:

$$\text{Eficiencia teórica} = 0.4096 \quad (40.96 \%)$$

XIV EFICIENCIA TERMICA REAL DEL HORNO.

La eficiencia de un horno es importante, ya que en ella nos basamos para aceptar si se construye el equipo. Generalmente las eficiencias de los hornos - de crisol varían de 10 a 30%. Lo anterior depende de - los materiales a utilizar; así como las dimensiones del crisol, material refractario, materiales aislantes, cámara de combustión y posición del quemador entre otros.

Antes de calcular la eficiencia real del horno del presente trabajo, es conveniente hacer notar lo siguiente:

Se comentó con personas especializadas - en la fabricación de hornos, la relación que existía en

tre el cálculo del diseño de un horno teóricamente y el cálculo de un horno en forma práctica. Diferentes diseñadores concluyeron que, la única relación entre un diseño teórico y un diseño práctico, consiste en que la eficiencia real de un horno diseñado prácticamente, es equivalente al 50% de la eficiencia de un horno diseñado teóricamente.

Los comentarios anteriores se hicieron con los departamentos de diseño de las casas comerciales: Morganite de México; Kintel, S.A. y FOSECO.

La eficiencia térmica real del horno es - la siguiente:

$$\begin{array}{l} \text{Eficiencia} \\ \text{real} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Eficiencia} \\ \text{teórica} \end{array} \times 0.5 \times 100 \quad (30)$$

Sustituyendo valores en la ec. 30), tenemos:

$$\text{Eficiencia real} = 20.48\%$$

Como podemos ver la eficiencia se encuentra entre el rango de eficiencias de hornos de crisol antes mencionado.

CAPITULO VI

TIPOS, FORMAS Y MOLDES DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO PARA LA PROTECCION CATODICA.

Existe una gran variedad de ánodos de sacrificio. El tipo y forma de estos ánodos depende del uso a que se tenga destinado, además de la casa que los expenda.

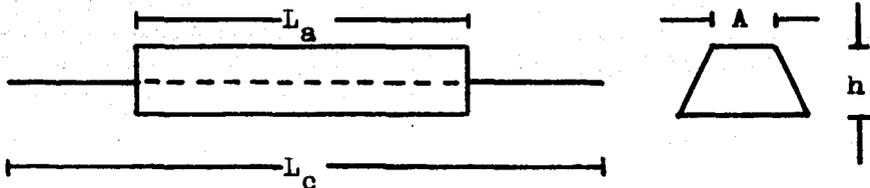
A continuación daremos algunos tipos y formas de ánodos de mayor uso en la protección catódica.

Para protección catódica en tanques de almacenamiento, barcos tanque e intercambiadores de calor, se tienen los siguientes ánodos:

TIPO AN-1

MODELO	PESO	A	h	La	Lc
AN-11	7.711	50.8	50.8	914.4	1219.2
AN-12	9.525	50.8	50.8	1219.2	1524.0
AN-13	10.886	50.8	50.8	609.6	914.4
AN-14	11.793	76.2	76.2	1524.0	1828.8
AN-15	16.329	76.2	76.2	914.4	1219.2

FORMA:



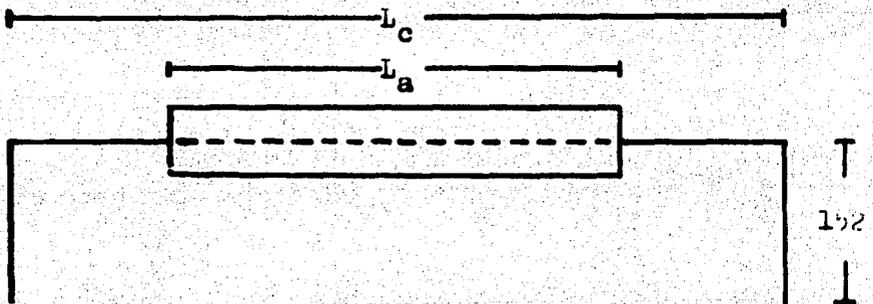
Nota:

El peso de los ánodos es en kilogramos.
Las dimensiones del ánodo estan en mm.

TIPO AN-2

MODELO	PESO	A	h	La	Lc
AN-21	7.705	50.8	50.8	914.4	1066.8
AN-22	9.519	50.8	50.8	1219.2	1371.6
AN-23	10.879	76.2	76.2	609.6	762.0
AN-24	16.318	76.2	76.2	914.4	1066.8

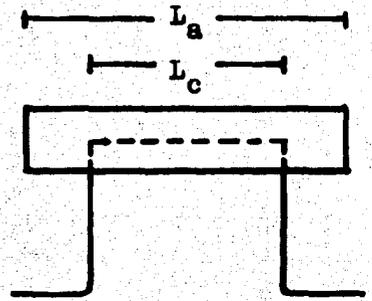
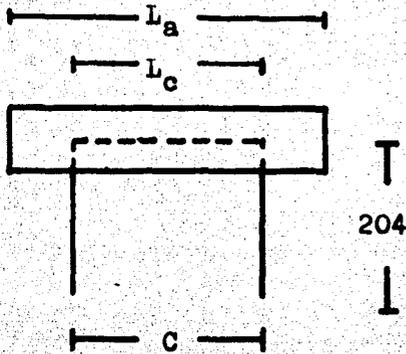
FORMA:



TIPO AN-3

MODELO	PESO	A	h	La	Lc	C
AN-31	9.071	50.8	50.8	1219.2	914.4	609.6
AN-32	11.339	50.8	50.8	1524.0	1219.2	762.0
AN-33	21.772	76.2	76.2	1219.2	914.4	609.6
AN-34	10.886	76.2	76.2	609.6	508.0	406.4
AN-35	18.143	101.6	101.6	609.6	508.0	406.4

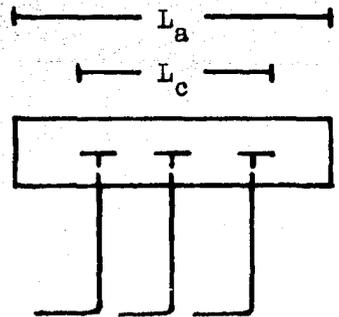
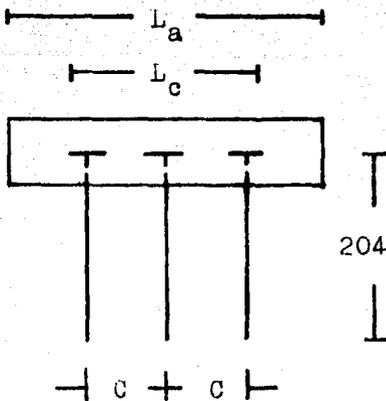
FORMA:



TIPO AN-4

MODELO	PESO	A	h	La	Lc	C
AN-41	23.571	76.2	76.2	1397.0	1219.2	381.0
AN-42	18.143	76.2	76.2	965.2	762.0	304.8

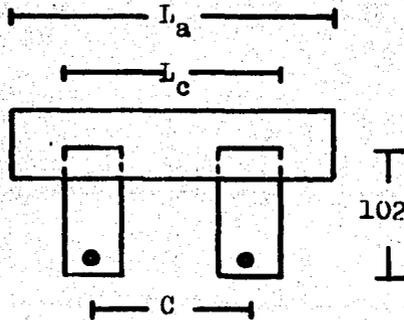
FORMA:



TIPO AN-5

MODELO	PESO	A	h	La	Lc	C
AN-51	9.065	50.8	50.8	1219.2	914.4	609.6
AN-52	11.339	50.8	50.8	1524.0	1219.2	914.4
AN-53	16.329	76.2	76.2	914.4	609.6	457.2
AN-54	10.886	76.2	76.2	609.6	508.0	406.4
AN-55	18.143	101.6	101.6	609.6	508.0	406.4

FORMA:



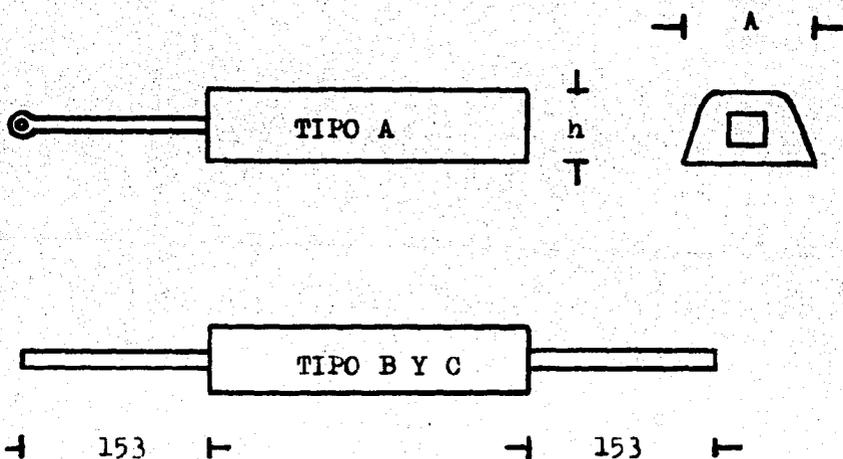
Para protección catódica en muelles, embarcaderos, rompeolas, pilares de puentes y algunas estructuras que se encuentran en la costa. Se tienen los siguientes ánodos:

TIPO AN-M

MODELO	PESO	L	A	h	TIPO DE CENTRO
AN-M1	108.86	609.6	254.0	254.0	A, B o C
AN-M2	108.86	1219.2	177.8	177.8	"
AN-M3	54.43	304.8	254.0	254.0	"
AN-M4	54.43	609.6	177.8	177.8	"
AN-M5	54.43	1219.2	127.0	127.0	"
AN-M6	40.82	457.2	177.8	177.8	"
AN-M7	40.82	914.4	127.0	127.0	"

AN-M8	40.82	1447.8	101.6	101.6	"
AN-M9	27.21	304.8	177.8	177.8	"
AN-M10	27.21	609.6	127.0	127.0	"
AN-M11	27.21	965.2	101.6	101.6	"
AN-M12	13.60	863.6	76.2	76.2	"
AN-M13	11.79	1524.0	50.8	50.8	B
AN-M14	7.71	914.4	50.8	50.8	B

FORMA:



Tipo A de barra y ojal con centro de acero.

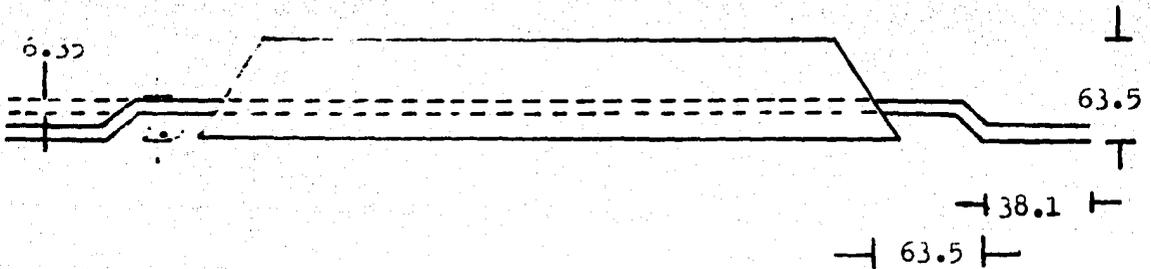
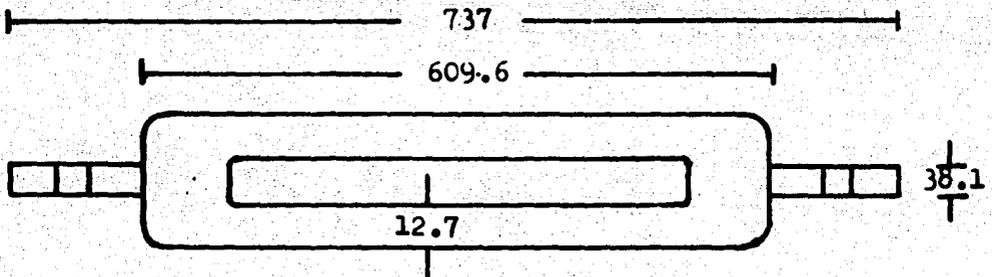
Tipo B de varilla o tubo con centro de acero.

Para protección catódica en cascos o armazones de barcos, aeronaves, remolcadores, lanchas, etc. - Se tienen los siguientes ánodos:

TIPO AN-E

MODELO	PESO	DIMENSIONES
AN-E1	13.154	609.6 x 127.0 x 63.5

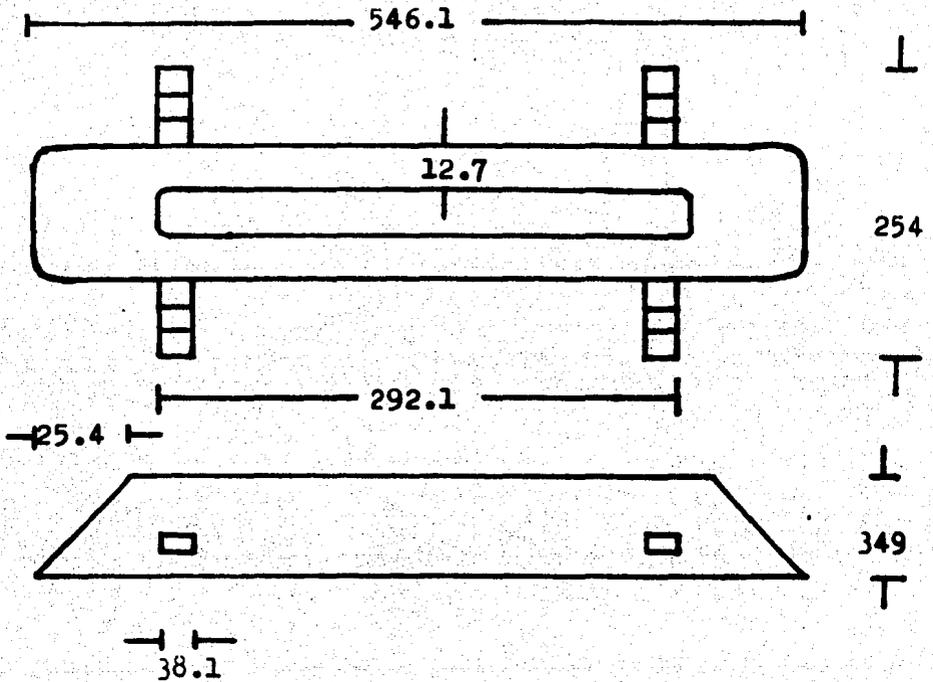
FORMA:



TIPO AN-F

MODELO	PESO	DIMENSIONES
AN-F1	7.026	546.1 x 127.0 x 34.9

FORMA:



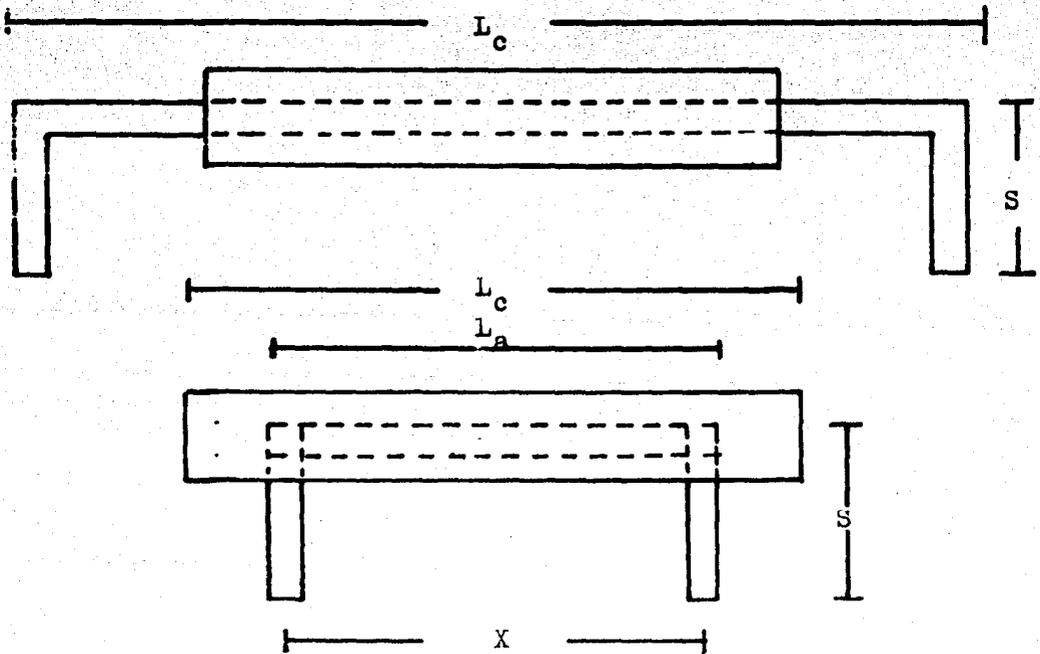
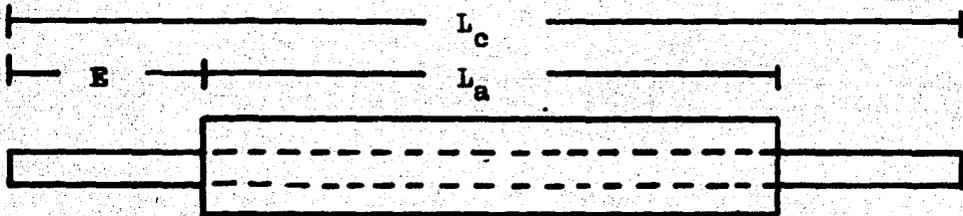
Para protección catódica de todo tipo de estructuras sobre superficies marinas, se tienen una gran variedad disponible de tipos de ánodos, de los siguientes tipos y formas:

A-1	165.1x165.1	2438.4	3048.0	-	304.8	-
A-2	165.1x165.1	1828.8	2438.4	-	(3)	-
A-3	241.3x241.3	2438.4	3048.0	-	304.8	-
B-1	165.1x165.1	2438.4	3048.0	-	304.8	(1)
B-2	165.1x165.1	1828.8	2438.4	-	(3)	(1)
B-3	241.3x241.3	2438.4	3352.8	-	(1)	(1)
C-1	165.1x165.1	2438.4	2133.6	1524.0	-	(1)
C-2	165.1x165.1	1828.8	1828.8	(2)	-	(1)

Donde:

- (1) de 609.6, 914.4, 1219.2, 1524.0 y 1828.0 mm.
- (2) de 304.8, 609.6, 914.4, 1219.2, 1524.0 y 1828.8 mm.
- (3) de 304.8, 609.6 y 914.4 mm.

FORMA:



Los centros son de tubo de acero.

CAPITULO VII

Además de los tipos y formas de ánodos - que hasta aquí hemos presentado, existen en el mercado - una gran variedad; diferentes a los ánodos hasta el momento presentados. En general los ánodos se estandarizan a - unos cuantos tipos y formas. Existen ánodos especiales, - pero su consumo es muy limitado; para estos casos su fabricación es exclusiva.

Los moldes para la elaboración de ánodos - de sacrificio para la protección catódica, se fabrican en casas comerciales especializadas; su costo varía dependiendo del tipo y forma deseado.

El presente trabajo no tratará de la fabricación de los moldes para los ánodos de sacrificio.

ESTIMACION DE LAS PARTES QUE INTEGRAN EL HORNO PARA LA FABRICACION DE ANODOS GALVANICOS.

Uno de los principales objetivos de esta tesis, consiste en el diseño del horno desde el punto de vista de Ingeniería. La estimación de costos de las partes que integran el equipo, se hará a manera de presupuesto.

Es conveniente indicar que los costos de las partes que integran el horno, se obtuvieron de las casas comerciales especializadas en la fabricación de hornos y de las casas expendedoras de accesorios para la fabricación de los mismos.

Cotización del equipo:

1) Envolvente metálica de placa comercial 285-C de 25.4 mm de grosor, con las siguientes dimensiones:

Diámetro exterior, 904.64 mm.

Altura, 1218 mm.

Area total, 3.46 m²

Costo por m², \$ 3,497.90

Costo envolvente \$ 12,102.73

2) Fondo metálico de placa comercial -- 285-C de 25.4 mm de grosor, con las siguientes dimensiones:

Diámetro, 885.6 mm.

Area total, 2.57 m²

Costo por m², \$ 3,497.90

Costo fondo, \$ 8,989.60

3) Tapa metálica de placa comercial ---
285-C de 25.4 mm de grosor, con las siguientes dimensiones:

Diámetro, 904.64 menos 429 mm.
Area total, 0.50 m²
Costo por m², \$ 3,497.90
Costo tapa, \$ 1,748.95

4) La cámara de combustión se construye con ladrillo refractario Canto Dovela No. 2. Se requieren 5 anillos laterales, con 43 piezas por anillo.

Ladrillos, 215 piezas.
Costo por ladrillo, \$ 44.80
Costo cámara, \$ 9,632.00

5) Piso de la cámara de combustión, se construye con dos anillos de ladrillo refractario Canto Dovela No. 3. El anillo externo de 10 ladrillos y el interno con 6 ladrillos.

Ladrillos, 16 piezas.
Costo por ladrillo, \$ 44.80
Costo fondo cámara, \$ 716.80

6) Entre la envolvente metálica y el ladrillo refractario, se utiliza un concreto refractario de baja conductividad térmica, para evitar pérdidas de calor. Castable Block Mix-M.

Volumen total, 0.1809 m³
Costo por saco, \$ 406.70
Costo de 4 sacos, \$ 1,626.80

7) El crisol que se utiliza en este horno es de grafito, marca Salamander modelo AF 250.

Costo del crisol, \$ 8,210.66

8) El crisol se deposita sobre una base de grafito, marca Salamander modelo IRC 141.

Costo de la base, \$ 1,239.33

9) Sobre el crisol se coloca una corona de grafito, marca Salamander modelo IRC 122.

Costo de la corona, \$ 1,726.52

10) En la parte inferior del horno se coloca en forma tangencial un quemador, marca Burner RI.

Costo del quemador, \$ 8,388.80

11) Para la combustión se utiliza un turbo ventilador, marca Clipper KF2.

Costo del turboventilador, \$ 13,210.40

12) El horno del presente trabajo es de tipo basculante. Se necesita un sistema giratorio que es de fabricación especial. El costo aproximado es el siguiente:

Costo del sistema
giratorio, \$ 19,600.00

13) La compra de accesorios, tales como: tubos y manguera de conexión del tanque de combustible;

mangueras de conexión del ventilador al quemador; manómetro y control automático del suministro de aire; llaves de globo, se calcula en un costo de:

Costo accesorios, \$ 12,600.00

14) Un tanque de almacenamiento de combustible se requiere para este horno. Un tanque con capacidad de 6000 litros, es suficiente para almacenar el combustible.

Costo tanque, \$ 17,640.00

A los costos anteriores, debemos añadir - un 10% por variación de precios y por accesorios no incluidos.

Costo parcial del horno, \$ 117,432.59

10% Adicional, \$ 11,743.25

Costo del horno, \$ 129,175.84

CAPITULO VIII

CONCLUSIONES.

El presente trabajo se hizo, con la finalidad de dar base para la posible fabricación del equipo para la elaboración de Anodos de Sacrificio de Zinc y Aluminio para la Protección Catódica.

El informe que se presenta del diseño del horno, se hizo prácticamente mediante un análisis teórico. En el comentamos los aspectos de la corrosión y la transmisión de calor, regidas por determinadas leyes matemáticas. Generalizamos diferentes tipos de corrosión, características de hornos, combustibles, tipos de quemadores, materiales refractarios y tipos o formas de ánodos. Mencionamos a manera de presupuesto, el costo del equipo: Aunque breve, sirve como auxiliar para la institución que se interese en la fabricación de dicho equipo.

En la introducción se comento, cuando un producto es de producción nacional, llega al consumidor a un costo determinado; Pero si éste es de importación, llegará al consumidor a un costo más elevado. Si así sucede y el volumen de importación es considerable, habrá una fuga económica a nivel nacional, pequeña si es un solo producto y grande si son varios los productos de importación.

Al término de esta tesis concluimos, que es necesario la construcción del equipo para la fabricación de Anodos de Sacrificio, para así evitar en lo sucesivo, fugas de capital al extranjero, debido a la importación de los mismos.

CAPITULO IX

BIBLIOGRAFIA.

- 1) Henthorne, Michael.
Fundamental of Corrosion.
Part 1,2.
May, 1971.
- 2) Husock, B.
Fundamental of Cathodic Protection.
Cleveland, Ohio.
- 3) Shrieber, C.F. and Reding, J.T.
Field Testing a New Aluminum Anode Al-
Hg-Zn Galvanic Anode for Sea Water A--
pplications.
Materials Protection.
Vol. 6, No. 5.
Houston, Texas.
May, 1967.
- 4) Reding, J.T.
The Dow Chemical Company.
Field Evaluation of Aluminum Sacrifi--
cal Anodes.
Freeport, Texas.
- 5) American Zinc Institute, Inc.
Zinc Anode for Cathodic Protection and
Ground.
New York.
- 6) Trinks & Mawhinney.
Industrial Furnaces, V-1 y V-II

- 5th . Edition.
Wiley, New York. 1961.
- 7) Schumann, Reinhardt Jr.
Ingeniería Metalúrgica, V-I y V-II
CECSA, México. 1968.
- 8) Johnson, Allen.
Fuels, Combustion and Furnaces.
Mc Graw Hill, New York. 1946.
- 9) Ministry of Fuel and Power.
Fuel Efficiency Committee.
Aguilar, Madrid. 1949.
- 10) Mc Adams, Williams.
Heat Transmission. 3th. Edition.
Mc Graw Hill, Tokio. 1967.
- 11) Perry, John.
Chemical Engineer's Handbook, 4th. Ed.
Mc Graw Hill, New York. 1967.
- 12) A.S. Foust.
Principles of Unit Operations.
John & Wiley, New York. 1960.
- 13) Donald Q. Kern.
Procesos de transferencia de calor. 4a. Ed.
CECSA, México. 1971.
- 14) David M. Himmelblau
Principios y cálculos básicos de la Inge-
niería Química.
CECSA, México. 1966.

- 15) Eduardo Shepard.
Fusión de las aleaciones de Aluminio -
en hornos de crisol.
FOSECO, S.A. México. 1973.

- 16) Leoba Graciela Sánchez Rodríguez.
Tesis Profesional.
U.N.A.M. 1972.

- 17) Jorge Alberto Reyes Lujan.
Tesis Profesional.
U.N.A.M. 1973.
