

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica

" MONTAJE DE REVESTIMIENTO CON REFRACTARIO PARA HORNOS DE
INDUCCION MAGNETICA"

INFORME TECNICO

Previo a la obtención del Título de :

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

EUGENIO VALENTIN SALAZAR VACA

GUAYAQUIL - ECUADOR

1989

AGRADECIMIENTO

AL ING. IGNACIO WIESNER F.
Director de Informe Técnico,
por su valiosa y desinteresada ayuda en la
elaboración del presente
Informe Técnico.

DEDICATORIA

La responsabilidad de los hechos, ideas y opiniones
expuestas en este libro, así como las responsabilidades
académicas, el patrimonio intelectual del autor y
la "UNIVERSIDAD NACIONAL POLITÉCNICA DEL LITORAL",
degradación de títulos y títulos profesionales de la
UNIVERSIDAD NACIONAL POLITÉCNICA DEL LITORAL.

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

A MIS HIJOS

Eugenia

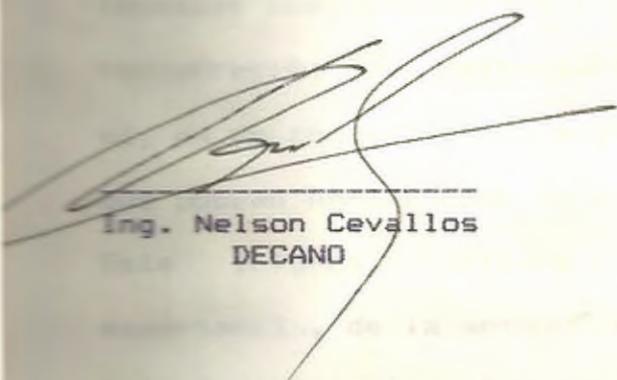
DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en este Informe, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual del mismo a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

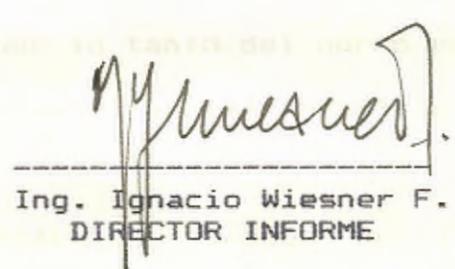
(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



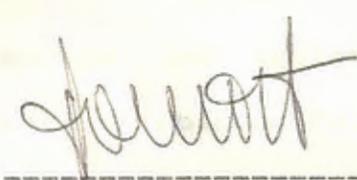
Eugenio Valentin Salazar Vaca



Ing. Nelson Cevallos
DECANO



Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR INFORME



Ing. Homero Ortíz
MIEMBRO TRIBUNAL

RESUMEN

El objetivo de este informe es el de dar a conocer los procedimientos del montaje y reparación de refractarios en hornos de inducción magnética.

El horno de inducción es un tipo de horno que se ha difundido en nuestro medio debido a las ventajas tanto técnicas como económicas y por lo tanto considero que la recuperación del refractario y por lo tanto del horno en sí, es un procedimiento muy importante en las industrias que posean hornos como este.

Este informe contiene la técnica basada en la experiencia, de la metodología y secuencia del montaje del revestimiento, las herramientas que deberán usarse y los posibles moldes o formas a usarse de acuerdo al tipo de horno de inducción a revestirse; se hablará también de los tipos de materiales refractarios que se podrían usar, dependiendo de su economía y su disponibilidad en nuestro medio.

Se hablará también de los aislamientos utilizados en aquellos y su técnica de colocación.

En conclusión, este informe brindará la técnica a seguirse para la recuperación de hornos de inducción cuyo refractario está deteriorado por causas que también serán analizadas en el informe técnico adjunto.

En particular este informe está basado en el montaje del refractario de un horno de crisol de 650 Kg. de capacidad.

INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

1. ANTECEDENTES

1.1. Generalidades y funcionamiento del horno de inducción

1.2. Tipos de hornos de inducción

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1. Problemas que plantean los refractarios

2.2. Causa de desgaste del revestimiento

2.2.1. Problemas comunes de desgaste

2.2.2. Problemas de operación

3. SOLUCIONES

3.1. Uso de refractario monolítico

3.1.1. Refractario Básico

3.1.2. Refractario ácido

3.1.3. Refractario de Alúmina

3.2. Uso de aislantes térmicos

3.3. Selección del refractario

3.4. Reparación del revestimiento

3.5. Detección de fallas

4. METODOLOGIA DEL PROCESO DE REVESTIMIENTO

4.1. Formadores usados

4.2. Preparación del refractario

4.3. Secado y sinterizado por inducción

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

INDICE DE FIGURAS

- Fig. 1.- Horno de Inducción magnética de crisol
- Fig. 2.- Horno de Inducción de canal
- Fig. 3.- Dilatación térmica de un mortero a base de alumina
- Fig. 4.- Variación gradiente térmico con el aislamiento.
- Fig. 5.- Relación entre la vida del refractario y la capacidad del horno, para materiales refractarios
- Fig. 6.- Relación entre el aumento de la sección del canal y la duración del Inductor.
- Fig. 7.- Curva de secado y sinterizado para refractarios ácidos.
- Fig. 8.- Porcentaje de ácido bórico a usarse según la temperatura de operación del horno.
- Fig. 9.- Bloque de arranque en un horno de crisol.
- Fig. 10.- Curva de secado y sinterizado para un horno de crisol pequeño.
- Fig. 11.- Inductor y crisol de horno de canal.
- Fig. 12.- Revestimiento del horno de canal.
- Fig. 13.- Horno de inducción de crisol.
- Fig. 14.- Horno de inducción de crisol.
- Fig. 15.- Formador usado en el horno de crisol.
- Fig. 16.- Horno de crisol sin revestimiento refractario.
- Fig. 17.- Penetración del metal en el revestimiento del horno de crisol.
- Fig. 18.- Muestra de zonas de sinterización del horno de crisol.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

1.1. GENERALIDADES Y FUNCIONAMIENTO DEL HORNO DE INDUCCION.

Principio de funcionamiento.

El horno de inducción magnética se basa en el principio de un transformador monofásico, cuyo circuito primario es una bobina a la que se le suministra un voltaje alterno. Esta bobina genera un campo magnético, que a su vez induce una corriente en el circuito secundario que es formado por el material fundido o a fundirse.

La condición para que este material pueda ser fundido en estos hornos, es que tenga la conductividad eléctrica un poco alta. La propiedad magnética que tenga este elemento, no es condición para su aplicación en estos hornos, por cuanto si el magnetismo inicial ayuda físicamente a la fundición por inducción en fundiciones ferrosas, este desaparece al alcanzar el punto Curie de temperatura.

La potencia en estos hornos se genera al calentar el metal, es decir, es necesario que haya material en el crisol (para los hornos sin núcleo) o en el inductor (para los hornos de canal) para que exista consumo significativo de corriente en la fuente generadora.

El calor del horno para la fundición del metal se genera internamente dentro del mismo elemento a fundirse. Es por eso que existen en estos hornos pocas pérdidas, dependiendo éstas del revestimiento exterior que se detallará posteriormente.

1.2. TIPOS DE HORNO DE INDUCCION

De acuerdo a principios de electromagnetismo existen dos grupos de hornos de inducción magnética. Los hornos de inducción de Crisol y los hornos de inducción de Canal.

1.2.2. HORNO DE INDUCCION DE CRISOL

Este horno llamado también horno de inducción sin núcleo, está formado básicamente por una bobina refrigerada por agua que circunda el revestimiento en forma de crisol (figura #1) en el que se depositan trozos de material a fundirse.

La bobina exterior debido a su alta frecuencia y voltaje induce en el metal a través del refractario, un elevado campo magnético que de acuerdo a la ley de Lenz induce otra corriente que calienta el metal.

Este tipo de horno es clasificado de acuerdo a su frecuencia:

- a. Baja frecuencia: estos trabajan con una

HORNO DE INDUCCION MAGNETICA DE CRISOL.

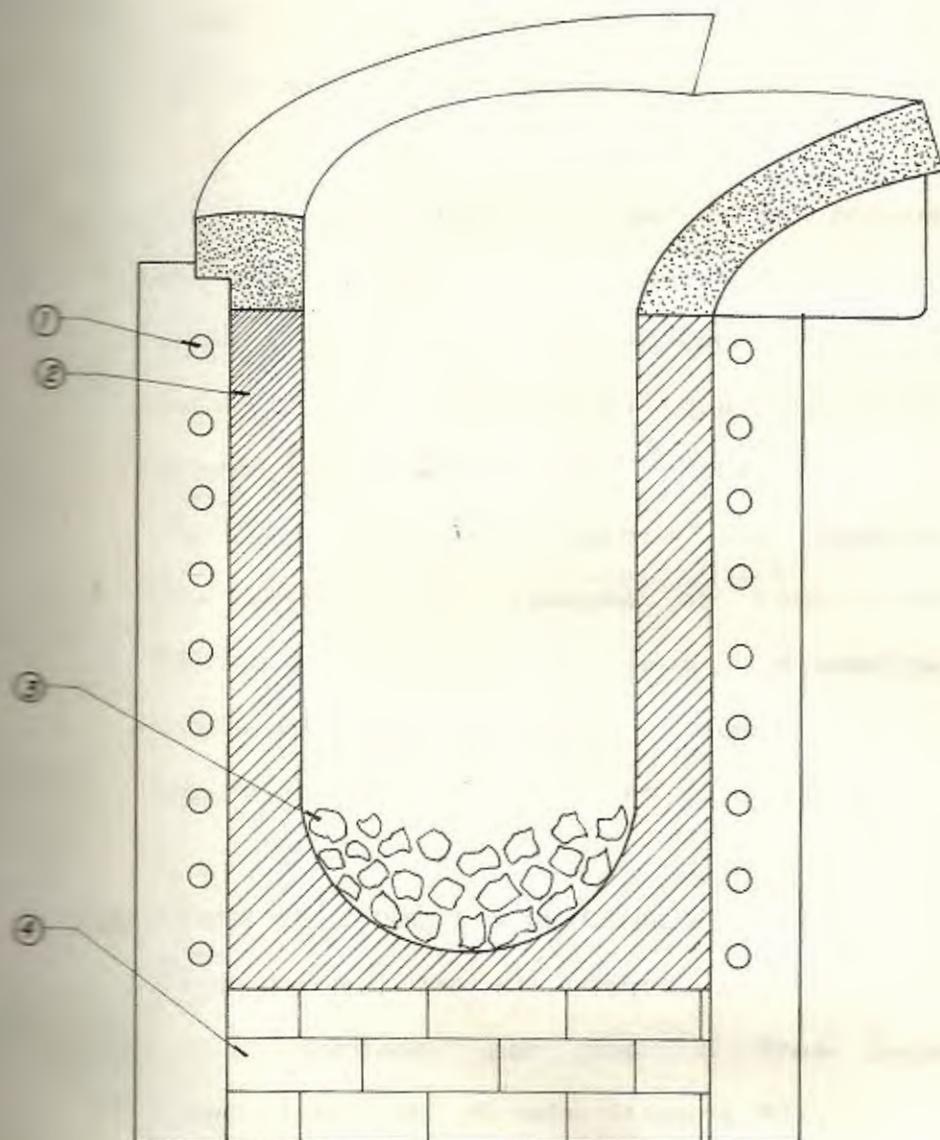


FIG. 1

1.- BOBINAS TUBULARES

2.- REVESTIMIENTO

3.- MATERIAL FERROSO SOLIDO

4.- LADRILLOS REFRACTARIOS

frecuencia de 60 Hz. en las bobinas del primario (frecuencia de red)

- b. Frecuencia intermedia: En estos hornos la frecuencia oscila entre 60 Hz y 1500 Hz.
- c. Alta frecuencia: Para los hornos cuyo ciclaje es superior a los 1500 Hz.

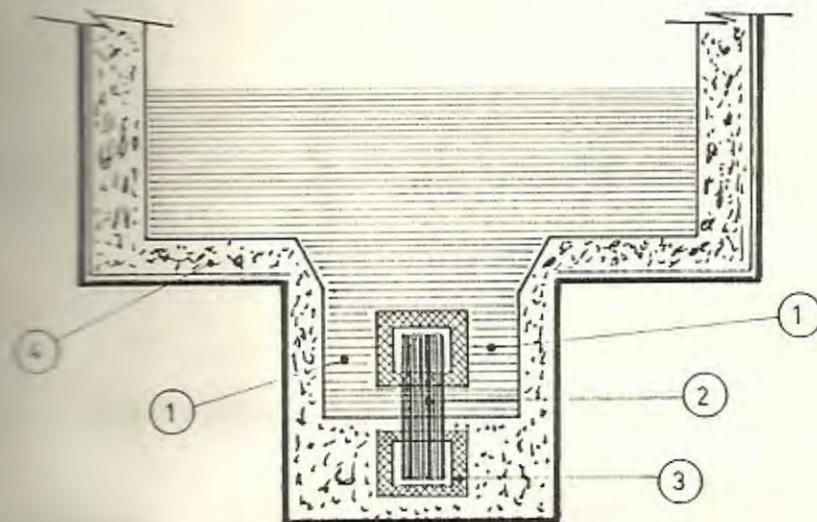
El sistema eléctrico de estos hornos es bastante sofisticado, consta de una fuente exterior (generalmente 440 VAC) trifásica, un tablero de control en el que van incluidos bancos de capacitores, reactores, puentes rectificadores de potencia, un inversor de corriente y un sistema de regulación con tiristores, diodos y demás elementos de protección y medición como voltímetro, amperímetro, kilowatímetro y pirómetros.

1.2.2. HORNO DE INDUCCION DE CANAL

Este horno, como su nombre lo indica puede estar formado por dos o tres canales, dependiendo del diseño (figura #2).

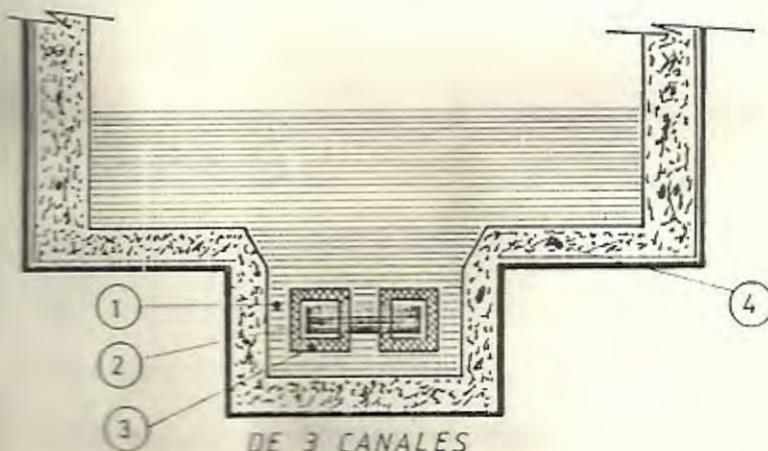
Su funcionamiento está basado en el principio de un transformador monofásico en corto circuito, cuyo secundario lo forma el circuito cerrado de los canales de material fundido.

HORNOS DE INDUCCION DE
2y3 CANALES



DE 2 CANALES

- ① CANALES DEL INDUCTOR
- ② NUCLEO DEL PRIMARIO
- ③ BOBINAS PRIMARIAS
- ④ REVESTIMIENTO



DE 3 CANALES

Básicamente, este horno está formado por un cuerpo receptor para contener la mayor parte del metal, y una unidad de calentamiento llamada inductor, unida a la base del horno, en la que se calienta el metal.

El calor generado en los canales pasa a la parte superior del horno mediante corrientes de convección combinadas con cierta agitación electromagnética.

En la actualidad existen hornos de múltiples inductores que van embridados lateralmente, y que pueden ser tratados independientemente para la reparación sin vaciarlos totalmente (reparación en caliente).

Los hornos de canal, generalmente son diseñados para mantenimiento, es decir, para mantener el caldo fundido proveniente de un cubilote, o un alto horno, pero existen también hornos de canal previstos para la fundición de carga sólida.

La parte eléctrica de estos hornos consta fundamentalmente de una fuente exterior (generalmente 440 VAC) y un tablero en el que van incorporados un banco de capacitores, un reactor, un transformador monofásico y diferentes instrumentos de control y medición como amperímetro, kilowatímetro, cofímetro y

pirómetros.

VENTAJAS DE LOS HORNOS DE INDUCCION

Los hornos de inducción magnética tienen algunas ventajas respecto a los otros tipos de hornos:

- a. Mejor control de la temperatura del metal fundido.

Debido al calentamiento que es generado dentro de la carga uniformemente, y mediante modernos instrumentos de control de temperatura se logra mantener el punto deseado.

- b. Mejor control de la propiedades aleatorias del metal.

En estos hornos se pueden hacer aleaciones ferrosas precisas debido a la disponibilidad de facilidad de maniobras.

- c. Facilidad de producción a pequeña escala.

Se pueden preparar pequeñas porciones de fundición sin que se desperdicie tanta energía.

- d. Disminución del costo del control de contaminación del aire.

No se necesitan como en otras fundiciones grandes chimeneas o extractores para gases, debido a que no existe combustión externa de

CAPITULO II

DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1. PROBLEMAS QUE PLANTEAN LOS REFRACTARIOS EN LOS HOR- NOS DE INDUCCION.

Los refractarios constituyen un punto importante del funcionamiento de los hornos de fusión y calentamiento por inducción para aleaciones ferrosas.

La experiencia ha ayudado a comprender los factores que influyen en el comportamiento del revestimiento. Se conoce que en los hornos sin núcleo el revestimiento se deteriora por la segregación de los componentes del material refractario, por la penetración del metal, por la deposición del carbono o por la acumulación de escoria en las paredes.

En los hornos de canal, se sabe que el ataque de la escoria, y la presencia de cal y óxidos alcalinos causan prematuro desgaste por erosión en las paredes y canales del horno.

Entonces, la elección del refractario en primer lugar depende del tipo de horno y de las condiciones del material con que va a trabajar.

El revestimiento de un horno de inducción de crisol tiene dos finalidades: contener la carga metálica durante la fusión, y aislarla eléctricamente del resto del horno.

Por lo tanto, el espesor del revestimiento influye

1.1.2 en las características eléctricas del horno. Un revestimiento muy delgado es ideal para un excelente rendimiento en la fusión, pero perjudicial en el calentamiento de las bobinas del horno, ya que el refractario tiene malas propiedades térmicas aislantes. Entonces para la selección del espesor del revestimiento hay que tener un criterio técnico, entre lo que se va a ganar por la eficiencia del equipo y ahorro de refractario, y lo que se puede perder por daños en la bobina y desgaste prematuro del revestimiento.

Para un horno de canal, el revestimiento de la parte superior o crisol, cumple funciones de contención y aislamiento térmico del material fundido.

En el inductor, el espesor del revestimiento entre las bobinas y los canales está limitada por la potencia del horno, y la permeabilidad magnética del refractario.

Por lo tanto, el diseño del espesor del revestimiento para un horno de canal quedará al criterio técnico del constructor.

2.2. CAUSA DE DESGASTE DEL REVESTIMIENTO

2.2.1. PROBLEMAS COMUNES DE DESGASTE EN HORNOS DE CANAL.

En el revestimiento de un horno de inducción de canal el deterioro está influenciado por

los siguientes factores:

- a. Por la temperatura de trabajo
- b. Por la velocidad de fundición
- c. Por la naturaleza de la fundición
- d. Por la calidad de la escoria que se forma
- e. Por el tipo de marcha del horno

La temperatura de trabajo de los hornos de canal depende básicamente del material que contengan. Por ejemplo en EVEREADY la fundición del zinc es mantenida entre 450 y 500 grados centígrados de temperatura.

La temperatura de marcha para la fundición del hierro suele mantenerse entre los 1450 y 1550 °C, pero en otros hornos se mantiene en un rango 60 °C más bajo. Lógicamente en este último caso el desgaste del revestimiento es menor y tiene más duración.

La temperatura de la fundición en los canales es siempre mayor que en el horno, por lo tanto, esta es una de las causas por la que el inductor dura menos que el crisol del horno.

La rapidez de fundición es proporcional a la potencia eléctrica suministrada. Si ésta es demasiado elevada, se calentará rápidamente el caldo en los canales haciendo subir muy bruscamente la temperatura en el horno,

además, este calentamiento en los canales hará fluir rápidamente el material en los mismos originando desgaste mecánico.

Los hornos de inducción de mantenimiento generalmente reciben la fundición proveniente de un horno eléctrico o un cubilote en la que la escoria es ligeramente ácida. Para un revestimiento ácido del horno de inducción causa poco problema, no así la escoria que se forma con la presencia del aire (FeO) y ataca las paredes del refractario en la zona de escorias, y más aún se entremezclan en la fundición pasando a los canales y deteriorando el inductor.

La calidad y cantidad de escoria que se forma es muy importante para la duración del revestimiento del horno. Una de las maneras de impedir en parte la formación de óxido de hierro en el horno, es mantenerlo lo más cerrado posible y estanco cuando no está en operación, y, hacer que reciba el material procedente de otro horno lo más libre de impurezas que se pueda.

Una de las maneras de mejorar las condiciones de la escoria para sacarla, es añadiendo cal a la fundición, pero esto trae como consecuencia un ataque al refractario ácido

del horno dada la naturaleza básica de la cal.

Algunos hornos de canal se utilizan para sarcha continua y permanecen siempre llenos de caldo. Cuando se les saca material para algún trabajo, se completa el nivel original con trozos sólidos.

Estos hornos duran mucho más que aquellos que trabajan intermitentemente, es decir que hay que vaciarlos completamente y apagarlos.

2.2.2. PROBLEMAS DE OPERACION

Muchas veces, las roturas, agrietamientos y penetración del metal en el revestimiento del fondo del horno, no solo se debe a la presión ferrostática del metal, sino a la mala maniobra de alimentación del horno.

Generalmente los hornos de canal de mantenimiento para fundiciones ferrosas son alimentados manualmente con pedazos de hierro. Si la altura de alimentación es excesiva y si el nivel del caldo está muy bajo, el hierro de alimentación golpeará bruscamente el fondo originando descascaramiento o agrietamiento del mismo.

CAPITULO III

SOLUCIONES

3.1. USO DE REFRACTARIO MONOLITICO

Si bien es cierto que los refractarios monolíticos tienen poco tiempo de vida, y demandan más tiempo de instalación en relación a los crisoles prefabricados para hornos de inducción, son bastante utilizados debido a la economía del refractario.

En los hornos de canal, debido a la complejidad del inductor, es necesario usar este tipo de refractario que tiene la ventaja de amoldarse fácilmente a los formadores.

Otra ventaja de los refractarios monolíticos, es la de sinterizarse en las zonas contiguas al material fundido, adquiriendo una estructura rígida y compacta en la parte interna del horno. La zona intermedia quedará en estado semi-sinterizado y la externa contigua al aislamiento permanecerá en forma de granos sueltos.

De acuerdo a la experiencia desarrollada en nuestro medio, se pueden utilizar tres tipos de refractarios, de acuerdo a su aplicación y a su reacción a temperaturas elevadas.

La aplicación específica que se trata en adelante serán dos casos a saber:

- Horno de inducción de canal para metales ferrosos hasta hierro nodular.

- Horno de inducción de crisol para fundición ferrosa, excluyendo aceros y materiales que generan escoria básica.

3.1.1. REFRACTARIOS BASICOS.

Se utilizan poco para el apisonado de inductores de hornos de canal para mantenimiento de metales ferrosos, debido a que el caldo para estos hornos generalmente proviene de otro con escoria ácida.

La situación es diferente en el caso de que el material provenga de un cubilote de viento caliente básico, en un acoplamiento duplex para producción de hierro dúctil.

Los principales morteros básicos utilizados son a base de magnesita pura y dolomita, y las ventajas que ofrecen estos refractarios son las siguientes:

1. Son livianos debido a su baja densidad
2. Tienen excelente refractariedad
3. Son de secado rápido
4. No necesitan robustas formas, ni martillos neumáticos para el apisonamiento

Entre las desventajas se encuentran las siguientes:

1. Tienen alta conductividad térmica
2. Poseen poca resistencia al choque térmico

3. Tienen gran porosidad
4. El material para el refractario es bastante higroscópico.

3.1.2. REFRACTARIOS ACIDOS

Son los más usados en los revestimientos de hornos de inducción para metales ferrosos, por cuanto, la escoria ácida producida en el proceso de fusión no ataca a este tipo de refractario.

El óxido de silicio es el principal componente de estos refractarios, el cual entra en proporción de hasta el 99% en la composición. Ver tabla I.

Las ventajas que ofrecen estos refractarios son las siguientes:

1. Excelente refractividad
2. Variedad en granulometría
3. resistencia al choque térmico
4. Economía en el costo

Uno de los refractarios ácidos que es práctico y económico, es el constituido por granos de cuarcita de diferente granulometría y ácido bórico u óxido bórico como ligante en una proporción del 2 al 5% en peso.

Si O ₂ -----	99.2 %
Al O ₃ -----	0.5 %
Fe ₂ O ₃ -----	0.2 %
Ca O -----	0.1 %

TABLA # 1.- ANALISIS QUIMICO DE LA SILICE OBTENIDA EN CRIDESA.

2.1.3. REFRACTARIOS A BASE DE ALUMINA

La construcción de hornos de canal para las aplicaciones aquí sugeridas, fue posible debido al uso de refractarios con alto contenido de alúmina, en caso de tratarse de materiales generadores de escoria básica como el acero inoxidable.

Estos refractarios, llamados también de corindón, presentan alta dureza en la capa sinterizada, además, debido a su constante dilatación lineal con la temperatura, garantizan que no habrá formación de grietas y fisuras. Figura # 3.

La desventaja que tiene este material es en la parte económica. Resulta oneroso para las pequeñas fundiciones utilizar este refractario que, por otra parte ofrece la ventaja de soportar temperaturas elevadas (hasta 1750 °C) y no ser atacado por la escoria. (Tabla II).

**DILATACION TERMICA DE UN MORTERO
A BASE DE ALUMINA.**

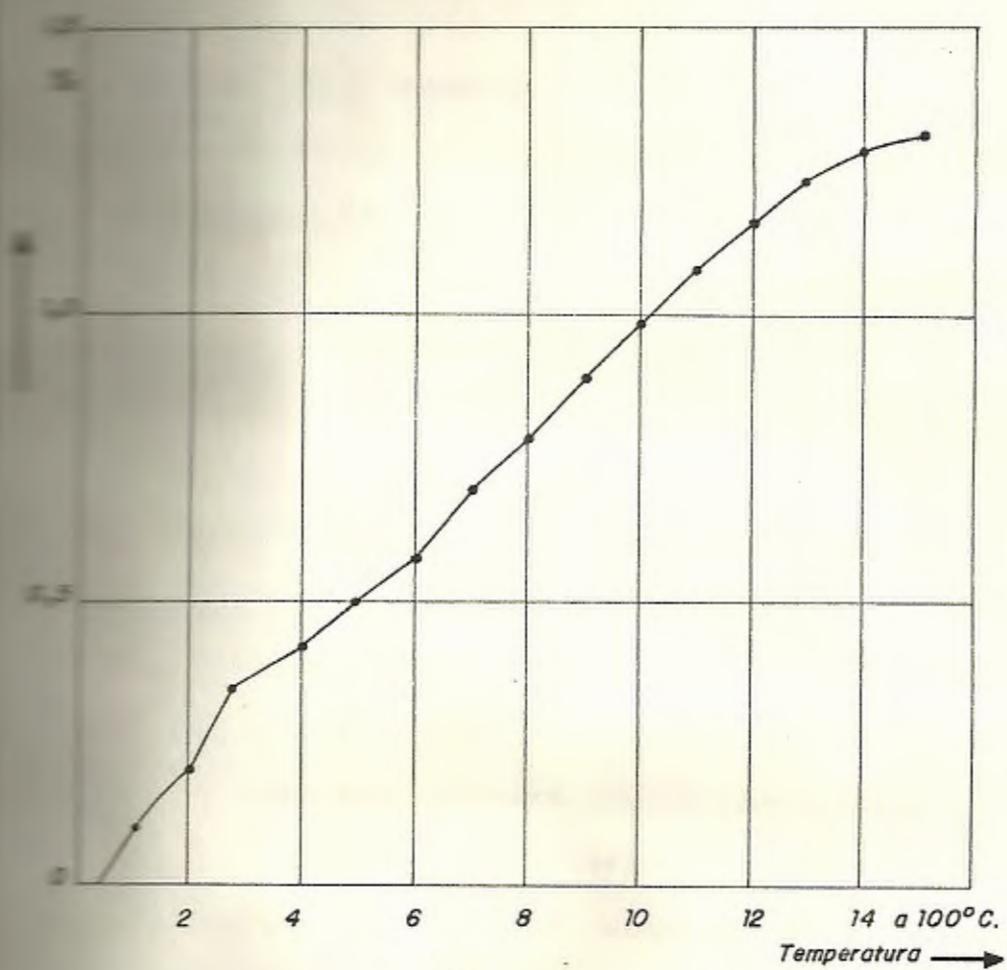


FIG. 3

Al ₂ O ₃ -----	95.0 %
Fe ₂ O ₃ -----	4.0 %
Si O ₂ -----	1.0 %
Densidad -----	3.3
Granulometría -----	0-5mm
Contenido de agua -----	4-5 %

TABLA # 2.- REFRACTARIO TIPICO A BASE DE ALUMINA.

3.2. USO DE AISLANTES TERMICOS

Los refractarios en general son malos aislantes térmicos, por lo tanto es necesario incluir en el revestimiento del horno, una capa de aislamiento que limite la fuga de calor.

Aislantes para horno de crisol

Con el fin de disminuir el calor transferido de la cara caliente de trabajo a las bobinas de inducción, se instala entre estas, una capa de aislamiento. Esta capa cumple también las siguientes funciones:

1. Actúa como una barrera física para sostener la capa agregada del refractario.
2. Actúa como colchón de deslizamiento para las dilataciones y contracciones del refractario, ocasionadas por las variaciones de temperatura propias del trabajo.

Generalmente el fabricante del horno da los

espesores y tipo de aislamiento a usarse, sin embargo se pueden utilizar los que cumplan con estos requisitos físicos:

- a. Baja conductividad térmica
- b. Baja conductividad eléctrica
- c. Alta permeabilidad magnética

La capa de aislamiento generalmente nunca se deteriora, ya que está protegida de la penetración del metal por la capa de arena suelta del refractario, no obstante, se la puede reconstruir utilizando telas de asbesto o fibras de cerámica del orden de 4 a 5 mm de espesor para capacidades de crisol de hasta una tonelada.

Aislantes para hornos de canal

Como la mayoría de los hornos de inducción de canales se emplean para mantenimiento del metal a temperaturas altas, es necesario evitar al máximo las pérdidas de calor en el crisol.

Debido a que en la zona de las bobinas del inductor, no se puede aumentar (por razones técnicas) el espesor del revestimiento de los canales, y como es aquí donde se genera el calor para todo el horno, hay que enfriar las bobinas para que no se quemem. Este enfriamiento generalmente se lo hace con aire, aunque muchas veces se utiliza agua como intercambiador de calor.

En las partes laterales del inductor se utilizan aislantes en capas sucesivas, generalmente de asbesto, aunque en la actualidad se está prefiriendo el uso de fibra de cerámica.

Los hornos de canal de hasta dos toneladas de capacidad, se revisten con aislamientos de hasta 30 cm de espesor antes de apisonar el refractario.

Este aislamiento normalmente va constituido por capas de diferentes materiales en el siguiente orden:

1. Una capa fina de asbesto que se pega con silicato de sodio a la carcasa metálica del crisol.
2. Una capa de láminas sucesivas de cartón de amianto prensado.
3. Una de ladrillos porosos de chamota de baja densidad.
4. Finalmente una capa de ladrillos duros de chamota, de alto contenido de alúmina y alta resistencia a la compresión y temperatura.

Estas capas sucesivas tienen la finalidad de disminuir la transmisión de calor hacia el exterior.

Figura #4.

3.3. SELECCION DEL REFRACTARIO

Al elegir el revestimiento para un horno, es importante que el refractario sea compatible con la escoria que vaya a producirse.

VARIACION DEL GRADIENTE DE TEMPERATURA CON EL AISLAMIENTO.

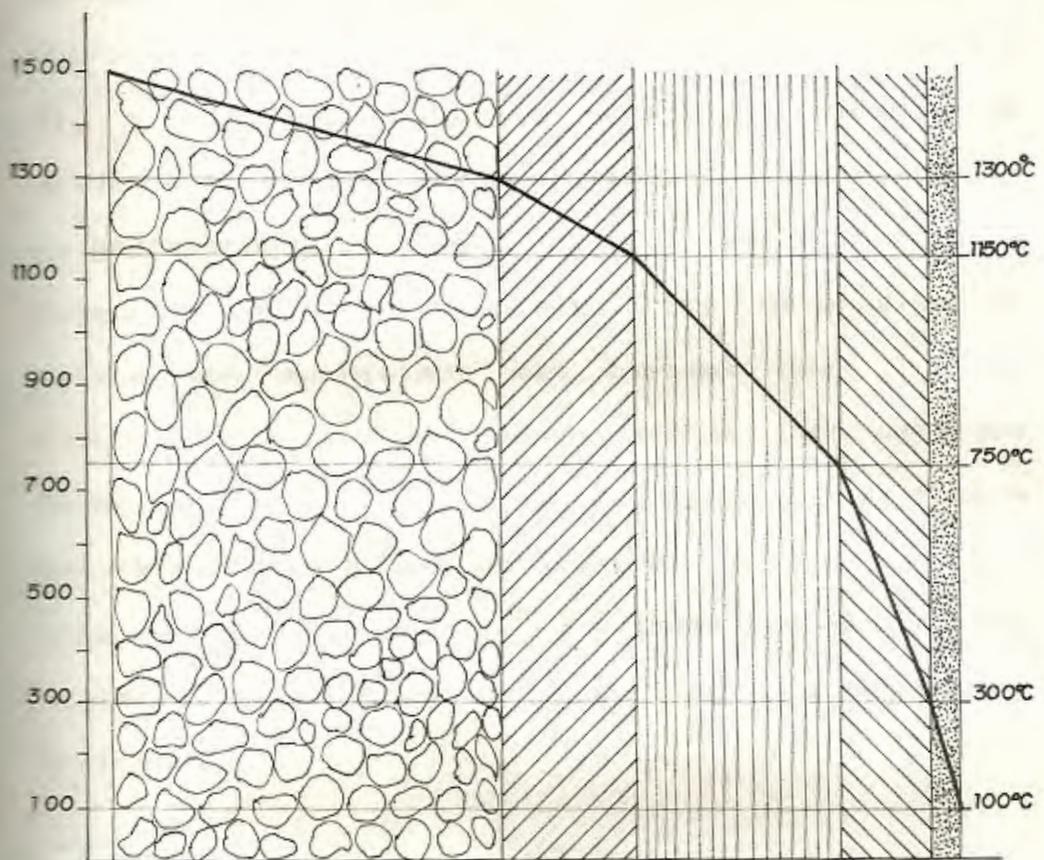


FIG. N° 4

-  refractario
-  ladrillos refractarios
-  ladrillos porosos
-  capa de carton de amianto
-  carcasa metálica

En las fundiciones ferrosas existen grandes cantidades de Silicio que al oxidarse parcialmente producen una escoria ácida. Si se utilizara un refractario básico para el revestimiento del horno, se produciría un grave ataque de la escoria al refractario, lo que causaría un prematuro desgaste del mismo.

Con esto queda aclarado que los refractarios básicos son inadecuados para fundiciones ferrosas (figura # 5), y la elección obvia será la de refractarios ácidos a base de sílice o alúmina.

La parte económica juega un papel importante en la selección del revestimiento. Los materiales de sílice son muchísimos más baratos que los de alúmina, los cuales tienen además una densidad mayor, que encarece aún más el costo en la compra del refractario a base de alúmina.

Esta es la razón por la que todas las fundiciones revisten sus hornos de inducción con materiales silíceos.

3.4. REPARACION DEL REVESTIMIENTO

En los hornos de inducción de crisol, la recuperación del refractario no trae mucha dificultad por cuanto se lo puede vaciar completamente para la reparación en frío.

En los hornos de canal, como por razones técnicas en

Relación entre la vida del refractario y la capacidad del horno, para materiales refractarios ácidos y básicos.

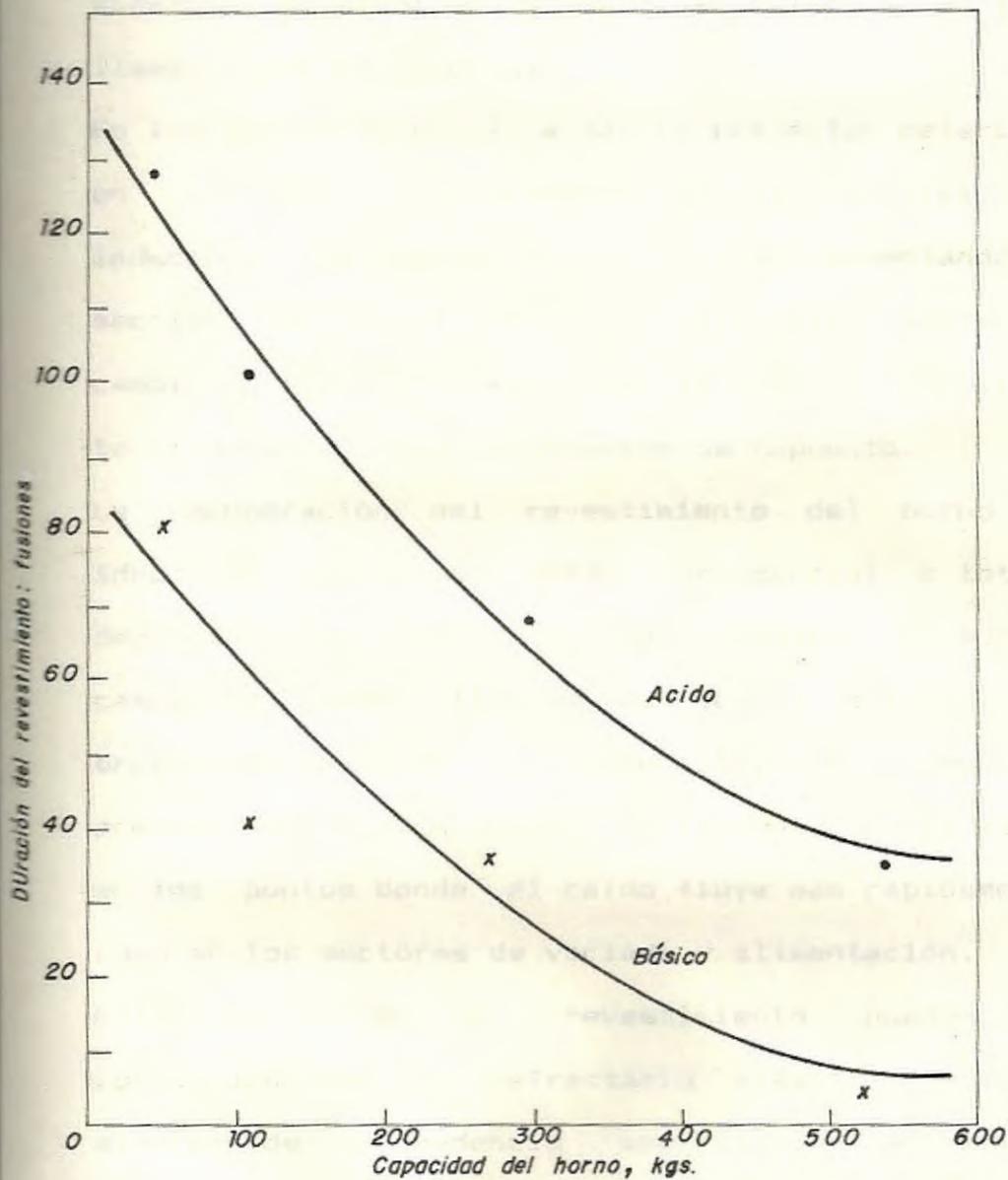


FIG. 5

el inductor debe de permanecer el material fundido, es más difícil la recuperación y siempre se lo hace en caliente.

En los hornos de inducción, el deterioro del refractario ocurre frecuentemente en la parte superior, al nivel del llenado del caldo, en un área llamada zona de escorias.

En los hornos de canal, a más de presentar deterioro en esta zona, se presenta en los canales del inductor, los cuales se erosionan aumentando su sección. La única solución para este caso es el cambio de inductor, razón por la que se recomienda tener siempre listo un inductor de repuesto.

La recuperación del revestimiento del horno de inducción de crisol puede ser parcial o total, dependiendo del criterio del técnico. En muchos casos se forman fisuras debido al enfriamiento brusco después de la producción, otras veces se produce una erosión notable en la zona de escorias o en los puntos donde el caldo fluye más rápidamente como en los sectores de vaciado y alimentación.

Estas fallas en el revestimiento pueden ser corregidas con un refractario plástico de alta alúmina de procedencia americana, que existe normalmente en el mercado local.

La recuperación parcial de los hornos de canal en la parte de la cavidad superior o crisol, es similar a

la de los hornos de crisol, con la diferencia de que no hay que apagar el horno, sino repararlo en caliente.

Para ello se baja el nivel del caldo hasta la parte superior del inductor, dejando el horno a la mínima potencia permisible para mantener fluido el metal, y se procede a la reparación.

Para la reparación parcial, hay que limpiar bien la zona con una pica o cincel, sacando las partes metálicas y costras adheridas a la parte afectada. Es recomendable dejar áspera la superficie a ser reparada, para que haya una buena adherencia del mortero.

Cambio de inductor

Como no es posible efectuar reparaciones en los canales, los hornos vienen con inductor embridado. Para el caso de que el horno tenga un solo inductor, lo conveniente es vaciarlo completamente y proceder al cambio en frío.

Cuando el horno tenga dos o más inductores, se procederá a voltearlo y vaciar el material, de tal forma que solo el inductor a cambiarse quede vacío. Antes del cambio, es necesario revisar bien la superficie de unión de la parte inferior del crisol con el nuevo inductor, ya que muchas veces se descascara el refractario en este sector al desmontarlo. Si el revestimiento no está plano y

liso, hay que trabajarlo aplanando la superficie con el sistema descrito anteriormente y secarlo.

Es de suma importancia la inspección meticulosa del inductor cambiado, ya que de esta se obtienen medidas estadísticas y de prevención para futuros cambios.

3.5. DETECCION DE FALLAS

Para los hornos de inducción en general, la experiencia demuestra que un incremento de temperatura en la parte exterior del crisol, a potencia constante y condiciones normales de trabajo, indican un aumento en la transmisión térmica del refractario. Esto puede suceder por las siguientes causas:

1. Desgaste de la capa de trabajo del refractario
2. Penetración del metal en el refractario
3. Sinterización progresiva del refractario

Para los dos primeros casos las alternativas de reparación parcial o total dependen del criterio del técnico.

Para el último caso, la solución es la reparación total (cambio de revestimiento).

Es importante tener conocimiento del equipo y estar familiarizado con los instrumentos eléctricos de control, para poder determinar fallas en los hornos de inducción de canal.

El deterioro de los canales, por el aumento de sección de los mismos está determinado por el factor de potencia del equipo. Existe una relación entre el área de la sección de los canales y el coseno del ángulo de fase, ya que mientras la sección aumenta, el factor de potencia disminuye.

La corriente y la potencia consumidas por el horno, tienen una relación directa con el aumento seccional de los canales, ya que el amperaje y kilowattaje aumenta, al aumentar el área de los canales del horno.

Por lo dicho, se puede graficar en un sistema de coordenadas, las variaciones del factor de potencia u otros parámetros, con respecto al tiempo de vida del inductor y así tener una referencia estadística para prever futuro cambio de inductor.

De la observación de este cuadro estadístico se puede deducir además, que el aumento porcentual de área seccional de los canales es útil hasta un 150% de aumento de la sección original. Ver figura # 6.

RELACION ENTRE EL AUMENTO DE LA SECCION DEL CANAL Y LA DURACION DEL INDUCTOR.

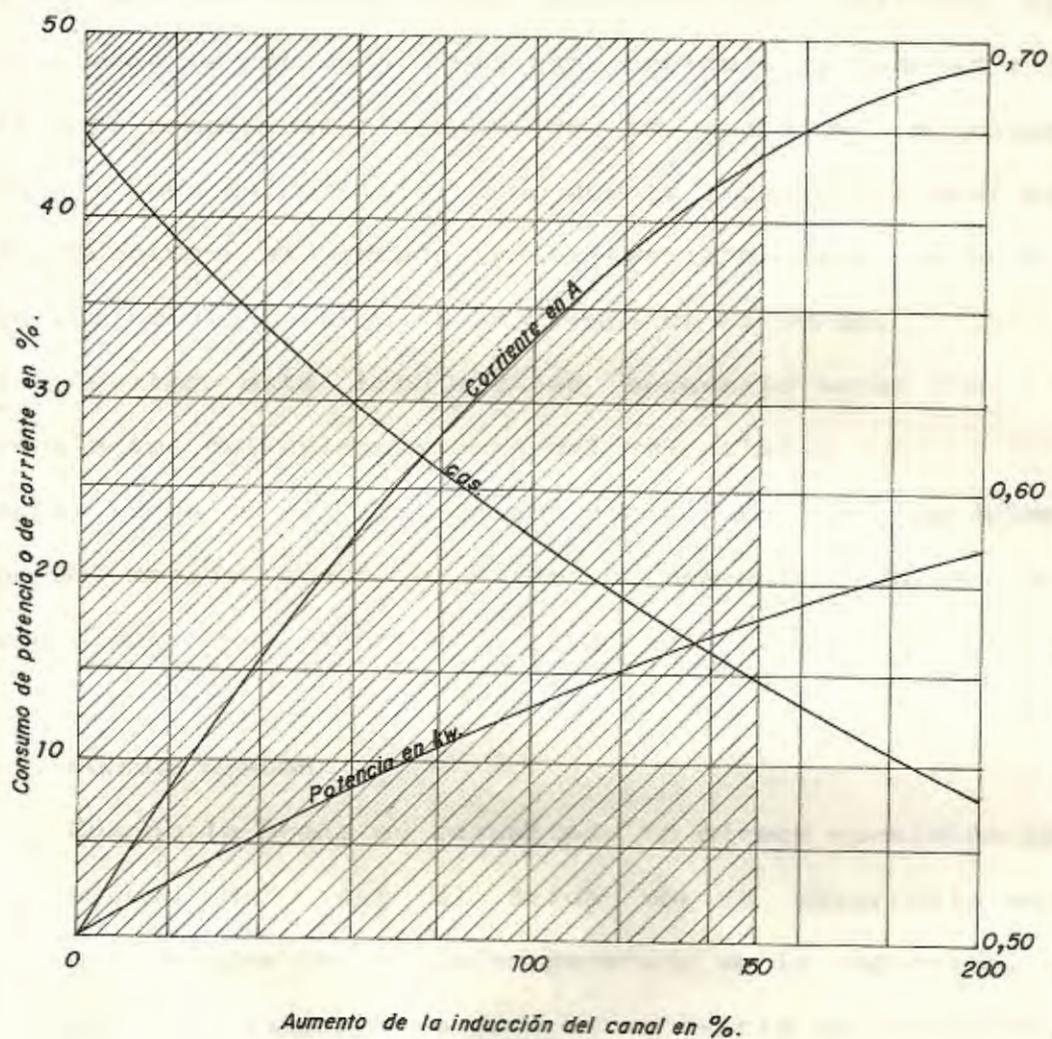


FIG. 6

 Porcentaje de la utilidad del área seccional de los canales.

CAPITULO IV

METODOLOGIA DEL PROCESO DE REVESTIMIENTO PARA HORNOS DE CRISOL

La rapidez de la operación del revestimiento para estos hornos es importante, por cuanto estos, normalmente están en operación continua y además es antieconómico usar períodos largos de curado.

El tiempo de secado para refractarios silicios es relativamente corto, sin embargo, debido a la humedad del ambiente propia del clima y de la época y, al ácido bórico que se utiliza como agente ligante -el cual es higroscópico- el secado y sinterizado para un horno pequeño se dilatará hasta un tiempo de 12 horas.

Para evitar este problema es necesario secar bien la arena antes del apisonamiento del refractario.

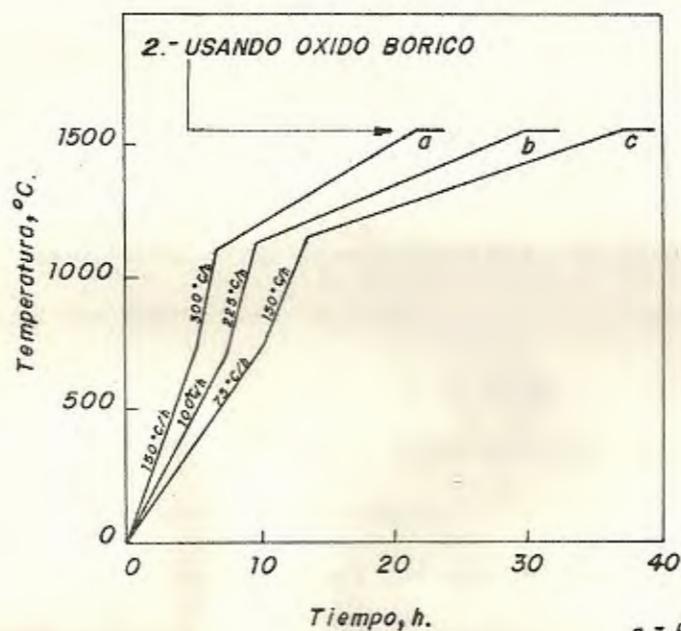
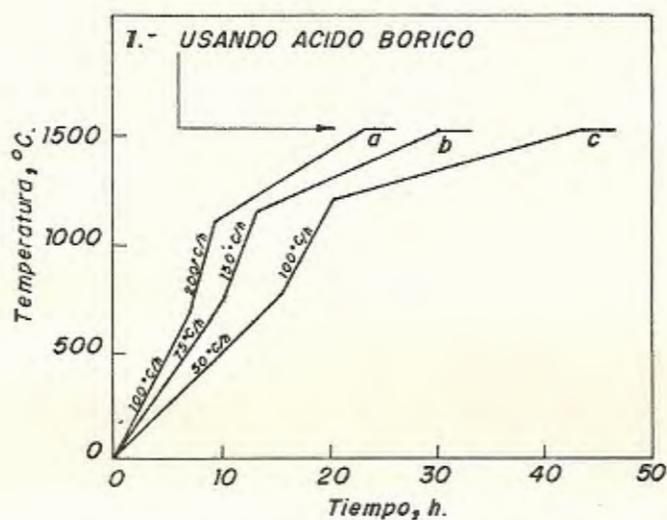
Muchas veces se utiliza óxido bórico en vez de ácido bórico, debido a que el óxido no presenta problemas de higroscopía. Ver figura #7.

4.1. FORMAS USADAS

Cuando la arena es compactada no ofrece consistencia alguna dado que el ácido bórico desarrolla sus propiedades con el calor generado en la inducción, o por las antorchas a gas. Es necesario por lo tanto, utilizar moldes o formas para darle consistencia al refractario antes de su endurecimiento.

Existen dos tipos de formas a utilizarse. Las formas

CURVA DE SECADO Y SINTERIZADO PARA REFRACTARIOS ACIDOS



Tiempo, h.

FIG. 7

a. - Horno bajo 10 t.

b. - Horno de 10 a 20 t.

c. - Horno sobre las 20 t.

consumibles y las formas recuperables.

Formadores consumibles.

Son los más utilizados para la compactación y secado de hornos pequeños, debido a que se necesitan mecheros de gas para el proceso, utilizando solo el calor producido por la inducción.

Durante el sinterizado, el formador es consumido para formar parte de la carga.

Formadores recuperables.

Estos traen economía en el uso. Son de geometría cónica y superficie exterior lisa de material metálico rolado de 10 a 15 mm de espesor.

La distorsión interna es minimizada con unas barras de refuerzo.

Después del apisonamiento se calienta la forma a unos 450°C, sea por antorchas o por inducción. Posteriormente se las enfría con aire hasta unos 200°C y se las extrae.

Una vez extraída la forma se procede al calentamiento del refractario con mecheros a gas a razón de 180°C/hr, hasta alcanzar 1400°C, en que el horno puede ser llenado con caldo procedente de otro horno, o con trozos sólidos de hierro para continuar el proceso por inducción.

Cuando se complete el nivel superior del horno, la temperatura es elevada a 1430°C, por el lapso de una hora para el proceso de sinterizado.

El proceso de revestimiento con formas recuperables es ideal para grandes hornos de crisol, dado que la recuperación continua del formador de gran tamaño, que solo es deteriorado por la distorsión y la oxidación, significa ahorro a largo plazo.

4.2. PREPARACION DEL REFRACTARIO

Es muy importante que la arena silicea esté seca, libre de impurezas y que tenga homogénea distribución de granos en la mezcla, antes del apisonamiento.

Es conveniente seguir la siguiente secuencia en la preparación del refractario para obtener un buen revestimiento.

1. Se secan bien las diferentes clases de arena de sílice
2. Se revuelven en un mezclador durante 10 minutos, las arenas con diferente granulometría, en proporción determinada
3. Se agrega poco a poco al mezclador, el ácido bórico en la proporción de 1%, y se lo revuelve por 5 minutos más. Ver figura # 8.
4. Se saca la mezcla en un tanque e inmediatamente se procede al apisonamiento.

El apisonamiento o compactación del refractario se lo hace manualmente con unos pisones de regular peso (15 a 20 lbs). Se comienza por el fondo del crisol,

**PORCENTAJE DE ACIDO BORICO A
USARSE SEGUN LA TEMPERATURA
DE OPERACION DEL HORNO.**

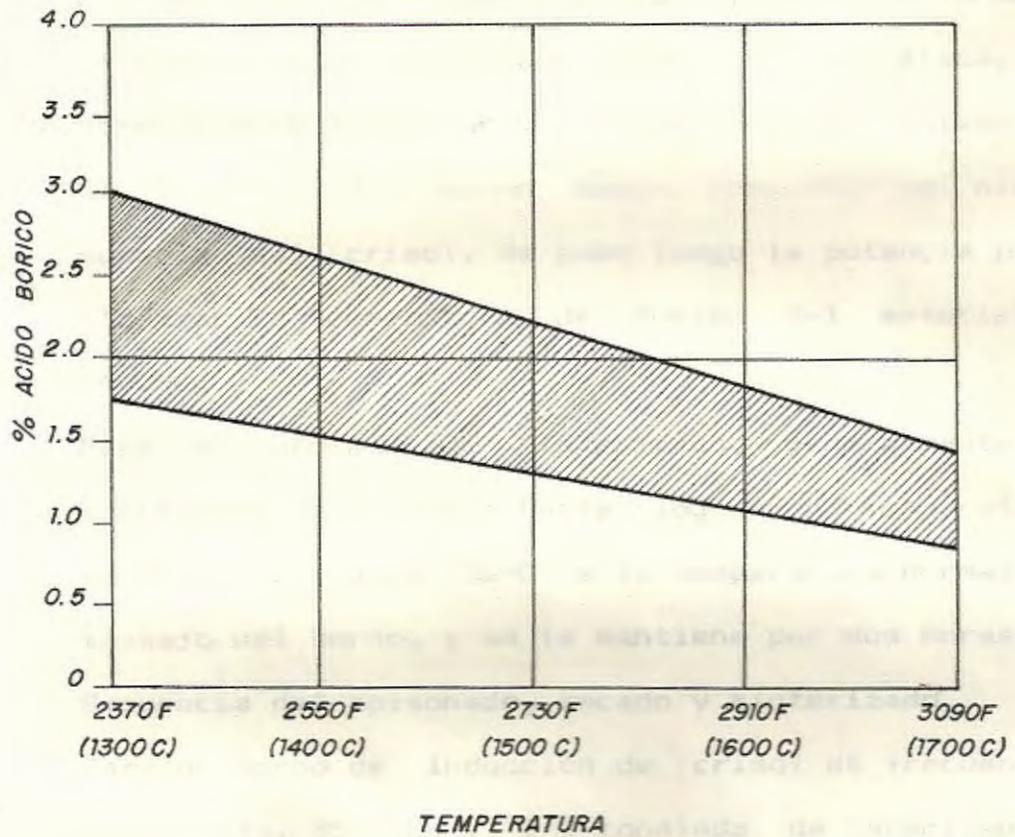


FIG. 8

apisonándolo en capas sucesivas de una pulgada de espesor.

El tiempo de compactación de cada capa es de aproximadamente tres minutos.

4.3. SECADO Y SINTERIZADO POR INDUCCION

En este proceso a más del formador consumible, se utiliza un bloque de arranque para el calentamiento inicial y secado del horno. Ver figura # 9.

Una vez secado el revestimiento y fundida la forma y el bloque de arranque por inducción magnética, se agregan poco a poco unos pedazos de hierro sólido en el interior del horno hasta completar el nivel superior del crisol. Se sube luego la potencia para alcanzar la temperatura de fusión del material a 1400°C.

Para el proceso de sinterizado, generalmente se incrementa la potencia hasta lograr una temperatura superior en unos 30°C a la temperatura normal de trabajo del horno, y se la mantiene por dos horas.

Secuencia del apisonado, secado y sinterizado

Para un horno de inducción de crisol de frecuencia intermedia, 350 KW y 1/2 tonelada de capacidad se sigue la secuencia siguiente para su compactación, secado y sinterización:

1. Se procede a compactar el piso del crisol hasta alcanzar un espesor de 10 cm.

**BLOQUE DE ARRANQUE EN
UN HORNO DE CRISOL.**

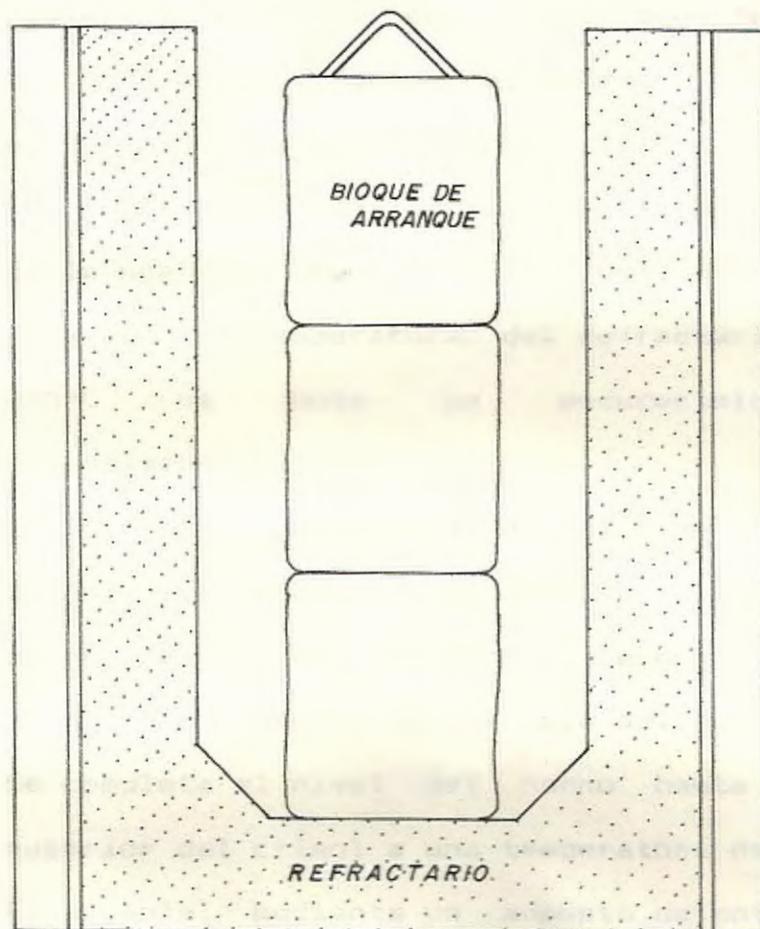


FIG. 9

2. Se coloca el formador metálico y se lo centra con cuatro cuñas de madera, dejando libre la zona lateral cercana al fondo del crisol.
3. Se sigue compactando, y una vez llegado el refractario al nivel de las cuñas centradoras, se las saca para continuar apisonando hasta llegar a la parte superior del horno.
4. Inmediatamente se coloca el bloque de arranque centrado en el interior del formador y se prende el horno a baja potencia.
5. Se incrementa cada 15 minutos la potencia para darle una razón de temperatura de 200°C por hora. (Cuando la temperatura del refractario alcanza 250°C se nota un endurecimiento del revestimiento)
6. Cuando la temperatura del bloque de arranque alcanza los 1300°C y empieza a fundirse, se añaden al crisol trozos pequeños de material ferreo y se aumenta la potencia del horno.
7. Se completa el nivel del horno hasta la parte superior del crisol a una temperatura de 1400°C
8. Finalmente, mediante un aumento de potencia, se hace subir la temperatura hasta 1450°C, manteniéndola en ese punto por el tiempo de 1 hora para la sinterización del revestimiento. Ver figura #10.
9. Una vez sinterizado el horno se puede bajar la

**CURVA DE SECADO Y SINTERIZADO
PARA UN HORNO DE CRISOL PEQUEÑO.**

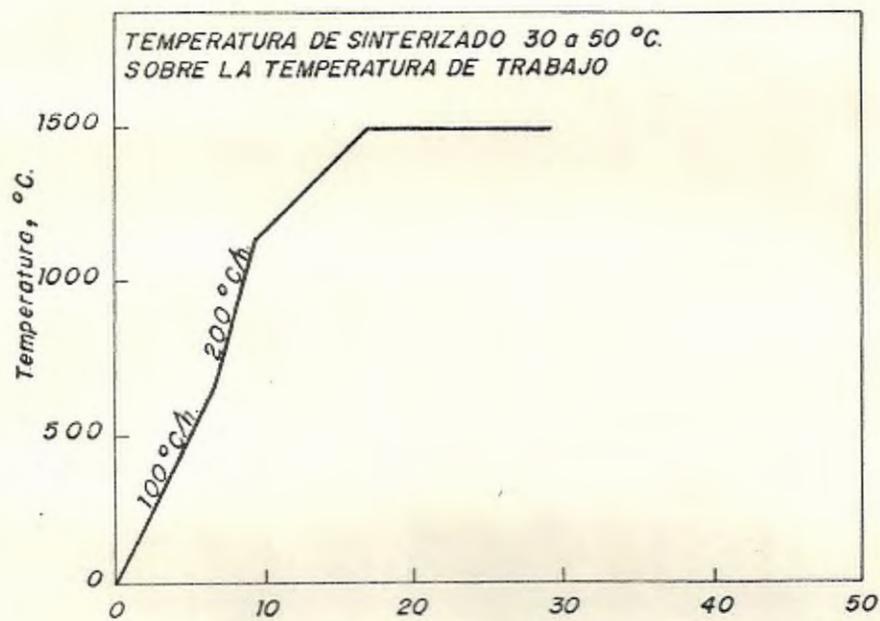


FIG. 10

temperatura y vaciar el material que se lo puede aprovechar para fundición de lingotes u otra clase.

Para el análisis de la figura 3 para la decisión de usar refractario nacional en el horno de producción de cristal de 400 Kg de capacidad, se hizo un análisis comparativo de los beneficios al utilizar refractario nacional, refractario cubano exportado y un cristal exportado de 400 Kg de capacidad.

Costo del horno de cristal
 Cantidad de fundición
 Peso del material para el revestimiento
 Potencia

Costo refractario Nacional de Sílice

Costo por kilogramos de sílice	10 = sucres
Costo del silicio de primer grado	150 = sucres
Porcentaje de costo del silicio en la inversión	
250 Kg/rev x 10 \$/Kg	2500 sucres/rev
250 Kg/rev x 2% x 1500 sucres/Kg	7500 sucres/rev
1 hombre/rev x 2000 sucres/hombre	2000 sucres/rev
7500 \$ / hr/rev x 15 sucres/10-hr	31500 sucres/rev
10000	49500 sucres/rev
49500 / 250 = 198 sucres/rev	
198 x 10 = 1980 sucres/colada	
10 coladas/rev	

CAPITULO V

CONCLUSIONES

A más del análisis de la figura 5 para la decisión de usar refractario silíceo en el horno de inducción de crisol de 650 Kg de capacidad, se hizo un análisis económico de los beneficios al utilizar refractario nacional, refractario sueco importado y un crisol importado de 650 Kg de capacidad.

Datos del horno de crisol

Capacidad de fundición	650 Kg
Peso del material para el revestimiento	250 Kg
Potencia	350 KW

Costo por colada

1. Para refractario Nacional de Sílice

Costo por kilogramo de sílice	10	suces
Costo del kilogramo de ácido bórico	1500	suces
Porcentaje en peso del ácido bórico en la arena seca		2%
250 Kg/rev x 10 S./kg	2500	suces/rev
250 Kg/rev x 2% x 1500 suces/Kg	7500	suces/rev
4 hombres/rev x 2000 suces/hombre	8000	suces/rev
350 KW x 6 hr/rev x 15 suces/Kw-hr	31500	suces/rev
TOTAL	49500	suces/rev

$$\frac{49500 \text{ suces/rev}}{50 \text{ coladas/rev}} = 990 \text{ suces/colada}$$

2. Para refractario Sueco importado

Costo por kilogramo	300	suces
250 Kg/rev x 300 S./kg	75000	suces/rev
4 hombres/rev x 2000 suces/hombre	8000	suces/rev
350 KW x 6 hr/rev x 15 suces/Kw-hr	31500	suces/rev
TOTAL	114800	suces/rev

$$\frac{114800 \text{ suces/rev}}{100 \text{ coladas/rev}} = 1148 \text{ suces/colada}$$

3. Para refractario de crisol

Costo/kilogramo de capacidad(punto)	1000	suces
650 Kg Fe x 8.9 Kg Cu/7.8 Kg Fe	742	Kg/ Cu
742 Kg Cu x 1000 suces/Kg Cu	742000	suces
2 hombres x 2000 suces/hombre	4000	suces
TOTAL	746000	suces

$$\frac{746000 \text{ suces}}{50 \text{ coladas}} = 14920 \text{ suces/colada}$$

Como se ve el costo por unidad de colada del refractario nacional es más económico que el refractario extranjero y que el crisol importado. Ver tabla # 3 comparativa.

	Dur. # col.	Costo de material S/.	Costo de Instalac S/.	Costo Total S/.	Costo Unit. S/.
Refractario Nacional	50	10000	39500	49500	990
Refractario Sueco	100	75000	39500	114500	1140
Crisol importado	50	742000	4000	746000	14920

TABLA # 3.- CUADRO COMPARATIVO DE MATERIALES

En los actuales momentos, el costo excesivo de los materiales extranjeros para la fundición, sumados a los problemas de importación, han hecho posible la utilización de refractarios nacionales. Su uso sumado a la experiencia, que la dá el tiempo de aplicación de los mismos, han hecho concluir que en nuestro medio hay abundantes y económicos refractarios silíceos cuya aplicación y uso ha sido tema de este informe técnico.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- INDUCTOTHERM INTERNATIONAL CORP. (New Jersey, Rancocas).
- 2.- A. Marquez, "Fundición", Revista para la America Latina, No 22 (Marzo, 1979).
- 3.- M. Cavarreta, H. Felckus, N. Serratrie, F. Rivalta, L. Sitia, Fundiciones de acero (Turín: Gamarra S.A.).
- 4.- "Current Information Report", Revista American Foundrymen's Society.
- 5.- S. Obermayer, Technical Information Bulletin (Co. Div. Comb. Engr., 1967).
- 6.- N. Furman, Scott Stanadard Methods of Chemical Analisis (New York: D. Van Nortrand, 1939).
- 7.- R. Araujo, Interpretación de las propiedades Físicas y Químicas de los Materiales Refractarios (Instituto Mexicano del Hierro y el Acero).
- 8.- Beira Broadsheet 204-1-Alverchurch, Birmingham B48 7QB-1981.



Fig. #11.- INDUCTOR Y CRISOL DE HORNO DE CANAL.



Fig. #12.- REVESTIMIENTO DEL HORNO DE CANAL.



Fig. #13.- HORNO DE INDUCCION DE CRISOL



Fig. #14.- HORNO DE INDUCCION DE CRISOL

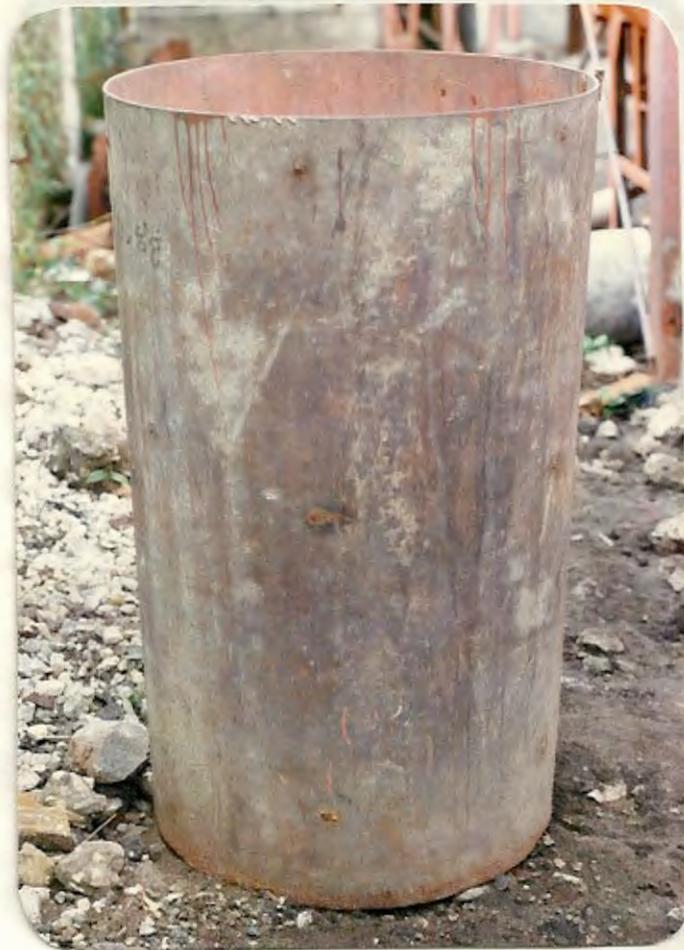


Fig. #15.- FORMADOR USADO EN EL HORNO DE CRISOL



Fig. #16.- HORNO DE CRISOL SIN REVESTIMIENTO REFRACTARIO



Fig. #17.- PENETRACION DEL METAL EN EL REVESTIMIENTO DEL HORNO DE CRISOL



Fig. #18.- MUESTRA DE ZONAS DE SINTERIZACION DEL HORNO DE CRISOL