

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Prolongación de la Vida Útil del Revestimiento Refractario en un
Horno de Inducción de INTRAMET”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Federico Gonzalo Ochoa Mite

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2006

AGRADECIMIENTO:

A Dios, a la Santísima Virgen María. A mis padres, profesores, amigos y familiares por su apoyo, sacrificio y paciencia. A la ESPOL, ASTINAVE, el CIMEG E INTRAMET y especialmente al ING. Ignacio Wiesner y a su personal por la colaboración y las facilidades prestadas en sus instalaciones para el desarrollo de esta Tesis

DEDICATORIA:

A mi Sr. padre. Federico Ochoa Chóez, mi madre Sra. Hilda Mite Crúz, a mi amada esposa Flérida, a mis hijos Ángel, Jenny y Santiago a mis hermanas, mis sobrinos, familiares y seres queridos que de alguna forma se sacrificaron y colaboraron por mi bienestar.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Eduardo Rivadeneira P.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE

Ing. Ignacio Wiesner F.
DIRECTOR DE TESIS

Dra. Cecilia Paredeš V.
VOCAL

Ing. Andrés Rigail C.
VOCAL



DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'F. Ochoa Mite', is written over a horizontal line.

Federico G. Ochoa Mite

RESUMEN

A fin de dar mayor vida útil al refractario monolítico sinterizado “in situ” del horno de inducción magnético usado para la fundición de partes de alta complejidad en la empresa de INTRAMET, se hacen cambios en la densidad de la mezcla de agregados, se varían los contenidos de ácido bórico, usado como agente ligante de la sinterización, y se establece una curva de elevación de temperatura con relación al tiempo para obtener mejores características mecánico-refractarias en el crisol del horno.

La metodología a seguir en el desarrollo de esta tesis será, primero describir el funcionamiento de los hornos de inducción sin núcleo, luego se presenta una descripción del equipo y los problemas encontrados en el refractario del crisol.

En el capítulo dos se presentan las alternativas de solución que se tiene para el refractario las cuales se escogen dependiendo del tipo de colada a fundir en esta clase de hornos eléctricos de inducción, también se determina la correcta combinación de granulometría y de su correspondiente porcentaje de ligante.

En el capítulo tres se realiza una evaluación de los parámetros que más han incidido en el mejoramiento de la productividad y en sus costos de producción.

Por último se dan las conclusiones y recomendaciones, para proteger y prolongar la vida del horno de inducción.

ABREVIATURAS

S.C.R.

SiO₂

Al₂O₃

Fe₂O₃

CaO

MgO

HG

Lbs

Tiristores

Oxido de silicio (sílice)

Oxido de aluminio (alúmina)

Oxido ferroso

Oxido de calcio (cal)

Oxido de magnesio (magnesia)

Hilo grueso

libras

SIMBOLOGÍA

M	Masa
ρ	Densidad
V	Volumen
Π	pi
H	Altura mayor
h	Altura menor
D	Diámetro mayor
t	Espesor del revestimiento
R	Resistencia al choque térmico
σ	Esfuerzo de tensión
K	Conductividad Térmica
E	Módulo Elástico.
α	Coefficiente térmico
μm	Micras
Ton	Toneladas
Hz	Frecuencia
\emptyset	Diámetro
Kw	Kilowatts

ÍNDICE GENERAL

	Pág.	
RESUMEN.....	III	
ABREVIATURAS.....	IV	
SIMBOLOGÍA.....	V	
ÍNDICE GENERAL.....	VI	
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII	
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX	
INTRODUCCIÓN.....	1	
CAPITULO 1		
1. PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL REFRACTARIO DEL HORNO DE		
INDUCCIÓN.....	3	
1.1 Descripción del equipo.....	4	
1.2 Tipos de refractarios apisonables monolíticos.....	9	
1.3 Sinterización de los refractarios.....	14	
1.4 Control del desgaste de refractario por Kg. de metal fundido.....	20	
1.5 Reparaciones y fallas del refractario.....	25	
CAPITULO 2		
2. SOLUCIONES CON ARENA SÍLICE.....		29
2.1 Aumento del espesor.....	30	

2.2 Aumento de la densidad del refractario.....	33
2.3 Curva de calentamiento para la sinterización.....	37
2.4 Índice de consumo con refractario mejorado.....	43

CAPITULO 3

3. EVALUACIONES DE LA IMPLANTACIÓN.....	47
3.1 Incidencia en la productividad.....	48
3.2 Evaluación de costo de producción.....	51
3.3 Evaluación del mejoramiento de la colada	52

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	54
--	----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Horno de inducción con crisol.....	5
Figura 1.2 Horno de inducción sin núcleo tipo AJAX.....	6
Figura 1.3 Esquema de convertidor estático de media frecuencia de tiristores.....	7
Figura 1.4 Vista lateral del equipo.....	8
Figura 1.5 Vista frontal del horno de inducción	9
Figura 1.6 Diagrama de fase de la alúmina-sílice.....	12
Figura 1.7 Dilatación térmica de la Sílice.....	13
Figura 1.8 Sinterización de granos de materiales de una sola fase....	16
Figura 1.9 Sección del revestimiento refractario y zonas características de acuerdo a la temperatura alcanzada en la sinterizada.....	18
Figura 1.10 Aplicando soldadura de bronce UTP-32 a la bobina.....	20
Figura 1.11 Herramienta para toma de medidas interiores del horno...	23
Figura 2.1 Relación del espesor del revestimiento a la capacidad del horno.....	31
Figura 2.2 Análisis Granulométrico realizado en la FICT.....	36
Figura 2.3 Línea de expansión térmica de materiales refractarios apisonables.....	38
Figura 2.4 Curva de sinterización con ligante de ácido bórico para la sílice.....	39
Figura 2.5 Curva de sinterización obtenida en el quemado del refractario.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Análisis químico para revestimiento ácido.....	10
Tabla 2	Propiedades principales de materiales refractarios.	11
Tabla 3	Granulometría recomendada para revestimiento ácido...	15
Tabla 4	Porcentaje de desgaste del revestimiento para control después de cada colada.....	24
Tabla 5	Análisis granulométrico del revestimiento anterior.....	33
Tabla 6	Porcentajes usados antes en el revestimiento de Sílice en el horno.....	35
Tabla 7	Análisis granulométrico de sílice	37
Tabla 8	Valores de tiempo, temperatura en el proceso de sinterizado.....	42
Tabla 9	Porcentaje de desgaste para 25 coladas que duro el nuevo revestimiento.....	44

INTRODUCCIÓN

La aparición del calentamiento eléctrico de metales por medio de bobinas de inducción magnética se debe entre otros a un ilustre guayaquileño, el Dr. Cryoano Tama, quien inscribió las primeras patentes sobre este tema en Alemania y EEUU a comienzos del siglo pasado.

La empresa INTRAMET posee un equipo para fusión de metales usando este principio y en las placas de identificación, las patentes usadas para su fabricación se lee AJAX-TAMA dando fé que lo que se asevera en esta tesis es verdad.

La fusión con horno de inducción revolucionó la fundición de metales ya que compitió con los costos de los tradicionales hornos de cubilote, de amplia aceptación mundial y proporcionó la seguridad de conocer la composición química del metal antes de hacer el colado, superando ampliamente la operabilidad de los cubilotes.

En Brasil, se tienen más de 8.000 hornos de inducción funcionando todos los días del año para suplir la demanda de partes para la industria automotriz principalmente y demás sectores de la producción.

En Ecuador, existen solo dos hornos de este tipo en funcionamiento con capacidad alrededor de 450 Kg. para producir piezas fundidas en acero de baja y media aleación y en particular INTRAMET se dedica a la producción de aceros inoxidable con diferentes propósitos tecnológicos, desgaste por corrosión a temperatura ambiente y a temperatura elevada, además tiene en producción materiales resistentes al desgaste abrasivo tales como hierro blanco aleado con 12% de Cromo y acero al Manganeso.

Los cuarzos suecos son de uso intensivo en la mayoría de las fundiciones en todas partes aunque poseen una pureza no mayor al 98%; en cambio las sílices que vienen provenientes del Oriente Ecuatoriano poseen una pureza sobre el 98%. Por lo que nos vimos animados al desarrollo de refractarios para hornos de inducción con materiales propios. El tema tratado en esta tesis es de gran importancia ya que representa un enorme ahorro el no tener que importar material de alto costo y de inferior calidad porque la refractariedad de la Sílice depende del grado de pureza.

CAPÍTULO 1

1. PROBLEMAS PRESENTADOS EN EL REFRACTARIO DEL HORNO DE INDUCCIÓN

El horno de inducción de INTRAMET a presentado fallas en su revestimiento por lo que se realizó el presente estudio para mejorar su producción y seguridad. Una de las causas principales que motivo este trabajo fue la falla del revestimiento que duró una mínima cantidad de 12 coladas que esto transformado en toneladas de producción nos representa un total de 6 Ton de acero.

Los hornos eléctricos de inducción utilizan una corriente inducida para fundir la carga metálica. Los hornos que aquí se tratan es del tipo de inducción sin núcleo y la energía eléctrica es dada por un equipo de media frecuencia que suministra energía a la bobina primaria, pero con una frecuencia modificada. La generación de la frecuencia es alrededor de 1000 Hz, suministrada por un conjunto de tiristores.

1.1 Descripción del equipo.

En un horno de inducción propiamente dicho sin núcleo consta de una bobina tubular de cobre la cual encierra una capa de material refractario alrededor de toda la parte circunferencial así a como toda la longitud interior del horno.

Cuando circula una corriente alterna a través de la bobina crea un campo magnético alternativo y por tanto variable. Según la ley de Lenz en toda sustancia conductora de la electricidad sometida a un campo magnético variable se induce una corriente eléctrica.

La corriente inducida, denominada corrientes parásitas o de Foucault, disipan calor por efecto Joule en la carga, efecto útil proporcional al cuadrado de la intensidad.

La corriente eléctrica que atraviesa la bobina crea un campo magnético atraviesa al refractario y funde el material de carga metálica dentro del horno. La bobina de cobre es mantenida sin sobrecalentamiento por agua de enfriamiento circulando a través de la bobina de inducción. (Fig. 1.1).

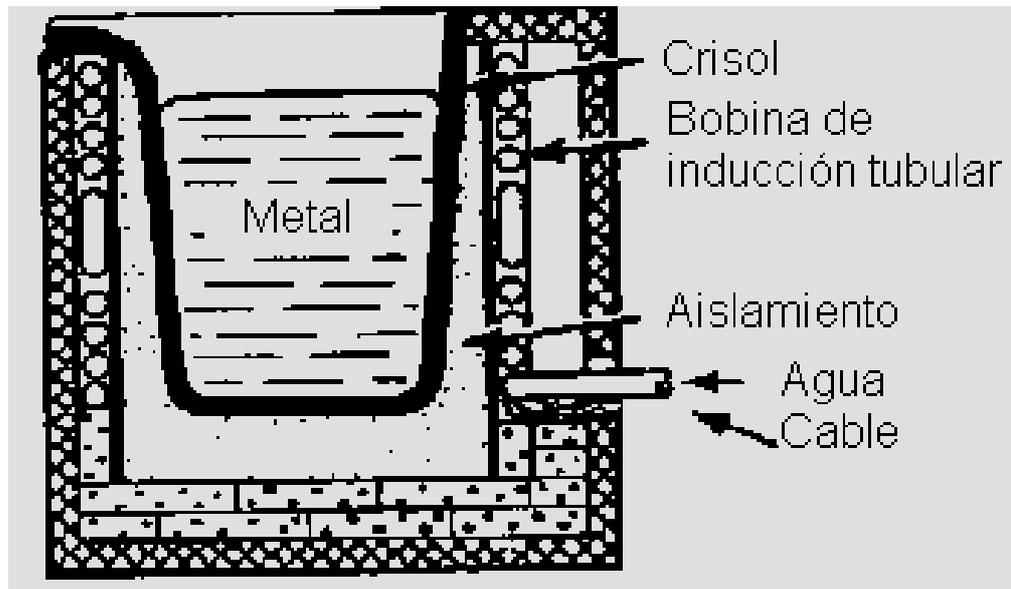


FIGURA 1.1 HORNO DE INDUCCIÓN CON CRISOL.

Los hornos de inducción sin núcleo se basan en la ley física la cual menciona que los cuerpos metálicos sometidos a la acción de un campo magnético de corriente alterna se calientan tanto más cuanto más intenso es el campo magnético y cuanto más elevada es la frecuencia.

En la Fig. 1.2. se tiene un horno de inducción sin núcleo del tipo AJAX, el cual está constituido por su crisol **a** de refractario apisonado que contiene el metal o la carga que se ha de fundir, la bobina de inducción de cobre **b** por la cual circula la corriente y es enfriada en su interior por agua, para vaciar la colada se hace girar el horno hidráulicamente en su pivote **d**.

Por efecto del campo magnético generado por la espiral se induce una corriente a la carga metálica y la energía eléctrica absorbida se transforma en calor. El crisol refractario no impide la acción del campo magnético.

En los hornos de baja frecuencia se emplea la frecuencia industrial o principal de 50 a 60 Hz, y son conocidos como hornos de inducción con núcleo. En los hornos de media frecuencia, ésta puede variar desde 150 a 10.000 Hz, y el método de generación de la media frecuencia puede ser de motor-alternador, de multiplicadores estáticos por transformador de núcleo saturado, y el de tiristores o S.C.R, y los equipos de alta frecuencia pueden operar desde 4.000 Hz hasta 400.000 Hz y estos pueden ser de válvulas electrónicas, de transistores y aperiódicos

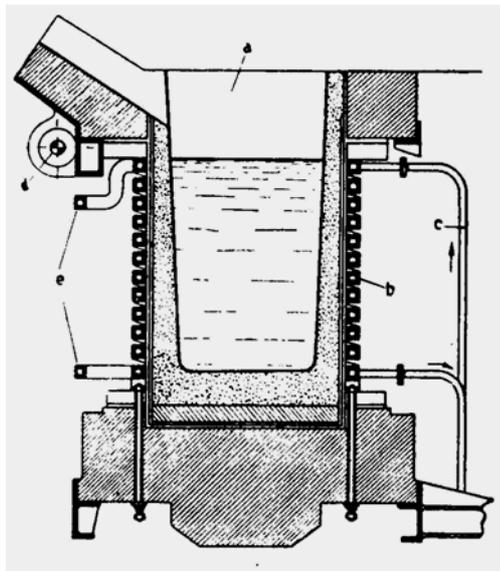


FIGURA 1.2 HORNO DE INDUCCIÓN SIN NÚCLEO TIPO AJAX

En los hornos de media frecuencia de tiristores posee un convertidor de frecuencia que se puede apreciar su esquema en la figura 1.3.

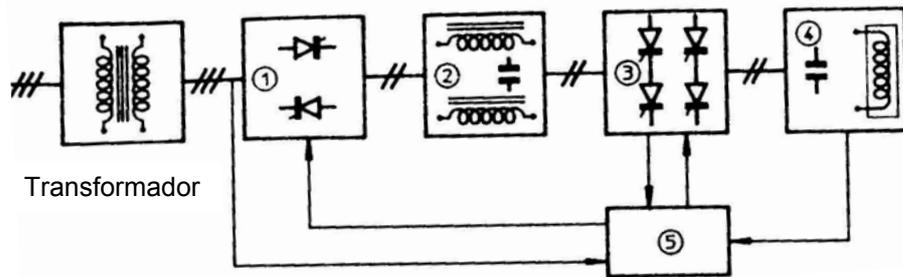


FIGURA 1.3 ESQUEMA DE CONVERTIDOR ESTÁTICO DE MEDIA FRECUENCIA DE TIRISTORES.

La línea trifásica alimenta al transformador y este a su vez a un rectificador de corriente de tiristores a 50-60 Hz del tipo de puente de Graetz 1, luego un equipo de filtrado 2 compuesto por una reactancia de alisado para obtener una corriente continua después a un ondulator o convertidor de frecuencia 3 de tiristores monofásico destinado a transformar la corriente continua de entrada en corriente de media frecuencia, de ahí al circuito del horno 4 formado por la bobina del horno y el banco de condensadores de corrección del factor de potencia propia del equipo por último el circuito de control 5 manejado electrónicamente.



FIGURA 1.4 VISTA LATERAL DEL EQUIPO.

En las toma fotográficas Fig. 1.4 y Fig. 1.5 se puede observar el banco de capacitores con su respectivo tablero de control, la central hidráulica con sus accesorios, el sistema de enfriamiento con sus radiadores, motores y ventiladores.

El horno en sí, consta de dos cubas, el horno basculante de la derecha esta operativo en cambio el horno de la izquierda esta fuera de servicio motivo de nuestro estudio y análisis



FIGURA 1.5 VISTA FRONTAL DEL HORNO DE INDUCCIÓN

1.2 Tipos de refractarios apisonables monolíticos.

Todos los hornos utilizan materiales refractarios los cuales son productos capaces de resistir las elevadas temperaturas sin fundirse y su resistencia pirocópica o cono seger es superior a los 1500°C (CONO 18 ver anexo). Cabe resaltar que la finalidad del aislamiento refractario en el horno de inducción es de:

Contener la colada

Disminuir las pérdidas de calor

Lograr en su exterior un ambiente adecuado.

En su interior proteger a la bobina de inducción.

Cortar la penetración de metal fundido o derrame de metal.

Soportar la temperatura máxima de operación.

Ser buen aislante térmico y eléctrico.

Soportar los cambios bruscos de temperaturas

Resistir la erosión causada por el torrente de gases ascendentes, el descenso de las cargas y de la escoria.

Tener alta resistencia a la compresión.

Por su comportamiento químico, los materiales refractarios se clasifican en tres grupos: ácidos, básicos y neutros.

Los materiales refractarios ácidos tales como la sílice del tipo apisonables son los más usados en los hornos de inducción sin núcleo. El análisis químico requerido de este tipo de refractario se muestra en la tabla 1.

TABLA 1

ANÁLISIS QUÍMICO PARA REVESTIMIENTO ÁCIDO.

SiO ₂	98.9
Al ₂ O ₃	0.6
Fe ₂ O ₃	0.2
CaO	0.1
MgO	0.04
Alkali	0.2

También en esta clase de hornos se pueden usar refractarios del tipo químicamente neutro. Entre los refractarios neutros se puede mencionar a la alúmina Al_2O_3 . En estado natural se la obtiene de la bauxita y para obtener alúmina con una pureza del 99.7% se usa el procedimiento conocido como el proceso Bayer.

Entre los materiales refractarios básicos se tiene a la magnesia y la dolomita, estos son usados muy poco en los hornos de inducción, la mayor desventaja de la magnesia es su pobre resistencia a los choques térmicos. En la naturaleza su mineral se lo conoce como magnesita y debe ser calcinado completamente para su proceso.

TABLA 2

PROPIEDADES PRINCIPALES DE MATERIALES REFRACTARIOS.

Nombre Común	Sílice	Alúmina	Magnesia
Composición Primaria	SiO_2	Al_2O_3	MgO
Punto de fusión	1723	2050	2800
Energía libre a 1450°C, KJ/mol	-594	-758	-732
Conductividad térmica (k) W/mK, 0-1200°C	1.7	2.6	4.0
Coefficiente de expansión ($\alpha \times 10\text{E}-6$)°C 0-1200°C	12.2	8.2	13.8
Resistencia al choque térmico ($R=\sigma k/E\alpha$)	715	480	345
Densidad ρ (g/cm ³)	2.65	3.98	3.58
Costo relativo	1	5	2.5-10

En la tabla 2 se tienen las propiedades de refractarios de uso común en los hornos de inducción la sílice, alúmina y magnesia. El punto de fusión de la Sílice pura es de 1723°C, el de la Alúmina de 2050°C tal como se muestra en el diagrama de fase del sistema Sílice-Alúmina. fig 1.6 El punto de fusión de la Magnesia es de 2800°C, la resistencia al choque térmico de la Sílice es mayor que el de al Alúmina y el de la magnesia la cual tiene una pobre resistencia a los choques térmicos, el costo de la Sílice es barato en contraste con la Alúmina y la Magnesia.

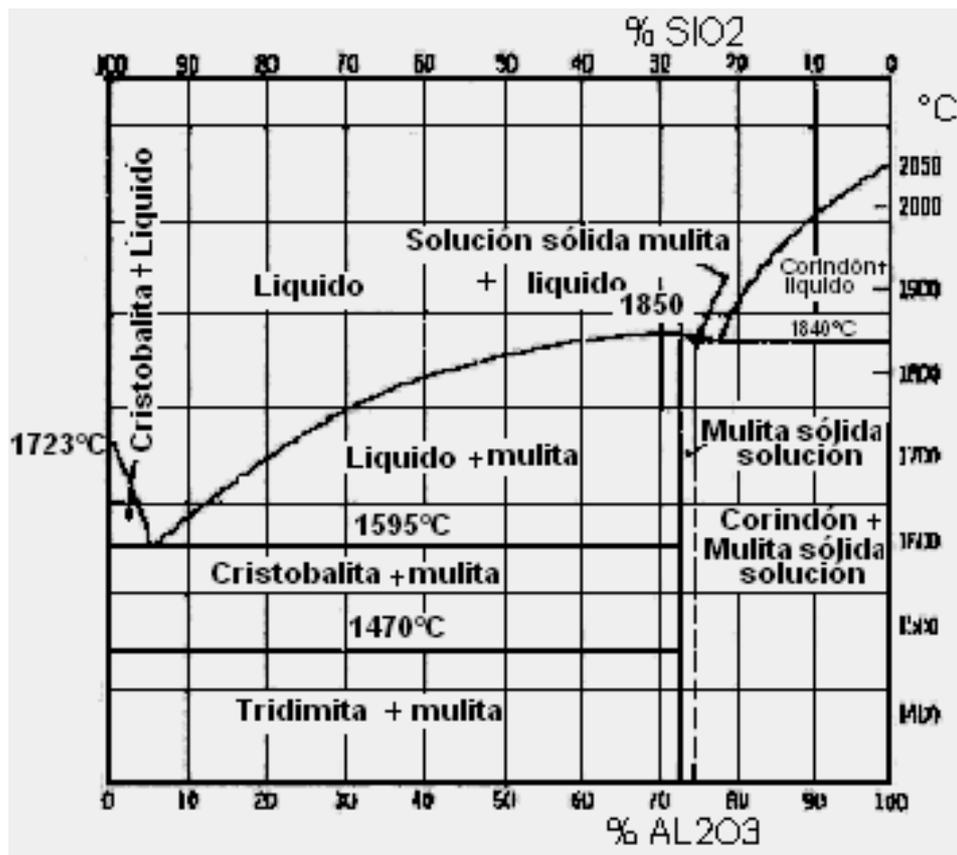


FIGURA 1.6 DIAGRAMA DE FASE DE LA SÍLICE-ALÚMINA.

El coeficiente de expansión térmica de la Sílice es de 12.2×10^{-6} en un rango de temperatura de 0-1200°C por lo que su razón de calentamiento debe ser lenta principalmente a los 573°C ya que sufre una transformación de cuarzo α a cuarzo β acompañada de una abrupta expansión ya que su cambio de volumen esta cerca de un 0.9% como se muestra en la fig.1.7

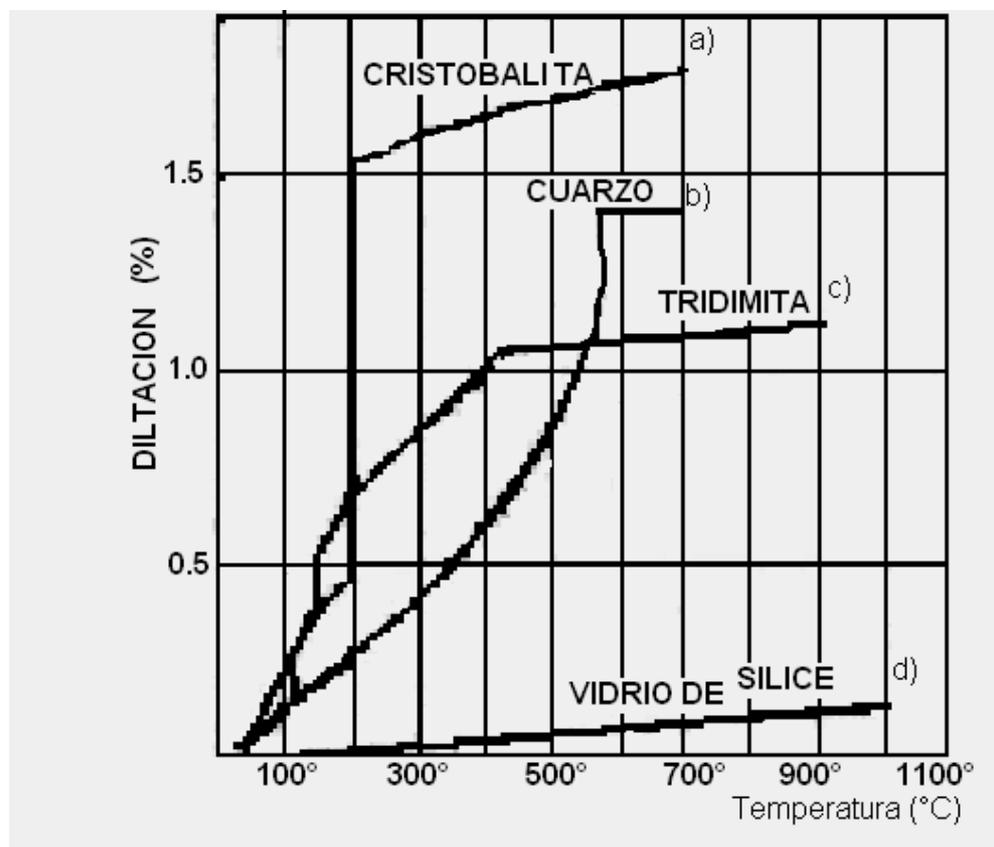


FIGURA 1.7 DILATACIÓN TÉRMICA DE LA SÍLICE

En el gráfico las ordenadas viene dada por la dilatación en porcentaje (%) vs abscisa que esta la temperatura en °C la curva (a) representa a la Cristobalita, la (b) al Cuarzo, la (c) a la Tridimita y la curva (d) al

vidrio de Sílice. En nuestro caso la arena de sílice que es la curva (b) el cuarzo.

1.3 Sinterización de los refractarios.

Los refractarios apisonables son materiales refractarios acondicionados usualmente con ligante hidráulico, con ligante químico, con ligante cerámico o combinados y no son extrudados pero tienen la plasticidad adecuada para ser apisonados y formar una estructura monolítica.

El revestimiento del horno de inducción se forma con arena sílice que consiste de granos microscópicos de cuarzo ligado con un cemento amorfo.

La recomendación de un estudio hecho en 50 fabricas Británicas usuarias de hornos de inducción nos proporciona una composición de tamaño de grano para el revestimiento que se exponen en la tabla 3 y que a dado buenos resultados.

El ligamento o agente de sinterizado para la sílice puede ser óxido ó ácido bórico. Si es ácido bórico se usa en la proporción del 1,0 al 3.0 %.

Sí es que se va a trabajar con una temperatura de 1550°C se debe adicionar un 2% de ácido bórico, pero este porcentaje se reduce al 1% si la temperatura de operación es de 1650°C

Durante la sinterización el ácido bórico reacciona con los granos finos de la sílice con lo que se produce una fase vidriosa en la cual se rellenan los huecos intersticiales entre los granos de cuarzo y liga la capa de fritada dentro de una masa monolítica. Este sinterizado debe ser muy lento para evitar grietas y fisuras las cuales pueden dar paso a una falla por penetración.

TABLA 3

GRANULOMETRÍA PARA REVESTIMIENTO EN BASE A LA ARENA DE SÍLICE.

Grano grueso > 850 μm	Grano medio 850 – 200 μm	Grano fino 200-63 μm	Grano ultra fino < 63 μm
33%	30%	17%	20%

La presencia de una pequeña cantidad de fase líquida acelera el proceso de sinterización y puede ocurrir a temperaturas más bajas, pero una cantidad excesiva puede modificar la forma y resistencia del material.

La Sinterización es el proceso que sirve para la densificación de un material policristalino y proporciona una liga cerámica de los granos de arena. Se produce al calentar a temperaturas próximas y por debajo

de la solidus, también se produce la sinterización a temperaturas por encima de la solidus.

Produciéndose fusión parcial de los granos de sílice actuando la presencia de fase líquida como un medio de transporte de materia. Al calentar el polvo fino a temperaturas subsolidus se produce un incremento de las áreas de contacto inter partículas con el tiempo se producen uniones entre partículas "cuellos" Fig 1.8 que crecen en espesor. El efecto es de tirar de los cristales aproximándolos que con el tiempo y el incremento de la temperatura se aumenta la densidad del refractario debido a que los poros pierden conectividad y se reducen hasta ser eliminados de la superficie, al desaparecer los poros el refractario se aproxima a la densidad cristalina teórica.

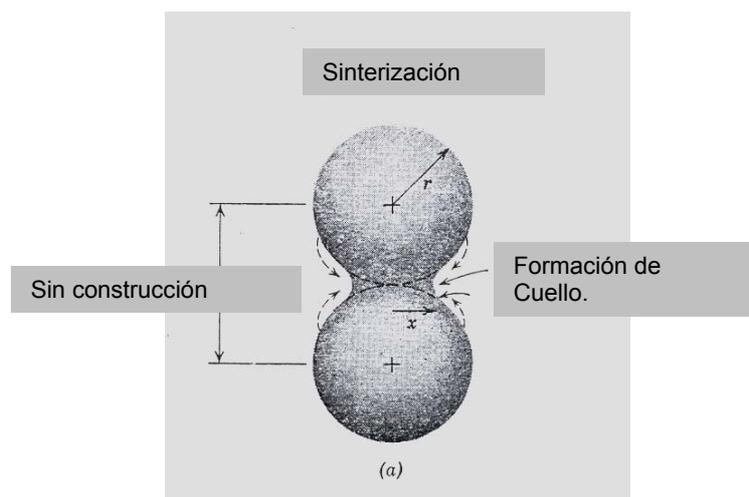


FIGURA. 1.8 SINTERIZACIÓN DE GRANOS DE MATERIALES DE UNA SOLA FASE.

La cinética de crecimiento de grano y la microestructura final del refractario depende del ángulo entre los granos cristalinos en la fase líquida denominado ángulo diedro. Así un ángulo diedro pequeño da un crecimiento de grano más rápido y un tamaño de grano final mayor.

Una vez que el refractario con su ligamento a sido instalado correctamente, la masa del refractario debe ser calentada en orden para activar el ligante y juntos formar el crisol. El calor debe ser aplicado de una manera controlada, para remover lentamente alguna humedad, y también se permiten que ocurran los cambios cristalinos en el desarrollo inicial del cerámico con el ligante. Este proceso es normalmente llevado a cabo durante la fusión de la primera carga metálica esta primera fundida se la conoce como el quemado del revestimiento.

Después del quemado en la cual la temperatura de revestimiento a variado considerablemente desde la cara caliente la cual esta en contacto con el metal a la cara fría próxima a la bobina refrigerada, en la sección ver figura 1.9.se distinguen tres zonas en el revestimiento que son creadas en el quemado o proceso de sinterizado.

Una zona sinterizada es formada en la cara caliente, con un relativo esfuerzo mecánico alto y una baja porosidad en su estructura. Esta

zona es aproximadamente un quinto del espesor del revestimiento y generalmente esta expuesta a temperatura por encima de los 1300°C.

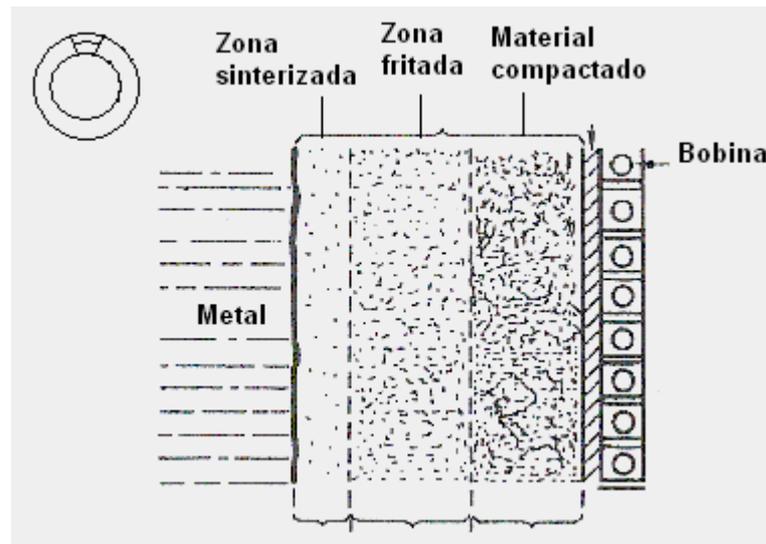


FIGURA 1.9 SECCIÓN DEL REVESTIMIENTO REFRACTARIO Y ZONAS CARACTERÍSTICAS DE ACUERDO A LA TEMPERATURA ALCANZADA EN LA SINTERIZADA

La siguiente zona es conocida como zona fritada que se forma detrás de la cara sinterizada y esta expuesta a una temperatura entre los 900-1300°C el desarrollo del ligante no se completa y naturalmente los esfuerzos mecánicos de esta zona se reducen a un tercio de la zona de sinterizado así también la porosidad es alta, esta zona ocupa dos quintos del espesor del revestimiento.

La zona que queda junto a la bobina es el remanente del refractario y que nunca alcanza los 900°C pues generalmente es mucho más baja que ésta. Como consecuencia del no haberse unido con el ligante esta zona retiene la forma original del aglomerado granular del revestimiento. Esta zona es muy importante porque sirve como una protección de la bobina cuando se produce una grieta o “crack” en la zona sinterizada y a través de la zona de la fritada esta capa no permite que el metal fundido penetre hasta la bobina de poder y es conocida como granos aglomerados. Para mayor protección de la bobina se coloca un barniz aislante y amianto entre la bobina y el revestimiento de la Sílice o también tela de asbesto.

Como la vida útil del revestimiento se prolonga el espesor de las tres capas de las interfases del revestimiento empieza adelgazarse y estas zonas tienden a moverse hacia la bobina, y eventualmente el material de aglomerado de la zona adyacente a la bobina se reduce y la grieta o “crack” se desarrolla y puede llegar a traer grandes problemas a la bobina tal como se muestra en la Fig. 1.10 en la que se está reparando con electrodo revestido la bobina luego de ser afectada por la alta temperatura del metal líquido que había en la colada con la consecuencia de la explosión metal/agua. Se corrigió la fuga de agua de la bobina después del desmontaje, posteriormente se realizó una

prueba hidrostática para comprobar si la aplicación de la soldadura había tenido la suficiente penetración y la estanqueidad de la bobina o solenoide requerida.



FIGURA 1.10 APLICANDO SOLDADURA DE BRONCE UTP-32 A LA BOBINA.

1.4 Control del desgaste de refractario por kg. de metal fundido.

En el interior del horno de inducción nos encontramos con el revestimiento refractario el cual sufre un desgaste normal como resultado del desprendimiento dado por el metal sobre las superficies de las paredes del crisol esto se debe a la acción de agitación inductiva causado por el campo de inducción electro-magnético del horno.

La importancia de esta agitación inductiva del baño de metal está en que la colada se mantiene siempre homogénea, y la absorción de adiciones como ferro-aleaciones o elementos químicos es siempre más eficiente que en otros tipos de hornos.

En teoría, el desgaste del refractario debería ser uniforme en todas las partes del crisol, pero en la práctica ocurre el desgaste en tres lugares bien definidos.

- En la interfase del metal y la escoria.
- En la unión del piso con las paredes a su alrededor.
- Y las áreas más pobres de revestimiento generadas en su instalación.

Para determinar el desgaste del revestimiento se usan 4 métodos que son: el visual, medidas físicas, chequeo de las características eléctricas del horno y otros parámetros tales como la temperatura del agua de enfriamiento midiendo la temperatura del revestimiento y otras temperaturas sensibles del equipo.

Entre la inspección visual esta la de revisar diariamente el crisol, sus paredes de revestimiento, el fondo y la parte superior.

Las mediciones directas del diámetro interior del horno de inducción es uno de los controles a llevar para poder obtener un consumo por desgaste del revestimiento y así poder programar el cambio del mismo y evitar daños catastróficos para los hornos artesanales de crisol.

Se deben tomar medidas del desgaste de crisol después de cada colada. En nuestro caso se empleó la siguiente herramienta y método para medir el diámetro del crisol.

En la Fig.1.11 se muestra la herramienta, la longitud del mango debe ser la profundidad del horno más unos 75mm por lo que se construyó el mango de tubo de hierro negro cedula 40 con una longitud de 750mm, en su extremo tiene un espárrago de 3/4 hilo corrido en acero inoxidable 304 su longitud es de 350mm, luego una tuerca de 3/4HG en acero inoxidable en ambos extremos que sirven para la fijación del regulador de distancia el mismo es construido en acero inoxidable con una longitud de 145mm con uno de sus extremos con cabeza redondeada y en el otro extremo la rosca hembra de 3/4HG unida por medio de dos barras de $\varnothing=10$ mm por 134mm de longitud.

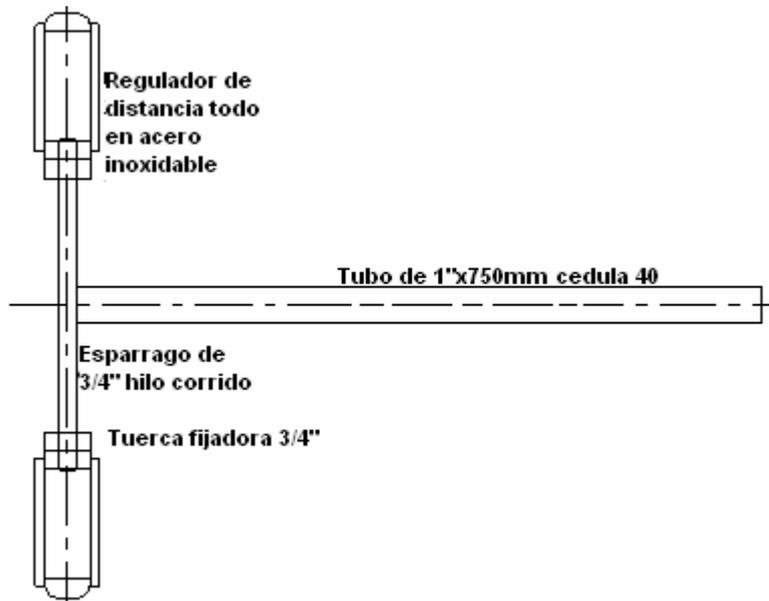


FIGURA 1.11 HERRAMIENTA PARA TOMA DE MEDIDAS INTERIORES DEL HORNO.

Con esta herramienta se realizan las lecturas de los diámetros de la mitad del crisol hacia abajo la cual es capaz de medir en todas las áreas fácilmente y compararlas con el diámetro original y se establece el % de desgaste de acuerdo a la tabla 4 obtenida experimentalmente. El desgaste máximo permitido en el revestimiento del horno es el 35% del espesor total de las tres capas sinterizadas.

Otra de las señales de alarma que nos indica que el revestimiento debe ser reemplazado es el aumento de Kg. de metal fundido. Ya que si aumenta la colada quiere decir que aumento su recipiente por lo que el refractario debió disminuir su espesor. Aunque debe tomarse en cuenta la cantidad de escoria adherida a las paredes del horno.

El obtener la máxima potencia con un voltaje más bajo de lo normal también es indicio que el revestimiento esta delgado.

En la colada # 12 la bobina se perforo con metal líquido debido a una fisura en el revestimiento, el diámetro interior llegó a 420mm con 60mm de espesor del revestimiento que representa un 33.33% de desgaste.

TABLA 4

PORCENTAJE DE DESGASTE DEL REVESTIMIENTO PARA CONTROL DESPUÉS DE CADA COLADA.

N° de coladas	Diámetro en mm	Espesor mm	Desgaste %
0	Øi=360	90	0
1	365	87.5	2.70
2	372	84	6.66
3	375	82.5	8.33
4	380	80	11.11
5	384	78	13.33
6	392	74	17.77
7	396	72	20.0
8	400	70	22.22
9	405	67.5	25.0
10	410	65	27.77
11	418	61	32.22
*12	Ø420	60	33.33

El otro método de controlar el desgaste del revestimiento es controlando la temperatura del revestimiento, la temperatura del agua de enfriamiento, así la temperatura de la bobina no debe pasar los 45°C, ya que a los 60°C se forman incrustaciones que tienden a obstaculizar el flujo del refrigerante, también se debe controlar el flujo de agua.

1.5 Reparaciones y fallas del refractario.

En la instalación del material refractario es esencial que todas las partes del horno a ensamblar estén limpias. Ya que algunos materiales extraños pueden causar serios problemas durante la instalación y subsecuentemente en la operación del horno

En la práctica es bueno proveerse de una bandeja de acero para premezclar el material refractario necesario para la instalación.

Todas las herramientas, bandeja de mezclar y pala deben ser limpiadas antes de su uso para evitar la contaminación del material refractario.

Existen tres métodos para la instalación del revestimiento de hornos de inducción; apisonado manual, con vibrador y el de inmersión del vibrador eléctrico. Este último se usa para capas de revestimiento de

225mm de espesor y en hornos de capacidad de 1 a 10 toneladas, la aplicación del revestimiento por medio del vibrador es usado para hornos con capacidades mayores a 10 toneladas aun que también se usa en hornos con capacidades de 6 a 10 ton. En nuestro caso se tiene un horno con una capacidad máxima de 0.5 ton por lo que el método a seguir para la aplicación del revestimiento monolítico es el apisonado manual.

El fondo del horno es apisonado con capas de 5-8 cm la cual tiene un tiempo de instalación entre unos 10 a 15 minutos. Para cerciorarse del espesor de la capa del fondo del horno se debe usar un medidor de profundidad tomado con referencia la parte superior del horno. El exceso de apisonar con la herramienta puede causar segregación en el fondo de la capa del revestimiento aminorando su vida útil.

El cálculo de la masa ó cantidad de material refractario requerido es:

$$M = \rho \times V$$

Donde:

M = Masa.

ρ = Densidad de la sílice (2650 Kg/m³).

V = volumen.

El volumen que ocupa el refractario dentro del horno se obtiene de:

$$V = \pi H (Dt + t^2) + \pi h (D+2t)^2/4.$$

Donde:

D = diámetro exterior del modelo de chapa metálica = 0.36 m

H = altura del modelo de chapa metálica = 0.66 m

T = espesor de la pared del revestimiento = 0.09 m

h = espesor del revestimiento en la base = 0.08 m

Reemplazado valores se tiene

$$V = \pi \times 0.66(0.360 \times 0.09 + 0.09^2) + \pi \times 0.08(0.360+2(0.09))^2/4$$

$$V = 0.102 \text{ m}^3$$

Por lo tanto su masa dada en kg será de:

$$M = 2650\text{Kg/m}^3 \times 0.102\text{m}^3$$

$$M = 271.08 \text{ kg } \text{ ó } 597.47 \text{ lbs}$$

Cuando se realiza el quemado del refractario pueden ocurrir fallas por lo tanto hay que seguir algún procedimiento para evitar estas fallas Existen tres métodos de quemado para formar el crisol.

Unos de los métodos más usados es quemar lentamente el revestimiento con carga metálica formada por acero, usando la potencia inductiva. El otro método parecido al primero pero al crisol luego de alcanzar una cierta temperatura se vierte metal a una temperatura aproximada de unos 1350°C El tercer método consiste en realizar un precalentamiento de la chapa de acero con gas o algún quemador sin carga en el horno hasta una temperatura de 1000°C y

luego completar con metal fundido hasta los 1350°C. En nuestro caso se usó el de quemar el revestimiento con carga es decir el primer método.

En el choque térmico se puede dañar el revestimiento lo cual se hace notar por medio de grietas y el mismo desprendimiento del refractario que llega a perforar a la bobina. La escoria es un producto que se genera de 2 formas, a saber; primero por la fusión de la sílice y segundo por el aporte de productos de oxidación de los metales en fusión y se encuentran en la superficie de la colada las cuales incrementan las fallas en el refractario.

CAPÍTULO 2

2. SOLUCIONES CON ARENA SÍLICE

El revestimiento refractario para hornos de inducción puede ser seleccionado por su composición química: ácidos, básicos y neutros dependiendo principalmente de la colada a fundir y la formación del crisol del horno de inducción debe ser en sitio del tipo apisonable tal como la arena de sílice que corresponde químicamente a un refractario del tipo ácido y que es usado para la fundición de acero principalmente.

La principal característica de estos refractarios es la de soportar las fundiciones con escorias ácidas tales como la fusión de fundición gris y acero moldeado que es lo que produce INTRAMET, entre los refractarios que cumplen con estos requerimientos esta la SiO_2 Sílice (Oxido de silicio) la cual tiene tres formas cristalinas conocidas que son: el Cuarzo, la Cristobalita y la Tridimita.

Para los hornos de inducción se usa la arena de sílice en forma de cuarzo sueco, pero nuestro suelo también proporciona este material y en el ANEXO 2 Análisis Granulométrico, ANEXO 3 Curva Granulométrica y ANEXO 4 Composición Primaria se tienen los análisis de la sílice nacional, provenientes específicamente del oriente de la Provincia de Zamora del Cantón Guaysini en la cual nos indica su análisis químico del material y se tiene un porcentaje de $\text{SiO}_2 = 98.3\%$. Por cuestiones de logísticas, de ahorro de divisas y además por tener las propiedades requeridas se usa nuestra sílice.

2.1 Aumento del espesor.

Desde el punto de vista eléctrico interesa un aislamiento mínimo con el cual se mejora el acoplamiento bobina-carga metálica en el crisol y se logra aumentar el factor de potencia. Desde el punto de vista de pérdidas de calor y seguridad interesa un mayor espesor de aislamiento.

En nuestro caso se tiene un horno con las siguientes características técnicas y con las siguientes dimensiones físicas necesarias para los cálculos requeridos.

Datos de entrada: 440 voltios, 567 amperios

Fase: trifásica

Frecuencia: 60Hz.

Datos de salida: 350Kw; 1000Hz, 1250 voltios, 497 amperios

Diámetro exterior de la bobina: 646 mm.

Números de espiras: 15.

Altura de la bobina: 600. mm.

Diámetro de la espira 29 mm.

El espesor del revestimiento se incrementa con la capacidad de la carga tal como se indica en la Fig. 2.1 la cual es un curva experimental obtenida después de un estudio a más de 50 fundiciones (ref. 3) y que relaciona el espesor del revestimiento vs. capacidad del horno en toneladas.

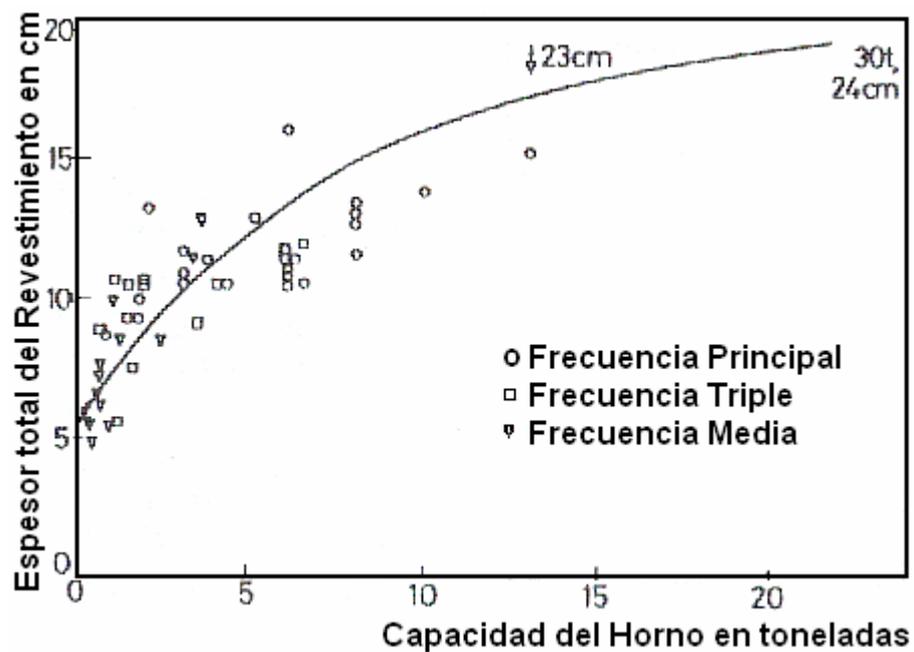


FIGURA 2.1 RELACIÓN DEL ESPESOR DEL REVESTIMIENTO A LA CAPACIDAD DEL HORNO

La carga máxima de hierro que se puede obtener del horno sin considerar la escoria que se produce en el proceso de fusión es:

$$M = \rho * V$$

Masa = Densidad X Volumen

$$M = \rho_{fe} * (\pi/4) * (\theta)^2 * h$$

$$\rho_{fe} = 7.85 \text{ gr/cm}^3$$

θ exterior de la chapa metálica = \emptyset interior del revestimiento = 360mm

$$m = 7.85 \text{ gr/cm}^3 * (\pi/4) * (36.0\text{cm})^2 * 66\text{cm} * (1\text{Kg}/1000\text{gr})$$

$$m = 527.36 \text{ Kg.} = 0.527 \text{ Ton. Esto es con un espesor de 90 mm.}$$

Si su revestimiento es de 6Cm de espesor su capacidad es de = 0.72 Ton

Si su revestimiento es de 10cm de espesor su capacidad es de =0.47 Ton

Antes de este estudio el espesor del revestimiento era de 60mm de espesor pero luego del análisis bibliográfico se decidió aumentarlo a 90mm el espesor de la pared del horno para fusión de hierro gris y de 100mm para acero inoxidable esto se logra con el desarrollo de la chapa metálica que se usa como modelo de tipo cono truncado y en la primera sinterizada el modelo que sirve para retener la sílice y dar forma al interior del horno pasa a ser parte de la carga metálica.

2.2 Aumento de la densidad del refractario.

El material empleado como revestimiento en los hornos de inducción sin núcleo es la sílice y en la sinterización se busca el efecto de tirar de los cristales aproximándolos aumentando la densidad del material refractario al incrementar el tiempo y la temperatura, eliminando los poros entre partículas perdiendo su conectividad. Si los poros pueden reducirse hasta ser eliminados de la superficie la densidad del material se aproxima a la densidad cristalina teórica

TABLA 5

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL REVESTIMIENTO ANTERIOR.

No. de Malla	Micrones	Gramos	Porcentaje
10,12,14,16	> 850 μm	0.0	0 %
30	590	5.3	3.52%
40	425	14.6	9.71%
50	297	30.5	20.28%
70	210	31.7	21.08%
80	180	9.3	6.18%
100	150	12.2	8.11%
200	74	33.4	22.21%
FONDO		13.4	8.91%
	TOTAL	150.4	100%

En la tabla 5 se presenta el ensayo granulométrico de la arena de Sílice utilizada antes.

Uno de los motivos por la cual el revestimiento tuvo una falla catastrófica, es que la granulometría que se usaba no era la apropiada tal como se muestra en la tabla 6, el análisis granulométrico realizado en el laboratorio de suelos y resistencia de materiales de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL muestran que se usó un 54.6% de grano medio, un 36.5% de grano fino, un 8.9% de grano ultra fino y 0% de grano grueso, motivo por lo cual el sinterizado se quemó muy rápidamente.

Desde la malla 10 hasta la malla 18 abarca lo que es grano grueso, mayor a 850 μm , que las mallas 20 hasta la 70 abarca el rango de granulometría comprendida de 850-200 μm es decir el grano medio, que las mallas 80 hasta la 230 abarca los granos finos que comprende los 200-63 μm y que las mallas 270 hasta la malla 400 abarca al grano ultra fino o granulometría menores a los 63 μm .

Luego se utilizó la granulometría recomendada por BCIRA (ver tabla 3) con un porcentaje de ácido bórico del 1%. En la Fig.2.2 se observa el proceso del análisis de granulometría.

TABLA 6
PORCENTAJES USADOS ANTES EN EL REVESTIMIENTO DE
SÍLICE EN EL HORNO

	Grano grueso > 850 μm	Grano medio 850 – 200 μm	Grano fino 200-63 μm	Grano ultra fino < 63 μm
N° Malla	10,12,14,16,18	30,40,50,70	80,100,200	Fondo
Gramos	0.0 g	82.1 g	54.9 g	13.4 g
Porcentaje	0 %	54.6 %	36.5 %	8.9 %

El total requerido de arena sílice para el llenado total del revestimiento entre la chapa metálica y la capa de protección de la bobina es de 597 lbs.

Esta capa de protección en nuestro caso es de tela de asbesto de 6mm de espesor recubierto con cemento Concrax 1500 con un espesor de 18 mm quedando con un diámetro de 540mm disponible para la sílice.

Por lo que se requiere de 197lbs de grano grueso que representa el 33%; de 179 lbs correspondiente al 30% de grano medio, 101.5 lbs de

grano fino que es el 17 % y de 119.4 lbs de grano ultra fino 20%, y se debe adicionar 5.97 lbs de ácido bórico correspondiente al 1%.



FIGURA 2.2 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO REALIZADO EN LA FICT.

En la tabla 7 se tiene el análisis granulométrico de la arena de sílice que se usó en el proceso de revestimiento del horno de inducción con su respectivo número de malla su equivalente en micras la cantidad en gramos y su respectivo porcentaje de un total de 400 gramos.

TABLA 7
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SÍLICE

U.S. MESH (#. malla)	MICRONS (μm)	GRAMOS (gr)	PORCENTAJE %	RETENIDO ACUMULADO%
4	4760	24.06	6.02	6.02
8	2380	39.83	9.96	15.98
10	2000	32.22	8.05	24.03
16	1190	35.75	8.94	32.97
30	595	34.57	8.64	41.61
40	400	28.36	7.09	48.70
50	297	29.12	7.28	55.98
70	210	28.16	7.04	63.02
80	177	18.74	4.68	67.70
100	149	20.44	5.11	72.81
200	74	28.75	7.19	80.00
Fondo	63	80.00	20.00	100.00

2.3 Curva de calentamiento para la sinterización.

Los cambios bruscos de temperatura especialmente bajo los 650°C , son catastróficos para la sílice por su gran coeficiente de dilatación lineal Fig. 2.3 a baja temperatura por lo cual hay que prevenirlas con velocidades de calentamientos suaves especialmente donde se producen los cambios alotrópicos de la sílice que van acompañados de cambios de volumen. Elevar la temperatura en etapas es crucial en

el proceso de quemado de refractarios por dos motivos la sinterización y el crecimiento de grano.

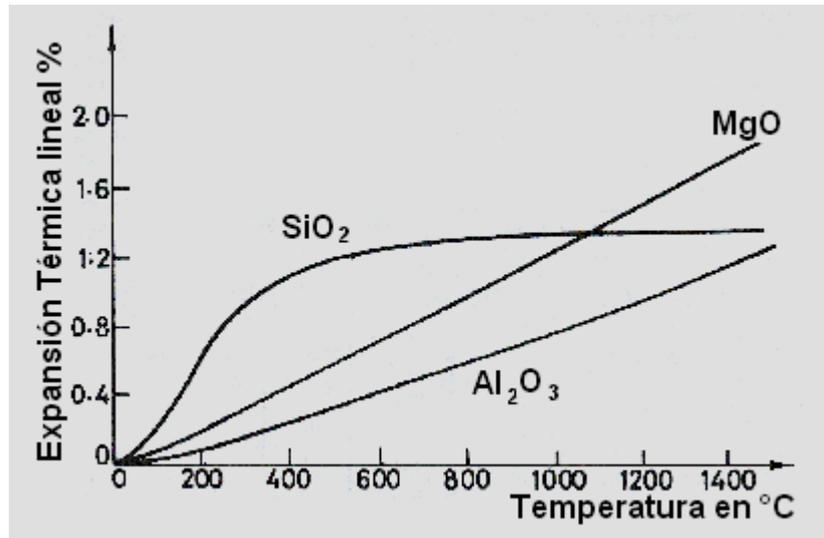


FIGURA 2.3 LÍNEA DE EXPANSIÓN TÉRMICA DE MATERIALES REFRACTARIOS APISONABLES.

En el proceso de sinterización se debe tener presente las regiones más críticas para cada refractario dependiendo de su curva de quemado y de las reacciones que ocurren.

Tanto la variación de la granulometría y el porcentaje del ligante dificulta una regla definitiva de cómo alcanzar una razón de cambio de la temperatura, pero en la Fig.2.4 se muestra una curva típica de calentamiento para los hornos de la capacidad menores de 10 t con ácido bórico como agente de sinterizado.

La temperatura final sobre el metal debe ser de unos 40°C arriba de la Temperatura de operación, y se la debe mantener por una hora para, asegurar un quemado satisfactorio del revestimiento.

En la Fig.2.4 se tiene la curva típica de quemado para ácido bórico como ligante para el refractario, la razón de calentamiento, la indicada en el grafico de 0 a 600°C el calentamiento es a razón de 100°C/h en un tiempo de 6 horas, luego se incrementa a razón de 200°C/h para permitir que alguna humedad escape libremente y también permitir que tengan lugar los cambios de volúmenes debido a los cambios alotrópicos cristalinos y la expansión térmica.

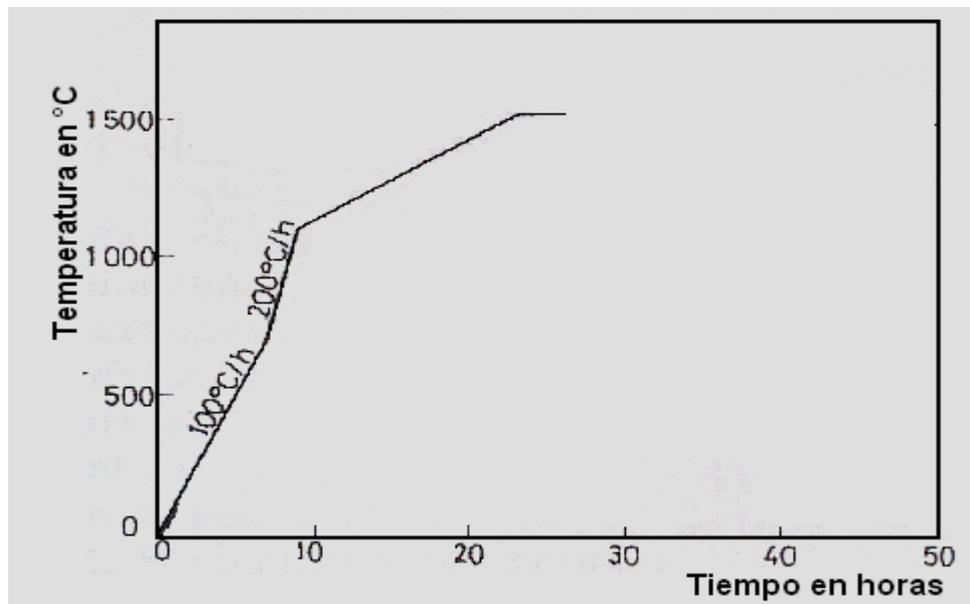


FIGURA 2.4 CURVA DE SINTERIZACIÓN CON LIGANTE DE ÁCIDO BÓRICO PARA LA SÍLICE.

Por encima de los 800°C ocurren expansiones térmicas pequeñas por lo que la velocidad de calentamiento puede ser incrementada.

Para realizar la sinterización del revestimiento del horno de inducción se dio cita al personal designado a las 23h00, para arrancar con el proceso a las 24h00. Antes de iniciar se realiza una última revisión del horno en general: nivel de agua del sistema de enfriamiento, si las bandas de los motores tienen su temple correspondiente, ajustes de abrazaderas, ajustes de los contactos y terminales eléctricos. Dado que el refractario a sido instalado con su respectivo procedimiento y la primera carga de metal esta lista para el sinterizado, en la tabla 7 se tiene los datos tomados de la hora inicial, la hora final y la temperatura máxima y mínima alcanzada en el proceso de quemado del refractario del horno de inducción.

La curva que se muestra en la fig.2.5 fue la seguida para el caso de INTRAMET. Y se la obtuvo experimentalmente. Para poder obtener la velocidad de calentamiento se monitorea el incremento de la temperatura, se prende y apaga el horno cada determinado tiempo.

Al inicio duró la prendida 3 minutos, llegando su temperatura hasta los 120 °C se espero unos 22 minutos en que su temperatura bajo hasta

los 77 °C; Luego se prendió el horno en promedio cada 8 min. Y paso prendido por un Lasso de 30 segundos durante las cuatro primeras horas a un 70% de su potencia. A partir de la cuarta hora se prendía el horno cada 4 min.;Y se mantenía energizado el horno por un tiempo de 8 min.

Si se realiza un análisis de regresión lineal ($y = a + bx$) en esta primera parte se obtiene la siguiente ecuación de línea recta.

de datos = 44; $a = 89.00$ intersección con el eje y ; $b = 124.44$ la pendiente y su correlación $r = 0.98$.

$$Y(T) = 89 + 124.44x(\text{hr})$$

A partir de la sexta hasta la novena hora se prendía el horno cada 5 min. Manteniendo prendido el horno por un tiempo de 26 min. de igual forma si realizamos un análisis de regresión lineal en esta segunda parte del proceso de quemado obtenemos los siguientes resultados:

de datos = 7; $a = -562.82$ intersección con el eje y ; $b = 215.38$ la pendiente y su correlación $r = 0.99$.

$$Y(T) = -562.82 + 215.38x(\text{hr}).$$

En las siguientes cuatro horas se mantuvo prendido el horno en forma continua y constante ya con metal fundido hasta vertir la colada. Luego en el gráfico 2.5 se tiene la curva de sinterización obtenida del proceso.

TABLA 8
VALORES DE TIEMPO, TEMPERATURA EN EL PROCESO DE SINTERIZADO.

Hora inicio (X)	Hora final	Δt	T. Máx.(Y)	T. Mín.	ΔT
0,22	0,22		77		
0,33	0,33	0,11	117	104	13
0,43	0,43	0,1	164	107	57
0,56	0,56	0,13	185	120	65
1,15	1,15	0,19	173	139	34
1,2	1,2	0,05	187	160	27
1,25	1,25	0,05	195	164	31
1,31	1,31	0,06	217	195	22
1,39	1,39	0,08	242	205	37
1,47	1,47	0,08	263	218	45
1,55	1,55	0,08	280	235	45
1,59	1,59	0,04	284	240	44
2,05	2,05	0,06	328	260	68
2,1	2,1	0,05	347	276	71
2,15	2,15	0,05	355	277	78
2,24	2,24	0,09	360	284	76
2,3	2,3	0,06	379	298	81
2,35	2,35	0,05	380	301	79
2,4	2,4	0,05	418	338	80
2,5	2,5	0,1	433	328	105
3	3	0,1	446	375	71
3,05	3,05	0,05	472	376	96
3,09	3,09	0,04	487	384	103
3,15	3,15	0,06	498	394	104
3,2	3,2	0,05	512	413	99
3,25	3,25	0,05	543	423	120
3,32	3,32	0,07	557	452	105
3,4	3,41	0,09	560	448	112
3,47	3,48	0,08	585	457	128
3,54	3,55	0,08	596	486	110
4	4,01	0,07	617	490	127
4,07	4,1	0,1	609	506	103
4,12	4,14	0,07	613	517	96
4,18	4,2	0,08	624	519	105
4,24	4,27	0,09	648	545	103
4,33	4,38	0,14	665	555	110
4,42	4,5	0,17	663	620	43
4,53	4,58	0,16	674	625	49
5,03	5,08	0,1	680	610	70
5,13	5,19	0,16	682	681	1
5,2	5,24	0,11	692	661	31
5,25	5,4	0,2	697	684	13
5,42	6	0,39	710	707	3
6,04	6,18	0,38	750	698	52
6,2	6,35	0,31	770	720	50
6,4	6,55	0,35	850	760	90
7	7,25		910	840	70
7,3	7,55		995	950	45
8	8,3		1150	1120	30
8,35	9		1270	1200	70
9,05	9,55		1380	1275	105
10	13		1400		
11	13		1400		
12	13		1400		
13	13		1400		

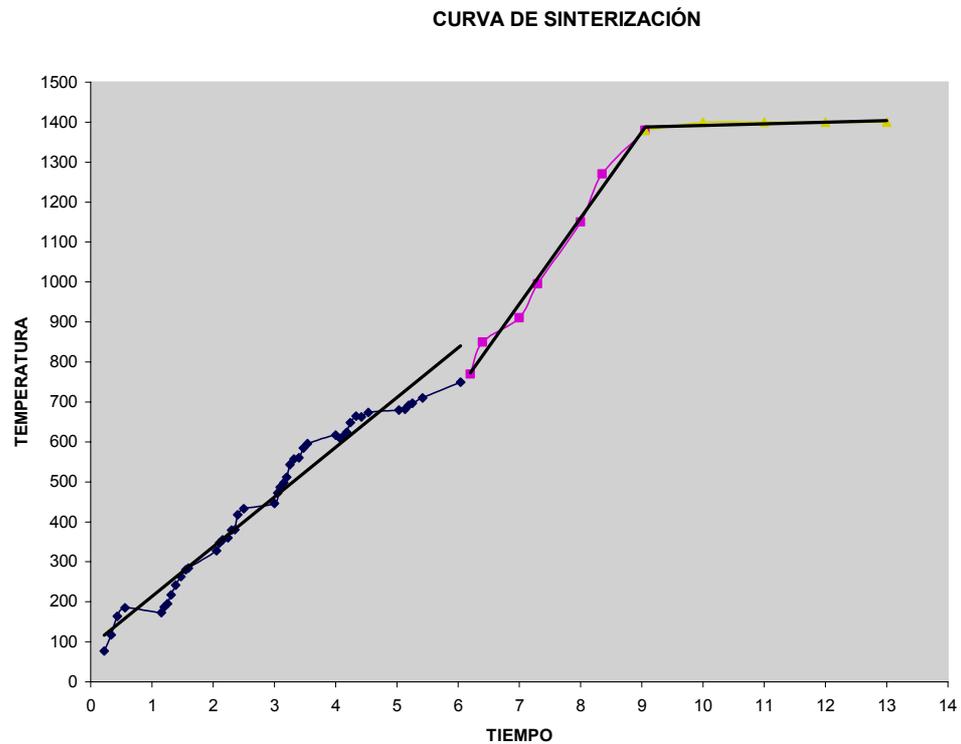


FIGURA 2.5 CURVA DE SINTERIZACIÓN OBTENIDA EN EL QUEMADO DEL REFRACTARIO.

2.4 Índice de consumo con refractario mejorado.

Luego de realizar los cambios de espesor en el horno de inducción se a logrado mejorar la potencia, su tiempo de operación, se ha logrado un mayor números de coladas y se tiene un horno de mayor seguridad para los operarios de este equipo.

Para hornos de inducción de media frecuencia, el consumo de energía para la fusión de diversas aleaciones Ferrosas y no Ferrosas es:

Acero = 620 Kwh/t.

Fundición = 580 Kwh/t.

Bronce = 420 Kwh/t.

Aluminio = 610 Kwh/t.

En la tabla 9 se presenta el desgaste en porcentaje del refractario en sus 25 coladas que duro el nuevo revestimiento, el comportamiento de su diámetro, de su espesor y la prolongación de su vida útil.

TABLA 9
PORCENTAJE DE DESGASTE PARA 25 COLADAS QUE DURO EL
NUEVO REVESTIMIENTO.

Nº. de coladas	Ø Diámetro mm	t Espesor mm	Desgaste %	Vida útil %
0	360	90	0	100
1	361	89.5	0.55	98.33
2	363	88.5	1.67	95.00
3	364	88.0	2.22	93.33
4	365	87.5	2.70	91.67
5	368	86.0	4.44	86.67
6	370	85.0	5.56	83.33
7	373	83.5	7.22	78.33
8	375	82.5	8.33	75.00
9	378	81.0	10.00	70.00
10	380	80.0	11.11	66.67
11	381	79.5	11.67	65.00
12	382	79.0	12.22	63.33
13	384	78.0	13.33	60.00
14	385	77.5	13.89	58.34
15	385	77.5	13.89	58.33
16	392	74.0	17.77	46.67
17	394	73.0	18.88	43.33
18	396	72.0	20.0	40.00
19	398	71.0	21.11	36.67
20	400	70.0	22.22	33.33
21	404	68.0	24.44	26.67
22	408	66.0	26.67	20.00
23	415	62.5	30.56	8.33
24	418	61.0	32.22	3.33
25	420	60	33.33	0

La primera columna indica el número de coladas seguido del diámetro tomado después de cada colada usando la herramienta artesanal previamente construida y descrita en el sub-capítulo 1.4. El espesor se lo obtiene restando el diámetro de 540 y dividiendo para dos.

$$t = (540 - \varnothing)/2.$$

El porcentaje de desgaste se lo obtiene dividiendo el espesor entre 90 y este valor se resta de la unidad y se multiplica por 100.

$$\% \text{ desgaste} = (1 - t/90) \times 100.$$

Su vida útil se halla restando 60 de su espesor multiplicando por 100 y luego dividiéndolo entre 30.

$$\% \text{ Vida útil} = (t-60) \times 100/30.$$

El diámetro con el cual se dio inicio este nuevo ciclo de vida del refractario es de $\varnothing = 360$ mm, con un espesor de $t = 90$ mm. Pero al llegar el refractario a un (30% ó 40%) se debe reemplazar dicho refractario y empezar el proceso de cambio de arena sílice siguiendo los procedimientos aquí explicado, este cambio de refractario se debe realizar por seguridad de la bobina y del horno en si y principalmente por la seguridad del personal que labora en dicho equipo y en la empresa. Ya que una explosión metal-agua es de una gran magnitud.

Si se toma el promedio de desgaste permisible del refractario en un 35% esto nos da un espesor t de 31.5mm, ó un diámetro $\varnothing = 63\text{mm}$.

Entonces nuestro diámetro con el que debemos parar por seguridad es de $\varnothing = (360 - 63) \text{ mm} = 423\text{mm}$.

El índice de consumo de refractario por las coladas que duro este nuevo refractario esta dado por el # de coladas entre el espesor limite de desgaste permisible es decir:

$$\text{Índice de consumo} = \# \text{ de coladas} / 30\text{mm}.$$

$$\text{Índice de consumo} = 25/30 = 0.83.$$

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIONES DE LA IMPLANTACIÓN

Luego del análisis situacional, estudio y revisión bibliográfica se usó la granulometría recomendada obtenida de la información británica de industrias dedicadas a la fundición con hornos de inducción y además con el aumento del espesor del refractario se logra varias mejoras que se evaluarán en este capítulo.

Las mejoras más importantes que se mencionan es la incidencia en la seguridad de la operación, en el incremento de la producción en nuestro caso cantidad de coladas con el mismo costo de un solo revestimiento del crisol eso si con una buena preparación del material refractario, el mejoramiento de la productividad en base al mejoramiento de la vida útil del refractario evidenciado por el incremento de coladas para el costo de la sinterizada del refractario.

3.1 Incidencia en la productividad.

El realizar menos paradas para realizar el cambio o reparación del refractario, así como también dándole una mayor seguridad en el trabajador se logro aumentar la productividad.

La cantidad de coladas que se obtuvieron antes de este estudio fueron de 12 coladas problema por el cual se dio paso al presente trabajo para analizar las posibles fallas del refractario, después de finalizado este trabajo se realizaron las correcciones, se tomaron medidas de precaución y con el nuevo refractario llegó a 25 coladas por lo que su vida útil mejoro y se prolongó.

Para obtener el índice de productividad se realiza la relación de la producción de la cantidad de coladas para los insumos y costos que cuesta realizar una sinterizada de refractario.

Índice de productividad = Costo de refractario / toneladas de metal producido.

En los costos de una sinterizada se considera:

Costo de la sílice = \$ 150.00

Energía eléctrica = 10 h x 245 Kw x \$0.08/Kwh = \$196.

El proceso de sinterización dura 14 horas de las cuales 10 h pasa prendido el horno a una capacidad del 70% de su potencia nominal esto es 245 Kw. De los 350 Kw. Disponibles. Se empieza la sinterización a las 24h00 y se culmina al día siguiente a las 14h00.

Mano de obra directa = obreros + técnicos

Tres obreros x 2 días = $3 \times \$18.00 \times 2 = \108

Dos técnicos = $2 \times \$ 50.00 \times 2 = \$ 200.00$

Costo de una sinterizada = Materia prima + Mano de obra + energía eléctrica.

Costo de la sinterizada = $\$ (150.00 + 308.00 + 196.00) = \$ 654.00$

En la fundición es siempre importante buscar minimizar el costo del refractario por toneladas de metal producidas. Además el precio es un factor que también se debe considerar.

Índice para las 12 coladas o 6.0 ton

= $\$654/ 6.0 \text{ Ton}$

= $\$109.00/ \text{Ton}$

para las 25 coladas. Que representa a 12.5 Ton

= $\$654/12.5 \text{ Ton}$

= $\$ 52.32/ \text{Ton.}$

Por lo tanto producir actualmente 1 Ton de acero, en refractario solo cuesta \$ 52.32.

Se pueden mencionar al menos 6 mejoras logradas en este trabajo:

1. Se logro determinar la granulometría recomendada para esta clase de aplicación de la arena sílice en los hornos de inducción.
2. Se estandarizo el porcentaje de ácido bórico utilizada para facilitar el transporte de materia en la sinterización.
3. Por medio de la herramienta construida para medir el diámetro interior e inferior del refractario se pudo llevar el control del desgaste del crisol.
4. Se determino el máximo diámetro con el cual se puede operar el horno, a partir de ese diámetro se debe parar el horno para reparar o empezar con el proceso del cambio del refractario.
5. Debido a que la mayor demanda de fundición es hierro gris comparado con el acero, se tomo la decisión de usar dos dimensiones de modelo en chapa metálica para el aglomerado: Una de mayor dimensión para hierro gris con lo cual se tiene un espesor del revestimiento de 90 mm, con una mayor capacidad de colada. El otro modelo de menor dimensión con lo cual se

incrementa el espesor del refractario a 100 mm con una menor capacidad de colada solamente destinado para acero.

6. Para la sinterización del refractario se debe usar la curva de quemado que corresponde para la sílice.

3.2 Evaluación de costo de producción.

Si es verdad se aumento el espesor por lo que se invierto más tiempo y material refractario este es insignificante comparado con la utilidad obtenida al implantar estas mejoras en el horno.

Si por cada colada se estima que se realiza 500 kg de metal fundido se tiene un costo primo de:

Costo primo = Materiales directos + Mano de obra directa

Materiales directos = Si se asume que el material a fundir es Acero el cual tiene un costo de \$0.08 U.S.D/ Kg. Se tiene 500 Kg de Acero X \$ 0.08 /kg
= \$40.00.U.S.D.

Mano de obra directa= Si cada obrero gana diariamente \$ 15.00 x 5 obreros = \$ 75.00.

Costo primo = \$40.00 +\$ 75.00 = \$115.00

Costo de Energía Eléctrica = 4h X 350 Kw = 1400KWh x \$ 0.08/Kwh

$$= \$112.00$$

Costo de producción: Costo primo + Costos indirectos de fabricación.

Si incluimos en un solo rubro todos los costos indirectos y estos son de \$.80.00

Costo de producción: = \$ 227.00.+ . \$80.00 = \$ 307.00.

INTRAMET que trabaja con su horno de inducción intermitentemente tiene un índice del costo de la Ton de metal producido. El cual se lo obtiene de los costos de los insumos, costo de mano de obra, los costos de energía eléctrica consumida más los costos de materiales para las toneladas producidas que dura cada refractario.

$$\text{Indice} = \$ 307.00 / 6 = 51.16$$

$$\text{Indice} = \$ 307.00 / 12.5 = 24.56$$

3.3 Evaluación del mejoramiento de la colada.

Luego de haber transformado el metal sólido en metal líquido se vierte esta colada en un molde permanente para tomar una muestra y con esta probeta se realiza el análisis metalográfico antes de vaciar la colada a sus respectivas cajas de moldeo la cual nos indica que las aleaciones requeridas están en parámetros permitidos en cada una de ellas y que cumplen con los requerimientos necesarios para la función que van a desempeñar, si pasa la prueba se vierte la colada de hierro

gris o acero en sus respectivos moldes perdidos, después se vuelve a sacar una muestra de probeta para su posterior análisis. Análisis metalográfico que se adjunta en el momento de entrega-recepción del trabajo para la satisfacción del cliente. El haber logrado disminuir el tiempo para la fusión del metal nos ha permitido mejorar la calidad de la colada.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber realizado el trabajo de mejoramiento del refractario del horno de inducción establecemos las siguientes conclusiones:

- ▶ Se logró prolongar la vida útil del refractario en un 100% luego de seleccionar la granulometría correcta con su respectivo porcentaje de ligante.
- ▶ Se mejoró la producción con más coladas de fundición ya que se duplico (25) en relación a las 12 coladas obtenidas antes de este estudio.
- ▶ Se disminuyeron los tiempos de paradas del horno de inducción evitando así un lucro cesante.
- ▶ Se brindo mayor seguridad en su entorno poniendo un límite mínimo de espesor

► Se mejoró la técnica para hacer correctamente nuestros propios refractarios de los hornos de inducción.

Las recomendaciones para mantener el refractario en buen uso son las siguientes:

► Antes de proceder a la sinterización del revestimiento se recomienda realizar un análisis de su composición para conocer de antemano que curva de temperatura se requiere para evitar defectos en el aislamiento.

► Se recomienda llevar un historial o bitácora de mantenimiento del sistema.

► Inspeccionar visualmente después de cada colada el diámetro del revestimiento.

► Para mejorar condiciones de operación ensayar con refractario monolítico de alta alúmina para tener un crisol para cuando se trate de materiales con escoria básica.

**APÉNDICE A: TABLA DE CONVERSIÓN DE MALLAS
GRANULOMÉTRICAS**

TABLA DE CONVERSIÓN DE MALLAS GRANULOMÉTRICAS

U.S. MESH (#. malla)	MICRONS (μm)	MILLIMETERS (mm)	PULGADAS (In)
10	2000	2.000	0.0787
12	1680	1.680	0.0661
14	1410	1.410	0.0555
16	1190	1.190	0.0469
18	1000	1.000	0.0394
20	841	0.841	0.0331
25	707	0.707	0.0280
30	595	0.595	0.0232
35	500	0.500	0.0197
40	400	0.400	0.0165
45	354	0.354	0.0138
50	297	0.297	0.0117
60	250	0.250	0.0098
70	210	0.210	0.0083
80	177	0.177	0.0070
100	149	0.149	0.0059
120	125	0.125	0.0049
140	105	0.105	0.0041
170	88	0.088	0.0035
200	74	0.074	0.0029
230	63	0.063	0.0024
270	53	0.053	0.0021
325	44	0.044	0.0017
400	37	0.037	0.0015

Fuente http://www.yambala.com/index_archivos/Page1798.html.

APÉNDICE B: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
UNIDAD DE SERVICIOS GEOLÓGICO MINEROS
LABORATORIO DE BENEFICIO DE MATERIALES

LBM-UGM-
UTPL-N

MUESTRA : SILICE
PROCEDENCIA : ZAMORA (FADGOY)
ANALISIS : GRANULOMETRIA EN SECO
SOLICITA : YAMBALA, SA
FECHA : JULIO 08, 2001
ANALISTA : EGDO. JUAN CARLOS NARANJO

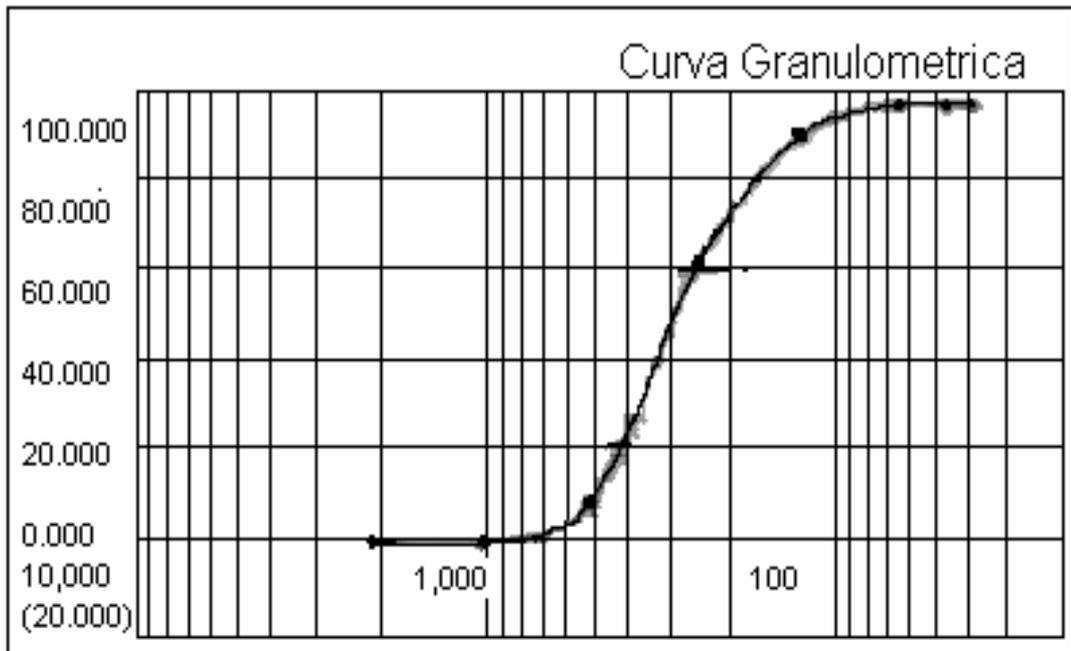
ANALISIS GRANULOMETRICO

MALLA N°	ABERTURA µm	PESO (gr)	PESO%	RETENIDO ACUMULADO%
10	2.000	316.03	0.012	0.012
18	1.000	290.52	0.268	0.280
35	500	327.01	9.560	9.340
60	250	655.68	53.320	83.160
120	125	425.78	28.030	91.190
230	63	271.95	7.590	93.780
325	45	205.24	0.600	99.380
400	37	200.20	0.809	99.389
(400)		422.65	0.020	99.409
	SUMA			99.409

Fuente: http://www.yambala.com/index_archivos/Page1798.html

APÉNDICE C: CURVA GRANULOMÉTRICA

CURVA GRANULOMÉTRICA



Fuente: http://www.yambala.com/index_archivos/Page1798.html

**APÉNDICE D: UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE
LOJA LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA
LABORATORIO DE ANÁLISIS INSTRUMENTAL**

MUESTRA	ARENAS SILICIAS	
PROCEDENCIA	ZAMORA	GUAYSINI
	PROVINCIA	CANTÓN
FECHA DE RECEPCIÓN	2000/01/05	
SOLICITANTE	DARWIN SURI GODOY	
ANÁLISIS SOLICITADO	Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , SiO ₂	
FECHA DE REPORTE	2000/01/06	
ANALISTAS	ING. : MIGUEL GUAMAN & CELSO	
ROMERO		

RESULTADO DE LOS ANALISIS

SERIE MUESTRA: ARENAS SILICIAS

Al ₂ O ₃	0.151
Fe ₂ O ₃	0.014
SiO ₂	98.32

DENOMINACIÓN:
METODOS UTILIZADOS:
ABSORCIÓN ATÓMICA
GRAVIMETRICO



**APÉNDICE E: EQUIVALENCIA DE CONOS PIROMÉTRICOS
PARA RATAS DE CALENTAMIENTO DE 150° C/HORA**

**TABLA DE REGISTRO DE GRANULOMETRÍA DE ALÚMINA EN
EXISTENCIA EN INTRAMET**

U.S. MESH (#. malla)	MICRONS (μm)	MILLIMETERS (mm)	GRAMOS (gr)	PORCENTAJE %
4	4760	4.760	32.06	
8	2380	2.380	46.90	43.97
10	2000	2.000	27.52	
16	1190	1.190	68.80	
30	595	0.595	40.57	
40	400	0.400	8.40	26.21
50	297	0.297	29.72	
70	210	0.210	25.78	
80	177	0.177	9.14	
100	149	0.149	13.64	16.77
200	74	0.074	44.09	
Fondo	63	0.063	53.38	13.04

**APÉNDICE F: TABLA DE REGISTRO DE GRANULOMETRÍA DE
ALÚMINA EN EXISTENCIA EN INTRAMET**

EQUIVALENCIA DE CONOS PIROMETRITOS PARA RATAS DE CALENTAMIENTO DE 150°C/HORA

Cono Seger	Temperatura en °C
13	1349
14	1398
15	1430
16	1491
17	1512
18	1522
19	1541
20	1564
23	1605
26	1621
27	1640
28	1646
29	1659
30	1665
31	1683
31½	1699
32	1717
32½	1724
33	1743
34	1763
35	1785
36	1804
37	1820

BIBLIOGRAFÍA

1. American Ceramic Society Bulletin, Volume 8, No. 10, Octubre 2001.
2. ASM Internatinal, Ceramics and Glasses, Volume 4, First Printing, USA 1991
3. BCIRA /ELECTRICITY SUPPLY INDUSTRY Manual on Refractories for Coreless Induction Furnaces in Ironfoundries 1979 Birmingham, England
4. SHACKELFORD JAMES Ciencia de Materiales para Ingenieros tercera Edición México 1995
5. FINN LYNGGAARD, Tratado de Cerámica , Omega,
6. JOSE A. MANRIQUE. Transferencia de Calor, Harla S.A, México 1981
7. JULIO ASTIGARRAGA URQUIZA, Hornos Industriales de Inducción, McGraw-Hill, Colombia, 1999
8. _KREIT, FRANK, _Principles of Heat Transfer, Intext Educational Publishers 1973

9. NICOLAS LARBURU ARRIZABALAGA. Maquinas Prontuario Paraninfo 1990.
10. R.W. GRIMSHAW, the Chemistry and Physics of Clays and Other Ceramic Materials, John Wiley & Sons, 1971.
11. SERWAY RAYMOND A., Física, McGraw-Hill, México 1992
12. SMITH, CORRIPIO, Control Automático de Procesos, Noriega Limusa, Mexico 1991.
13. Guías de producción más limpia 2 Fundición, México, 1era Edición 1988
14. FH NORTON, Cerámica para el Artista Alfarero, CECSA, México
15. www.modercasting.com/Spanish/furnace.pdf
16. Guías de Referencia para el Mantenimiento Apropriado del Horno de Inducción sin Núcleo. Escrito: GEORGE HARRIS. Traducido: Samuel Piña.
17. Química de materiales cerámicos. Por Javier Alarcón.
18. TERMODINAMICA FAIRES/SIMMANG UTEMA, MEXICO 1991.