

00568

③



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

OPTIMIZACION DEL REVESTIMIENTO
REFRACTARIO DEL SIFON A PRESION
DE UN HORNO OXICUPULA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA QUIMICA
(INGENIERIA DE PROYECTOS)

PRESENTA

ALEJANDRO ROGEL RAMIREZ

Director de tesis: M. en I. Alejandro Anaya Durand



293 766

MEXICO, D. F.

2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE QUÍMICA
DIRECCIÓN

BIOL. FRANCISCO J. INCERA UGALDE.
Jefe de la Unidad de Administración del Posgrado.
Presente.

Me es grato informarle que el alumno **ALEJANDRO ROGEL RAMÍREZ** presentará próximamente su examen para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Química (Proyectos) (Clave 468) ante el siguiente jurado:

Presidente:	Dr. Julio Ricardo Landgrave Romero
Primer Vocal	Dr. Constantino Alvarez Fuster
Secretario:	M. en C. Alfonso Durán Preciado
Primer Suplente:	M. en C. Eduardo Montaña Aubert
Segundo Suplente:	M. en C. Jorge Luis Aguilar González

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Ciudad Universitaria, D. F., 7 de febrero de 2001.

El Director

Dr. Enrique R. Bazúa Rueda

C.c.p. Integrantes del Jurado
C.c.p. Coordinador de Área
C.c.p. Departamento de Control Escolar
C.c.p. Interesado
*ggm.

A ISA:

*POR SU APOYO E IMPULSO
EN MOMENTOS DIFÍCILES, QUE
HICIERON POSIBLE ESTE TRABAJO.*

A LIZ, ISKANDER, YAZMIN Y RODRIGO:

*POR SU COMPRENSIÓN Y AFECTO,
RAZÓN DE MI ESFUERZO.*

ÍNDICE

Capítulo 1

Metodología de la Investigación

1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Hipótesis Central	1
1.3 Objetivo General y Objetivos Específicos	1
1.4 Variables bajo Estudio	2
1.5 Definición del Objetivo de Estudio	2
1.6 Periodo de Observación	2
1.7 Nivel de Análisis	2
1.8 Fuentes de Datos	3
1.9 Consideraciones sobre la Metodología	3

Capítulo 2

Descripción del Sistema

2.1 Antecedentes	4
2.2 El Horno Oxícúpula de SICARTSA	4
2.2.1 El Horno Oxícúpula	5
2.2.2 El Sifón a Presión	9
2.2.3 Transporte a la Cabeza del Horno	12
2.2.4 Los Gases de Combustión	14
2.2.4.1 Combustión y Recuperación de Calor	16
2.2.4.2 Tratamiento de agua de lavado de Gases	16
2.2.5 Granulación de la Escoria	19
2.2.6 Soplo e inyección de Oxígeno	21

Capítulo 3

Materiales Refractarios

3.1 Clasificación de los Materiales refractarios	28
3.1.1 Por Comportamiento químico	28
3.1.2 Origen y Constitución Mineralógica	30
3.1.2.1 Refractarios de Alta Alúmina	30
3.1.2.2 Refractarios Magnésicos	30
3.1.3 Por su Forma Física	32
3.1.3.1 Refractarios Formados	32
3.1.3.2 Refractarios Informes y Especiales	33
3.2 Propiedades de los Refractarios	
3.2.1 Propiedades Físicas	34
3.2.2 Propiedades Térmicas	35
3.2.3 Propiedades Térmicas y Termomecánicas	36
3.2.4 Propiedades Químicas	37
3.3 Aplicaciones de los Revestimientos refractarios	38
3.3.1 En la Industria Siderúrgica	38
3.3.2 En Aceración	39
3.4 Factores que afectan el Rendimiento del Refractario	41
3.4.1 Consideraciones Generales	41
3.4.2 Práctica de Precalentamiento	41
3.4.3 Carga metálica al Convertidor	42
3.4.4 Acondicionamiento de la Escoria	43
3.4.5 Adición de Cal Dolomítica	44
3.4.6 Control de Temperatura de fin de Sople	44
3.5 Mecanismos de Desgaste del refractario	44
3.5.1 Desgaste Mecánico	45
3.5.2 Ataque Químico	45
3.6 Procedimientos que Disminuyen la Rapidez de Corrosión	46
3.6.1 Goneado	46
3.6.2 Salpicado	47
3.6.3 Formación de Espinel	47
3.7 Alternativas para Contrarrestar el Desgaste del Refractario	49

Capítulo 4

Interacción Refractario-Escoria

4.1 Composición	51
4.1.1 Agregados	52
4.1.2 Formadores de Liga	53
4.1.3 Rellenos	55
4.1.4 Aditivos	55
4.1.5 Reforzadores	58
4.2 Refractarios de Alta Alúmina Más Comunes	58
4.3 Textura y Estructura de un Refractario	62
4.3.1 Determinación de la Porosidad Aparente	63
4.3.2 Distribución de Tamaño de Poro	68
4.3.3 Permeabilidad	69
4.3.4 Análisis por Tamizado	69
4.4 Factores que Determinan la Porosidad	70
4.4.1 Práctica de Colocación del Colable	70
4.4.1.1 Cantidad de Agua Añadida	71
4.4.1.2 Mezclado Apropiado	71
4.4.1.3 Vibrado o Picado	72
4.4.1.4 Desarrollo de Liga Hidráulica	73
4.4.1.5 Secado	74
4.4.1.6 Calentamiento	75
4.4.2 Transformación de Fases	75
4.5 La Escoria	76
4.5.1 Descripción de la Escoria	76
4.5.2 Función de la Escoria	77
4.5.3 Control de la Escoria	78
4.5.6 Corrosión	80

Capítulo 5

Modelo de Agua

5.1 Consideraciones de Semejanza y Criterios de Modelado	82
5.2 Desarrollo de Modelos físicos Rigurosos	84
5.3 Criterios de Semejanza del No de Reynolds y No de Froude	85
5.4 Descripción del Sistema	88
5.5 Modelo de Agua a Escala Reducida	90
5.5.1 Modelo de Agua del Sifón a Presión	91

Capítulo 6

Optimización Geométrica del Sifón a Presión

6.1 Descripción del Sistema	96
6.2 Perfiles de Desgaste	97
6.2.1 Antecedentes	97
6.2.2 Deterioro del Refractario	98
6.2.3 Medidas Remediales	102
6.3 Fundamentos	105
6.4 Optimización Geométrica del Sifón	107
6.5 Acciones a seguir	108

Capítulo 7

Minimización del Área de Contacto en la Interfase Refractario-Escoria

7.1 Antecedentes	111
7.2 Supuestos	112
7.3 Desarrollo Experimental	112
7.3.1 Preparación de probetas para prueba	112
7.3.2 Determinación de la porosidad Aparente	115
7.3.3 Determinación de Módulo de Ruptura y Resistencia	115
7.3.4 Análisis por Tamizado	117
7.4 Análisis de Datos	118
7.5 Conclusiones	118

Capítulo 8

Conclusiones, Recomendaciones y Propuestas

8.1 Conclusiones	120
8.2 Recomendaciones	121
8.3 Propuestas	121
Bibliografía	122

RESUMEN

En la producción de arrabio en el Horno Oxícúpula de SICARTSA el revestimiento refractario del sifón a presión tiene una campaña actual de 5-6 días, que se traduce en una producción de 10 000 toneladas de arrabio líquido. Esta producción representa un 60% de la cantidad inicial de 17 000 toneladas de metal líquido por campaña.

Además, aún cuando la práctica de instalación del concreto refractario y la calidad del mismo no han variado, aparentemente, la realidad es que la vida útil del refractario se ha reducido.

Todo lo anterior repercute en la contribución del revestimiento al costo de producción del arrabio, que es de dos dólares por cada tonelada de metal líquido producido, duplicando su costo inicial.

La hipótesis central del presente trabajo es que es posible incrementar en 3 500 toneladas de arrabio líquido por campaña, reduciendo el área de contacto en la interfase refractario-escoria mediante:

- i) La optimización geométrica del sifón, haciendo un análisis hidrostático.
- ii) Estableciendo las condiciones de mezclado, cantidad de agua y rapidez de secado, necesarias para producir una porosidad aparente de 14% del volumen del monolito. De acuerdo con los estándares ASTM respectivos.

Aumentando el espesor del revestimiento entre la salida de escoria y el sifón, se produce un aumento del 33% de la campaña actual del revestimiento. El aumento del volumen de monolito refractario aplicado no es significativo, comparado con el aumento en la producción de arrabio. El costo de la tonelada de metal líquido producido se reduce en 0.5 dólares con estos cambios.

La porosidad aparente de 14% en volumen, representa un 30% más de la duración de la campaña del sifón. Lo anterior se logra estandarizando la práctica de aplicación del refractario colable.

INTRODUCCIÓN

Para procurar la reducción de los gastos en la producción de acero, cuyo precio internacional es de 150 dólares por tonelada de planchón, se requiere un estudio de las variables involucradas en sus diferentes etapas de fabricación.

En la producción de arrabio en el Horno Oxícúpula de SICARTSA, el revestimiento refractario del sifón a presión tiene una campaña actual de 6 días de duración, que se traduce en una producción de 10 000 toneladas de arrabio líquido. Este volumen de producción representa un 60% de la cantidad inicial de 17 000 toneladas de metal líquido por campaña del sifón.

Por otro lado, aún cuando la práctica de instalación del concreto refractario colable y la calidad del mismo no han variado, aparentemente, la realidad es que la vida útil del revestimiento refractario se ha reducido.

Todo lo anterior repercute en la contribución del revestimiento refractario al costo de producción del arrabio, que es de 2 dólares por cada tonelada de metal líquido producido, cuando inicialmente era de 1 dólar/tonelada.

La hipótesis central del presente trabajo es que es posible incrementar la campaña del sifón a presión en dos días más, lo que significa una producción adicional de 3 500 toneladas de arrabio líquido por campaña, reduciendo el área de contacto en la interfase refractario-escoria.

El estudio se realizó de acuerdo con la siguiente metodología:

- i) Se diseñó y construyó el modelo de agua, a escala reducida, del sifón a presión, para estudiar cualitativamente el comportamiento hidrodinámico del mismo. (Capítulo 5)
- ii) Se realizó la optimización geométrica del sifón, haciendo un análisis hidrostático, como una primera aproximación. (Capítulo 6)
- iii) Se establecieron las condiciones de mezclado, cantidad de agua y rapidez de secado, necesarias para producir una porosidad aparente de 13-14% del volumen del monolito. (Capítulo 7)

Para dar una solución a muy corto plazo se analiza el efecto de la interacción refractario-escoria. Posteriormente se optimizan algunas de las variables involucradas en la textura (porosidad abierta) y estructura del monolito instalado (CMOR y CCS), de acuerdo con los estándares ASTM respectivos.

Finalmente, se presentan algunas propuestas que pueden proporcionar soluciones radicales para aumentar la duración de la campaña del sifón a presión.

CAPÍTULO 1

Metodología de la Investigación

1.1 Planteamiento del problema

En el contexto de la globalización económica y las exigencias competitivas internacionales, que imponen la reducción de los costos de producción del acero; es necesario efectuar un análisis de las variables involucradas en el proceso de producción del arrabio.

Durante las pruebas de arranque, el revestimiento refractario del sifón a presión, del Horno Oxícúpula de SICARTSA tuvo una campaña de 10 días, lo que se traduce en una producción de 17 000 toneladas de arrabio líquido.

Aún cuando la calidad del refractario colable y la práctica de instalación no han cambiado, aparentemente, la campaña del sifón se ha reducido a 6 días, que representa un 60% de la campaña original, con una producción de 10 000 toneladas de arrabio líquido.

Lo anterior se traduce en un costo de 2 dólares por cada tonelada de arrabio líquido, ya que en la reparación del sifón se requieren alrededor de 20 toneladas de material refractario, con un costo de 1 dólar/Kg.

Nos interesa aumentar la duración de la campaña del sifón a presión en dos días más que la actual (33%), para una producción total de 13 500 toneladas de arrabio líquido por campaña y abatir el costo de producción de este rubro.

1.2 Hipótesis Central

Se puede aumentar la duración de la campaña del sifón a presión, del horno Oxícúpula de SICARTSA, realizando una optimización geométrica y una reducción de la superficie de contacto en la interfase refractario-escoria, en un 30% con respecto a la campaña actual de 5-6 días.

1.3 Objetivo General y Objetivos Específicos

El objetivo general de este estudio es el análisis de las variables que causan el desgaste del revestimiento refractario del sifón a presión, con la intención de procurar el alargamiento de la campaña de este equipo.

- i) Analizar la hidrodinámica del flujo en el sifón, para caracterizar el flujo y determinar si existe un mecanismo de desgaste del refractario por erosión mecánica.
- ii) Efectuar una optimización geométrica del arreglo del sifón, a partir de los perfiles de desgaste y las condiciones de operación del horno oxicúpula, registrados en la planta.
- iii) Analizar la práctica de colocación del monolito, midiendo tiempos de mezclado, cantidad de agua añadida y equipo de instalación.
- iv) Reducir el área de contacto en la interacción refractario-escoria, para contrarrestar la disolución del refractario por la escoria.

1.4 Variables bajo estudio

La hipótesis central implica que el desgaste del monolito refractario del sifón a presión, está relacionado con una rapidez de deterioro en dirección axial y dirección radial y con el área de contacto entre el refractario y la escoria. La intensidad del deterioro, se obtiene de los registros de desgaste en ambas direcciones, mientras que la superficie de contacto es una función de la porosidad abierta del monolito y de la geometría del mismo.

1.5 Definición del objetivo de estudio

Se estudia a los dos sifones que tiene el horno oxicúpula de SICARTSA, de dimensiones diferentes y características similares.

1.6 Periodo de Observación

Los registros que se tienen en la planta y fueron analizados, son de noviembre de 1998 hasta la actualidad, enero del 2001.

1.7 Nivel de análisis

Es el estudio del horno oxicúpula de SICARTSA, único en el mundo por su capacidad de fusión de 100 ton/h de carga metálica y un revestimiento refractario de concreto colable libre de cemento, Metpump HP4

1.8 Fuentes de datos

Se tuvo acceso a fuentes primarias y secundarias de datos. Las fuentes primarias son los registros de operación del horno Oxicúpula de SICARTSA, los perfiles de desgaste reales, la observación de la instalación del monolito, las reparaciones intermedias, opiniones de jefes de turno y operadores de refractarios, de ingenieros de proceso y una observación directa de estas operaciones por parte del autor.

Las fuentes secundarias son una investigación intensiva en manuales de operación del horno, revistas especializadas, memorias de congresos siderúrgicos, revistas editadas por SICARTSA y libros.

1.9 Consideraciones sobre la metodología

Se siguió un procedimiento que consta de tres etapas sucesivas:

- 1.- Diseño y construcción del modelo de agua, a escala reducida, del sifón a presión. (Capítulo 5)
- 2.- Optimización geométrica, como una primera aproximación, para aumentar la campaña del revestimiento. (Capítulo 6)
- 3.- Se determinó la porosidad abierta, como una función de la práctica de instalación, curado y secado-calentamiento. (Capítulo 7)

CAPÍTULO 2

Descripción del Sistema

2.1.- Antecedentes

Desde hace 25 años la Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas (SICARTSA), perteneciente a la iniciativa privada desde 1993, explota minas de material férreo de donde se extraen rocas que, después de ser trituradas y pulverizadas, son constituyentes de una pulpa ferrosa, la cual es transportada por medio de un Ferroaducto hasta la siderúrgica que se localiza a 30 kilómetros de los yacimientos ferríferos. Ahí, en las distintas plantas de la empresa las convertirán en pellets, en arrabio ígneo y finalmente, producirán el acero (con menos del 3% de carbón) que será conformado en palanquillas y de estas últimas, se producirá la varilla y el alambro.

Actualmente, esas rocas se extraen de las minas "El Volcán" y "El Mango", localizadas entre los ríos Acapulcan y las Truchas, en el estado de Michoacán. El método que se utiliza para su explotación se llama de "cielo abierto", cuya primera etapa consiste en realizar barrenos de 25 cm. de diámetro por 13.5 m de profundidad, con la finalidad de introducir una carga explosiva para provocar las voladuras del mineral. El terreno explotado se va conformando por medio de rampas descendentes en forma cónica, con niveles progresivos en forma de escalones de 12 metros de altura y banquetas de 5 a 6 metros de anchura.

La explotación considera una producción de 45 000 toneladas diarias del mineral ferrífero (hematita), de las cuales 10 000 toneladas son de hierro. Los trabajos de exploración de SICARTSA contemplan yacimientos con una vida superior a los 25 años más.

2.2 El Horno Oxidúcula de SICARTSA

Para tener una idea global del contexto en el cual se realizó el presente trabajo, se divide la planta del horno Oxidúcula en las siguientes áreas:

- 1) El Horno Oxidúcula
- 2) El Sifón a Presión
- 3) Sistema de carga
- 4) Gases de combustión
- 5) Escoria
- 6) Soplo e Inyección de Oxígeno.
- 7) Sistema de Refrigeración.

2.2.1 El Horno Oxícúpula.

Está diseñado para fundir cargas entre 15 y 100 toneladas/hora, desde 100 % chatarra hasta una combinación del 50 % con otro material como briquetas, lingotes, etc. Son utilizados en fundidoras que producen grandes cantidades de hierro líquido, en las plantas de aceración, etc. El hierro y la escoria fluyen desde el crisol del horno a través de un canal circular (piquera), a la presión del horno, hacia un recipiente externo (sifón a presión) en donde se separan por diferencia de densidades y fluyen por salidas diferentes. El arrabio se desplaza por un canal alternante hacia los carros torpedo, que lo transportarán a la planta de aceración. La escoria, después de ser enfriada con agua, solidifica en pequeños grumos de consistencia y apariencia arenosa, verde o café oscura, y es transportada por medio del agua que la solidificó hacia los tanques de lavado de escoria. Una vez seca, la escoria es transportada por camiones y vendida a las plantas de cemento, por el contenido de alúmina (19% peso). Los gases efluentes del horno son lavados, se les separan los sólidos remanentes y, después de ser secados los primeros, son quemados para precalentar el soplo.

De acuerdo con el esquema de la Figura 2.1, en el horno (1) se funde la materia prima a hierro bruto para la aceración. La carga es transportada hasta la boca del horno mediante dos cestas, utilizando grúas. Se opera el horno con soplo caliente de 620° C, que se distribuye en el anillo de soplo (dona) mediante 10 toberas. El gas del tragante se succiona en la parte inferior de la boca de carga del horno.

La carga metálica (2) que puede ser chatarra, lingote, hierro esponja (DRI), briquetas (HBI), ladrillos de subproductos, etc., se almacena en dos parques de chatarra. Dos grúas de imán colocan la carga en la tolva pesadora que descarga a las cestas, ubicadas encima de carros transportadores. De estos últimos, las cestas son elevadas por las grúas de alimentación hasta la boca del horno.

El coque y los aditivos(3) son transportados por bandas hasta las tolvas de almacenamiento, que se encuentran arriba de las tolvas pesadoras. Unas canaletas vibrantes trasladan el coque a la tolva pesadora y además, criban los finos de coque. El transporte del coque al horno se realiza de la misma manera que la carga metálica. Los finos del coque son inyectados con el soplo caliente, al igual que el oxígeno, por las toberas al cubilote. La presión ambiental del soplo es levantada por el ventilador (4) y es alimentado a través de los recuperadores de calor, en donde aumenta su temperatura hasta 620°C, al anillo del cubilote.

El arrabio (5) sale del sifón a presión por el canal de hierro, fluye por canales revestidos de refractario hasta un distribuidor anular que lo alimenta a carros torpedo, para que lo transporten a la zona de aceración.

El gas del horno (6) o gas de tragante se succiona en la cámara circular, pasa por el separador de partículas gruesas, se lava y se seca. Posteriormente, se alimenta a la cámara de combustión. En el recuperador de calor cede energía calorífica al soplo frío y finalmente, sale por la chimenea al ambiente.

Los lodos (7) del refrigerador se bombean, junto con las aguas residuales del desintegrador, a un estanque de sedimentación. Los fondos del estanque son bombeados a un filtro prensa; la torta húmeda se transporta, por medio de una banda, como costras de lodo a un contenedor y el filtrado se recircula al estanque.

La escoria (8) se granula saliendo del sifón a presión por el contacto con agua fría y mediante transporte hidráulico llega al depósito de granulado. Una grúa automática recoge con una concha la escoria sedimentada en el depósito y la coloca en un patio o en el camión directamente.

2.2.1.2 Comienza la Fusión

Antes de empezar con la fusión, la cámara de combustión debe alcanzar una temperatura de 650° C, el sifón a presión y los canales de hierro tienen que estar calientes al rojo vivo. Si no saliera soplo o llamas intensas de las salidas de hierro y escoria del sifón, durante y poco tiempo después de aplicar el soplo, indica que el canal de la piqueta está obstruido con escoria. En este caso, se abre la mirilla de observación para limpiarla.

La cantidad de aire necesaria para el comienzo de la fusión, se establece automáticamente, mediante un programa de computadora.

Se tienen que controlar las alimentaciones de agua de refrigeración para la coraza del horno, para el blindaje del tragante y para las toberas.

Después de 15 a 30 minutos de iniciada la fusión empieza a caer arrabio en el sifón, inundando los canales de hierro y de escoria. El material refractario del sifón a presión retira una gran carga térmica del hierro. Si el hierro se enfría en el canal de salida del sifón hay que calentarlo con la lanza de oxígeno, para evitar un atoramiento. Cuando comienza a fluir el arrabio líquido por el canal alternante es muy importante observar al horno y las salidas de hierro y escoria, durante los siguientes 30 minutos. En caso de que el hierro sufra un enfriamiento en el canal alternante, hay que elevar su temperatura con la lanza de oxígeno.

El chorro de hierro va disminuyendo al final de la fusión a fondo. Cuando del sifón solamente salga un chorro fino, se para el horno. La válvula del aire caliente se cierra, la válvula de soplo se abre automáticamente y la tapa del horno se abre.

En la salida de hierro se forma un terraplén con material refractario de moldeo y se abre el orificio de drenaje del sifón para que salga el hierro y la escoria, los cuales se reciben en una cama de arena. El drenado del sifón dura alrededor de 30 minutos y cuando los materiales solidifican en la arena, son removidos por un trascabo y transportados al patio de chatarra.

GENERAL	Altitud sobre el nivel del mar Temperatura Velocidad del viento máx. Humedad relativa del aire Alimentación de la red	4 m 10-45 ° C 210 Km/h 30- 100 % 480 V/60 Hz
1 OXICÚPULA Oxígeno Inyección fino de coque	Producción nom. Toberas soplo caliente Adición O ₂ al soplo máx. 10 lanzas de inyección máx. Sistema NPT máx. Sifón a presión Agua de enfriam. toberas/coraz Cantidad de jgos. de carga	80 t/h 10 X 210 mm ø 2, 000 Nm ³ /h 3, 000 Nm ³ /h 2, 400 Kg/h 2 unidades 300-450 m ³ /h 2 x 12 cestas/h
2 CARGA METÁLICA	Diseño % Chatarra HBI BRI A 100 0 0 B 30 70 0 C 70 30 0 D 70 0 30 E 50 20 30 Grúas de carga Volumen de cestas	2 X 12 t 16 m ³
3 COQUE Y ADITIVOS	Volumen de cestas Tamaño de coque	6 m ³ >75 mm
4 SOPLO	Caudal de soplo máx. Presión de soplo Temperatura de soplo caliente	55 000 Nm ³ /h 400 mbar 620 (± 20) ° C
5 Hierro	Capacidad carros torpedo	200 t
6 Gas de Horno Depuración gases Cámara de combustión Recuperador Caudal de aire de	Caudal del tragante máx. CO en tragante Desintegrador máx. Caudal agua lavado máx. Temperatura máx. Gas puro 2 haces máx. Contenido polvos en gas puro Combustión y enfriamiento	65 000 Nm ³ /h 16 -25 % vol. 69 000 Nm ³ /h 500 m ³ /h 1 100 ° C 900 ° C <20 mg/Nm ³ 150 000 Nm ³ /h
7 LODOS	Caudal de agua sucia máx. Potencia filtro prensa Superficie del filtro Volumen costras lodos	30 m ³ /h 100 l/m ² h 199.3 m ² 2 500 l/carga
8 ESCORIA	Caudal escoria máx. Caudal agua granulación máx. Volumen concha de grúa	110 Kg/t (70 real) 250 m ³ /h 1.5 m ³

TABLA 2.1 Datos de Diseño del Horno Oxícúpula.

2.2.2 El Sifón a Presión.

Junto con el hierro, la escoria fluye a través de un canal circular (piqueta) desde el crisol del horno hacia el sifón a presión, unido al cuerpo del horno y revestido de material refractario (Metpump HP4). Intensas reacciones ocurren entre la escoria fresca y el hierro, a temperaturas alrededor de los 1800° C, durante su trayecto desde el crisol del horno oxícúpula hasta su separación en el recipiente a presión. El hierro líquido es separado de la escoria en un recipiente externo, que se mantiene a la presión del crisol del horno, de ahí su nombre de **sifón a presión**. Sale de este recipiente y, a través del canal alternante, se vierte en los carros torpedo que lo transportan a la zona de aceración. La escoria es enfriada a la salida del sifón, con agua fría y es transportada hidráulicamente a los estanques de granulado.

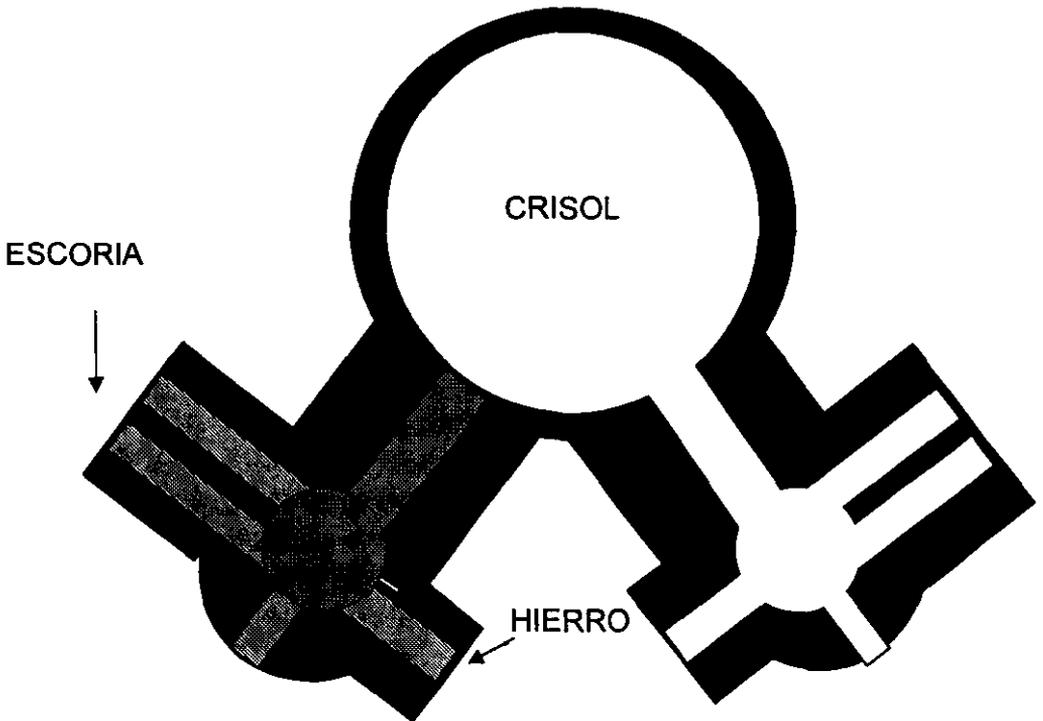


FIGURA 2.2 Vista superior del crisol y los dos Sifones a Presión

El horno Oxícúpula cuenta con dos sifones a presión, uno en operación y el otro en reparación o en espera, mientras su "colega" está trabajando. La Figura 2.2 muestra la vista superior del horno y los dos sifones.

Con referencia a la Figura 2.3 cada sifón (1) está construido de placa de acero al carbón de 25.4 mm de espesor y con revestimiento de material refractario monolítico de 475 mm de grosor. El hierro fundido (2) en el cubilote sale con la escoria (3), por el fondo inclinado del crisol del horno, a través de la piqueta (4) y se colecta en el sifón a presión. La separación del hierro y la escoria se realiza por la diferencia de densidades, ya que el hierro es casi tres veces más pesado que la escoria ($\rho_{\text{hierro}} \cong 6\ 800\ \text{Kg/m}^3$ y $\rho_{\text{escoria}} \cong 2\ 600\ \text{Kg/m}^3$) esta última flota en la parte superior del baño líquido dentro del sifón. La diferencia entre los niveles de escoria y metal líquido (150 mm), asegura una separación definida.

El canto superior del canal de hierro (5) se encuentra 150 mm debajo del correspondiente al canal de escoria (6), para que pueda existir un sello de arrabio. El sifón a presión está diseñado de manera tal que una parte de la escoria se encuentra normalmente debajo del nivel de la entrada al canal, y la escoria puede subir al nivel de su rebosadero debido a las condiciones hidrostáticas. La escoria se sedimenta encima del hierro en el rebosadero de escoria. En el rebosadero de hierro se encuentra únicamente hierro. El nivel efectivo de hierro (7) está entre el canto superior del canal de escoria y el rebosadero de hierro y es el responsable del ajuste de las presiones necesarias para que el hierro y la escoria puedan salir en flujos continuos. Por la erosión del refractario en la salida de escoria, se reduce el nivel efectivo del hierro. Al pasar el límite máximo de erosión existe la posibilidad de que la presión ferrostática impulse a la escoria espontáneamente del canal de escoria y el peligro de que, al ser proyectada fuera del contacto con el agua de enfriamiento, alcance al personal con **consecuencias fatales**. Para evitar este peligro de **muerte** hay que reparar el sifón a tiempo, levantando el rebosadero de escoria. (acondicionamiento)

Al parar el horno cae la presión en el crisol y con ella la presión en el sifón. Por la densidad menor de la escoria, que viene básicamente al final, sube el nivel en el sifón. El diseño del sifón considera un volumen suficiente, entre la superficie libre del baño y la piqueta, para que no se formen embalses dentro del horno.

El sifón que está en operación tiene bloqueada una salida de escoria con masa refractaria. El calentamiento del sifón, operación que dura tres días, se realiza con un quemador de gas natural que tiene una rapidez de calentamiento de 60°C/h.

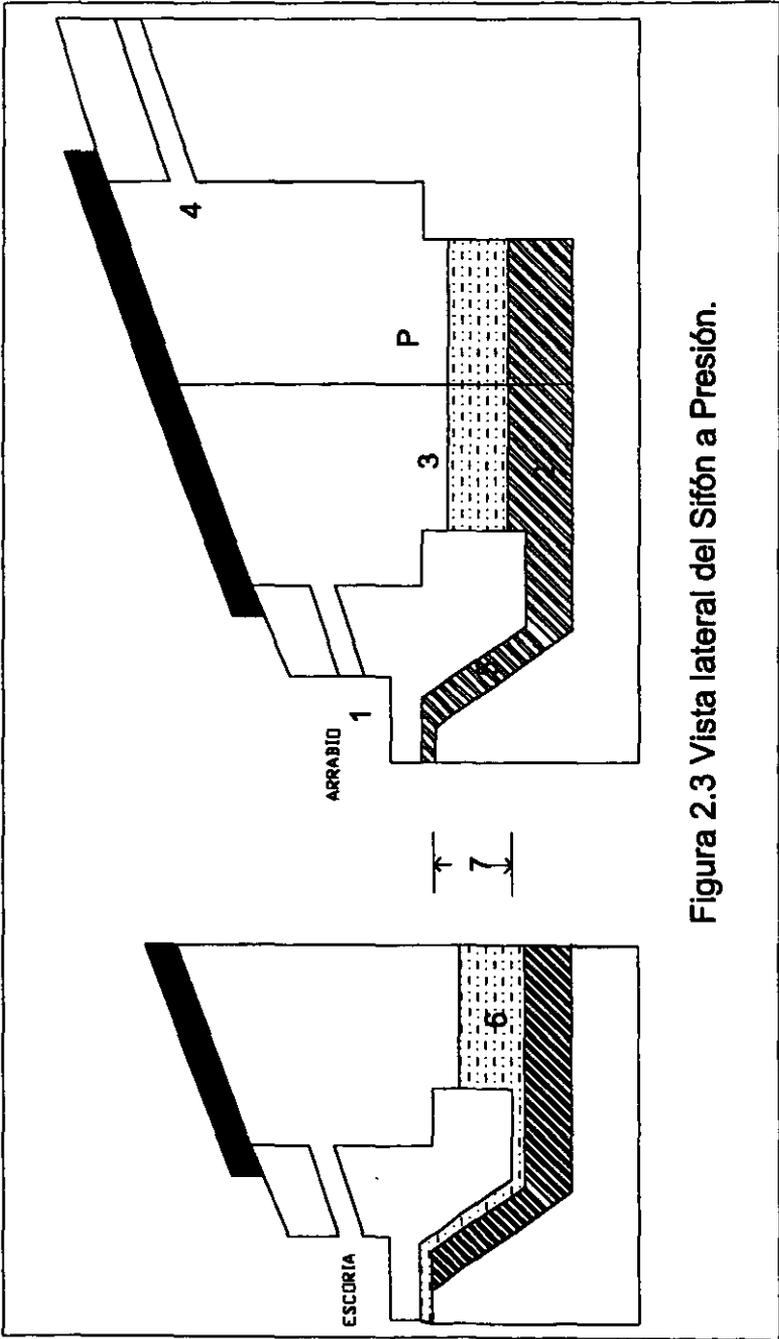


Figura 2.3 Vista lateral del Sifón a Presión.

2.2.3 Transporte a la Cabeza del Horno. (Figura 2.4)

La carga metálica y los aditivos se transportan mediante dos sistemas de elevación independientes a la cabeza del horno. Los carros transportadores de cestas (1) se encuentran en su posición inicial, debajo de las cajas del ascensor (2). Cada carro lleva dos cestas de carga (3) en las posiciones A y B. Una cesta siempre está llena. Cada mecanismo de elevación (4) traslada a la cesta llena de material, en la caja del ascensor hacia arriba. Este ascensor tiene dos posiciones de espera, C (abajo) y D (arriba), y dos posiciones de cambio de la velocidad: abajo (de lento a rápido) y arriba (de rápido a lento). La velocidad de la elevación, es controlada por convertidores de frecuencia. Al principio, la velocidad de accionamiento es lenta y se cambia a rápida cuando llega al detector de posición E. En la posición F entra el freno y se detiene la elevación, la cesta se desplaza a su posición de espera.(D)

El programa verifica las condiciones para cargar al horno. En la situación en la que el otro carro del ascensor está en su posición de caja, la cesta se desplaza directamente al horno o bien, a la posición de espera (delante del horno) G si la tapa del horno está cerrada o el horno está lleno y luego se desplaza hacia el extremo correspondiente. Si el otro carro no está en su posición de caja (D) la cesta se mantiene en su posición en la caja. Si las condiciones se cumplen, la cesta se descarga en el horno (5) y se desplaza a su posición inicial, encima de la caja del ascensor. Simultáneamente, el carro transportador de cestas se desplaza para colocarse debajo de la tolva pesadora y se carga la segunda cesta.

Al principio, la cesta baja a velocidad lenta, cambia a alta velocidad cuando pasa por el detector de posición F, y se frena en la posición E. En la posición de espera C, se para la cesta. El programa verifica si el carro transportador está en posición para la recepción de la cesta, en la posición vacía en el carro. Después, el carro transportador se desplaza y se coloca en forma tal que la cesta llena puede ser elevada a la cabeza del horno.

El transporte de aditivos se realiza en los intervalos posteriores a los de carga metálica, descargando las cestas por turnos. Los pasos necesarios, son los mismos que los mencionados para la carga metálica. La diferencia está en los tamaños de las cestas, en los carros transportadores, en los mecanismos de elevación y en los carros del ascensor, que están diseñados con una capacidad más pequeña para los aditivos.

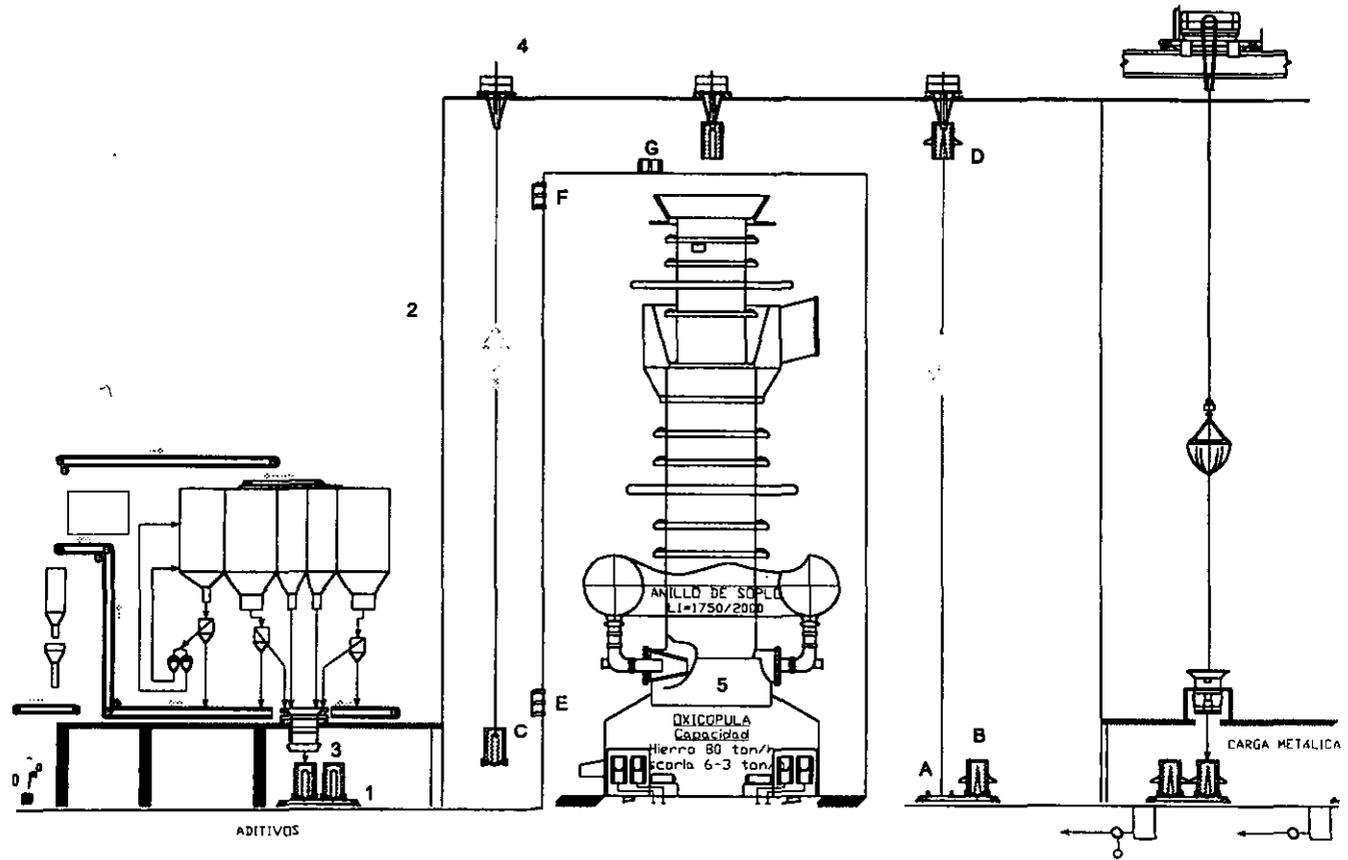


Figura 2.4 Sistema de Carga al Horno.

2.2.4 Los Gases de Combustión. (Figura 2.5)

El gas de tragante caliente (24-25% de CO, 7-8% de CO₂, 1-2% de H₂, 33-37% de Fierro total, 28-32% de Carbono, 0.5-2% de ZnO, metano, etc.) llega por la tubería de aspiración del horno, al recolector de polvo y fluye a la primera etapa del refrigerador del gas (1). En esta etapa se humedece a contracorriente el gas de tragante, se reduce su contenido de polvo grueso, evaporándose cierta cantidad de agua.

En la cabeza del refrigerador se desvía el gas y pasa a la segunda etapa, invirtiendo la dirección del flujo. En esta etapa se sigue humedeciendo el gas para reducir, aún más, el contenido de polvo y la temperatura del gas disminuye hasta 40° C.

El agua que refrigera y lava al gas es alimentada por toberas, en tres diferentes niveles. El funcionamiento correcto del refrigerador requiere la distribución adecuada del agua de enfriamiento. En el fondo del tanque refrigerador se encuentra un depósito de agua (5), con un agitador que evita la sedimentación del lodo. El gas que abandona al refrigerador pasa directamente al desintegrador (3).

El desintegrador es un sistema compuesto de barras fijas y barras rotatorias. Las barras fijas están sujetas a un estator. Las barras rotatorias están sujetas al rotor, que está acoplado a un motor eléctrico de accionamiento.

El agua de lavado se inyecta en dirección central al eje; de modo que, por la fuerza centrífuga, el agua y el gas son lanzados radialmente a la carcasa. Al chocar las gotas de agua con las barras del rotor, que gira a 880 revoluciones por minuto y con las barras del estator, son fragmentadas en pequeñas gotitas.

La división de las gotas de agua en gotitas, es necesaria para alcanzar altos grados de separación. Elevando las revoluciones por minuto de rotor y la cantidad de agua de lavado, se puede aumentar el nivel de separación. La forma de las barras es ovalada para tener cierta ventilación, lo que ayuda a la circulación del gas corriente abajo.

A la salida del desintegrador se encuentra una mezcla de gas purificado y gotas de agua cargadas con polvo, que se envían al separador de agua (4).

La entrada al separador de agua se encuentra en el fondo del recipiente. La mezcla fluye hacia arriba del separador, pasando a través de una cama separadora constituida de cilindros cerámicos de 4 pulgadas de longitud y 1.5 pulgadas de diámetro, colocada encima de una rejilla.

La limpieza de la cama, es efectuada por toberas, que inyectan agua por encima y debajo de esta cama.

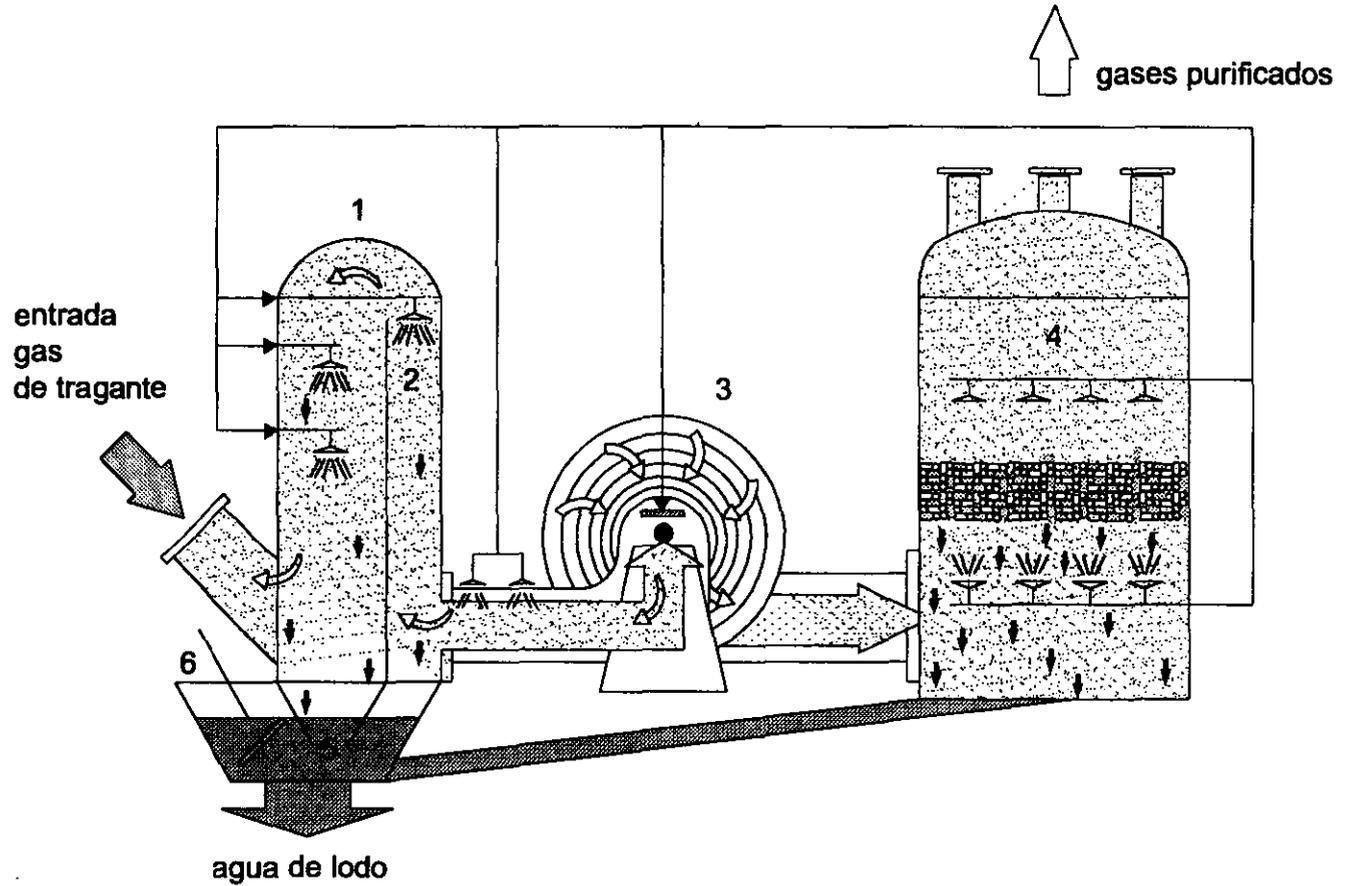


Figura 2.5 Sistema purificador de gas

2.2.4.1 Combustión y Recuperación de Calor. (Figura 2.6)

El gas purificado (1), proveniente del sistema de purificación de gas de tragante, entra a la cámara de combustión (2), controlando los contenidos de CO, H₂ y O₂. (3).

La cámara de combustión está forrada de material refractario, dentro de ella se encuentra un quemador pequeño (4). En la entrada de la cámara se encuentra el quemador principal (5), que sirve para el recalentamiento de la cámara y apoya al proceso de combustión. Ambos quemadores funcionan por la alimentación de gas de coque.

La cantidad de gas de combustión y la velocidad de flujo del aire están regulados por la temperatura de la cámara. El aire para la combustión y la ventilación de la cámara es impulsado por un ventilador (9). La cantidad de aire alimentado para la combustión depende de la pureza del gas proveniente del sistema de purificación, la concentración de O₂ en el interior de la cámara y la temperatura de la misma.

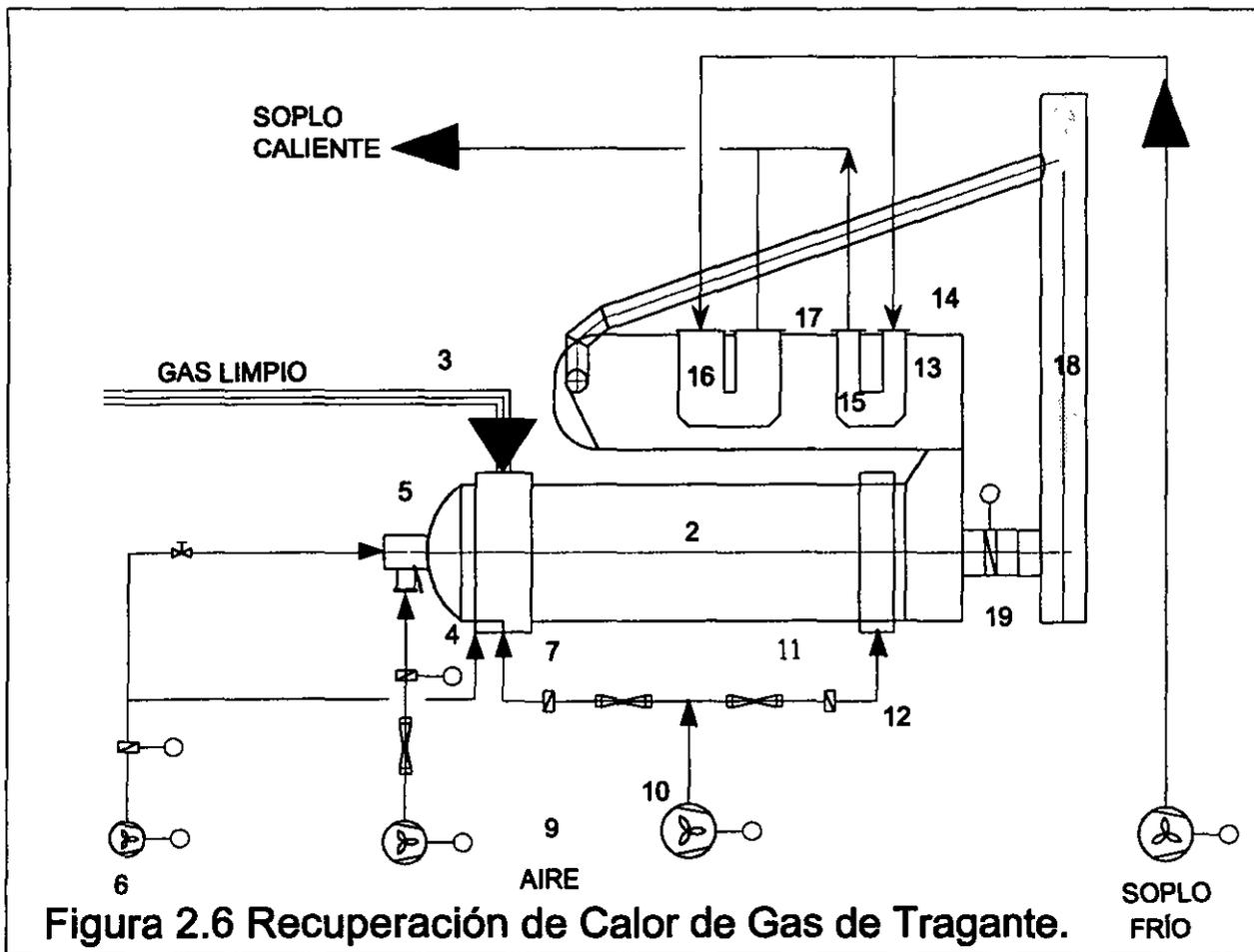
El aire frío o sople frío(12) abate la temperatura del gas quemado hasta una temperatura, que no debe ser superada por la temperatura del recuperador (13), para que el intercambiador de calor no sufra daños. La cantidad requerida de aire refrigerante se ajusta en el recuperador, por control de temperatura(14), antes de entrar al intercambiador de calor.

Los gases efluentes de la cámara de combustión llegan al recuperador de calor, el cual está constituido de un haz tubular para el intercambio de calor, el aire frío pasa dentro de los tubos. El sople frío entra al intercambiador de calor en la misma dirección de flujo de los gases de combustión, en paralelo (15). En el haz tubular principal(16) fluye a contracorriente, en dirección contraria al sentido de flujo de los gases de escape. Finalmente, los gases de combustión se desprenden a la atmósfera por la chimenea(18), después de abandonar el recuperador de calor.

2.2.4.2 Tratamiento del Agua de Lavado de gases.(Figura 2.7)

El agua contaminada con polvo en el depósito inferior del refrigerador, se transporta mediante bombas a la cámara de tratamiento. Aquí, se le añade NaOH hasta alcanzar un pH mayor que 7, requerido para la precipitación de metales pesados. El valor del pH no debe ser mayor que 8.5, para evitar la separación y la sedimentación del carbonato de calcio.

La sosa es añadida antes de la adición del agente floculante, en un sitio de alta turbulencia para obtener un mezclado óptimo. Una floculación directamente



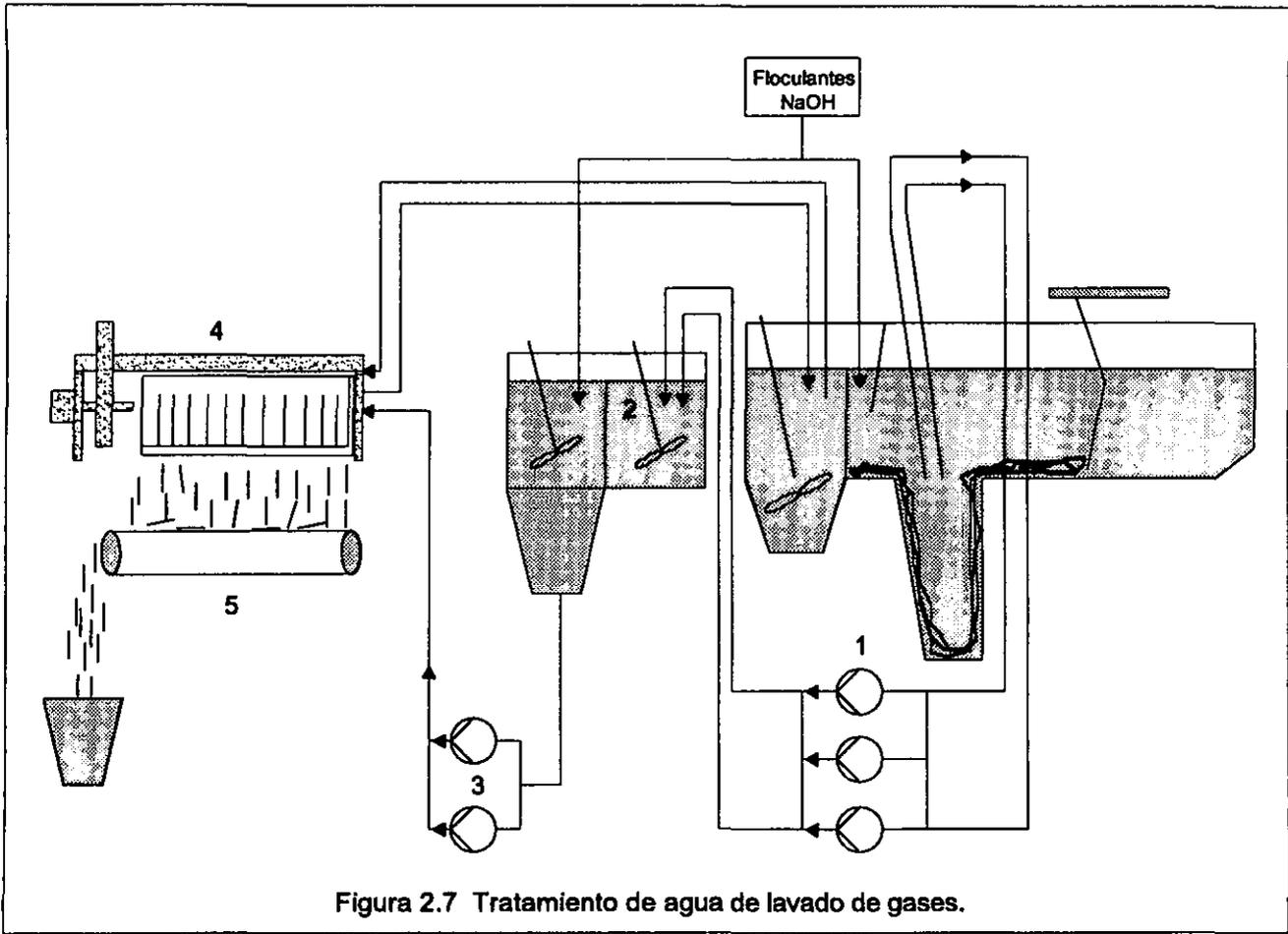


Figura 2.7 Tratamiento de agua de lavado de gases.

acoplada es muy conveniente, porque los gérmenes recientemente formados son muy reactivos y se adicionan fácilmente al agente de floculación.

En el fondo del tanque de sedimentación(6) se depositan los sólidos y los flóculos, un deslamador (7) vierte los sólidos en el embudo del tanque. El lodo es impelido por dos lanzas (1) sumergidas en la pierna del tanque, hacia el tanque de agitación. En esta parte, se le añade al lodo más agente de floculación y se agita lentamente, para favorecer el crecimiento flocular. Este lodo se encuentra en condiciones para su deshidratación ulterior.

Los lodos resultantes son enviados a un filtro prensa, para la separación mecánica del agua y la recuperación de los sólidos, mediante bombas (3).

En el filtro prensa(4), constituido de varias cámaras, se deshidratan los lodos y se comprime la torta, de manera automatizada.

La filtración se realiza a flujo constante, a medida que el espesor de la torta aumenta dentro de los marcos la resistencia al flujo también se incrementa; por lo tanto, se requiere aumentar la presión de alimentación de lodos para mantener un caudal de filtrado constante.

El proceso de filtración está controlado por un sistema que consta de un depósito y una cabeza de medida. Si la cantidad de la materia filtrada en el depósito cae a un nivel predeterminado, se detiene la filtración después de un cierto tiempo prefijado, desviando la alimentación de los lodos.

Debajo de las placas filtrantes se encuentran chapas con declive hacia un canalón, para coleccionar el exceso de material durante el proceso. Estas placas se abren cuando se descarga el sólido y sirven de guía para el material sólido provenientes de los marcos de filtración. Si el sólido se retiene en la placa y no cae en la banda transportadora, el proceso se detiene automáticamente, mediante un sistema de fotoceldas.

2.2.5 Granulación de la Escoria. (Figura 2.8)

La escoria proveniente del sifón a presión llega a la cabeza de granulación (1), en donde entra en contacto con una corriente de agua fría; la cual le sirve de transporte. Por el enfriamiento brusco con el agua, se solidifica la escoria en forma granular; la capa de agua transporta este granulado por un sistema de canales (3), hasta el tanque de granulado. Es en este último tanque donde el granulado sedimenta (4).

El agua calentada por la granulación, pasa por los tanques (5), hacia el tanque de agua caliente (6). Los rebosaderos y pasos intermedios, están diseñados para que los gránulos no pasen por encima de ellos.

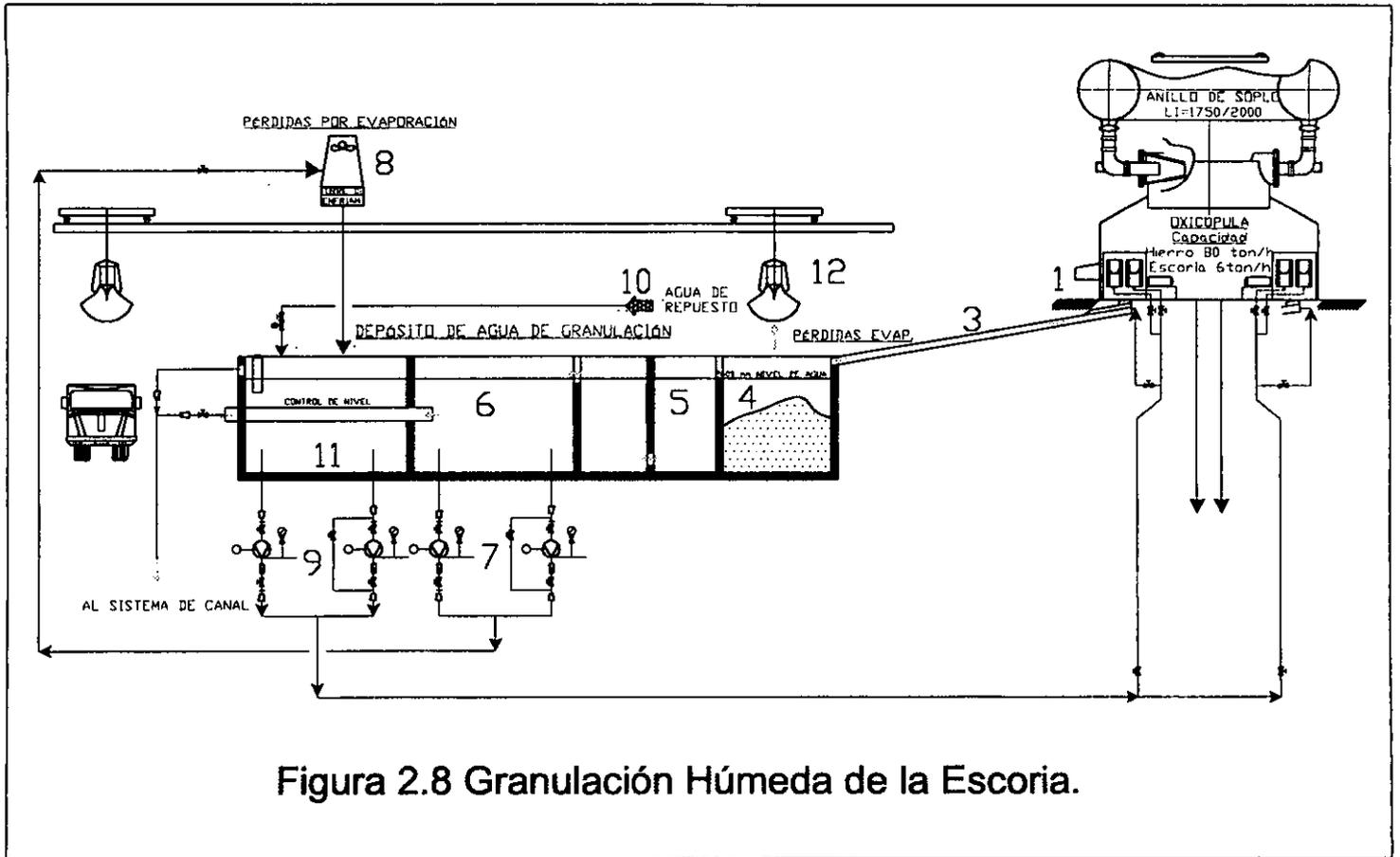


Figura 2.8 Granulación Húmeda de la Escoria.

El agua caliente movida por dos bombas (7), se envía a la torre de enfriamiento (8). Después de enfriarse, el agua se retorna al tanque de agua fría (9). El nivel de este último tanque se mide con una sonda, que indica cuando el nivel se encuentra en su valor máximo o mínimo, aquí se le añade el agua de repuesto.

El control de las bombas de agua fría y caliente se realiza mediante dispositivos que miden la presión; además, hay un termómetro en la línea de agua fría, que regula la velocidad del ventilador de la torre de enfriamiento.

El granulado de escoria sedimenta y permanece en el fondo del tanque. Por encima del tanque se encuentra una grúa con un cucharón que tiene tres posiciones horizontales diferentes, donde se hunde el cucharón para sacar el granulado del tanque.

Antes de elevarse el cucharón a su altura de desplazamiento se detiene un tiempo por encima del tanque, para que escurra el agua del granulado. Posteriormente, la grúa se desplaza lateralmente y deposita la escoria húmeda y granulada en un contenedor o directamente al camión transportador.

2.2.6 Soplo e Inyección de Oxígeno.

El ventilador de soplo frío (1) succiona aire del ambiente y puede incrementar su presión ambiental en 400 mb. (Figura 2.9)

La velocidad del motor que acciona al ventilador (2) se controla por un regulador de frecuencia y, un cambio en el caudal del soplo se regula por la velocidad del motor.

La tubería del soplo frío(3), que contiene un medidor de flujo tipo Venturi (4) y un medidor de presión (5), transporta el aire frío hasta el recuperador de calor (11). El soplo frío se divide en cuatro flujos que van a dos prehaces (6) y dos haces principales (7), dentro del recuperador de calor. Delante de cada haz de tubos se encuentra una válvula reguladora. En las cámaras laterales de los haces (10) se distribuye el soplo frío a los tubos paralelos, construidos de material resistente al calor. Los tubos de los haces están colocados en dirección transversal al flujo de gases de combustión. El soplo, en calentamiento, se retorna en la parte inferior del recuperador (8). Después de distribuirse, otra vez, en los tubos paralelos, llega a la cámara lateral. Los tubos tienen una forma de "Lira", para absorber los choques térmicos y las expansiones volumétricas.

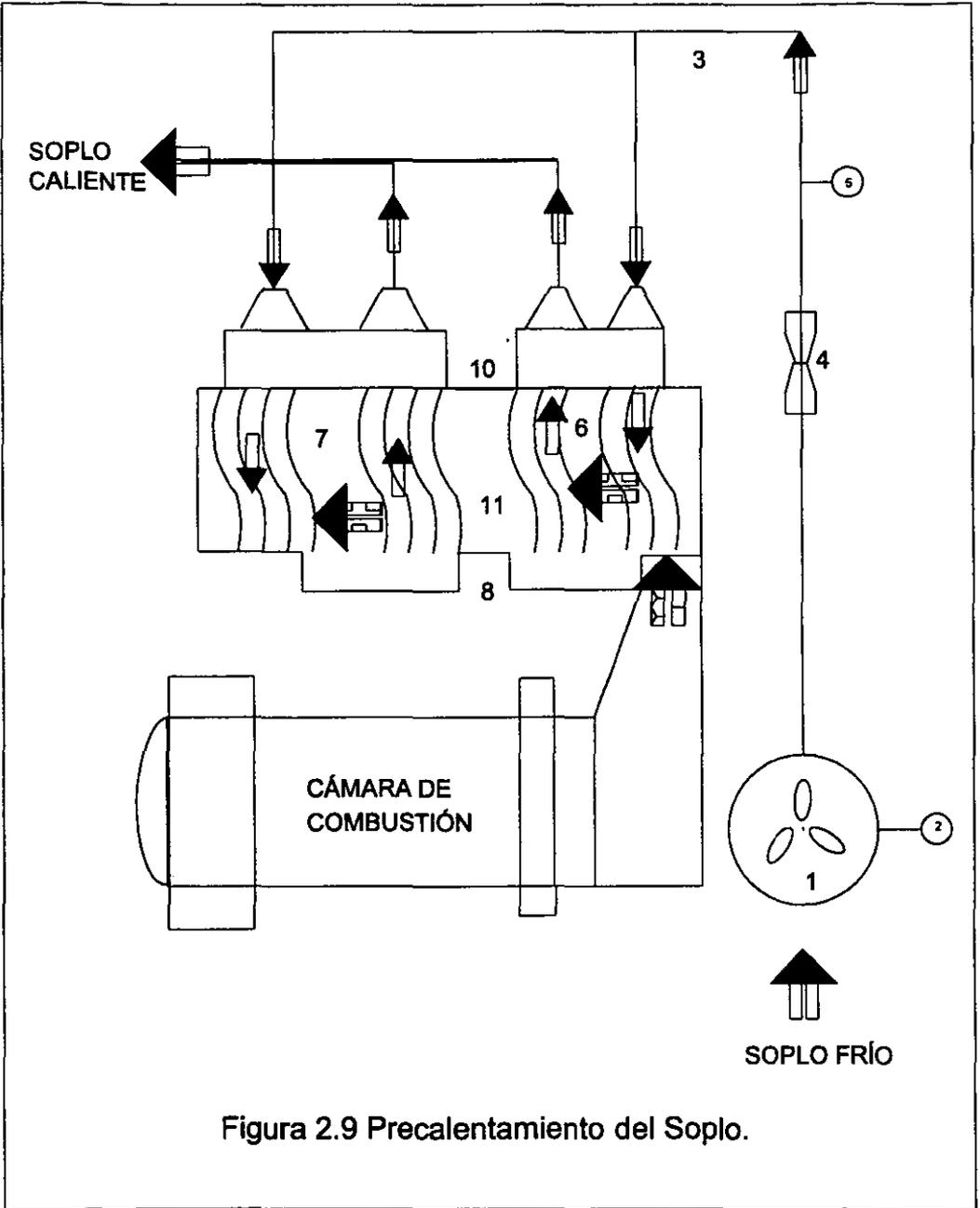


Figura 2.9 Pre calentamiento del Sopro.

En los prehaces el intercambio de calor se realiza en corriente paralela, el soplo frío corre en el mismo sentido que el gas de combustión. En los haces principales, la transmisión térmica se lleva a cabo en contracorriente. La temperatura del soplo caliente es de alrededor de 620°C. El sistema de control supervisa esta temperatura, si sube de este límite, el gas caliente escapa de la cámara de combustión por un "by pass" a la chimenea. El control se realiza por las válvulas "by pass", que abren o cierran, dependiendo de la temperatura del soplo.

El soplo caliente se transporta al anillo del soplo (dona), colocado alrededor del horno, con el fin de distribuir el soplo a las toberas. Una distribución homogénea del soplo caliente se asegura por las pérdidas altas de presión de los portavientos y de las toberas. El aro de soplo (dona) tiene un diámetro de 1 750 mm. El soplo tiene una velocidad lineal de 10 m/s y los portavientos son de 220 mm de diámetro; así que la presión antes de los portavientos se eleva. En el interior de los portavientos y de las toberas la presión es menor, así que el soplo se reparte en los cuatro portavientos y eleva su velocidad.

El soplo inyectado al horno entra en la zona de coque y quema la cama de este material, alcanzando temperaturas de 2 000° C, para la fusión de la carga metálica. Los portasoplos transportan en su sentido vertical al soplo, desde la dona a las toberas y se tienen las siguientes características:

- a) Los compensadores absorben las deformaciones térmicas en la fase de arranque y paro del cubilote.
- b) Las lanzas para la inyección de oxígeno y de finos de coque están montados en prensaestopas.
- c) Se puede observar el proceso en la zona de coque por las ventanillas.

Las toberas están repartidas uniformemente en la circunferencia, montadas con una inclinación de 5° con el eje horizontal, para llegar a una alta profundidad de inyección del soplo. Las piezas de relleno varían la posición radial de las toberas, y permiten variar las distancias entre las toberas y el horno.

Existen dos sistemas para la inyección del oxígeno:

- i.- el soplo caliente se enriquece con oxígeno y
- ii.- Con lanzas Oxijet se inyectan directamente por las toberas de soplo al cubilote, con un flujo volumétrico de 2 000 m³ /h. Se dispone de 4 000 m³/h a una presión de 12 bar en la red.

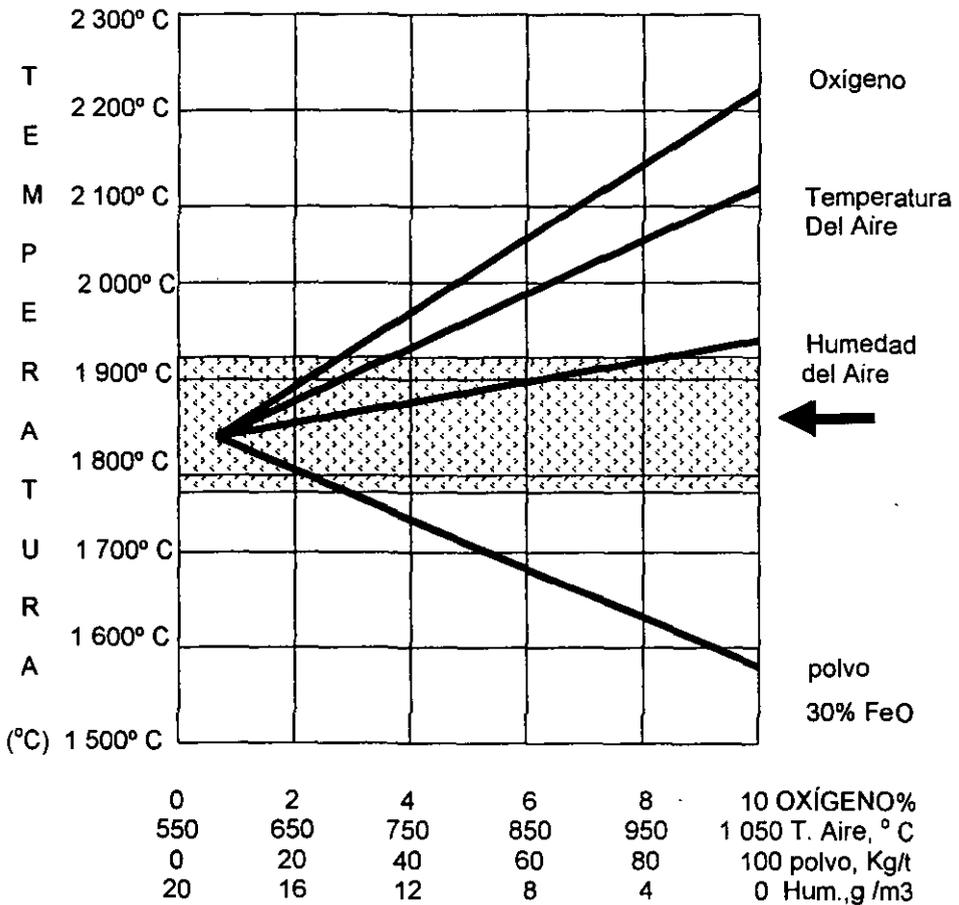


FIGURA 2.10 Temperaturas en el Lecho de Coque

Las lanzas Oxijet tienen una longitud de 2 000 mm y un diámetro de 26.9 mm. Por las lanzas se puede inyectar el oxígeno al cubilote con una velocidad de Mach 2. La Figura 2.10, presenta las condiciones del soplo e inyección de oxígeno aplicados al horno. La Figura 2.11, presenta las condiciones de operación para la inyección de oxígeno.

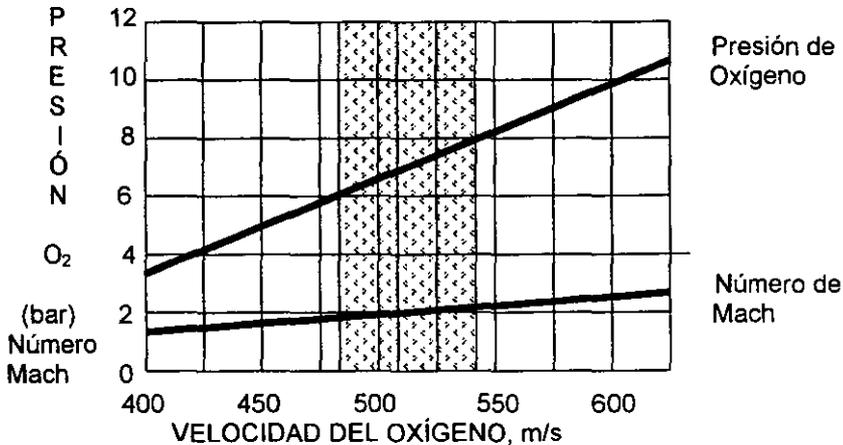


FIGURA 2.11 Inyección de Oxígeno Supersónica.

Las características de la inyección de oxígeno supersónica son:

- mayor distribución del gas.
- Evitar la presencia del "hombre muerto".
- Elevación de la temperatura del hierro líquido.
- Mejoramiento de la carburación.
- Menos pérdidas de calor por enfriamiento de la cámara, porque la zona caliente se pasa al centro del horno.
- Bajas temperaturas del gas de tragante, por menor contenido de N_2 , velocidades de gas mínimas.
- Menores cantidades de gas significan menor cantidad de emisiones y equipos más pequeños para su manejo.
- La presión baja en el horno disminuye el consumo de energía eléctrica.

2.2.7 Refrigeración de la coraza. (Figura 2.12)

El enfriamiento del horno se compone del sistema de enfriamiento de la boca de carga (1) y del sistema de enfriamiento de la coraza (2). (Figura 2.12)

Las bombas de agua fría (3) suministran el agua de enfriamiento del depósito de agua fría (4) a la boca de carga y a la coraza de la parte inferior del horno. El agua para el enfriamiento de la boca de carga se distribuye por el anillo distribuidor (5) a tres anillos de duchas (6).

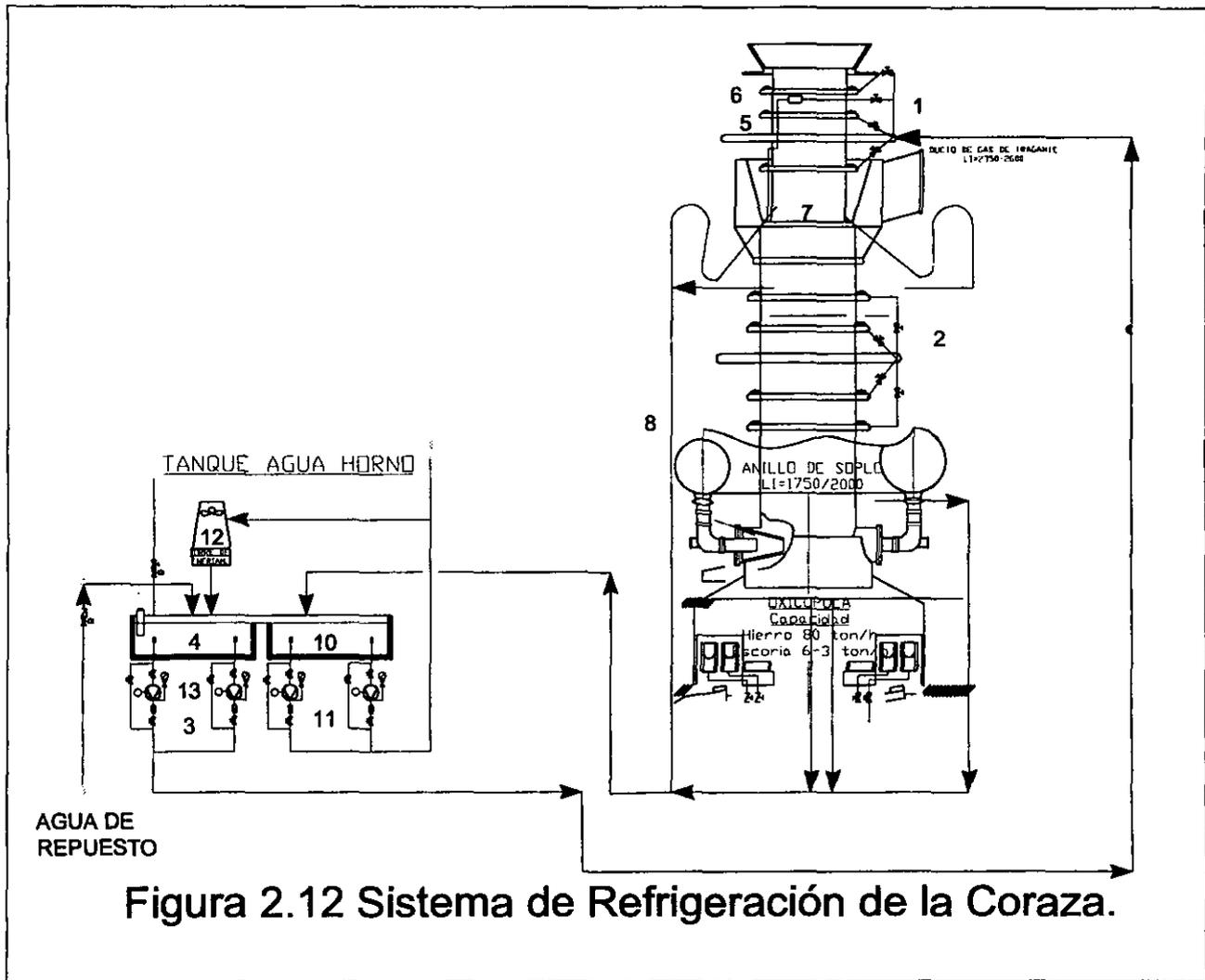
El agua llega por las duchas a la superficie de la boca de carga y se colecta en el colector de agua (7). Para evitar sedimentaciones de lodos en el colector, el agua de enfriamiento puede salir por tres tubos de salida, que pasan por la cámara de captación de gases. Los sedimentos que caen en el depósito salen con el flujo de agua. El agua de enfriamiento cae por un tubo vertical (8) al depósito.

El agua de enfriamiento de la parte inferior del horno se distribuye por duchas que están colocadas en cuatro anillos. El agua sale de los anillos por toberas de cobre a la parte inferior de la coraza. El agua rocía, enfriando la superficie de la parte inferior de la coraza y llega al colector inferior del horno. El rebosadero del colector mantiene un nivel continuo de agua en el colector. Desde allí, el agua desborda continuamente y se une con el agua de enfriamiento de la parte superior y cae, por gravedad, al depósito de agua caliente. (10).

Las bombas de agua caliente suben el agua a la torre de enfriamiento (12). El flujo de agua sale de la torre y se desplaza por gravedad al depósito de agua fría. Un rebosadero equilibra los niveles del agua entre los depósitos de agua caliente y fría.

Una sonda de nivel controla las pérdidas de agua, que se compensan por la adición de agua de repuesto. Se tiene un rebosadero para la eliminación de caudales demasiado altos de agua. Para evitar contenidos elevados de sal en el agua, sale un flujo continuo de los depósitos. El sistema añade agua de repuesto, para compensar las pérdidas por evaporación y por los flujos que salen de los depósitos.

Las bombas tienen válvulas para evitar el retorno del agua, en la bomba de reserva. Se puede cortar el flujo en la entrada y en la salida de cada bomba, con una válvula (14).



CAPÍTULO 3

Materiales Refractarios

Introducción

Para la producción de acero es indispensable la utilización de materiales refractarios, debido a las temperaturas elevadas que requiere el proceso.

Dentro de esta industria siderúrgica intervienen dos tipos de aplicación de procesos: los primarios relacionados con la explotación de minerales, además de su beneficio y caracterización con el fin de adquirir las propiedades que requieren las materias primas a ser empleadas en los siguientes procesos; y los procesos secundarios, encaminados a la producción y refinamiento del arrabio así como de la aleación, colado y formado del acero.

Los materiales refractarios tienen mayor aplicación dentro de los procesos secundarios en las áreas del alto horno, aceración, colada continua, laminación, el horno oxícúpula, el horno eléctrico y de recalentamiento

3.1 Clasificación de los Materiales Refractarios.

Los materiales refractarios son aquellos materiales resistentes a las altas temperaturas, al ataque de las escorias y a otros fenómenos físicos inducidos por el calor. Estos materiales son sometidos a una gran variedad de acciones destructivas como el ataque químico de la escoria, la abrasión de los metales líquidos, la presión mecánica ejercida por el metal fundido, el choque térmico, ciclos de calentamiento, erosión mecánica, etc. Por lo anterior, no es posible tener un solo producto que cumpla con todos los requerimientos de los procesos que los utilizan.

Como puede verse en la Figura 3.1, el punto de fusión de los materiales refractarios en su estado puro, varía desde 1 815° C a 3 315° C. Los refractarios en servicio solo pueden contener pequeñas cantidades de material fundido (1-5%), sin deterioro de sus características estructurales.

3.1.1 De acuerdo con su comportamiento químico, los refractarios pueden clasificarse como ácidos, básicos y neutros.

Los refractarios ácidos son materiales compuestos por óxidos que tienen la capacidad de aceptar iones oxígeno al reaccionar, para alcanzar su forma estable. Contienen cantidades sustanciales de sílice sin reaccionar, la cual puede actuar químicamente, a las elevadas temperaturas de proceso, con la escoria, humos, gases o refractarios de naturaleza básica. Los refractarios ácidos más comunes son los de sílice (SO₂) y los de arcilla (H₄Al₂Si₂O₉).

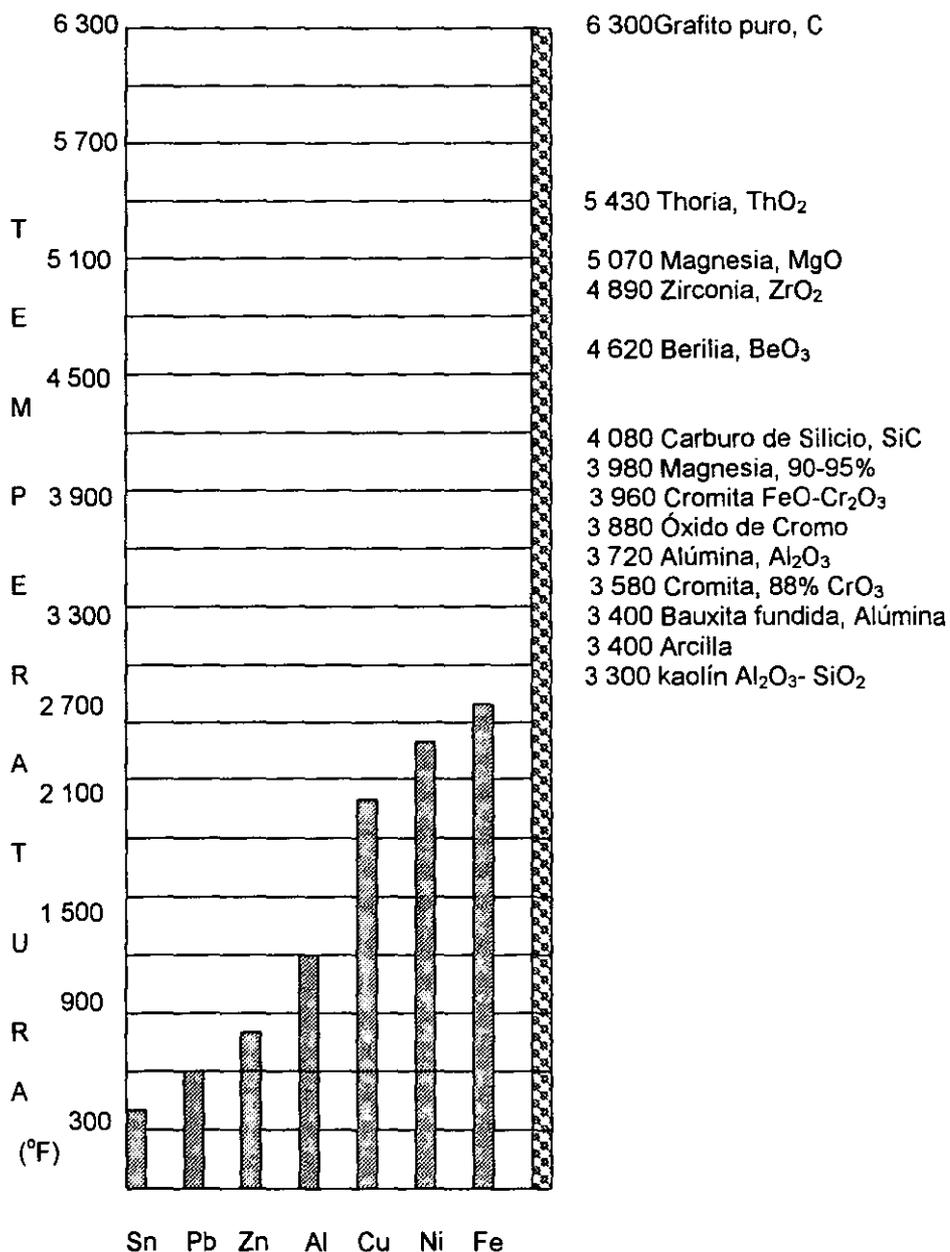


FIGURA 3.1 Puntos de Fusión de Materiales Industriales y Refractarios.(The AISE Steel Foundation, 1999)

Los refractarios básicos son materiales cuya característica es ser donadores de los iones oxígeno al momento de reaccionar, para alcanzar su forma estable. Tienen como sus principales compuestos al óxido de magnesio (MgO) y al óxido de calcio (CaO). Reaccionan químicamente con la escoria, fundentes o refractarios de naturaleza ácida. Los refractarios básicos más comunes son la magnesita, magnesita-carbono, dolomita, etc.

Los refractarios neutros, llamados también anfóteros, son materiales que no presentan un carácter físico definido; es decir, dependiendo de las condiciones o del medio que los circunda, se pueden comportar tanto como ácidos como básicos. Los refractarios neutros más comunes son los de alta alúmina, grafito y cromo.

Teóricamente, los refractarios ácidos no deben ser utilizados con escorias, gases y humos de naturaleza básica; a su vez, los refractarios básicos no deben ser usados bajo condiciones ácidas. En la práctica, no siempre se cumplen estas reglas, lo que disminuye el valor de esta clasificación.

3.1.2 De acuerdo con su origen y/o Constitución Mineralógica.

Desde un punto de vista mineralógico se evidencian las posibilidades de un entendimiento del origen y la naturaleza de los refractarios.

Los materiales refractarios pueden clasificarse tomando en cuenta los materiales que los constituyen o con respecto al material predominante después de su fabricación. En cualquier caso, se pueden clasificar estos materiales como:

3.1.2.1 Refractarios de Alta Alúmina

Los refractarios de alta alúmina están constituidos principalmente por Al_2O_3 , en mayor proporción y sílice (SiO_2) en menor proporción. Las materias primas utilizadas para la preparación de estos materiales son: Bauxita, silimanita, cianita, andalucita, mullita natural, mullita sintética, corindón y diásporo. Estos refractarios tienen como mínimo, un 45 % de alúmina, existiendo productos comerciales de 50, 60, 70, 80, 90, y en algunos casos, hasta del 99%. La Tabla 2.1 muestra algunos productos de alta alúmina, incluyendo su análisis químico típico.

3.1.2.2 Refractarios Magnésicos.

Estos refractarios están constituidos básicamente de Óxido de Magnesio, conocido comúnmente como magnesita, también se incluye a la dolomita, que es un carbonato doble de calcio y magnesio ($CaCO_3.MgCO_3$). Las materias primas para la fabricación de estos materiales refractarios básicos son la magnesita natural, el hidróxido de magnesio $[Mg(OH)_2]$ químicamente precipitado, mejor conocido como magnesita de agua de mar, la magnesita electrofundida y la

COMPOSICIÓN QUÍMICA							
Alúmina %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Álcalis
50	43-47	47-51	0.5-0.6	0.5-0.6	0.9-1.6	2.2-2.4	0.8-1.3
60	28-37	58-67	0.1-0.6	0.1-0.3	0.9-2.7	1.7-3.0	0.2-1.2
70	19-28	68-77	0.1-0.2	0.1-0.3	0.9-2.2	2.0-3.3	0.2-1.2
80	8.5-17	78-86	0.1-0.2	0.1-0.4	0.7-1.7	2.5-3.2	0.1-0.6
90	3.5-10	87-96	0.0-0.2	0.1-1.9	0.2-1.1	0.1-2.6	0.2-0.9
99	0.4-1.1	98-99	0.0-0.1	0.1-0.2	0.1-0.3	0.0-0.3	0.1-0.3
Mullita	12-29	68-86	0.0-0.1	0.1-0.4	0.1-0.4	0.1-2.8	0.2-0.6
Electrofundido	0.1-0.3	94-95	0.0-0.1	0.1-0.3	0.1-0.2	-	0.3-0.4

TABLA 3.1 Composición Típica de Materiales Refractarios de Alta Alúmina.

dolomita. Dentro de este grupo de materiales básicos se incluye a los refractarios impregnados con alquitrán y a los de magnesita-carbono.

3.1.2.2.1 Tipos de Ligas Presentes en los Refractarios Básicos.

Los refractarios básicos de los diferentes tipos pueden ser ligados o aglutinados en varias formas tales como: Liga cerámica, Liga Resina y Liga Directa.

La liga Cerámica se aplica prácticamente a todos los ladrillos que pasan por el proceso de quemado, misma que se efectúa por la vitrificación de los aglutinantes adicionados, a temperaturas de 1 000°C a 1 300°C, que debido a un proceso de sinterizado, une las partículas o granos del material.

La liga Directa se desarrolla a una temperatura mucho mayor que la de la liga cerámica; la sílice y la alúmina reaccionan con la magnesita, en la periferia de los granos, resultando ladrillos de mayor refractabilidad que los ladrillos quemados.

La liga Resina se utiliza solo en ladrillos de magnesita-carbono. La resina es el único aglutinante encontrado que permite humectar una masa refractaria con alto contenido de grafito y darle una consistencia necesaria para prensarla. Más estrictamente, es el único aglomerante técnicamente aceptable con una disponibilidad y precio razonable. Presenta otras ventajas como un buen poder aglomerante, lubricante durante el prensado y su relativo alto rendimiento en carbono, tras la pirólisis que experimenta. Este carbono es tan resistente a la oxidación como el grafito y está uniformemente distribuido, llenando los poros y contribuyendo a una mayor resistencia del material refractario. Las resinas

utilizadas pueden ser muy variadas, aunque las más utilizadas son las resinas fenólicas.

También podemos incluir en esta categoría el proceso de impregnado o alquitrinado, que se realiza a los ladrillos de magnesita quemados, los cuales se sumergen en un tanque con alquitrán al alto vacío hasta saturarlos. Posteriormente, son secados a una temperatura determinada, quedando atrapadas en los poros del ladrillo, variadas cantidades de carbono, aumentando con esto la resistencia a la penetración y/o ataque químico de las escorias, humos, gases, etc.

Otro aspecto importante en los ladrillos básicos es la utilización de placas metálicas, ya sea interiores o cubriendo las caras exteriores de las piezas, misma que protege al ladrillo de roturas durante su traslado, almacenaje e instalación. En operación, la placa metálica se funde y se oxida, combinándose con la magnesita del ladrillo, formando una liga de gran refractabilidad. En la cara fría del ladrillo, la lamina permanece inalterada, impartiendo rigidez al revestimiento e impidiendo la disgregación (spalling), por carga o choque térmico. La Tabla 3.2 muestra las composiciones típicas de los refractarios básicos.

Refractarios Básicos	COMPOSICIÓN QUÍMICA								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Alcalis	C
Magnesita	0.4-4.5	0.1-1.0	91-98	0.6-3.8	0.1-0.9	0.1-2.3	-	-	-
Magnesita-cromo	1.8-4.4	0.1-1.0	69-81	1.0-1.5	6.7-17	2.3-11	-	-	-
Cromo-Magnesita	3.4-5.1	2.5-10	29-52	0.7-1.4	18-24	8-15	-	-	-
Cromo	4.9-8.3	9-27	18-22	0.5-0.7	30-33	12-15	-	-	-
Dolomita Ladrillo	0.3-1.0	27-29	38-43	50-57	0.1-0.3	0.2-1.1	-	-	4-5
Dolomita Calcinada	0.3-0.8	0.3-1.8	19-22	29-32	0.0-0.1	0.3-1.8	-	-	-
Impregnado	0.5-3.8	0.2-1.0	88-98	0.9-6.2	0.0-0.4	0.1-3.0	-	-	4-5
Magnesita-Carbón	0.4-0.8	0.1-0.2	95-97	0.8-2.3	-	0.1-0.2	-	-	8-14
Electrofundido	2.0-3.0	7.0-9.0	55-59	0.0-1.0	18-22	9.5-11	1.0-2.0	-	8--

TABLA 3.2 Composición Química de Refractarios Magnésicos.

3.1.3 Por su presentación o Forma Física.

A los materiales refractarios también podemos clasificarlos por su presentación comercial, aquí tenemos ladrillos y especialidades.

3.1.3.1 Refractarios Formados.

Son piezas preformadas listas para utilizarse, la mayoría de los ladrillos se fabrican por el proceso de prensado en seco.

Las materias primas se muelen, se criban a los tamaños adecuados y se mezclan con una cantidad controlada de aglutinantes. Esta mezcla se alimenta al molde de una prensa mecánica, donde se forma el ladrillo a una presión muy elevada. También se puede aplicar vacío durante el prensado, para obtener ladrillos de mayor calidad: más duros, menos porosos, más pesados y con mayor resistencia al choque térmico y mecánico.

Los ladrillos crudos son secados en pisos calientes o en hornos túnel, posteriormente son sometidos a otros procesos, donde se determinan las propiedades finales del producto, de acuerdo a la aplicación que se les dará.

3.1.3.2 Refractarios Informes y Especialidades.

Las especialidades refractarias son materiales refractarios cuidadosamente seleccionados y balanceados en su granulometría y agregados (aditivos), procesados y envasados, generalmente, en seco; se utilizan para la construcción y/o reparación de revestimientos monolíticos y no monolíticos.

Las especialidades han ganado gran importancia en los procesos modernos, en la construcción, reparación y mantenimiento de revestimientos refractarios de los equipos.

El éxito de su gran aceptación, está basado en los grandes ahorros en tiempo de instalación, bajo costo de mano de obra, y por la gran habilidad que tienen para ser utilizados en reparaciones en caliente.

Las especialidades refractarias se fabrican con las mismas materias primas que se emplean para la fabricación de los ladrillos, la única diferencia que existe es que las especialidades son sinterizadas y/o quemadas después de que han sido instaladas; resultando revestimientos libres de juntas, con gran estabilidad de volumen y una resistencia excepcional.

Las especialidades refractarias más conocidas y de mayor uso son : morteros, concretos apisonables, plásticos y proyectables.

Los Morteros son materiales refractarios finamente molidos, en pasta o en polvo, que se usan para pegar ladrillos refractarios. Aunque se pueden fabricar de cualquier material, los tipos más usados son alta alúmina, sílice y magnesita. Los morteros refractarios pueden clasificarse en dos grupos que son: de fraguado al aire y de fraguado en caliente, dependiendo de si necesitan calor o no para desarrollar su liga.

Los Concretos son una mezcla de materiales refractarios y aglutinantes hidráulicos, que permiten efectuar revestimientos monolíticos, ya que desarrollan una fuerte liga a temperatura ambiente. Cuando un concreto se calienta la liga

inicial desaparece y se forma otra liga cerámica. Generalmente, los concretos se envasan secos, para su uso se mezclan con agua. Los concretos refractarios se pueden instalar por vaciado, vibrado apisonado o por proyección neumática.

Se pueden conseguir concretos refractarios de composición similar a los ladrillos refractarios; es decir, se pueden obtener concretos ácido, básicos y neutros.

Los Plásticos refractarios son materiales que se preparan para darles consistencia de plasticidad, por lo que no requieren de una preparación especial para su uso. Las calidades comerciales que se fabrican son similares a los ladrillos de arcilla, alta alúmina y cromita.

Se utilizan en reparaciones de emergencia o en lugares donde sea difícil trabajar con otros materiales. Generalmente, se apisonan en el lugar hasta lograr una buena compactación, formando un revestimiento monolítico.

Los refractarios Apisonables son una mezcla íntima y en proporciones cuidadosamente determinadas, de materiales refractarios en estado natural o calcinados, con o sin otros ingredientes, que mezclados y amasados con agua adquieren plasticidad para moldearse por compactación, formando estructuras monolíticas de una dureza excepcional, al fraguar al simple secado con el aire o bien, al aplicársele temperatura. Por lo general, los apisonables se presentan en estado seco, a los que es necesario agregar agua para que adquieran consistencia y trabajabilidad.

Los Materiales Proyectables son materiales refractarios, cuidadosamente elaborados y balanceados en cuanto a su tamaño de grano. Contienen agregados que les dan una alta adherencia, diseñados especialmente para aplicarse con máquinas de proyección y que se utilizan para revestir y/o reparar aquellos equipos con las más intrincadas configuraciones, o en áreas inaccesibles para aplicar el refractario por medio de otros métodos, o simplemente como parte de un programa de mantenimiento preventivo. En algunos revestimientos refractarios, especialmente en caliente, la aplicación de estos productos por el método de proyección es ideal. Especialmente para aplicar o colocar grandes cantidades de material en un tiempo extremadamente corto, comparado con cualquier otro método. Además, los revestimientos y/o reparaciones que con ellos se efectúan, proporcionan una alta densidad y, por consiguiente, una gran resistencia a la abrasión y a la erosión.

3.2 Propiedades de los Materiales Refractarios.

3.2.1 Propiedades Físicas.

Es de suma importancia conocer las propiedades físicas que se requiere posean los refractarios a instalarse en los equipos próximos a revestirse, ya que de ello depende su vida útil.

3.2.1.1 Propiedades Estructurales. Son aquellas características que definen a los materiales refractarios por medio de un extenso análisis estructural y de textura, los más importantes son:

- a) **Densidad Aparente.** Esta relacionada con la razón del peso seco dividido por el volumen del material, más la suma de los volúmenes de los poros abiertos y poros cerrados. Esta es una propiedad primaria que relaciona las composiciones químicas y mineralógicas de los materiales. La comparación de sus valores puede conducir a la detección de anomalías como la presencia de fases de minerales no deseados o algunas otras fases de transformación.
- b) **Porosidad Aparente.** Esta relacionada con la razón volumen de poros abiertos dividido por el volumen total, expresado en por ciento. Esta propiedad está en función de la curva de distribución granulométrica de la matriz de materiales y agregados, el modo de compactación y la sinterización de los mismos.

La porosidad aparente puede considerarse como una de las propiedades más importantes en términos de vida útil de los refractarios. A bajos valores de porosidad proporciona mejoría en la resistencia a la compresión en caliente y/o en frío; de modo que mejora la resistencia al impacto, abrasión y erosión. De igual modo, tiene efecto sobre el incremento de la resistencia a la corrosión química, dificultando la penetración de metales fundidos, escoria líquida y otros fundentes. Por otra parte, se observa un incremento de la conductividad térmica, de tal modo que, para materiales refractarios aislantes, es preferible una alta porosidad. Se mide como un porcentaje del volumen total del material.

- c) **Permeabilidad.** Es la medición de la proporción de fluidos que fluyen a través de una estructura y es dependiente del tamaño, del número y forma de los poros conectados. A diferencia de las propiedades anteriores, esta última es una propiedad que varía de acuerdo a la dirección en la cual se hace la medición.

Los valores deseados de permeabilidad dependen del uso final que se les dará. En el alto horno, los revestimientos refractarios son atacados por líquidos y gases, siendo uno de los más deteriorantes el CO, el cual puede disociarse resultando en depósitos de carbono. Las unidades más utilizadas, para medir la permeabilidad, son los centidarcies (cDarcy)

3.2.2 Propiedades Térmicas.

Son aquellas directamente relacionadas con los cambios de temperatura y, en consecuencia, el comportamiento que presentan ante estos cambios.

- a) **Expansión Térmica.** Mide los cambios dimensionales que sufren los materiales en función de la temperatura de operación y, por lo tanto, tiene influencia sobre la resistencia a los esfuerzos térmicos. Los refractarios son una mezcla de sólidos (matriz) y espacios vacíos (poros). La fase sólida está constituida de granos de tamaños gruesos, medio y fino, los cuales se expanden. Sin embargo, debido a la complejidad inherente, algunas formas refractarias pueden expandirse y otras contraerse. Valores típicos son de $13.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{F}$), para el espinel de Magnesio. ($\beta = \Delta V/V_0/\Delta T$)
- b) **Capacidad Calorífica.** Esta propiedad se encarga de medir la cantidad de calor requerida por el material para cambiar su temperatura en una unidad. Ya que los valores que toma esta propiedad son constantes para compuestos puros, para el caso de materiales refractarios, que son una mezcla de fases, el valor del Cp (calor específico) es aproximadamente igual a la suma de los calores específicos de los componentes individuales multiplicados por sus fracciones en masa correspondientes. Para la mayoría de los compuestos cristalinos, la capacidad térmica aumenta desde 0 a 0°K a un valor cercano a 25.1 kJ/Kg°K.
- c) **Conductividad Térmica.** Esta propiedad se refiere a la cantidad de calor que el material es capaz de transmitir por unidad de tiempo; y por lo tanto, la rapidez con la cual un equipo se puede enfriar. Al igual que las demás propiedades térmicas, esta varía en función de la microestructura y textura, tamaño de poros, tamaño de grano y naturaleza de ligas entre granos. Por lo tanto, para revestimientos refractarios en los cuales se requiere conferir un efecto aislante térmico, es recomendable que los materiales empleados en el diseño posean valores bajos de conductividad térmica, como la sílice y arcillas refractarias. Contrariamente, los materiales con alta densidad tales como el grafito, poseen altos valores de k (conductividad térmica), pero dada su microestructura les permite ser materiales más resistentes a la penetración de la escoria. De hecho, esta es la base de los refractarios de magnesita-carbón y los bloques de carbón utilizados para la construcción del alto horno. Las unidades comunes son W/m°K, Btu/hr/ft°F)

3.2.3 Propiedades Mecánicas y Termomecánicas.

Son aquellas en las cuales el comportamiento mecánico de los materiales, está regido por las relaciones que existen entre la deformación-ruptura y tipo de carga aplicada, siendo esta última de tipo mecánica, térmica, estática, dinámica y/o cíclica.

- a) **Módulo de Elasticidad (MOE).** Es la constante de proporcionalidad que existe entre un esfuerzo aplicado y la correspondiente deformación unitaria sufrida, expresada como tensión. Cuando las relaciones esfuerzo-deformación son rectilíneas, el MOE es constante. El módulo de elasticidad para los refractarios está en función de las fases que lo constituyen, la

textura (forma y distribución de los granos), la porosidad y la temperatura de operación. Las unidades utilizadas son Mpa (Mega Pascal).

- b) Resistencia a la Compresión (CCS). Esta propiedad mide la máxima carga compresiva que puede soportar un refractario a temperatura ambiente, sin fallar. Típicamente, el valor más alto de CCS es de 2 a 10 veces mayor que el valor más alto del HMOR. La CCS es un parámetro que sirve para evaluar la resistencia a la compresión de los refractarios, el cual tiene significado práctico en el manejo y los procesos de operación abrasivos y de impacto mecánico, a las cuales están expuestos los revestimientos refractarios. Los valores se encuentran entre 40 a 150 Mpa., para refractarios.
- c) Módulo de Ruptura en Caliente (HMOR). Esta propiedad mide la resistencia de los materiales refractarios a la tensión a altas temperaturas. La determinación de HMOR es una de las pruebas más importantes debido a que los refractarios son operados a altas temperaturas, y se aplica principalmente a ladrillos de sílice y básicos. Algunos refractarios tales como los ladrillos de arcilla refractaria super duros y los ladrillos de magnesita-cromo quemados, presentan un incremento en resistencia a altas temperaturas, debido al fenómeno de alivio de tensión, que es producido por la transformación de su liga química en liga cerámica a altas temperaturas. Se reporta en Mpa indicando la Temperatura de la prueba (1400° C).
- d) Resistencia al Choque Térmico. Se refiere a la determinación de la resistencia relativa de los refractarios al choque térmico, bajo condiciones similares a las que se presentan en el proceso. Esta determinación no presenta un análisis completo de los esfuerzos térmicos y fallas que presentan los refractarios bajo condiciones de tensión. La resistencia al choque y esfuerzos térmicos tiene el papel de mantener la integridad microestructural y las causas para ocasionar la falla son: bajo coeficiente de expansión térmica, alta porosidad, pequeña área de liga entre cristales y/o agregados (proceso de sinterizado), alta conductividad térmica.

3.2.4 Propiedades Químicas.

Estas propiedades sirven para realizar la caracterización y clasificación de los refractarios, especialmente cuando se complementa con datos de pruebas físicas y mineralógicas.

- a) Hidratación. La hidratación de los ladrillos de magnesita y otros refractarios básicos presentan inconveniente debido a que les produce la aparición de zonas frágiles y pérdida de su integridad estructural. Un ejemplo lo constituye la hidratación de la magnesita. El equilibrio de la reacción es la temperatura y la presión parcial del agua, variables que conducen la dirección de la reacción dependiendo de los valores que presenten. La práctica de ganeo en caliente en los muñones del convertidor, es un

ejemplo de la desventaja de la hidratación de la magnesita, que produce agrietamientos en los ladrillos de magnesita-carbón.

- b) Corrosión. La corrosión es un proceso que presentan los refractarios mediante la degradación de sus componentes y se lleva a cabo a través de mecanismos como disolución del refractario en contacto con el acero líquido y la escoria, reacción con un líquido, un sólido o un vapor y penetración de un líquido o vapor. En la mayoría de los casos estos mecanismos ocurren en combinaciones de dos o más a la vez; y, desde luego, la reacción-disolución deben tratarse juntos y posteriormente a la penetración. El ataque de la escoria es un proceso complejo que involucra la penetración de escoria líquida, así como la disolución y disolución-reacción, así como erosión mecánica. La penetración de la escoria puede destruir o romper las ligas en los agregados y/o matriz del refractario, de modo que el desgaste resulta de la erosión de partículas gruesas, o en ocasiones, el desprendimiento de grandes secciones de la unidad refractaria. La resistencia a la corrosión de la escoria es una característica difícil de medir, ya que depende de una gran lista de parámetros que están relacionados con la interacción escoria-refractario.

3.3 Aplicaciones de los revestimientos Refractarios.

3.3.1 En la Industria Siderúrgica.

Dentro de toda industria existen equipos que se encuentran expuestos a condiciones desgastantes como son: atmósferas oxidantes o reductoras, altas temperaturas, reacciones químicas, desgastes mecánicos, etc. Estos equipos en los cuales se fabrica, transporta y se refina el arrabio para la elaboración del acero, necesariamente tienen que estar recubiertos por capas de material refractario, en un montaje a base de ladrillos o en una sola pieza monolítica. Entre estos equipos se encuentran:

- 1) Hornos de Coquización. Grandes volúmenes de ladrillo de sílice se utilizan en estos hornos, debido a su elevada conductividad térmica. La frecuencia de reparación de las instalaciones refractarias varía según las unidades. La vida útil de una planta coquizadora es de varios años, lo mismo que un alto horno.
- 2) Alto Horno. Todo equipo que se encuentra en operación con altas temperaturas, necesariamente requiere estar protegido por un revestimiento refractario. En la cuba del alto horno se utiliza, generalmente, ladrillo de 42% de alúmina, resistente al ataque del monóxido de carbono, fundentes, abrasión mecánica y altas temperaturas. En el crisol, que es un área destinada a la producción del arrabio y que maneja una temperatura alrededor de 1 850° C, está recubierta por bloques de carbón para el piso y paredes de la cuba que, además de no ser penetrados por el arrabio, facilitan la transmisión de calor hacia el exterior, gracias a su elevada conductividad térmica. En la capa inferior se usan bloques de grafito, con

una conductividad térmica muy superior a la del carbón y de aproximadamente 50 veces a la de un ladrillo sílico-aluminoso. En las estufas del alto horno para el revestimiento de bóvedas, cámaras de combustión y sección superior de las cámaras generadoras, se utilizan grandes volúmenes de ladrillo de sílice. En la parte inferior de las cámaras de regeneración, se utilizan diversos grados de ladrillo de mullita y sílico-aluminosos, que tengan buena resistencia a la deformación bajo carga y a los cambios de temperatura. La mullita corresponde a la forma cristalina, estable de los minerales silimanita, cianita, andalucita, cuando han sido sometidos a elevadas temperaturas ($3.Al_2O_3$).

- 3) Olla Termo.- Este equipo está destinado específicamente al transporte del arrabio del alto horno al área de fabricación del acero. Debido a que se necesita minimizar las pérdidas de temperatura durante el transporte del arrabio, estos equipos requieren tener tres tipos de revestimientos: el revestimiento aislante (que está constituido por un concreto a base de refractario sílico-aluminoso), el revestimiento de seguridad (refractario de alúmina al 38%) y el revestimiento de trabajo (refractario de alta alúmina).
- 4) Distribuidores de Colada Continua. Estos equipos se utilizan específicamente para el colado del acero de la olla hacia el molde, para la producción de palanquilla. Están protegidos por dos revestimiento: el revestimiento de seguridad (que puede ser de ladrillo refractario o de una pieza monolítica de MgO al 95%), que es vaciada y moldeada en el mismo distribuidor) y el revestimiento de sacrificio (puede ser de placas de sílice al 80% o refractario proyectado de MgO al 95%).
- 5) Hornos de Recalentamiento.- Se utilizan ladrillos de 60% de alúmina, en las zonas de alta temperatura que permiten una operación continua. En secciones de menor temperatura se emplea ladrillo del 42% de alúmina.

3.3.2.- En el Área de Aceración.

El proceso de aceración es del tipo por lotes, es decir por coladas; donde se requieren recipientes revestidos con materiales refractarios para recibir y transportar el metal líquido, desde la estación de recepción de arrabio hasta la máquina de colada continua.

Los principales recipientes utilizados en aceración B.O.F. (Basic Oxygen Furnace), son:

- i) Olla para Transporte de Arrabio.- En este tipo de ollas se lleva a cabo la desulfuración del arrabio y el transporte del mismo hacia el convertidos B.O.F., para la fabricación del acero. La olla de arrabio solo requiere de dos tipos de revestimiento: el revestimiento de seguridad y el revestimiento de trabajo (de alta alúmina). El revestimiento de seguridad consta de dos capas: la primera capa es la que está en contacto con la coraza metálica, su principal función es aislar térmicamente y disminuir

las pérdidas de calor por las paredes y piso de la olla. Esta capa puede ser un concreto aislante, 60-70% alúmina o una teja refractaria, 60-70% alúmina. La segunda capa de seguridad es de ladrillo sílico-aluminoso 75% de alúmina, con un espesor de 63 mm. Si la olla de arrabio no es sometida a otros procesos externos, solamente para transportar arrabio, todo el revestimiento de trabajo se instala de una sola calidad, entre las más económicas está la de 75-80% alúmina. Los espesores son de 229 mm. Se pueden obtener campañas de 300 coladas, con reparaciones parciales de zona de impacto en piso y muro. Si la olla de arrabio sufre el proceso de desulfuración, se pueden revestir con una calidad más alta, alúmina grafitada, con espesores de 229 mm. Se pueden lograr campañas de 1000 coladas; con reparaciones parciales de piso y muro.

- ii) Ollas para Transporte de Acero.- Inicialmente las ollas para transporte de acero se utilizaban solo para recibir y homogeneizar al acero producido en el convertidor., y transportarlo a la máquina de colada continua. Como las condiciones no eran muy severas, el revestimiento de seguridad era igual que el de la olla de arrabio y el revestimiento de trabajo se hacía con una sola calidad: ladrillo de 80% alúmina, zonificando solo la zona de impacto con mayor espesor, se podían obtener campañas de 100 coladas, con reparaciones parciales en piso y línea de escoria. Actualmente, cuenta con operaciones más complejas, de metalurgia secundaria. En la olla de acero se pueden realizar burbujeo de gas por el piso, calentamiento del acero, adición de ferroaleaciones, inyección de alambre para desoxidación profunda, formación de escorias muy básicas, etc. Por lo que el revestimiento refractarios se ha zonificado y mejorado en calidad.
- iii) Convertidor B. O. F.- En este horno básico al oxígeno se realiza la fabricación y refinación del acero, las temperaturas en promedio que maneja son de 1 650°C, y las escoria que maneja son básicas y oxidantes. Por lo tanto, es necesario que esté protegido por un revestimiento compatible con el proceso. De este modo, el convertidor requiere dos tipos de revestimiento: el revestimiento de seguridad (constituido de ladrillo refractario de magnesita al 98%) y el revestimiento de trabajo, que en promedio tiene un 85% de MgO y 13% de carbón. La adición del carbón es con el fin de abatir la porosidad del ladrillo y, por lo tanto, minimizar la penetración de la escoria en la matriz del refractario. Adicionalmente, la zona de muñones esta zonificada con refractario de grano electrofundido, el cual presenta una mayor resistencia al ataque por desgaste mecánico y/o ataque químico. El revestimiento de seguridad es de ladrillo de magnesita quemado, en el piso del convertidor se instalan tres capas. Las dos primeras capas tiene un espesor de 63 mm cada una y la tercera capa tiene un espesor de 229 mm. En todo el muro el espesor de la capa de seguridad es de 150 mm. El revestimiento de trabajo es 100% básico y actualmente se instala puro ladrillo de magnesita-carbono; utilizando varias calidades al

zonificarlo, buscando balancear el desgaste. El piso del convertidor se reviste con ladrillos refractarios de magnesita-carbono, 13% de carbono residual, el arreglo del piso es en anillos concéntricos. El estadio o cono inferior está revestido con ladrillo de 13% carbón, zonificando en el lado de los muñones con ladrillo con adición de magnesita electrofundida y metales antioxidantes. El barril se zonifica con tres calidades diferentes de ladrillo de magnesita-carbono. En el lado de carga se coloca ladrillo con 13% de carbón residual, resistente al impacto. El cono superior se zonifica con ladrillo enchapado en el lado de los muñones: en el lado de vaciado con ladrillo con magnesita electrofundida y metales antioxidantes y ladrillo de 13% de carbón residual, en el lado de la carga. En la boca se instalan cuatro carreras de ladrillo enchapado y se remata con refractario apisonable.

3.4 Factores que Afectan el Rendimiento del Revestimiento Refractario.

3.4.1.-Consideraciones Generales

Las operaciones de la ceración tienen un efecto significativo sobre la vida de un revestimiento refractario de B.O.F., y dentro de este contexto, se deben considerar todas y cada una de las variables involucradas en el proceso. Existen operaciones que afectan a los refractarios desde un aspecto mecánico (por ejemplo, cuando se carga al convertidor), desde un punto de vista termomecánico (durante el calentamiento del convertidor) y desde un aspecto químico, especialmente el ataque de la escoria. En el último caso, la sílice, derivada principalmente del silicio del arrabio y el FeO, que son los dos óxidos más perjudiciales para un revestimiento refractario, en los muñones vulnerables por se difícil darles mantenimiento. Además, existen otros factores como la adición inadecuada de fundentes a una colada, las altas temperaturas de fin de soplo, la frecuencia de resoplos, la falta de embanques, goneos y los tiempos largos de proceso, pueden ser dañinos para la vida del revestimiento.

3.4.2 Práctica de Precalentamiento.

Históricamente, el precalentamiento del revestimiento refractario es realizado tan rápido como es posible con base en el uso de refractarios ligados con alquitrán, los cuales pasan por un punto de ablandamiento a medida que son calentados. Un calentamiento excesivamente prolongado podría ocasionar una oxidación demasiado severa del material refractario, ocasionando el desplome de estos ladrillos en el barril y el cono.

Sin embargo, un calentamiento rápido puede causar un impacto térmico para los ladrillos quemados impregnados con alquitrán, en el revestimiento. El aislamiento con refractarios proyectados sobre las áreas de mayor desgaste de los ladrillos quemados impregnados, previene un daño por impacto térmico previo al calentamiento.

Una tendencia reciente, particularmente ahora que los refractarios ligados con resina han sustituido a los ladrillos temperizados ligados con alquitrán en algunos talleres, es hacia los calentamientos más largos. Se observó que de 3 a 4 horas de precalentamiento fueron suficientes, por el control de las adiciones de coque, altura de la lanza de oxígeno, etc. Se estableció que el comportamiento deseado del precalentamiento fuera una inclinación gradual de la temperatura, desde la ambiente hasta unos $1\ 100^{\circ}\text{C}$, por encima de 4 horas, disminuye el impacto térmico para el ladrillo y permite la expansión de la estructura total del ladrillo de trabajo. En ausencia del impacto térmico es confiable agregar alrededor de 76 mm del revestimiento de trabajo, disponible para la campaña.

3.4.3 Carga Metálica del Convertidor.

3.4.3.1 Prácticas de Carga de Chatarra.

El método utilizado en cada acería para vaciar la chatarra dentro del convertidor, puede tener efectos significativos sobre la rapidez de desgaste de la zona de carga del revestimiento refractario. Asimismo, se sabe que al momento de realizar este procedimiento y durante este, surgen otros factores tales como la cantidad, la altura, velocidad y el ángulo de vaciado, que también pueden tener una influencia sobre la magnitud y tipo de desgaste ocasionado en la zona de carga.

Por otra parte, la ubicación o posicionamiento de la chatarra en la caja de carga, juega un papel bastante importante, ya que de ello depende que se minimice el daño sufrido por el revestimiento al momento de cargarla. La forma en que se acomoda la chatarra dentro de la caja se realiza secuenciando lotes de chatarra, de tal manera, que la más ligera se posiciona al frente de la caja, para que esta actúe como colchón, es decir, que amortigüe el impacto de la chatarra más pesada cuando sea cargada.

3.4.3.2 Carga de Arrabio.

Es el paso próximo en la secuencia de la colada, acción que resulta abrasiva y corrosiva para la zona de carga del revestimiento y, probablemente, sea más perjudicial que la propia chatarra. La posición de la olla de arrabio y la velocidad de vaciado, tienen una amortización definitiva sobre el desgaste del refractario.

Una alta cantidad de arrabio mejora el rendimiento de fin de sople, en términos de por ciento de coladas aceptables y de número reducido de coladas con resople. Un alto porcentaje de arrabio suministra más entrada térmica para la colada y esta condición puede originar menos resoplos por temperatura.

3.4.4 Acondicionamiento de la Escoria y su Interacción con el Refractario.

Todos los procesos metalúrgicos a base de oxígeno, son esencialmente procesos de oxidación, en los cuales elementos como C, Si, P y S son oxidados por el sopleo de oxígeno para formar CO, CO₂, SiO₂ y P₂O₅. Algo de manganeso y hierro son también oxidados para formar MnO y FeO. El CO y CO₂ escapan junto con algo de SO₂. Los otros elementos oxidados forman una masa líquida, que flota en la superficie del baño de metal fundido debido a su densidad, menor que la del hierro fundido. La escoria fundida de sílice es ácida y altamente corrosiva, sobre el revestimiento refractario del recipiente que la contiene. Tiene una gran tendencia a contaminar al hierro fundido con Si, P, O, y S, debido a la gran actividad química de estos elementos en la escoria.

La cal (CaO) se añade al baño de metal fundido y la escoria para neutralizar la acidez de la sílice y la vuelve básica. La escoria básica es menos corrosiva que la escoria ácida para los revestimientos.

Si se añaden otros materiales similares al CaO con el mismo fin, se obtiene una escoria con fluidez y basicidad, que optimizan la desulfuración y defosforación y proveen una adecuada protección al revestimiento.

Como la cal no se disuelve inmediatamente en los componentes oxidados, la basicidad de la escoria permanece baja, en detrimento del refractario. Este retardo de la disolución de la cal en la escoria, que se forma rápidamente, es causada por la formación del silicato dicálcico, que atrapa a los cristales de cal. A menos que la basicidad de la escoria sea elevada rápidamente, es decir que se disuelva la cal con celeridad, la reacción de la escoria con el refractario básico, produce una severa corrosión del revestimiento.

3.4.4.1 Basicidad Binaria.

La basicidad binaria se define como la razón de los óxidos básicos a los óxidos ácidos. Con frecuencia, esta relación se reduce a la simple proporción de cal a sílice.

Las altas relaciones cal/sílice se sabe que son beneficiosas para el revestimiento refractario. El porcentaje de MgO en solución disminuye con el incremento de la relación. Con base en pruebas de laboratorio, se ha establecido que la basicidad binaria definida como CaO/SiO₂ es el factor más importante que influye sobre la erosión de los refractarios. Mostrando que para una escoria líquida de basicidad binaria entre 0.7 y 1.2 toma lugar una erosión severa del refractario, en basicidades binarias por encima de 1.2 esta erosión empieza a disminuir.

3.4.5 Adición de Cal Dolomítica.

Esta acción se realiza debido a que es un control operacional fuertemente importante, que influye sobre la vida del revestimiento refractario del convertidor.

A pesar de las altas basicidades de las escorias de aceración, existe un gradiente químico entre las mismas y el MgO del material refractario, de tal manera que tratarán de satisfacer este requerimiento con la disolución del revestimiento.

A las altas temperaturas de aceración, esta condición permite que el MgO del revestimiento se disuelva en la escoria, hasta que se sature con MgO de una fuente externa. Cuando se maneja una escoria ternaria pura FeO-CaO-SiO₂, la escoria puede disolver de 6 a 8 % de MgO a 1 600° C.

La adición de la cal dolomítica al convertidor durante el soplo, se hace con el fin de disminuir la capacidad que posee la escoria para disolver la magnesita del refractario. Lo anterior se lleva a cabo mediante el acondicionamiento, el cual consiste en incrementar el contenido de MgO de la escoria, adicionando materiales ricos en MgO, por ejemplo, cal dolomítica, ladrillos de recuperación triturados, etc.

3.4.6 Control de Temperaturas de Fin de Soplo.

Las temperaturas de vaciado se han incrementado en años recientes, a medida que los desgasificadores y colada continua se ponen en línea; la temperatura es muy importante para la vida del revestimiento B.O.F. Las impurezas en los refractarios forman líquidos a temperaturas elevadas y estos líquidos hacen a los refractarios susceptibles a todos los ataques de escorias líquidas. Las escoria líquidas son también más fluidas a temperaturas altas, lo cual incrementa su capacidad para atacar al revestimiento. A mayor temperatura, mayor rapidez de desgaste del refractario.

El control de la temperatura es también un factor importante, que influye en la velocidad de desgaste del refractario. Una colada caliente retrasaría el vaciado mientras es enfriada en el convertidor y el aumento del tiempo a temperaturas altas causa un desgaste adicional. En alguna forma, una colada fría debe resoplarse, el tiempo de la colada se incrementa, simultáneamente el contenido de FeO de la escoria se incrementa y como resultado incrementa también sus propiedades de erosión.

3.5 Mecanismos de Desgaste del Refractario.

A temperaturas elevadas, existen dos mecanismos de falla, críticamente importantes que se cree, son responsables del desgaste de los revestimientos

refractarios del sifón a presión. Este deterioro es causado por dos factores básicos: ataque químico y desgaste mecánico.

3.5.1 Desgaste Mecánico.

Incluye cualquier fuerza física que daña la estructura del refractario. Los choques térmicos, impactos por carga, erosión por flujo de gases y líquidos, abrasión por partículas sólidas en movimiento, son causas de deterioro mecánico.

El agrietamiento del refractario puede ser resultado de una expansión intensiva en la cara caliente, causada por el calentamiento rápido de un revestimiento nuevo, o bien las grietas pueden formarse como resultado de los ciclos térmicos

Cuando el refractario se expone a un rápido incremento de la temperatura, la cara caliente se expandirá más y los esfuerzos térmicos causan una separación de la cara caliente, del remanente del cuerpo refractario.

Durante el precalentamiento, algunas porciones descostradas de la superficie caliente pueden desprenderse, debido al calentamiento demasiado rápido y no uniforme. El alto coeficiente de expansión térmica del material y la gran diferencia de temperaturas entre la cara caliente y el lado frío, son factores que determinan el desgaste mencionado.

3.5.2 Ataque Químico.

Usualmente, el desgaste mecánico y el ataque químico trabajan juntos, complementándose mutuamente y acelerando el deterioro total del refractario, drásticamente. En general, la acción química debilita la estructura del refractario, permitiendo que las fuerzas mecánicas complementen el desgaste. En ausencia de fuerzas mecánicas que remuevan el material afectado químicamente, el ataque químico se hace gradualmente más lento y eventualmente, se detiene. Debido al gradiente térmico y al hecho de que las especies químicas tienen una difusión exponencial, que varía inversamente con la distancia que tienen que desplazarse. Por el contrario, en la ausencia de ataque químico, la estructura del refractario es muy fuerte y puede resistir esfuerzos mecánicos severos sin deterioro significativo.

Los elementos químicos pueden penetrar a los refractarios causando una variación en el volumen del área penetrada, que puede ser de encogimiento o de expansión. De cualquier modo, el cambio de volumen producirá esfuerzos y fracturas en la interfase de la porción penetrada y la parte no penetrada del refractario. Subsecuentemente, el choque térmico o las cargas mecánicas pueden remover fácilmente, al refractario expuesto al ataque químico. Aún si no ocurre un cambio de volumen, la acción química puede debilitar las uniones que mantienen juntos a los granos individuales que constituyen al refractario (ligas), causando la vulnerabilidad de la masa a los esfuerzos mecánicos.

En una situación de impacto, cuando la escoria y el hierro es vertido a la masa refractaria, el refractario es suficientemente fuerte para resistir los esfuerzos mecánicos, a menos que haya sido penetrado y debilitado por el ataque químico.

En años recientes se ha incrementado el uso de materiales refractarios colables libres de cemento. Estos colables tienen la ventaja de no producir fases de bajo punto de fusión como la gelenita, a altas temperaturas y, en consecuencia, se incrementan sus propiedades de resistencia en caliente.

Los mecanismos de corrosión por la escoria asociados con refractarios colables del alta alúmina ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$) libres de cemento, es de naturaleza compleja. Primeramente influenciado por la infiltración de CaO y subsecuentemente por la formación de fases de CA_2 y CA_6 ($\text{C}=\text{CaO}$, $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$). En un grado menor ocurre la formación de fases de sílica de bajo punto de fusión como Gelenita y motecellita, que ocurren en la cara caliente y pueden acelerar la corrosión. La efectividad del MA espinela ($\text{M}=\text{MgO}$) en corrosión reductora, parece ser más crítica en la matriz del colable, favoreciendo su formación "in situ". Sin embargo, un exceso de MgO libre en el colable, puede provocar demasiada formación de espinela en la cara caliente, causando una expansión excesiva, inestabilidad y mayor corrosión. El CA_6 parece que actúa como un catalizador en la formación de espinela, en las zonas más frías del refractario. Los óxidos de hierro no juegan un papel significativo en los mecanismos de corrosión. La habilidad de la espinela para mantener buena resistencia a la corrosión y estabilidad a altas temperaturas, está íntimamente correlacionada con el contenido global de MgO en el colable y el contenido de CaO en la escoria. (Zhang, 1997)

A medida que la relación $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ aumenta, la penetración de la escoria tiende a disminuir. (Ba Shir, 1997)

En la producción de acero el tipo de escoria presente puede ser caracterizada, aproximadamente, por su razón de basicidad, la cual puede determinarse por la siguiente fórmula $\text{IB3} = (\text{CaO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$. El Al_2O_3 tiene un carácter anfotérico y su ubicación en la fórmula de la basicidad es indeterminada.

3.6 Procedimientos que Disminuyen la Rapidez de Corrosión del Refractario.

3.6.1 Goneado.

El uso del goneado es para maximizar el uso del revestimiento refractario (ladrillos) de trabajo o las mejoras salpicando de escoria, y el uso de cal dolomítica han reducido el desgaste de los ladrillos refractarios. Pero cuando se presenta un deterioro crítico, se requiere aplicar un goneo en las áreas de desgaste más severo, para maximizar la vida del refractario de trabajo.

La rapidez de desgaste del refractario decrece cuando el espesor del material decrece. La profundidad de la oxidación del carbono del ladrillo y la profundidad de penetración de la escoria dentro del ladrillo, son controladas parcialmente por el perfil térmico a través del espesor del revestimiento. Generalmente, hasta que el revestimiento de trabajo alcanza un espesor de 7-15 pulgadas, se aplica el goneo.

En la mayoría de las acerías el goneado se realiza entre calentamientos, lo que implica cierta premura en la aplicación y la versatilidad del equipo para realizarlo. La premura anterior requiere el uso de materiales premezclados o goneados de tipo rotatorio. Casi todos los materiales se aplican con pistolas estándares, que transportan el material seco a la lanza; después se inyecta agua para humedecer la mezcla y activar las ligas (materiales añadidos a un material granular para darle manejabilidad y resistencia). Un flujo controlado de los materiales es crítico para el óptimo proceso de goneo.

3.6.2 Salpicado (splashing).

La disolución de los refractarios por la escoria es la mayor causa del desgaste del revestimiento, en cualquier horno o equipo de acería. La escoria tiende a penetrar la porosidad presente, en cualquier material refractario, reaccionando con la estructura y disolviendo las uniones (ligas), que mantienen a los granos individuales juntos.

En los años recientes se ha utilizado el "salpicado" de la escoria para contrarrestar el efecto de penetración de la misma, en el refractario. La escoria así aplicada, solidifica entre calentamientos, proporcionando una capa disponible para el revestimiento. Se acondiciona la escoria con cal dolomítica o roca dolomítica, antes del soplo. Algunas veces se añaden cantidades de cal dolomítica, mayores que las requeridas para los procesos metalúrgicos, antes del calentamiento; esto provee una escoria de vaciado acondicionada y lista para ser salpicada, después de vaciar el acero. Después del soplo, se retira cualquier cantidad de escoria en exceso. La escoria adherida al revestimiento es una fuente de escoria básica, con un contenido relativamente alto de óxido de magnesio. La escoria básica neutraliza a la escoria ácida, previamente formada, se eleva la basicidad y se incorpora magnesita dentro de la nueva escoria formada. (Eade, 1997)

3.6.3 Formación de Espinel. ($Mg Al_2 O_4$).

Varias rutas se han estudiado para el desarrollo de concretos con espinel. En el caso de concretos de alúmina-espinel, los procesos se pueden sintetizar mediante dos enfoques:

- a) Añadiendo espínela sintética como agregado en un concreto de alúmina y/o.
- b) Incluyendo MgO a la fase enlazante del concreto. (Zhang, 1997)

Pocas investigaciones analizan la inclusión de MgO en concretos de alta alúmina y bajo cemento sin la adición de espinel sintética. Recientes publicaciones, indican que este enfoque podría producir concretos más resistentes al ataque de la escoria, y sería una solución menos costosa. La formación de espinel en la matriz del concreto puede lograrse a temperaturas entre 1 000°- 1200° C; sin embargo, la fase spinel se incrementa de una manera estable a mayores temperaturas (1 400° C). La variación en el porcentaje de MgO no influye apreciablemente en los procesos de nucleación y formación de espinela, pero la cristalización se ve claramente definida para materiales con 6% de MgO. Los concretos con formación de espinela "in situ", pueden ser desarrollados sin la adición de espinela sintética y pueden ser técnicamente prometedores como recubrimientos para ambientes severos. (Gutiérrez, 1996)

Si la penetración de la escoria puede ser prevenida, el refractario retendrá sus propiedades mecánicas. La masa entera será erosionada y no solamente la pequeña cantidad que une a los materiales (liga).

La formación de espinela es una alternativa para limitar la penetración de la escoria, produciendo un material refractario más resistente al desgaste, que abate los costos del mismo.

La espinela es un mineral sintético formado por la reacción de los óxidos de aluminio y magnesio. Es altamente refractaria y ofrece una excelente resistencia a la corrosión de la escoria fundida. Un material formador de espinela, inicialmente no contiene espinela; sin embargo, esta se forma durante el calentamiento del refractario.

La reacción de la espinela es catalizada por la escoria, mientras esta penetra al refractario. Durante la formación de espinela, ocurren expansiones de volumen, que llenan los poros existentes. Los tres óxidos más comunes en la escoria del acero (sílica, Cal y óxido de Hierro) reaccionan con la espinela y otros elementos del refractario y son convertidos en una solución sólida de sustancias de mayor punto de fusión como hexaluminato de calcio y $MgO-FeO-Al_2O_3$. Las sustancias se enfrían solidificándose y bloqueando cualquier porosidad remanente. Estos dos mecanismos previenen efectivamente cualquier penetración adicional de la escoria. La espinela ya formada no reacciona, y la escoria simplemente la envuelve. En cambio, cuando es formada durante el servicio, es mucho más activa y produce una barrera altamente efectiva para la escoria. (Eade, 1997)

En la industria del acero los refractarios con liga de resina o de carbón son utilizados por ejemplo en distribuidores, líneas de escoria y de zonas de impacto de las ollas, en los canales de escoria de los sifones a presión, etc.

Aunque algunos de estos productos muestran un excelente comportamiento en la práctica, las aplicaciones futuras de estos materiales estarán restringidas por las legislaciones de seguridad aplicables. En muchas acerías las condiciones de

trabajo son afectadas por los vapores que emiten el fenol, cresol y formaldehído. (Formo, 21997)

3.7 Alternativas Para Contrarrestar el Desgaste del Refractario.

La única forma de que la temperatura de la cara caliente, de la pared refractaria, pueda mantenerse debajo de la temperatura crítica de disolución y ataque por los diversos mecanismos de desgaste, es proporcionar una eficiente e invariante transferencia de calor, de la cara caliente a la cara fría, a través del refractario.

Si la temperatura del refractario, en la cara caliente es mayor que $1\ 150^{\circ}\text{C}$, comienza el ataque por disolución del acero y estará sujeto a erosión por el movimiento de los materiales fundidos. Consecuentemente, estos materiales líquidos pueden, también, ser forzados dentro de los poros del revestimiento, debido a la cabeza estática de la escoria y la presión interna del sífon.

Los problemas de la pared refractaria se deben a: falta de desfogue de la expansión térmica, altos gradientes térmicos a través de la pared monolítica e incapacidad para acomodar la expansión térmica diferencial. Todos los factores anteriores promueven fracturas, con el consecuente ataque químico del metal caliente. A menudo, el ataque químico al refractario es el resultado de la existencia de fracturas.

El diseño apropiado del revestimiento refractario requiere: refractarios de alta conductividad térmica, que puedan minimizar los gradientes de temperatura a través de la pared y, consecuentemente, promover la formación de una capa protectora de material solidificado, en la cara caliente. También se debe proporcionar la capacidad para la expansión térmica axial, pero algo más importante, prevenir la expansión térmica diferencial del espesor de la pared.

La expansión térmica diferencial ocurre porque la temperatura de la cara caliente es mayor que la de la cara fría. Esta diferencia es de, al menos $1\ 450^{\circ}\text{C}$, especialmente cuando no existe una barrera de material solidificado en la cara caliente.

Las fracturas interrumpen la habilidad del refractario para transportar calor y dificultan el enfriamiento, actuando como capas de aire.

La baja conductividad térmica y el encogimiento se combinan para proporcionar barreras adicionales a la transferencia de calor y se produce una temperatura, de la cara caliente, mayor que la requerida para formar la capa sólida, de modo que esta última no se puede formar, porque es erosionada y disuelta por el material fundido.

También se requiere una baja porosidad y mínimo tamaño de poro, para limitar la cantidad de material líquido que penetra al refractario. (The AISE Steel Foundation, 1999)

La idea central es mantener a la pared refractaria enfriada de tal manera, que se forme rápidamente una capa protectora en la cara caliente del revestimiento y se prevenga la penetración de los materiales fundidos. Esta capa protectora aumenta su espesor con el tiempo formando una capa aislante, una vez que se alcanza el equilibrio térmico. En este sistema las temperaturas de la cara caliente, detrás de la capa solidificada, son de 200° a 600° C. (The AISE Steel Foundation, 1999)

Otra alternativa, para prolongar la vida útil del refractario, es la deposición de una capa cerámica interna, que es sólida a la temperatura de operación.

En Europa y especialmente en Japón, es práctica común, añadir cantidades significativas de rocas de titanio (Ilmenita) en la carga o inyectado directamente por las toberas. Esta adición, produce una capa protectora de titanio (Ti-bear), temporal, en las paredes y fondo del sifón. Pero, una vez que se detiene la inyección, la capa protectora se desgasta rápidamente. Este es un método muy costoso de protección al refractario, puesto que el mineral de titanio es costoso y se aumenta el consumo de coque, porque se requiere energía para aislar el titanio del mineral.

Toda vez que el enfriamiento de la cara interna del refractario depende de la transferencia de calor a través de toda la pared del revestimiento, es imperante que el contacto entre la pared refractaria y el sistema de enfriamiento sea altamente eficaz y continuo.

CAPÍTULO 4

Interacción Refractarios de Alta Alúmina-Escoria

Introducción

El consumo de refractarios monolíticos se ha incrementado sustancialmente en años recientes, principalmente en las industrias del hierro y del acero. La demanda creciente de materiales estructurales con comportamientos mecánicos mejorados, particularmente a altas temperaturas, ha conducido al desarrollo de refractarios colables de bajo contenido de cemento y libres de cemento. Comparados con los ladrillos cocidos convencionales, estos materiales exhiben propiedades mecánicas relevantes como mejor resistencia en caliente, mayor resistencia al choque térmico, bajo deterioro mecánico y resistencia al flujo plástico. Más aún, los refractarios colables ofrecen una serie de ventajas en el manejo, trabajo, y colocación; entre otros, revestimiento automatizado y fácil reparación del equipo de aceración, son de los beneficios más prominentes.

Uno de los factores limitantes en el uso de refractarios colables es el empleo de cemento, Aluminato de Calcio (CA), que es frecuentemente utilizado como liga para conferir resistencia mecánica al monolito en su colocación. La combinación de calcio proveniente del cemento con otros óxidos presentes en la mezcla refractaria, produce la formación de compuestos eutécticos con muy bajo punto de fusión. En presencia de Sílica por ejemplo, el compuesto de más bajo punto de fusión, de la mezcla ternaria $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ tiene una temperatura de fusión de solo 1170°C . (Zhang, 1997)

La presencia del líquido, sin embargo, degrada enormemente el comportamiento del colable a altas temperaturas.

La hidratación de un cemento consta de tres fases: disolución, nucleación y precipitación. Estudios realizados ⁽⁵⁾ indican que la adición hasta un 25% de polvo de micro sílica (sílica fume) tiene dos efectos sobre el periodo de inducción. Primero, debido a su gran área de contacto, actúa como secuestrador del agua reduciendo la cantidad de agua disponible para el proceso de hidratación del aluminato de calcio, lo que disminuye la velocidad de crecimiento del cristal. La presencia de microsilica favorece el empaque de las partículas y produce densidades mayores y bajas porosidades, con el correspondiente aumento a la resistencia a la compresión.

4.1 Composición.

Una formulación refractaria de colable de alta Alúmina, típicamente contiene alrededor del 85% de Al_2O_3 , 5% de materiales como SiC, SiO_2 y otro 10% que

incluye materiales formadores de ligas hidráulicas, materiales para rellenar los micro poros y aditivos. En general podemos distinguir las siguientes porciones en un refractario: agregados, agentes de liga, rellenos, reforzadores y aditivos.

4.1.1. Agregados.

La andalucita y la kyanita son las fuentes minerales de alúmina, contienen alrededor del 60%, completando el balance sílica, hierro y titanio. A partir de la andalucita y la silimanita, cuando se calientan a temperaturas elevadas, se forma el mineral refractario llamado Mullita ($3\cdot\text{AlO}_3\cdot 2\text{SiO}_2$). La formación completa de mullita ocurre entre 1300 y 1400° C.

Algunos tipos de alúminas obtenidas por procesos térmicos o químicos, son utilizadas como refractarios e incluyen alúmina calcinada, tabular y fundida. En general, la alúmina calcinada se utiliza para promover las ligas refractarias durante la manufactura y en uso, mientras que la alúmina tabular y fundida se usan como agregados. La alúmina tabular se forma en la deshidratación por calcinación de $\text{Al}(\text{OH})_3$ a 1925° C, mientras que la alúmina fundida es más densa después de una fusión total y solidificación rápida. (The AISE Steel Foundation, 1999)

Entre los materiales que constituyen los agregados de un refractario podemos mencionar a:

Alúmina Tabular.- Es una alúmina de alta pureza transformada a la fase de corindón por sinterizado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión, tiene placas duras y densas como cristales que le dan buena conductividad térmica, baja porosidad, excelente resistencia al choque térmico a temperatura elevada, resistencia al ataque de la escoria, excelente estabilidad volumétrica, que se traduce en un mínimo de encogimiento durante las recalentadas.

Alúmina Sinterizada.- Es óxido de aluminio convertido a corindón por sinterizado a 1750°-1800°C. Es relativamente menos pura que la alúmina tabular, teniendo gran densidad de grano, baja porosidad, superior resistencia a los choques térmicos a alta temperatura, resistencia al ataque de escoria y alta resistencia individual de grano. La resistencia de la alúmina sinterizada depende del contenido de Al_2O_3 , temperatura de sinterizado y microestructura.

Alúmina Fundida.- Tiene estructura de grano uniforme, alto punto de fusión y alta refractabilidad. Es químicamente estable a altas temperaturas y tiene buena resistencia a la abrasión.

Bauxita Calcinada.- La bauxita natural es calcinada en un intervalo de temperatura de 1400° a 1800°C. Los diferentes álcalis presentes, contenidos de hierro y titanio, tiene influencia en el proceso de sinterizado, las propiedades elásticas y la resistencia a la corrosión de la escoria del producto final. La Mullita y el contenido de vitrificado, imparten mayor resistencia al desgaste térmico.

Mullita Sinterizada.- Se forma por sinterizado a altas temperaturas (1600°-1700°C) de alúmina calcinada y aluminosilicatos mullíticos. Su principal característica es su mínima expansión térmica y la presencia de cristales prismáticos que imparten alta resistencia al choque térmico y estabilidad volumétrica al material. La Tabla 4.1 Contiene las composiciones típicas de los agregados aluminosos más comunes.

4.1.2. Formadores de Ligas.

En la industria del acero los refractarios con liga de resina o de carbón son utilizados por ejemplo en distribuidores, líneas de escoria y de zonas de impacto de las ollas, en los canales de escoria de los sifones a presión, etc.

	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	TiO ₂ %	CaO %	SiO ₂ %	Na ₂ O %	ρ(g/cm ³)
Alúmina Sinterizada	99.5	0.1	0.09	0.08	0.05	0.13	3.6
Alúmina Tabular	99.8	0.05	-	0.05	0.1	0.42	3.58
Alúmina café Sinte.	93.0	1.4	0.9	0.5	2.7	-	3.5
Alúmina Fundida C.	93.2	1.0	3.0	1.3	1.1	0.35	3.7
Alúmina Fundida B.	99.3	0.16	0.14	-	0.18	0.25	3.6
Bauxita Calcinada	88.5	1.6	4.0	0.4	5.5	0.30	3.4
Mullita Sinterizada	72.1	0.5	0.03	0.03	23.4	0.28	2.75

TABLA 4.1 Propiedades Típicas de Agregados de Alúmina.
(Ba Shir, 1997)

Aunque el contenido de Aluminato de Calcio cada vez decrece en los colables de bajo y ultra bajo cemento, todavía es responsable del desarrollo de la liga hidráulica en el colable.

Se han hecho esfuerzos para sustituir gradualmente al cemento con otros tipos de ligas hidráulicas libres de calcio. Estos requerimientos condujeron al desarrollo de los llamados colables de ultrabajo cemento y posteriormente, a la fabricación de colables en los que el cemento es omitido y sustituido por polvos de Alúmina nanopulverizada (nano-Alúmina), que son capaces de desarrollar uniones hidráulicas entre las partículas cristalinas del agregado y el material de relleno. (Zhao, 1997)

Para los colables libres de cemento una estructura de liga obvia es la de magnesia fina y reactiva y alúmina, para desarrollar las ligas de espinela "in situ" a través de reacciones de estado sólido durante el calentamiento. Actualmente, toda vez que existen aluminatos de magnesio en un amplio intervalo de estequiometría, es posible desarrollar una fase de liga con la adición de magnesia al colable de alta alúmina.

SECOS	LÍQUIDOS	
	SOLUCION ACUOSA	NO ACUOSAS
Ácido Bórico	Alginatos	Alginato de Carbón
Alúmina coloidal	Ácido Crómico	Aceites
Sílica coloidal	Solución Sílica coloidal	Alquitrán de petróleo
Alúmina Hidratadas	Monofosfato de alúmina	
Metil celulosa	Melazas	
Monofosfato de Al.	Ácido Fosfórico	
Resinas	Silicato de potasio	
Humo de sílica	Resina	
Fosfato de sodio y Al.	Silicato de sodio	
Polifosfato de sodio	Agua	
Almidones		
Ceras		

TABLA 4.2 Agentes de Liga Más Comunes.
(The AISE Steel Foundation, 1999)

Los colables libres de cemento fueron ligados con alúmina nanopulverizada altamente reactiva, que es capaz de desarrollar ligas hidráulicas a temperatura ambiente. Los colables libres de cemento están entre los materiales más resistentes al flujo plástico, aún en presencia de sílice. (Yoshimoto, 1997)

Las resinas sintéticas es un término colectivo que describe una gran variedad de productos químicos, de bajo y alto peso molecular, de composición variada, que pueden clasificarse de acuerdo con sus propiedades físicas como elastómeros, termoplásticos, o materiales termoestables.

Las resinas fenólicas, las más importantes ligas para los refractarios, son productos de condensación del fenol y el formaldehído. Estas resinas se clasifican en novolacas y resoles. La versatilidad de las resinas fenólicas se deriva de las funciones de unión que pueden realizar. Entre otras cosas, las resinas fenólicas pueden proporcionar ligas intermedias, asociadas con la termofijación de sus propiedades, durante la producción de ladrillos refractarios y, en una etapa

posterior, son capaces de formar carbón, por descomposición pirolítica. En la forma de liga de carbón, contribuyen a la calidad del material.

El reticulado óptimo tridimensional de las resinas fenólicas durante el proceso de curado para formar resita es muy importante, para la formación efectiva de carbón durante la pirólisis (55-70%).

La Hexametilén tetramina es utilizada, generalmente, para curar las novolacas fenólicas. Los resoles sólidos tienen un rendimiento del 66-70% de carbono en una atmósfera inerte, aunque este rendimiento decae a dos tercios en presencia de oxígeno.

Los compuestos que se desprenden durante la pirólisis de las resinas fenólicas, consisten principalmente en Hidrógeno, agua, monóxido de carbono, hidrocarburos de bajo peso molecular y una cierta fracción de derivados aromáticos.

Actualmente, los productos refractarios con liga de resina se fabrican, predominantemente, por el mezclado a temperatura ambiente, utilizando resinas fenólicas o soluciones de novolacas. Este proceso tiene un bajo impacto ambiental comparado con el correspondiente a las ligas de alquitrán.

4.1.3 Rellenos.

Se requiere de partículas sólidas muy finas, de tamaños menores a 40 μm para llenar los poros que permanecen entre los cristales del agregado, que tienen partículas de tamaño mayor a los 50 μm , disminuyendo estos microporos y, por lo tanto, la penetración de la escoria. Cuando la escoria penetra disuelve las uniones entre los cristales de agregado y los materiales de relleno, dejando a la deriva a las partículas del agregado, que son fácilmente arrastradas hacia la salida de escoria.

Las nanopartículas de Sílice amorfa (humo de sílica) y aún partículas de Alúmina calcinada nanopulverizadas se han utilizado con éxito para contrarrestar la acción de la escoria mencionada.

4.1.4 Aditivos.

La hidratación de un cemento consta de tres fases: disolución, nucleación y precipitación. En la Figura 4.1 se muestra un esquema de este proceso.

Después del contacto con el agua los granos anhidros de Aluminato de Calcio se disuelven y desprenden iones de Ca^+ y Alúmina AlO_4^- en la solución, hasta su saturación.

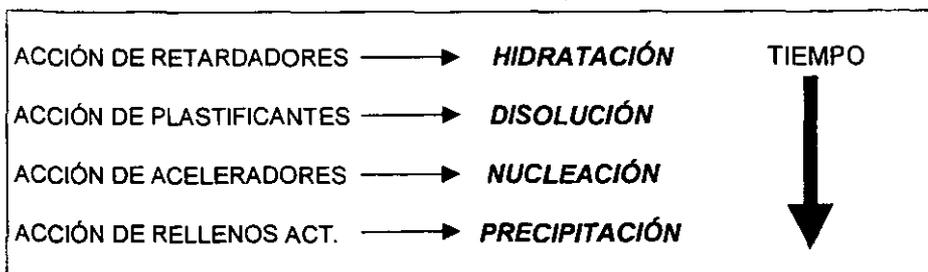


FIGURA 4.1. Representación esquemática del proceso de Hidratación.

Los núcleos se forman durante un periodo de incubación o latencia. Siguiendo a esta fase de nucleación, toma lugar una generación que conduce a la precipitación masiva. Esta fase de precipitación del hidrato de Aluminato de calcio corresponde a la deposición y endurecimiento del cemento y, por lo tanto, también al endurecimiento del colable.

Los Retardadores tienen influencia en la cinética de la hidratación por la modificación, usualmente retardando la disolución de las partículas del cemento anhidro. El mecanismo consiste en bloquear la disolución por la absorción o secuestro de los granos del cemento y/o la combinación de los iones de calcio. Típicamente, los retardadores pertenecen a la familia de compuestos ácidos de sodio, donde el ácido es orgánico; cítrico o glucónico. Ejemplos de estos retardadores son el ácido carboxílico hidroxilado y sus sales derivadas como ácido cítrico, citrato trisódico, ácido tartárico y gluconato de sodio.

Un retardador Na^+X^- , donde X^- es el anión del ácido. El anión X^- en solución puede formar una sal de calcio de solubilidad limitada.

Adicionalmente, la sal de calcio o ácido orgánico pueden ser absorbidos en la superficie de los granos del cemento y esto puede retardar, más aún, la disolución del cemento, retardando la saturación.

Los fluidizantes, plastificantes y agentes reductores de agua, son sustancias que son absorbidas en los granos del cemento, modificando su carga superficial e incrementando su factor zeta. Lo anterior crea una disminución en los hidratos, negativamente cargados, para neutralizar las cargas positivas sobre la superficie

del cemento anhidro. Una buena dispersión ocurre debido al efecto repulsivo de los granos cargados positivamente, que obstaculiza la floculación.

El plastificante y el retardador dependen del mecanismo de absorción sobre la superficie del cemento. Un ejemplo es el citrato de sodio que retarda el tiempo de precipitación.

Los Aceleradores tiene influencia sobre el periodo latente de hidratación, formando gérmenes que reducen el tiempo necesario para la formación de gérmenes homogéneos, acelerando la hidratación. Las sales de Litio son los aceleradores más comunes en la hidratación de los aluminatos de calcio.

Los antioxidantes pueden clasificarse en metálicos y no metálicos. Tales aditivos son constituyentes que tienen mayor afinidad con el oxígeno que el carbono, son utilizados para retardar la oxidación del carbono y del grafito. A menudo, actúan como bloqueadores de los poros y, muchos de ellos, tienen efectos positivos en la resistencia mecánica de los refractarios. La influencia de estos constituyentes sobre la resistencia a la escoria es ambivalente.

Entre los antioxidantes metálicos se tiene al silicio, aluminio y aleaciones, que pueden ser utilizados en materiales refractarios.

Los principales antioxidantes no metálicos son el carburo de silicio, carburo de boro y nitruro de silicio, que pueden ser utilizados en formulaciones refractarias.

Los refractarios colables de autoflujo, son un grupo particular de colables avanzados de los grandes grupos de Bajo, Ultrabajo y libres de cemento, que están caracterizados por una consistencia, después del mezclado, que les permite fluir sin la aplicación de una energía externa (por ejemplo vibración). Pueden considerarse mezclas de dos componentes principales: el agregado refractario y el sistema de liga. El agregado refractario en forma granular, hasta un 60-85%, es el componente principal de la mezcla colable y tiene, inicialmente, partículas con tamaños superiores a los 45 μm . La fracción de finos, con partículas de tamaño menor de 45 μm , representa el sistema de unión, el cual contiene esencialmente la liga hidráulica (aluminato de calcio o alúmina hidratable), microsilica (humo de sílice), polvos cerámicos ultrafinos (alúmina reactiva, alúmina calcinada o tabular. Bauxita calcinada, kyanita, etc.) y la mezcla de aditivos (que no exceden del 0.3-0.5% de la mezcla), que juegan un papel preponderante en la consecución de las propiedades adecuadas del colable. Esta fracción llega a ser la matriz del concreto sólido después de la colocación y también, será una matriz cerámica durante el calentamiento, que ligará a las partículas iniciales del agregado refractario. Para lograr una matriz cerámica con la fortaleza necesaria, requiere especial atención el control del tiempo de colocación del colable. (Oprea, 1997)

Sin se considera que la fracción de finos (tamaño menor de 45 μ m), los aditivos y el agua constituyen el sistema de liga de un refractario colable; entonces, su reología determina el comportamiento del flujo de ese colable, para un determinado agregado. (Bobylev, 1997)

4.1.5 Reforzadores.

Con la finalidad de que los revestimientos refractarios sean más resistentes a la abrasión y erosión se han añadido materiales como carburo de silicio y otros de mayor dureza, en proporciones de 15 y hasta 30% en peso de la formulación refractaria total.

4.2 Refractarios de Alta Alúmina con Carburo de Silicio, más comunes.

Se ha comprobado que los refractarios con base en carburo de silicio, son los más importantes y efectivos en varias aplicaciones a temperaturas elevadas, debido a su alta resistencia inicial, excelente resistencia a la erosión y la corrosión, bajo coeficiente de expansión y excelente resistencia al choque térmico. En la Tabla 4.3 se muestra la composición típica del carburo de silicio.

El carburo de silicio comercial usado como material refractario, se fabrica en horno eléctrico a partir de una mezcla de coque y arena silicosa. El producto final es un material extremadamente duro (9.0 en la escala de MOH), con alta conductividad térmica y buena resistencia a temperaturas elevadas y resistencia al choque térmico. Su intervalo de servicio, con buenas propiedades refractarias, es desde 1 535° hasta 1 650° C. (Zhao, 1997)

	SiC	Si	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Tamaño mm
SiC	96.84	0.48	1.47	0.24	0.51	< 3
Si	---	98.5	---	0.24	0.88	< 0.053

TABLA 4.3. Composición Típica del Silicio y Carburo de Silicio.
(Zhao, 1997)

Los colables de Al₂O₃ – SiC –C, con excelente resistencia a la escoria y al metal fundido, son utilizados para recipientes contenedores de estos materiales. Sin embargo, cuando son utilizados en recipientes de gran tamaño o donde el calentamiento y enfriamiento son severos, pueden sufrir fracturas. Tales fracturas condicionan el astillamiento que acorta la vida de servicio del recipiente. En un principio, se utilizó roseki pero, en condiciones severas, el desgaste del refractario aumenta cuando se añade este material. Se ha encontrado que la adición de MgO es efectiva para la minimización de las rupturas, como se muestra en la Figura 4.2.

Aún cuando conserva sus propiedades mecánicas más o menos estables, con la adición de MgO, la resistencia a la corrosión aumenta, cuando se añade alrededor de 6%.

La formación de espinel, para retardar el deterioro del refractario, ha conducido a la fabricación de formulaciones refractarias que contienen formadores de espinel, lo que puede conseguirse de dos maneras:

- a) incluyendo espinel sintético, como agregado en un colable de alúmina.
- b) Añadiendo MgO a la fase de liga del colable que formará, durante el calentamiento, el espinel de Magnesio ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$). Figura 4.3.

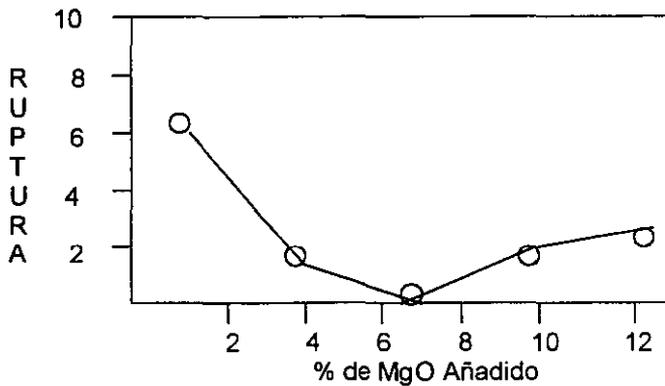


FIGURA 4.2 Efecto del MgO sobre las Rupturas.
(Yoshimoto, 1997)

Los colables con espinel de Magnesio, parecen promisorios para aplicarlos a temperaturas elevadas, en donde el requisito primario es la alta resistencia al ataque de la escoria ácida. Al añadir polvos ultrafinos de SiO_2 , para que reaccione con MgO y agua, se forman ligas de gel de $\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$. (Yoshimoto, 1997)

La inclusión de polvos ultrafinos de Al_2O_3 , espinel de Magnesio y SiO_2 , aumenta la fluidez y disminuye la cantidad de agua requerida. La adición de partículas ultrafinas, entre las partículas del agregado de mayor tamaño, puede tener efectos lubricantes y disminuir la viscosidad del colable. Una mayor cantidad del polvos ultrafinos, entre 0.4-0.5%, produce efectos contrarios en la fluidez del material. (Bobylev, 1997)

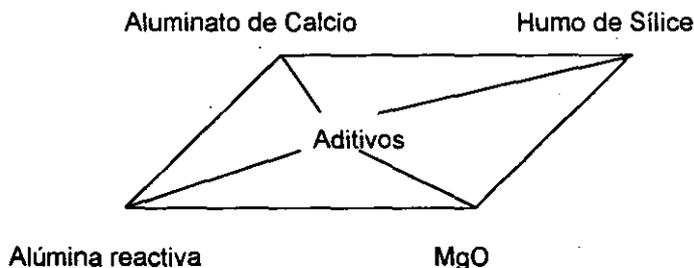


FIGURA 4.3 Formadores de Espinel "in situ". (Yoshimoto, 1997)

A mayor cantidad de MgO, se forma "in situ", una mayor cantidad de espinel, alrededor de las partículas de CaO. El espinel formado puede reaccionar con el FeO, para formar soluciones sólidas de espinel.

Se ha comprobado que la cantidad de finos en la mezcla colable, determina si un colable es auto fluido o vibrable. Generalmente, más finos y superfinos en proporción, forman el autoflujo para la misma cantidad de agua. (Aase, 1997)

Entre las formulaciones refractarias más utilizadas, clasificadas como concretos refractarios colables de ultra bajo cemento (ULCC):

Unicast

Tiene una excelente resistencia a la escoria y al hierro fundido. Se recomienda para utilizarlo en el crisol de hornos cúpula, piqueras, separadores de escoria (sifones), ductos de horno y canales de metal líquido. La composición química se muestra en la Tabla 4.4 y en la Figura 4.4 la curva de secado-calentamiento.

Plicast

Constituido de alúmina tubular, con liga hidráulica y se instala con vibrado, recomendado para usarlo hasta temperaturas de 1650° C, con bajos requerimientos de agua, 4.0-4.4 litros por cada 100 Kg. La tablas 4.4, 4.5 y 4.6, muestran sus características y la Figura 4.5 es la curva de calentamiento recomendada.

Kercast

Refractario colable grafitico, tiene como agregado al corindón, y tiene liga hidráulica, requiriendo de 4-5 litros por cada 100 Kg de material, se aplica por vibrado.

Se han desarrollado refractarios colables libres de cemento (NCC), de liga húmeda. El advenimiento de ligas hidráulicas de alúmina ha permitido el desarrollo de sistemas de alta pureza que pueden fabricarse, esencialmente, libres de calcio (menos del 1%). Se ha observado que las formulaciones refractarias de alta alúmina libres de cemento, son más resistentes al ataque de la escoria de alta basicidad.

Entre los materiales libres de cemento más comunes, resistentes a condiciones de altas temperaturas y ataque de escoria, tenemos

HP4

es un concreto bombeable de alta alúmina y carburo de silicio-C, que tiene excelente resistencia al hierro líquido, la escoria, y choques térmicos. Tiene una alta resistencia a altas temperaturas, alta densidad, baja porosidad y características de secado rápido.

MATERIAL	MAT. REQ (Kg/ m ³)	INSTALACIÓN	SERVICIO(°C)	CAD.
HP4	3 017.8	Bombeable	3 100	12 m.
HP5	3 001.7	Bombeable	3 100	8 m.
UNIRAM	2 873.3	Vibrado	---	---
PLICAST	2 950.0	Vibrado	1 650	4 m.
KERCAST	3 000.0	Vibrado	1 650	6 m.
CARSIT	3 110.0	Bombeable	---	---
UNICAST	2 967.6	Vibrado	---	6 m.

Elaboración propia

TABLA 4.4 Datos Generales de ULCC y NCC.

Es altamente recomendado para ductos, canales de hierro y escoria, áreas de impacto y labios de los carros torpedo y para piqueras. La Tabla 4.5 muestra las composiciones químicas de los colables y la Figura 4.6 es la gráfica de secado-calentamiento de este material.

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	SiC	C
HP4	72.3	7.2	0.8	1.8	0.1	17.6	---
HP5	73.2	6.5	0.3	2.0	0.1	17.4	---
Kercast	70.3	4.6	---	---	---	19.2	3.1
Uniram	65.3	4.3	0.5	1.5	---	27.2	---
Plicast	63.0	1.8	0.3	---	0.7	32.0	2.0
Carsit	72.0	4.0	0.2	1.6	1.3	18.0	---
Unicast	62.1	5.5	0.6	1.4	1.0	29.0	---

Elaboración Propia

TABLA 4.5 Composición Química de Refractarios Comunes.

HP5

Es un refractario bombeable, libre de cemento, con propiedades mejoradas en resistencia al metal fundido, la escoria y a los choques térmicos; tiene características superiores de secado. Las propiedades físicas de este material se encuentran en la Tabla 4.5.

MATERIAL	P. A. %	ρ , g/cm ³	CMOR MPa	CCS, MPa	PLC, %
HP4	13.6	3.018	3.41	28.0	+0.51
HP5	14.2-15.0	3.001	5.51	25.5	+0.30
UNIRAM	---	2.873	---	41.4	---
PLICAST	16	2.900	4.0	45.0	+0.10
KERCAST	---	3.050	---	70.0	+0.20
CARSIT	---	3.110	11.0	47.0	---
UNICAST	15.1	---	---	41.0	---

Elaboración Propia

TABLA 4.5 Propiedades Físicas de Colables de ULCC y NCC.

Uniram

Tiene propiedades antioxidantes para presentar mayor resistencia al ataque químico del hierro líquido y la escoria. Se utiliza en hornos cúpula, canales, sifones, piqueras, para escoria y arrabio.

4.3 Textura y Estructura de un Refractario.

La caracterización de un material refractario mediante un análisis de su estructura y textura es altamente recomendable.

Las propiedades que pueden ser determinadas a temperatura ambiente como densidad, porosidad, distribución del tamaño de poro y un análisis de tamizado, nos pueden permitir predecir e incrementar el tiempo de vida útil de un revestimiento.

El reto es medir tan exactamente como sea posible el peso y el volumen de un sólido seco. La dificultad emana de la definición de un sólido: con o sin poros, discontinuidades, defectos cristalinos y textura de la superficie exterior. En la tecnología de refractarios es costumbre distinguir entre materiales refractarios granulares y sólidos, y materiales conformados. Para nuestro estudio nos interesa caracterizar a materiales conformados (probetas).

La densidad de un material es una propiedad primaria que relaciona sus propiedades químicas y mineralógicas. La comparación de los valores de la densidad puede conducir a la detección de la presencia de fases mineralógicas o una transformación de fases.

Para materiales conformados la densidad (tanto como la porosidad) puede ser una indicación del proceso de manufactura o colocación. La exactitud de los datos depende de la muestra apropiada y sobre todo del método de prueba.

4.3.1 Determinación de la Porosidad Aparente.

La Figura 4.3 (a, b y c) ilustra la porosidad abierta contra la porosidad cerrada en refractarios conformados, así como el significado de porosidad real y porosidad aparente. La porosidad real es el cociente del volumen de poros cerrados más poros abiertos y el volumen total, expresado como un porcentaje.

La porosidad aparente es el cociente del volumen de los poros abiertos únicamente y el volumen total, expresado en por ciento.

La absorción es también una medida de la porosidad abierta. La porosidad aparente se expresa como un volumen porcentual, mientras que la absorción se expresa como un por ciento en peso; el peso del agua (o de otro líquido absorbible como keroseno) que puede ser absorbido por los poros abiertos, expresado como un porcentaje del peso de la muestra seca.

La diferencia entre la porosidad real y la porosidad abierta, es la porosidad cerrada.

La porosidad aparente en particular, es una característica preponderante en el proceso de manufactura y colocación de refractarios. La porosidad depende de las curvas de distribución granulométrica para los materiales del agregado y la matriz, la formas de compactación y la historia térmica hasta el sinterizado. La porosidad puede tener un amplio intervalo de variación, dependiendo de las condiciones de la manufactura o la práctica de colocación.

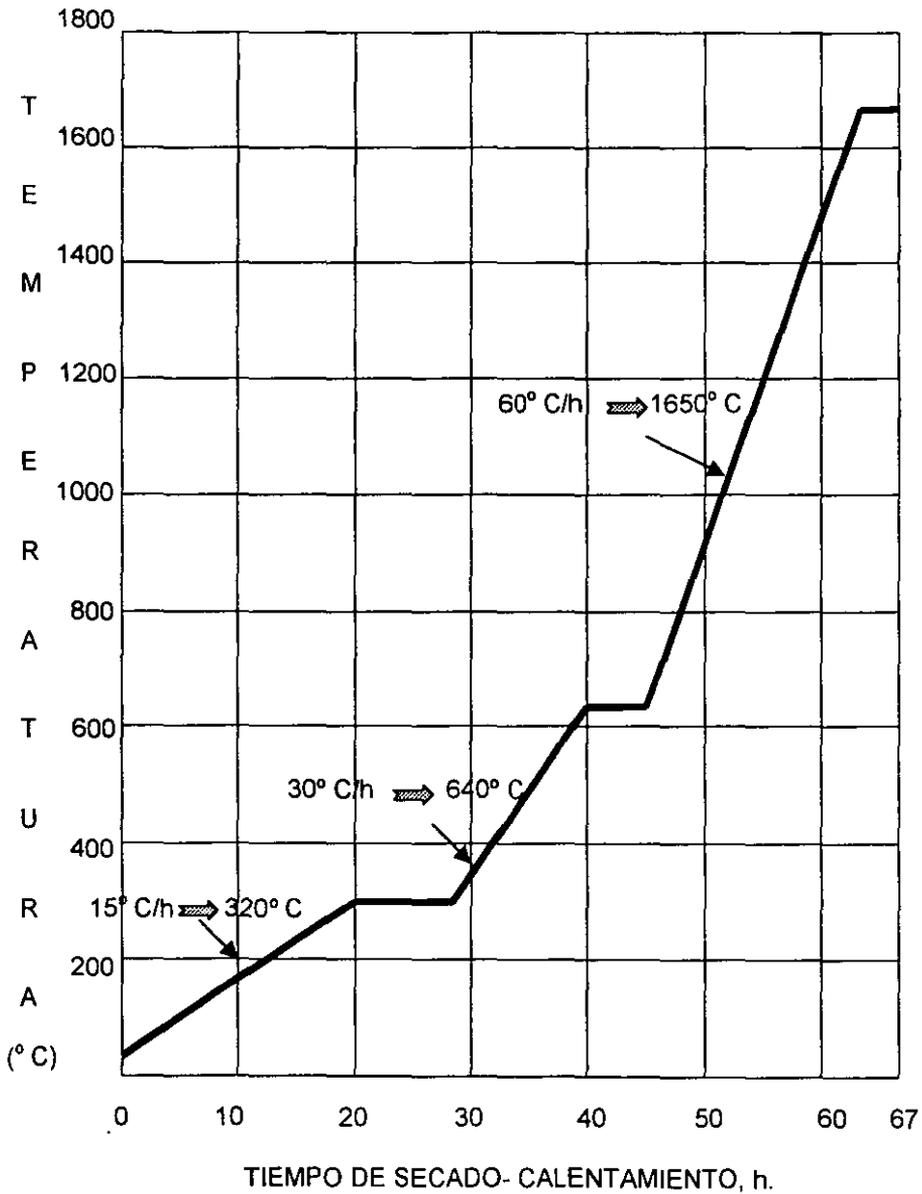


FIGURA 4.4. Gráfica de Secado- Calentamiento para Unicast (ULCC).

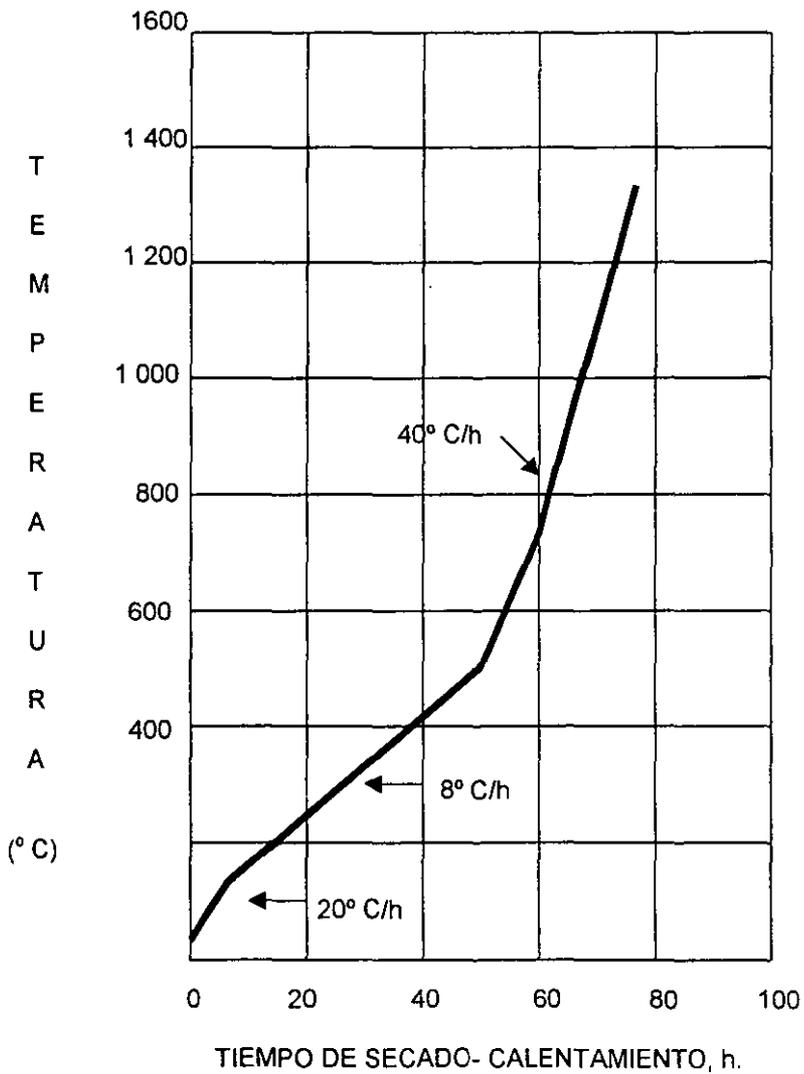


TABLA 4.5 Gráfica de Calentamiento para Plicast.

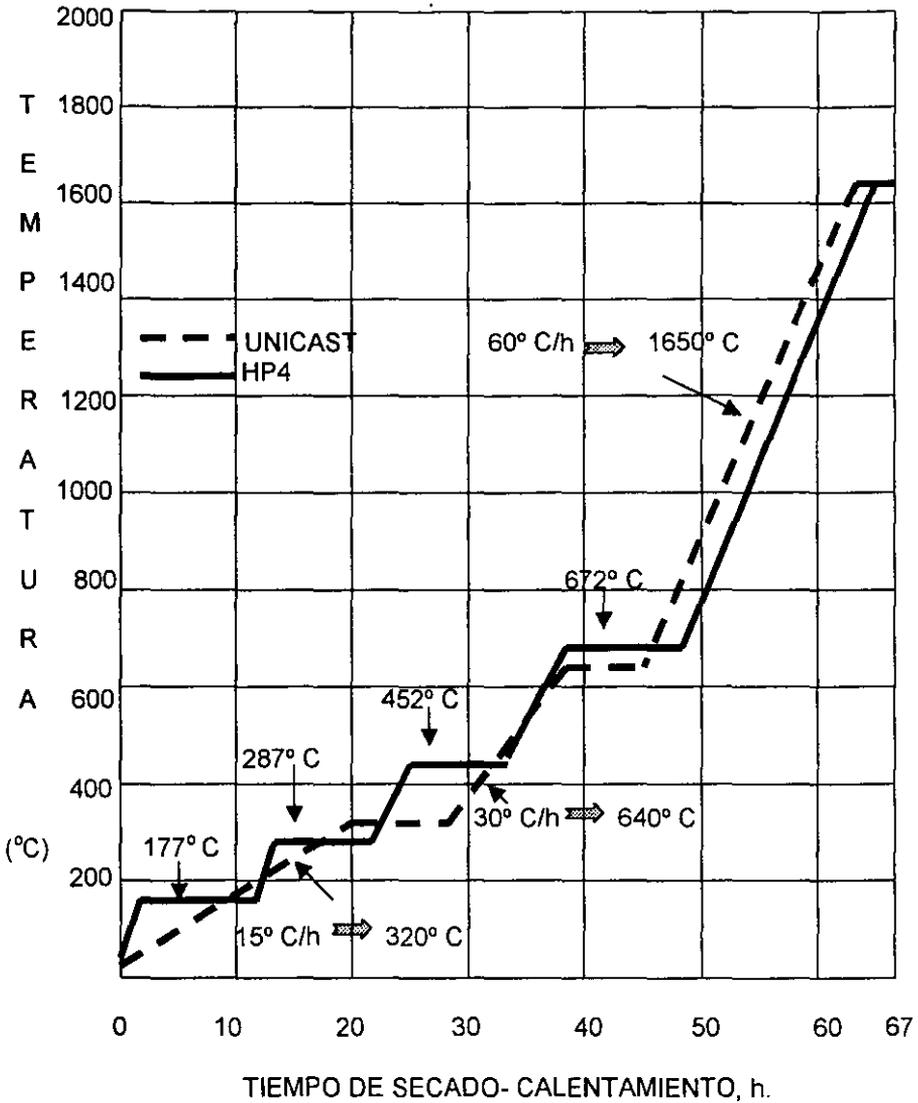


FIGURA 4.6 Gráfica de Secado-Calentamiento para Unicast (ULCC) y HP4 (NCC).

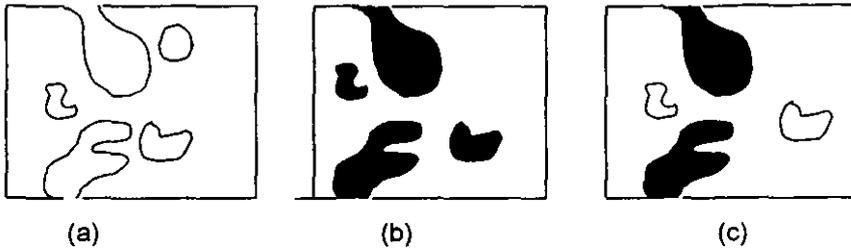


FIGURA 4.7 Representación esquemática de: a) poros cerrados y poros abiertos, b) porosidad real, y c) porosidad aparente.

4.3.1.1 Procedimiento de Prueba.

Se dispone de dos métodos de los estándares de ASTM para medir la porosidad aparente, ASTM 20^{2b} para refractarios conformados, por inmersión en agua hirviendo o en otro líquido, si no puede utilizarse agua; y ASTM 830^{2c}, por presión de vacío. En ambos métodos la medida del agua o del líquido absorbido, la gravedad específica aparente y la densidad son requeridos. Par obtener los datos anteriores deben realizarse cuatro mediciones; a) peso seco de la muestra, b) volumen total, c) volumen de poros abiertos, y d) el volumen del material sólido y de los poros cerrados.

El peso seco se mide con instrumentos que tengan una resolución de 0.01 g (2×10^{-5} lb).

La medición del volumen total esta basada en el principio de Arquímedes que establece que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza de empuje igual al peso del volumen del fluido desplazado. Conociendo tal diferencia en los pesos y la densidad del fluido, el volumen del cuerpo sumergido es fácilmente calculado.

El volumen de los poros abiertos es medido por la cantidad de agua absorbida por la muestra.

El volumen combinado de material sólido y poros cerrados es la diferencia entre el volumen total y el volumen de los poros abiertos. Una mayor descripción del este procedimiento de prueba y de los dispositivos utilizados, se hará en este capítulo, más adelante (sección 4.5).

La porosidad aparente (o absorción de agua) puede ser considerada una de las propiedades más significativas para la vida de servicio de los refractarios.

La baja porosidad mejora las resistencias a la ruptura en frío y en caliente, y así, mejora la resistencia a la abrasión, corrosión y al impacto. La baja porosidad mejora la resistencia a la corrosión porque disminuye la permeabilidad y aumenta la resistencia a la penetración por metales, escorias, y otros fundentes. La capacidad de carga (carga, resistencia al flujo plástico, y refractabilidad bajo carga) se ven mejoradas por la baja porosidad. La conductividad térmica aumenta con la disminución de la porosidad.

4.3.2 Distribución de Tamaño de Poro.

En años recientes, ha aumentado la importancia de la distribución del tamaño de poro de un material refractario. En algunos casos, esta distribución de tamaños de poro ha sido especificada como un criterio estándar para la evaluación de los refractarios.

El tamaño y la cantidad de poros en un material sólido son determinados midiendo la cantidad de mercurio que puede ser forzada dentro de los poros del material de estudios a diferentes presiones. Toda vez que el mercurio no moja a los materiales, el mercurio no penetra las aberturas entre los racimos de las partículas al menos que se aplique una fuerza. Así, el mercurio penetrará dentro de los poros en estricta relación con la presión

$$P_d = -4\gamma \cos \Theta \quad 4.1$$

Donde P = presión aplicada, d = diámetro del poro, γ = tensión superficial del mercurio, y Θ = ángulo de contacto entre el mercurio y el sólido. El ángulo de contacto entre el mercurio y una gran cantidad de sólidos se encuentra entre 112° a 142°, con 130° como el valor más frecuente. Aplicando la ecuación 3.1 y usando, por conveniencia, 130° como el ángulo de contacto y 474 ergs/cm² como la tensión superficial del mercurio, se puede determinar la relación entre presión y diámetro de poro.

El tamaño de poro no solamente define la distribución del tamaño de los poros de un material refractario sino que también determina el tamaño de las ligas formadas en la matriz porosa y entre la matriz porosa y las partículas del agregado. El tamaño de cada área de unión tiene un efecto importante sobre el cambio crítico en las propiedades del refractario. Un gran número de áreas de liga menores puede bloquear la propagación de la fractura y aumenta la resistencia a esta propagación, por lo tanto, mejora la resistencia al choque térmico. Sin embargo, un número más pequeño de uniones con un área transversal mayor se disuelven lentamente y pueden incrementar la resistencia a la corrosión de la escoria.

Para refractarios quemados, impregnados con carbón, el tamaño del material óxido anfitrión determina la distribución del carbón en el cuerpo del refractario.

4.3.3 Permeabilidad.

La permeabilidad es una medida de la rapidez con la que un líquido o gas fluye a través de una estructura y depende del tamaño, número y tortuosidad (forma) de los poros conectados. Como la densidad y la porosidad, la permeabilidad es una propiedad que varía de acuerdo con la dirección en la que se realiza la medición.

La permeabilidad, en centidarcies, está definida por la siguiente ecuación:

$$K = 1\,888 \frac{VH}{[TAP]} \quad 4.2$$

Donde K = permeabilidad en centidarcies, H = altura del espécimen de prueba en cm., T = tiempo de flujo en segundos; A = área transversal de la pieza de prueba en cm²; P = presión aplicada al aire que pasa a través de la pieza de prueba en cm de agua; y V = volumen de agua en ml.

El uso del material refractario determina si se requiere una mayor o menor permeabilidad, en el caso de los sifones a presión se requiere baja permeabilidad para retardar la penetración de la escoria.

4.3.4 Análisis por Tamizado.

Es un método para medir la distribución del tamaño de partículas de un material granular.

El análisis de tamizado se realiza de acuerdo con el estándar ASTM C 92 2i, para análisis por tamizado y contenido de agua de materiales refractarios. Ambos, análisis por tamizado; seco y húmedo pueden realizarse. El análisis húmedo es el más exacto y el más comúnmente utilizado. El análisis en base seca es normalmente para partículas gruesas y para aquellos materiales que contienen ingredientes solubles en agua.

Para que los datos del análisis por tamizado sean significativos, las muestras deben ser representativas del producto en estudio. Generalmente es mejor manejar muestras grandes.

En el análisis por tamizado se manejan muestras de 250 g (0.55 lb); para un análisis en base húmeda el material es disgregado en agua y lavado con agua en el tamiz de prueba más fino. El tamiz es comúnmente de malla 200, pero pueden utilizarse tamices más finos. Este procedimiento lava los materiales extremadamente finos de las partículas de mayor diámetro, permitiendo un análisis más exacto y reduciendo la obstrucción de los tamices más finos. La muestra es secada para remover toda la humedad y se coloca en el dispositivo para tamizado, colocando los tamices más abiertos en la parte superior y los más cerrados en el fondo. El dispositivo para tamizado se mueve en dos y tres direcciones por espacio de 15 minutos. La cantidad de sólido retenida en cada

tamiz se pesa hasta el 0.1 g más cercano. El cálculo del análisis por tamizado completo se basa en el porcentaje del peso acumulativo total, que se retuvo en cada tamiz individual.

La información derivada de un análisis por tamizado es útil para controlar la molienda de los materiales granulares y controlar la distribución de tamaño de partículas requerido durante la manufactura o colocación del material refractario, como una medida de su calidad.

4.4 Factores que Determinan la Porosidad.

Procurando el alargamiento de la campaña de un revestimiento refractario, por la disminución del área de contacto entre este y la escoria, proponemos una clasificación de las causas que originan la porosidad en tres grupos: 1) la naturaleza granulométrica y mineralógica intrínseca de la formulación del colable, 2) la práctica de colocación del colable, y 3) la transformación de fases a altas temperaturas.

En la sección 4.1, se describió a la formulación de material refractario colable de alta alúmina, como constituida de agregado, agente de liga, material de relleno y aditivos, con propiedades determinadas de acuerdo con las pruebas mencionadas en la sección 5.3.

4.4.1 Práctica de Colocación de Colable.

Para que un concreto refractario permanezca en buen estado, debe mantenerse en condiciones totalmente anhidras. El tiempo de caducidad promedio de un refractario colable va desde 6 hasta 12 meses. No es recomendable utilizar concretos que contengan terrones o grumos; si se encuentran terrones duros, el material ha fraguado y es inadecuado su uso.

Es muy importante recordar que un concreto refractario desarrolla su resistencia y endurece debido a una reacción entre el material de liga hidráulica y el agua agregada para mezclado. Si la cantidad agregada de agua no es suficiente, esta reacción no llega a ser completa y el concreto refractario no desarrolla su resistencia máxima. Las cimbras de madera que no han sido impermeabilizadas o una pared porosa, pueden absorber el agua que el concreto requiere para desarrollar su liga hidráulica.

Un procedimiento para evitar que se pierda agua de la mezcla refractaria es cubrir el molde, con algún tipo de cubierta impermeable, como aceite, parafina fundida o pintura de aluminio. En algunas ocasiones es más conveniente usar una lámina impermeable como molde.

4.4.1.1 Cantidad Adecuada de Agua.

Una cantidad de agua menor a la requerida para desarrollar la liga hidráulica reduce la resistencia del monolito. Con una cantidad excesiva de agua, pueden segregarse los agregados y el material de liga, durante la instalación.

Generalmente, se tienen cantidades de agua recomendadas por el proveedor del refractario, pero esta cantidad debe ajustarse de tal modo que se tenga una trabajabilidad adecuada.

De cualquier forma, es adecuado efectuar la prueba de bola en mano; si el material escurre entre los dedos, tiene demasiada agua; si tiene una apariencia muy porosa, indica que tiene agua insuficiente. Puede haber una variación pequeña en la cantidad de agua necesaria de una carga de concreto a otra y factores como el tipo de equipo de mezclado y tiempo de mezclado, pueden afectar la cantidad de agua requerida.

4.4.1.2 Mezclado Apropiado.

Para el mezclado mecánico se recomienda una mezcladora de tipo de paletas. Esta mezcladora también llamada de mortero o yeso, tiene cuchillas sobre un eje de rotación horizontal, el cual mezcla rápida y totalmente, desarrollando buena trabajabilidad con la cantidad mínima de agua.

Aunque las mezcladoras del tipo de tambor se han usado extensamente con algunos concretos refractarios, su eficiencia de mezclado es menor que las descritas de paletas.

El tiempo de mezclado es tan importante como el uso del equipo adecuado. Si el concreto refractario no es mezclado el tiempo suficiente, habrá de añadirse más agua para desarrollar la trabajabilidad adecuada para su colocación. Con una mezcladora de paletas los concretos refractarios pesados requieren de 2 a 3 minutos de mezclado. Por el contrario, un tiempo de mezclado demasiado largo desintegra al agregado ligero, originando un aumento en la densidad cuando se instala y reduciendo sus propiedades aislantes.

Algunos concretos refractarios endurecen unos cuantos minutos después del mezclado por aglutinamiento. Esta no es la acción del fraguado hidráulico y no perjudica al monolito. Si el endurecimiento es causado por aglutinamiento y no por fraguado, se puede obtener una consistencia trabajable simplemente mezclando nuevamente pero sin añadir agua.

De cualquier manera, el concreto refractario debe colocarse antes de que empiece a fraguar, puesto que si se hace después, no se obtendrá una buena calidad en la instalación.

4.4.1.3 Vibrado o Picado para Eliminar Bolsas de Aire

Los medios para producir vibraciones en el colado comenzaron a utilizarse en 1975, porque representaban ciertas ventajas en la aplicación de los refractarios como menor tiempo y fácil instalación.

Con el avance de la ciencia y la aplicación de nuevas tecnologías se han desarrollado los colables desde cementos silicosos, cementos de alta alúmina, de bajo cemento ($4 < \text{cemento} < 7\%$), ultra bajo cemento ($1 < \text{cemento} < 4\%$), hasta sin cemento (menos del 1% de cemento).

El desarrollo anterior trajo consigo un aumento en el grado de aplicación de los colables, mayor cuidado de los operadores y requerimiento de mayores tiempo durante la instalación para procurar las mejores propiedades del colable.

El vibrado o apisonado deficiente del concreto provoca oclusiones de aire que dan como resultado una estructura porosa y con baja resistencia. Las bolsas de aire y cavidades deben eliminarse del material instalado, para obtener homogeneidad y una estructura resistente.

No importa si se utilizan vibradores internos o externos en la colocación, se producen inevitablemente defectos en el material refractario. El más bajo contenido de agua en el colable produce las mejores propiedades (entre 6 y 7% en peso de agua). El contenido de agua requerido durante la instalación es de 6.5%, al menos, para tener una trabajabilidad adecuada. Entre los factores que llevan a un exceso de agua en la mezcla colable está el temor de los obreros de que el refractario no llene completamente el molde a colar. Aunque la eficiencia en el trabajo de instalación aumenta con el aumento del contenido de agua, se produce un abatimiento de la dureza, aumento de la porosidad aparente y reducción de la resistencia a la corrosión y la resistencia del colable a la penetración de la escoria disminuye. Al mismo tiempo que disminuye la resistencia del colable, disminuye enormemente la vida útil del monolito. (Sen, 1997)

La calidad de la instalación se evalúa por la cantidad de burbujas de gas durante el sangrado. Mientras menos burbujas de gas, mayor densificación del colable y mayor calidad de instalación. Pero el sangrado produce segregación en el colable y la formación de estructuras anisotrópicas. De acuerdo con lo anterior, el monolito está formado por tres capas: superior, media y de fondo. La primera tiene un espesor de 0.5 mm, y debe ser rota antes de vaciar el siguiente lote de material colable. Sin embargo, a mayor cantidad de agua y mayor tiempo de vibrado, menor es el espesor de esta capa y peores las propiedades del monolito. La capa intermedia es la mejor en cada lote, pero las partículas más grandes se van hasta la capa del fondo. El proceso anterior, de migración de las partículas más finas a la capa superior y las más grandes a la capa del fondo, se favorece con las fuerzas de vibración. La vida útil de un monolito depende, en gran proporción, de la calidad de su instalación.

Los vibradores internos son muy utilizados en la industria de los refractarios, por sus características de alta frecuencia, menor fuerza de vibración y fácil operación. Debido a que la región de impacto efectivo del vibrador es reducida, se mueven de aquí para allá, sin salir del colable. La profundidad y la cantidad del lote del colable añadido debe ser controlado en cada etapa de la colocación. Sin embargo, lo anterior implica más trabajo para el operador y tiempo empleado, y afecta a la velocidad de producción. La experiencia, destreza y criterio de cada operador, impactan en la calidad del monolito instalado.

La reducción del contenido de cemento en las formulaciones refractarias colables, requiere del desarrollo de equipo de mezclado e instalación con mayor eficiencia, mejores propiedades de mezclado y mayor capacidad.

Debido a la variedad de vibradores en tamaño y frecuencia y la diversidad de materiales colables, se requiere efectuar pruebas para elegir una combinación adecuada. (Ba Shir, 1997)

4.4.1.4 Desarrollo de la Liga Hidráulica.

Son indeseables tanto bajas como altas temperaturas del concreto refractario y de la atmósfera en que es instalado. Las temperaturas ambientales más favorables están entre 15° y 32° C. A temperaturas más bajas disminuye la velocidad a la cual el concreto fragua o desarrolla su resistencia.

Por el contrario, temperaturas muy altas incrementan la velocidad de fraguado o endurecimiento del concreto. Lo anterior significa que habrá menos tiempo de mezclado y colocación del material.

No debe permitirse que el concreto refractario se seque durante las primeras 24 horas, después de su instalación, ya que esto roba el agua que necesita para desarrollar su liga hidráulica.

Una manera de proteger la superficie del concreto refractario de las evaporaciones es rociarlo, con una fina llovizna de agua, a intervalos regulares. Debe permitirse que el concreto refractario fragüe parcialmente, para que el agua de rocío no arrastre el material de liga.

Un mejor método es aplicar una cubierta de material para curado a base de resinas, cuando la superficie se ha terminado y no hay humedad sobre ella. Este material, desarrollado para proteger la superficie del concreto de la evaporación, forma una membrana impermeable la cual evita la evaporación del agua. El costo de mano de obra se reduce considerablemente y el procedimiento es más seguro que el rociado con agua.

Como se mencionó anteriormente, la protección contra las pérdidas de humedad toma importancia creciente cuando la temperatura del aire es alta y la humedad disminuye. Los concretos refractarios densos son más susceptibles a reducir su resistencia a la evaporación de su superficie, pues tiene más bajo contenido de

agua que los materiales aislantes. Enfatizando, no debe permitirse que los concretos sequen al aire mientras desarrollan su liga hidráulica.

El periodo de curado, durante el cual el concreto refractario está siendo protegido contra el secado, puede extenderse y se incrementa ligeramente la resistencia del concreto. Después de que el concreto refractario ha desarrollado su liga hidráulica, puede permitírsele secar al aire por tiempo indeterminado, antes de aplicar calor para completar el secado y llevarlo a su temperatura de operación.

4.4.1.5 Secado.

El proceso de secado de un revestimiento refractario es la operación que determina la seguridad, estabilidad y comportamiento del revestimiento. Por lo tanto, durante el secado es necesario seleccionar el equipo que proporcione una remoción completa de la humedad, no contamine al ambiente y sea de mínimo costo. La tecnología actual de secado está básicamente orientada a utilizar quemadores, utilizando combustible líquido o gaseoso. Sin embargo, la eficiencia en el aprovechamiento de energía no es mayor del 30-35%, aún con equipo para recuperación de calor. Además, se contamina la atmósfera con S_2C , CO , óxido de nitrógeno, e hidrocarburos no quemados durante el proceso de combustión.

El uso de secadores eléctricos mejora varios de los aspectos mencionados, pero tiene menor tiempo de vida útil debido al empleo de resistencias. Sin embargo, se logra un mayor control durante el secado de la masa refractaria en forma simplificada. No olvidar que alrededor de un 20% del daño causado al material refractario, es debido a un proceso burdo de secado.

En el proceso de secado del revestimiento el volumen del vapor de agua aumenta en 1600 veces; por lo tanto, el secado con un suministro de calor intenso en la etapa inicial, puede causar la destrucción del refractario debido al incremento de la presión de los vapores de agua, produciendo una estructura porosa y capilar.

Parte del agua permanece unida químicamente en algunos compuestos y, por lo tanto, para su separación se requiere una cantidad considerable de energía. Los componentes refractarios de la masa del revestimiento tienden a cambiar su volumen, debido a la transformación de fases a temperaturas elevadas.

Con base en lo anterior, la práctica del secado del revestimiento monolítico debe tener especial atención en:

- a) regulación fina de la intensidad de calor, especialmente en la etapa inicial del proceso, para evitar una separación no uniforme del agua.
- b) Una distribución uniforme del calor sobre el revestimiento, para evitar sobrecalentamientos locales y, como consecuencia, una transición no homogénea de fase, causando microfracturas. (Serenó, 1996)

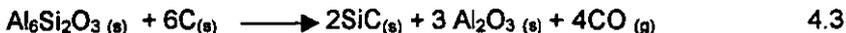
4.4.1.6 Calentamiento.

Existen dos razones por las cuales no debe calentarse demasiado rápido el concreto, la primera vez. Una es que estos tienen una permeabilidad más baja comparada con el ladrillo o plástico refractario. Si se calienta demasiado rápido, el agua al evaporarse desarrolla una alta presión dentro del concreto, lo cual provocara fracturas en el material. Otra razón para no calentar los concretos demasiado rápido la primera vez, es que puede originar el desarrollo de una distribución de grietas en la fase fría, las cuales se extienden dividiendo al aislante a través de la fase caliente. Un programa de calentamiento rápido causa que la fase caliente seque y eleve su temperatura, mientras que el resto del concreto se mantiene frío por la evaporación del agua. La fase caliente se expande causando el desarrollo de grietas en la fase fría. Como resultado, el revestimiento del concreto refractario no tiene buena resistencia y se produce un debilitamiento del monolito.

Aunque la rapidez de calentamiento se establece experimentalmente y es proporcionada por el proveedor del material refractario, como una regla general la temperatura de los gases calientes en contacto con el refractario debe incrementarse, como máximo a una velocidad de 55°C cada hora. A 120° C , 260°C y 540°C, debe mantenerse constante la temperatura, como mínimo, media hora por cada pulgada de espesor del revestimiento refractario

4.4.2 Transformación de Fases.

La mullitización es significativa a 1500° C. El contenido de mullita decrece rápidamente a 1550° C y desaparece a 1600° C simultáneamente, el contenido de corindón y SiC aumenta, y el contenido de carbón decrece. Con base en lo anterior, se sugiere la siguiente reacción



La porosidad aparente aumenta cuando la temperatura es mayor de 1500° C para la reacción anterior. ⁽¹⁴⁾ Como resultado de esta reacción se tiene un aumento del 38% del volumen de la fase sólida, haciendo que los refractarios pierdan textura. Las densidades de 3.17, 2.281, 3.217, y 3.987 g/cm³, se utilizan para mullita, carbón, SiC y Al₂O₃, para calcular el cambio volumétrico. Consecuentemente, un aumento en la porosidad aparente esta asociada con la cantidad de mullita que reacciona con el carbono. Se ha reportado que el SiO₂ reacciona con el carbono para formar SiC a temperaturas mayores que 1500° C. (Serenó, 1996)

Por lo tanto, la secuencia de reacción sugerida es que la mullita es disuelta en el líquido, y luego, el SiO₂ reacciona con el carbono para formar SiC y Al₂O₃, que son precipitados del líquido simultáneamente. Si el contenido de SiO₂ de refractario

aumenta considerablemente después de oxidar al SiC, decrece la refractabilidad del refractario, lo que produce una menor resistencia al ataque de la escoria.

Cuando se forma el espinel por la reacción de la alúmina y la magnesia ocurre una expansión volumétrica. Lo anterior es evidente a partir de la consideración de los volúmenes molares de los reactivos y el producto. El volumen molar de la magnesia es $11.26 \text{ cm}^3/\text{mol}$, de la alúmina $25.55 \text{ cm}^3/\text{mol}$ y el producto de reacción, la espinela de aluminato de magnesio, es de $39.52 \text{ cm}^3/\text{mol}$. El volumen aditivo de los reactivos es de $36.81 \text{ cm}^3/\text{mol}$. El incremento del volumen es de $2.71 \text{ cm}^3/\text{mol}$, que equivale a un 7.35 % de expansión volumétrica, en esta reacción en estado sólido.

En resumen, parece que existen al menos tres mecanismos que pueden contribuir a la expansión volumétrica total en la formación de espinela, durante el proceso de reacción de sinterizado: a) expansión normal por el aumento del volumen del producto, b) contacto y tamaño de partícula, c) Efecto Kirkendall. (Yoshimoto, 1997)

Se han realizado investigaciones para estudiar el efecto de la temperatura y la porosidad sobre la conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico, de los concretos refractarios aluminosos convencionales (The Iron Steel Society, 1996). Para materiales cristalinos puros, cuando aumenta la temperatura el calor específico también aumenta, y la conductividad térmica disminuye.

4.5 La Escoria.

En años recientes, los procesos de fabricación del Fierro y el Acero han experimentado cambios sustanciales como el uso de cantidades mayores de oxígeno. Estos cambios, exigen de la industria de los refractarios materiales con propiedades mejoradas y el desarrollo de equipo y herramientas para su colocación. Los refractarios comúnmente denominados como básicos han ganado importancia, como resultado de la aplicación de tecnologías mejoradas en la industria del acero.

Si las propiedades del material refractario como resistencia al choque térmico, estabilidad volumétrica y resistencia mecánica permanecen dentro de los valores adecuados, la duración del revestimiento refractario depende directamente de la resistencia que presente el revestimiento al ataque de la escoria.

4.5.1 Descripción de la escoria.

Durante largo tiempo se le ha dado poca importancia al papel que juegan la escoria y los materiales refractarios en la producción de acero, tanto en los procesos primarios, convertidores al oxígeno y hornos de arco eléctrico, hornos oxícúpula; como en las ollas de metalurgia secundaria. Sin embargo, la tendencia general de reducción de costos en la producción de acero sin sacrificar la calidad

del producto, ha provocado el análisis de las ventajas que trae aunado el manejo de una buena escoria, tanto en la producción de acero como en el ahorro del consumo de refractarios.

Un viejo dicho manejado por los antiguos aceristas narra " Si usted cuida la escoria el acero se cuidará solo". Lo anterior no es más que enfatizar una de las variables claves en la producción de acero y para el rendimiento óptimo de los refractarios. Un acero de calidad, es siempre acompañado de una escoria de calidad.

4.5.2 Función de la Escoria.

La escoria en un proceso metalúrgico tiene varias funciones, entre las que se pueden mencionar:

- 1.- Aislar al acero líquido del ambiente.
- 2.- Atrapar las impurezas que flotan por diferencia de densidades.
- 3.- Desulfuración y desfosforación del acero.

Como una definición de escoria se puede manejar la siguiente: " Las escorias son líquidos complejos que consisten principalmente de silicatos de calcio, otros compuestos y óxidos en solución o en suspensión".

Se les llama escorias básicas a aquellas en donde predomina el óxido de calcio (CaO) y/o el óxido de magnesio (MgO). Las escorias ácidas son aquellas en donde predomina la sílice (SiO₂). Con base en esta definición, existen compuestos intermedios que pueden catalogarse que pueden catalogarse como escorias ligeramente ácidas o ligeramente básicas.

En los procesos siderúrgicos actuales, primarios o secundarios, el componente principal de las escorias es la cal, por lo que estas son consideradas como básicas. Junto con este constituyente principal de las escorias se tienen una cantidad adicional de óxidos o compuestos que intervienen directamente en las características de la escoria. Estos constituyentes secundarios son principalmente: MgO, Al₂O₃, SiO₂, y Fe₂O/Fe₂O₃. Las características de las escorias determinan el efecto de estas, sobre el refractario. El origen de los componentes de las escorias son de tres fuentes principales: óxidos formados por la oxidación de Silicio, Manganeseo, Fósforo y Hierro, presentes en la carga; SiO₂, MnO, MgO, y otros óxidos cargados como tales o introducidos con el mineral de hierro o con fundentes o por erosión del refractario. La cal es alimentada para neutralizar los óxidos ácidos (SiO₂ y P₂O₅). (Seren, 1996)

Una caracterización de la escoria es el índice de basicidad o simplemente basicidad, que se puede determinar con la siguiente fórmula

$$IB = \frac{[\%CaO + \%MgO + \%MnO]}{[\%Al_2O_3 + \%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%P_2O_5 + \%Cr_2O_3]} \quad 4.4$$

Aunque en la práctica, la basicidad más comúnmente utilizada es la Basicidad llamada binaria, que es $IB2 = CaO/SiO_2$.

La interacción refractario-escoria está determinada, principalmente, por cinco factores:

- 1.- Composición química
- 2.- Fluidez
- 3.- Turbulencia
- 4.- Temperatura
- 5.- Tiempo

La incompatibilidad escoria-refractario es la causante de lo que generalmente llamamos ataque de escoria. Esta acción se puede dividir en dos ataques juntos y complementándose. Bajo ciertas condiciones de operación un factor puede ser preponderante sobre el otro y esto conduce a los distintos mecanismos de ataque que se observan en los equipos metalúrgicos.

Una escoria se puede analizar en distintos pasos del proceso metalúrgico de refinación secundaria y nos damos cuenta de que su análisis químico varía. Es por esto que la escoria se dice que es un factor dinámico. Estas variaciones en el análisis químico se deben a las adiciones que se hacen durante el proceso y a la función propiamente dicha de la escoria de "levantar" impurezas del baño. La incompatibilidad de la escoria con el refractario utilizado provocará que parte del refractario sea disuelto por la escoria para tratar de alcanzar el equilibrio. Esto también es un factor que contribuye al cambio en la composición química de la escoria y es uno de los mecanismos más destructivos para el revestimiento.

4.5.3 Control de la Escoria.

Como se mencionó anteriormente, la interacción refractario-escoria está afectada directamente por cinco factores. El control del ataque de la escoria sobre el refractario se basa, principalmente, en manipular estos factores de tal manera que la escoria se vuelva menos agresiva para el monolito. También, se mencionó que se pueden distinguir dos tipos de ataque por escoria sobre el refractario, el físico y el químico. El ataque químico de la escoria se debe a que tiene un punto de fusión más bajo que las temperaturas de operación de los hornos. Lo anterior trae aunado el reblandecimiento del refractario en la zona de contacto con la escoria y la erosión mecánica hace su aparición. El ataque físico a los refractarios se basa principalmente en la penetración de la escoria, la cual satura los poros del refractario. Esto cambia sustancialmente las características mecánicas del refractario y lo vuelve muy sensible al choque térmico, lo mismo que al astillamiento estructural.

Sin embargo, tanto el ataque químico como el físico pueden controlarse si se entiende cual es el papel que juega cada una de estas variables o los factores mencionados con anterioridad. El ataque químico de la escoria sobre el refractario se minimiza si se lleva a una escoria tan cerca como sea posible al equilibrio con el refractario. Esto es, ajustar la composición química de la escoria de manera tal, que no disuelva material del refractario. Por otro lado, la fluidez de la escoria está directamente afectada por la cantidad de líquido y de sólido presentes en ella, al igual que por la viscosidad del líquido.

Si la temperatura de operación del horno se incrementa, la magnitud del ataque químico y físico de la escoria sobre el refractario se incrementa. De igual manera, tiempos prolongados de contacto entre la escoria y el revestimiento, provocaran mayor daño estructural para este último.

Para entender mejor el concepto de equilibrio entre la escoria y el refractario, lo mismo que la fluidez de una escoria, es necesario recurrir a los diagramas de equilibrio, mejor conocidos como diagramas de fases. Estos diagramas nos indican la relación que existe entre los componentes de un sistema. Estas relaciones nos permiten identificar si existe la posibilidad de una reacción entre los componentes de un sistema, lo mismo que el estado de los componentes y productos de reacción.

La Tabla 4.6 muestra una composición típica de la escoria proveniente del horno oxícúpula. En la Tabla 4.7 se reportan datos de la composición del arrabio.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA							
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	IB2	S
35.56	35.89	18.96	1.63	0.98	2.07	0.991	0.45
1.06	0.535	0.585	0.18	0.13	0.33	0.04	0.06

TABLA 4.6 Composición Típica de una Escoria.

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL METAL CALIENTE							
	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr
PROMEDIO	3.71	0.39	0.48	0.075	0.123	0.486	0.186
DESV TIP	0.23	0.04	0.08	0.018	0.015	0.115	0.033

TABLA 4.7 Composición Típica del Arrabio.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Además de la composición química, la viscosidad y la tensión superficial de la escoria, son propiedades que influyen en la magnitud de l ataque.

Debido a que los materiales refractarios son porosos, el ángulo de contacto se hace un parámetro muy importante. La escoria penetra en los poros y la presión capilar de penetración, P, está dada por la expresión:

$$P = 2\sigma\cos \Theta/r$$

donde σ = tensión superficial, Θ = ángulo de contacto, r = radio del capilar.

La presión de penetración es máxima cuando $\Theta = 0^\circ$, y cero cuando $\Theta = 90^\circ$, y negativa, cuando Θ es mayor de 90° .

4.5.6 Corrosión.

La degradación de un material refractario por la corrosión, puede ser causada por mecanismos como:

- 1.- Disolución del refractario en contacto con un líquido.
- 2.- Reacción con un líquido, un sólido o un vapor.
- 3.- Penetración de un líquido o un vapor.

La resistencia a la corrosión de una escoria es una característica muy difícil de medir, puesto que depende de una gran variedad de variables, la mayoría se representan en la Figura 4.9.

Lo que hace a la resistencia a la corrosión tan difícil de medir es el hecho de que esta caracterizada por los materiales involucrados (Composición de fases, química y mineralógica), su tamaño de grano, forma y distribución; el proceso de instalación determina la porosidad (tamaño y distribución), la proporción de los materiales de la matriz, y la naturaleza de la ligas.

Por otro lado, la composición química de la escoria (determinada por el proceso metalúrgico, su razón de ser) y sus propiedades intrínsecas como fluidez, viscosidad, tensión superficial, conductividad térmica, densidad, etc., también contribuyen a su caracterización.

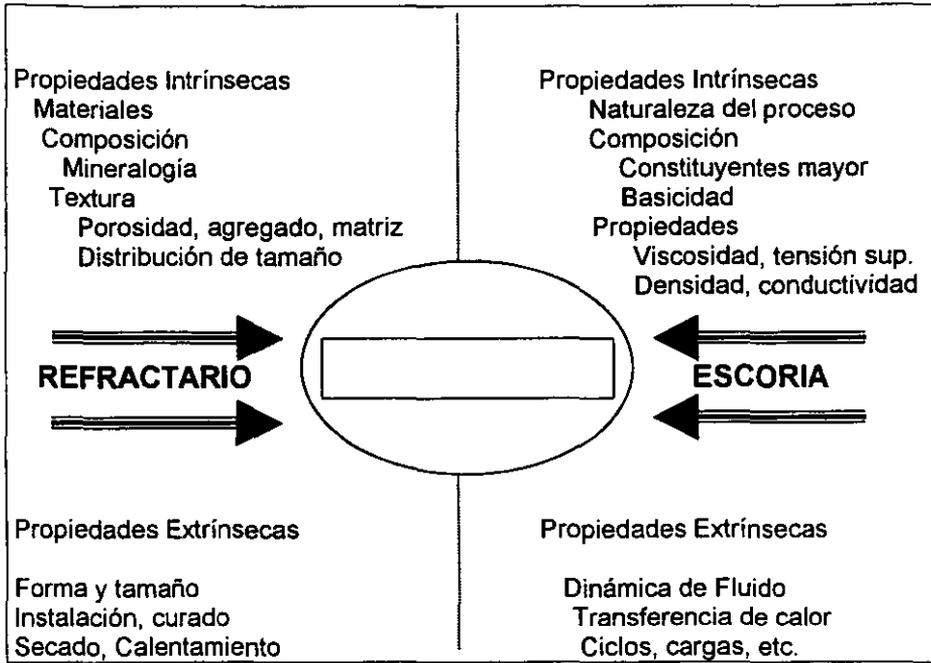


FIGURA 4.9 Variables en la Interacción Refractario-Escoria.
 (The Iron and Steel Society, 1996)

CAPÍTULO 5

Modelo de Agua

Introducción

La interacción entre los tres parámetros de proceso: Temperatura, Composición y Flujo de fluido, determinan la respuesta del proceso siderúrgico en términos de calidad y productividad.

El comportamiento del flujo del fluido puede caracterizarse por su velocidad, patrones de flujo e intensidad de turbulencia. Ninguno de estos parámetros es observable directamente en las operaciones de acería. Por esta razón, las técnicas de modelado físico utilizando agua como el fluido del modelo, nos permiten visualizar el comportamiento del flujo del fluido en estas operaciones.

El flujo del fluido en los diferentes procesos de acería ha sido estudiado extensivamente en los años recientes. Estas investigaciones incluyen modelados matemáticos, estudio de trazadores radiactivos y modelado con agua.

La modelación matemática de los patrones de flujo ha ganado popularidad, recientemente, con el advenimiento de soluciones numéricas y modelos de turbulencia refinados. El modelo matemático puede ser útil para explicar o verificar los resultados experimentales o para proporcionar guías de diseño experimental.

El modelado con agua, a escala total o reducida, ha sido un procedimiento empleado por varios investigadores. Varios estudios industriales han usado modelos a escala completa, mientras varios otros investigadores, como en las instituciones académicas, utilizaron modelos a escala reducida, quizá por las restricciones de recursos y espacio. En los modelos a escala reducida solo se puede cumplir con un criterio de semejanza (Froude o Reynolds), solo a escala total se pueden satisfacer ambos criterios. (Mazundar D., 1999)

El modelado con agua, por otra parte, es una experimentación muy sencilla y puede ser realizada por personal relativamente poco experimentado. Un experimento cuidadosamente planeado puede dar resultados muy útiles y la interpretación correcta de los mismos, puede proporcionar una guía en el diseño de equipo. El modelo de agua a escala reducida o a escala completa, es un medio muy popular para la simulación física del flujo dentro de los equipos siderúrgicos. Es un método relativamente rápido y poco costoso para el estudio cualitativo y semicuantitativo del flujo del arrabio o del metal fundido y, como consecuencia, el diseño del equipo de interés. Si se tienen los instrumentos como velocímetro laser-Dopler, anemómetro laser-Dopler, etc, se pueden determinar cuantitativamente las componentes de la velocidad del fluido, en un volumen de control, así como la intensidad de las turbulencias para el estudio hidrodinámico del recipiente.

5.1.- Consideraciones de Semejanza y Criterios de Modelado.

En la construcción del modelo físico de un proceso o de algún aspecto particular de un proceso, buscamos representar o modelar al sistema cambiando los materiales que se manejan y también, frecuentemente, la escala de operación.

El principal objetivo del modelado físico es proporcionar una representación realista del sistema, usando materiales y equipo de modo que las mediciones puedan ser hechas más convenientemente y a un menor costo, comparado con el prototipo.

Los modelos físicos pueden ser clasificados en tres grupos principales:

- a) Modelos Físicos Rigurosos, contruidos siguiendo ciertas reglas estrictas de criterios de similaridad. Bajo estas condiciones pueden realizarse mediciones cuantitativas en el modelo como campos de velocidades, intensidades de turbulencia, perfiles de temperatura, velocidades de reacción, etc. Los datos obtenidos de esta manera, pueden ser trasladados, utilizando un escalamiento apropiado, para describir el comportamiento del sistema real o prototipo.
- b) Un procedimiento alternativo puede ser estudiar solo los fenómenos físicos relevantes, con el objetivo de proporcionar información para la construcción de modelos matemáticos. El comportamiento del sistema industrial real podría predecirse a partir del modelo físico.
- c) Una tercera aproximación podría ser la realización de experimentos ad hoc, para tener una idea del sistema, como un prerrequisito para los estudios con modelado matemático.

Cada uno de estos acercamientos tiene un papel definido en los estudios de investigación y desarrollo.

Los modelos físicos rigurosos son útiles porque, a menudo, obvian el desarrollo paralelo del modelo matemático. En muchos casos prácticos, sin embargo, no se puede construir un modelo físico que satisfaga todos los criterios de semejanza. En estas condiciones solo se modela físicamente un aspecto relevante del problema y debe complementarse el estudio con un modelado matemático.

El estudio de los fenómenos físicos relevantes ha sido utilizado ampliamente y ha conducido al desarrollo de relaciones importantes para describir el comportamiento de las burbujas de gas en el metal fundido, la interacción de chorros impactantes con el acero líquido y para fenómenos de flujo en columnas empacadas. La representación matemática de estos fenómenos, deducida de mediciones a temperatura ambiente, ha servido para predecir, con cierta significatividad, el comportamiento del sistema real a altas temperaturas.

Finalmente, los experimentos ad hoc, contribuyen a la visualización del flujo, aproximación preliminar de la cinética, problemas de fluidez; pueden ser muy útiles par desarrollar programas más serios de investigación.

5.2 Desarrollo de Modelos Físicos Rigurosos.

El requisito para que un modelo represente al sistema real o prototipo, es satisfacer los criterios cuantitativos de similitud.

Existen muchos estados de similitud, sin embargo, los más utilizados son los siguientes: (Franzini J., 1999)

- 1) Similitud Geométrica. Es la semejanza de la forma. Dos sistemas son geoméricamente similares cuando la relación de cualquier longitud en un sistema y la correspondiente longitud en el otro sistema, en todas las dimensiones, es la misma. Esta relación es usualmente denominada factor de escala. Mientras que la similitud geométrica es uno de los requerimientos más obvios en el modelado, a menudo no es posible una semejanza geométrica total. Bajo determinadas condiciones ciertas dimensiones críticas del modelo son escaladas y otras no. En este procedimiento se dice que se utiliza un modelo distorsionado. Ejemplos de esta situación incluyen estudios de rugosidad de superficies, escalamiento de ríos, lagos, etc. Un caso especial de modelo distorsionado es el uso de una sección del modelo, en donde las dimensiones utilizadas son solo una parte de las correspondientes al prototipo.
- 2) Semejanza Cinemática. Representa la similitud de movimientos. Siendo esencial para que la similitud cinemática se cumpla entre dos sistemas, que además de la semejanza geométrica, las velocidades en puntos respectivos de ambos sistemas, guarden la misma relación fija.
- 3) Semejanza Dinámica. Representa la similitud de las fuerzas. La similitud dinámica se observa entre dos sistemas cuando la magnitud de las fuerzas en puntos correspondientes, en ambos sistemas, guardan una relación fija. En el modelado físico de problemas de flujo de fluidos es esencial que ambas similitudes, la geométrica y la dinámica, se cumplan si se quiere obtener conclusiones cuantitativas de los resultados. Las fuerzas principales involucradas en la similitud dinámica son: fuerzas inerciales, de presión, viscosas, gravitacionales, de tensión superficial, elásticas y magnéticas.
- 4) Semejanza Térmica. En sistemas no isotérmicos se debe satisfacer el criterios de similitud térmica; en otras palabras, la velocidad de transferencia de calor por los diversos mecanismos como conducción, convección y radiación, debe estar en una relación fija entre el modelo y el prototipo. Cuando existe similitud geométrica y cinemática, los perfiles de temperatura en el modelo y el prototipo deben guardar una proporción fija.

- 5) Semejanza Química. Se avoca al establecimiento de las condiciones necesarias en el modelo, de modo que las velocidades de las reacciones químicas, en cualquier punto, sean proporcionales a la rapidez de reacción en el tiempo correspondiente y en el mismo punto en el prototipo. En la práctica, la simulación química de los procesos presenta muchos problemas porque requiere de la proporcionalidad del tiempo, temperatura y concentración entre el modelo y el sistema a escala completa.

Existen otras similitudes que debe cumplirse en el modelado físico pero para el contexto del presente trabajo, son suficientes los criterios de semejanza geométrica y dinámica.

En los estudios realizados en modelos de escala reducida, isotérmicos, en sistemas sin reacción, se requieren dos estados de similitud; geométrica y dinámica, que deben ser satisfechos entre el modelo y el sistema a escala completa.

La similitud geométrica requiere que cada dimensión en el modelo guarde una relación fija con las dimensiones correspondientes del modelo a escala completa. La semejanza dinámica, en nuestro caso es sinónimo de similitud cinemática, determina que las fuerzas que actúan sobre un elemento fluido mantengan una relación idéntica entre el modelo y el prototipo. En cualquier sistema de flujo, el balance entre las fuerzas actuantes sobre un elemento fluido, puede ser descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes.

5.3 Criterios de Semejanza del Número de Froude y el Número de Reynolds.

El número de Reynolds, Re , está dado por

$$Re = VD\rho/\mu \quad 5.1$$

El número de Froude, Fr , se define por

$$Fr = V/(gD)^{1/2} \quad 5.2$$

La similitud del número de Reynolds entre el modelo (m) y el prototipo (p), implica que

$$[VD\rho/\mu]_m = [VD\rho/\mu]_p \quad 5.3$$

Puesto que la viscosidad cinemática (μ/ρ) del agua a temperatura ambiente y la del arrabio fundido a 1600°C , es casi la misma (dentro del 10%), se puede demostrar que (Palafox R., 1999, Harris D., 1983).

$$V_m \approx (1/\lambda) V_p \quad 5.4$$

donde λ es el factor de escala, y está dado por

$$\lambda = D_m/D_p \quad 5.5$$

De forma equivalente, la similitud del número de Froude entre el modelo y el prototipo, implica que

$$V_m = (\lambda)^{1/2} V_p \quad 5.6$$

El número de Reynolds es la razón de las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. Las fuerzas inerciales originan el flujo convectivo o transferencia convectiva de momentum y las fuerzas viscosas causan la transferencia difusiva de momentum. En el flujo laminar, la viscosidad molecular del fluido origina el intercambio entre capas adyacentes de fluido y resulta la transferencia difusiva de momentum. En flujos turbulentos, la transferencia difusiva de momentum no se debe únicamente al intercambio de moléculas sino también se origina por el intercambio de grupos de moléculas (remolinos), en una distancia relativamente grande (comparada con la trayectoria libre media molecular), conocida como distancia de remolino. En tales flujos, la contribución a la transferencia difusiva de momentum debida al intercambio de agregados moleculares, puede ser de varios ordenes de magnitud mayor que la contribución debida al intercambio molecular, causado por la viscosidad molecular. Así, la viscosidad turbulenta es responsable de la transferencia de momentum debido al intercambio de agregados de material de la misma manera que la viscosidad molecular origina la transferencia de momentum debida al intercambio de moléculas. El término "Viscosidad efectiva" se refiere a la suma de las viscosidades molecular y turbulenta. Es importante enfatizar que la viscosidad molecular es una propiedad del fluido mientras que la viscosidad turbulenta depende del régimen de flujo. En el flujo turbulento, la transferencia difusiva de la cantidad de movimiento depende de la viscosidad efectiva y no de la viscosidad molecular. Por lo tanto, la semejanza con base en el número de Reynolds es muy importante en flujo laminar, pero es irrelevante en el modelado de flujo turbulento. (Sahai Y., 1996)

Es evidente, en las ecuaciones 5.4 y 5.6, que la satisfacción de ambos criterios de semejanza (Re y Fr) en el modelo de agua, solo es posible con el uso de un modelo a escala completa, $\lambda=1$. Puesto que en un modelo a escala reducida, $\lambda<1$, solo uno de estos dos criterios de similitud puede ser satisfecho; generalmente, los investigadores han seleccionado el criterio de semejanza del número de Froude, en el cual la velocidad en el modelo se determina de acuerdo con la ecuación 5.6. La importancia y validez de este criterio se puede examinar considerando las fuerzas relevantes que actúan sobre el modelo del sifón, en un flujo isotérmico. Las fuerzas involucradas son inerciales, viscosas y gravitacionales. El número de Froude, que es la razón de fuerzas inerciales y fuerzas gravitacionales, es

importante donde ambas fuerzas gravitacionales e inerciales actúan sobre el fluido. Así, el modelo de agua es un método muy conveniente para modelar el flujo, la coalescencia de las inclusiones y aspectos de flotación y separación de escorias en el sifón a presión.

5.3.1 Criterio de Semejanza del Número de Froude.

Para un flujo por gravedad en orificios por debajo de una columna de líquido, se requiere que (Hoaslip L., 1983))

$$Fr_m = Fr_p \quad 5.7$$

y
$$V_m^2/gH_m = V_p^2/gH_p \quad 5.8$$

de donde
$$H_m/H_p = V_m^2/V_p^2 \quad 5.9$$

Designando a $H_m/H_p = H_f$ como el factor de escala (λ) de la altura del líquido en el sifón y V_f^2 como el factor de escala de la velocidad, se tiene

$$H_f = V_f^2 \quad 5.10$$

Para fuerzas gravitacionales $V = (2gH)^{1/2}$, donde H es la altura del nivel del metal líquido, arriba de los orificios de salida, de donde

$$\begin{aligned} V_m^2 &= 2gH_m \\ V_p^2 &= 2gH_p \end{aligned} \quad 5.11$$

De donde $H_f = V_f^2$, lo que implica que la cabeza hidráulica y el diámetro deben reducirse en la misma relación.

El factor de escala para el tiempo $t_f = H_f/V_f$, o bien de la ecuación 5.11 $V_f = (H_f)^{1/2}$, y

$$t_f = (H_f)^{1/2} \quad 5.12$$

Similarmente, un factor de escala para el flujo volumétrico Q, es

$$Q_f = D_f^2 H_f / t_f = H_f^3 / t_f \quad 5.13$$

Y finalmente
$$Q_f = H_f^{5/2} \quad 5.14$$

Por análisis similares se concluye que la escala entre diámetros de orificios se reduce de acuerdo con el factor de escala lineal.

Resumiendo, se ha demostrado que para un flujo por gravedad. La equivalencia del número de Froude se mantiene, si todas las dimensiones, incluyendo tamaño del recipiente, diámetro, sección transversal de orificios circulares y la cabeza hidráulica, se escalan de acuerdo a un simple factor de escala (λ). Además, se obtiene una serie de relaciones útiles como:

$$H_f = V_f^2 = t_f^2$$

$$H_f = D_f = Q_f^{2/5}$$

$$[Q_m/Q_p]^{2/5} = \lambda$$

El modelado a escala reducida de acuerdo con un simple factor de escala, ($\lambda < 1$) para todo el modelo de flujo (solo satisface la similitud de acuerdo con el criterio del número de Froude), es apropiado para el estudio de trayectorias de flujo y fenómenos asociados como formación de vórtices y distribuciones de tiempos de retención de fluidos. Otros fenómenos de flujo no son simulados adecuadamente bajo este único criterio de escalamiento.

5.4 Descripción del Sistema

Para el entendimiento de los mecanismos de separación de la escoria y el arrabio en el sifón a presión, en este sistema multifásico, se requiere de un conocimiento detallado del comportamiento hidrodinámico del recipiente. Se necesita la determinación de los niveles de turbulencia, puesto que el tamaño de los remolinos está directamente relacionado con los niveles locales de la energía cinética turbulenta (k) y de su rapidez de disipación (ϵ). (Kresta S., 1996)

La teoría y el diseño de modelos de agua para el estudio del flujo de fluidos en el sifón a presión, se discute a continuación. Se consideran tres secciones de estudio:

- a) Flujo del arrabio y la escoria en la piquera (proveniente del crisol)
- b) Patrones de flujo en el sifón a presión (Chorro impactante).
- c) Flujo de arrabio y escoria en sus respectivas salidas.

Para una corriente homogénea de líquido, las fuerzas predominantes en la etapa a) son inerciales y de gravedad, y así el criterio que gobierna debe ser el número de Froude.

La penetración ocurre cuando las fuerzas inerciales sobrepasan a las fuerzas de tensión superficial, haciendo predominar el criterio del número de Weber.(b)

Una vez que el chorro y el líquido en el sifón son una fase continua, la propagación del chorro está influenciada por fuerzas inerciales y viscosas, la razón de las cuales es el número de Reynolds. Sin embargo, se recordará que anteriormente se estableció que el flujo dentro del sifón es turbulento, por lo que el número de Reynolds es casi invariante, haciendo irrelevante este criterio.

Durante el proceso de llenado del sifón a presión, las partículas líquidas de escoria son emulsionadas en el arrabio líquido, como resultado de las condiciones de flujo específico que ocurren en el metal fundido. Cuando se está llenando el sifón, el metal y la escoria líquidos fluyen hasta el fondo del recipiente, antes de ser deflexionados hacia las paredes por el fondo del sifón, que actúa como una superficie de impacto, transformando la velocidad axial en velocidad radial. Este proceso desarrolla una región de circulación (remolinos), cuya expansión espacial alcanza un máximo a medida que el nivel del líquido en el sifón aumenta. En este punto, la relación entre el nivel del líquido y el diámetro del sifón es muy próximo a $H/D = 0.5$. A medida que el nivel del líquido rebasa esta relación, la estructura de los remolinos se perturba. Se forman pequeñas áreas de recirculación en la parte cercana a la superficie libre, mientras el remolino pierde intensidad. El proceso de separación de las gotas de escoria emulsionadas que acompañan al arrabio en la corriente de entrada, está ligado íntimamente a las características del flujo mencionado. Puede esperarse que mientras el llenado del sifón se realiza, las gotas de escoria se encuentran inicialmente en el remolino, circulando junto con el arrabio. Una vez que se rebasa la relación $H/D = 0.5$, la separación de la escoria es facilitada por las perturbaciones y pérdida de intensidad de las turbulencias. La influencia del campo de flujo mencionado arriba, sobre el movimiento de las gotas de escoria fue examinado en una serie de modelos físicos en los cuales se simuló la separación de las gotas emulsionadas de escoria.

En el sifón a presión se lleva a cabo una separación y flotación de las inclusiones (escoria). Sin embargo, la eficiencia de tal operación es controlada, a menudo, por las velocidades de los procesos de transferencia de masa y calor, y está muy relacionado con la naturaleza del flujo de la emulsión de escoria y arrabio dentro del sifón. Consecuentemente, un conocimiento detallado de los parámetros de flujo (distribución espacial de las componentes de velocidad, energía cinética turbulenta y su disipación) es un prerrequisito para un análisis significativo y eficiente del proceso y/o su optimización. Como es sabido, las altas temperaturas de operación junto con la opacidad del arrabio, y el hermetismo del sifón, hacen que la experimentación directa en el recipiente sea virtualmente imposible, para una observación visual directa. Como una alternativa, los modelos transparentes de escala reducida, utilizando agua como simulador del arrabio y algún aceite mineral o de silicón que represente a la escoria (se han utilizado microesferas huecas de polietileno), son muy útiles para investigar la hidrodinámica y procesos de transporte asociados en el sifón a presión. Como se muestra en la tabla 51, el agua a 20°C y el hierro fundido a 1600°C tienen viscosidades cinemáticas equivalentes, haciendo posible que los modelos de agua de escala reducida, sean una herramienta excelente para investigar varios fenómenos de transporte.

	Agua a 20° C	Acero a 1 600° C
μ_{abs} (cp)	1	6.4
ρ (g/cm ³)	1	7.08
ν_{cinem} (CS)	1	0.9
σ (dinas/cm)	7.3	1 600

TABLA 5.1 Propiedades del Agua y el Acero.

5.5.- Modelo de Agua a Escala Reducida.

Considerando al sifón como un recipiente a presión en el que se realiza la separación mecánica de dos fases líquidas, arrabio y escoria, el balance de momentum sobre un volumen elemental del fluido, para un sistema estacionario, isotérmico y laminar, puede expresarse en forma compacta en notación tensorial

$$\partial(\rho V_j V_j) / \partial x_i = - \partial P / \partial x_i + \partial / \partial x_j [\mu (\partial V_j / \partial x_i + (\partial V_i / \partial x_j))] \quad 5.15$$

La forma adimensional, correspondiente a la ecuación anterior, puede expresarse como

$$N_{Eu} = f(N_{Re}, N_{Fr}) \quad 5.16$$

La ecuación 5.16 es la llave para la semejanza dinámica entre dos sistemas geoméricamente similares, la cual puede satisfacerse absolutamente cuando el factor de escala, λ , es la unidad, entre el modelo y el prototipo. Sin embargo, en los modelos de escala reducida $\lambda < 1$, utilizando agua para representar al arrabio, es imposible cumplir simultáneamente con ambos criterios, de Re y de Fr, a pesar de que las viscosidades cinemáticas son casi idénticas. Como una consecuencia de este hecho debe ignorarse la influencia de alguno de los dos números de similitud. A menudo, en sistemas de flujo turbulento de arrabio, la transferencia de momentum vía fuerzas moleculares viscosas, se considera de importancia secundaria.

Varios estudios (Harris D., 1983, Sahai Y., 1996 y Heaslip L., 1983) parecen indicar que el flujo en una operación de separación es gobernado por el número de Froude, por lo tanto, principalmente por las fuerzas gravitacionales e inerciales, que actúan sobre el metal líquido que fluye.

Si en dos sistemas geoméricamente semejantes los números de Reynolds y de Froude son iguales para ambos, los sistemas están descritos por la misma ecuación diferencial adimensional. Si, además, las condiciones

iniciales y límites son también las mismas, los sistemas tendrán las mismas distribuciones adimensionales de velocidad y de presión. En tales casos, se dice que los sistemas son dinámicamente semejantes, ya que las relaciones de todas las fuerzas que intervienen en el proceso son iguales.

La expresión para el balance de cantidad de movimiento en el flujo turbulento (ecuación de Navier-Stokes turbulenta) puede representarse

$$\partial(\rho V_i V_j) / \partial x_j = -\partial P / \partial x_i + \partial / \partial x_j [\mu_e (\partial V_i / \partial x_j + (\partial V_j / \partial x_i))] \quad 5.17$$

$$N_{Eu} = f(N_{Ret}, N_{Frt}) \quad 5.18$$

En la cual N_{Ret} el número de Reynolds turbulento, representa la relación de las fuerzas inerciales y viscosas turbulentas. El trabajo de Sahai y Burbal (1996) parece indicar que bajo condiciones de flujo turbulento, la magnitud del número de Reynolds turbulento es muy similar. Con base en lo anterior, la condición esencial para la similitud dinámica entre el modelo y el prototipo, bajo régimen de flujo turbulento, puede expresarse como

$$N_{Frt} \text{ modelo} = N_{Frt} \text{ prototipo} \quad 5.19$$

La similitud entre el modelo y el recipiente a escala completa, con criterio basado en la ecuación 5.16, requiere que el flujo de entrada de agua al modelo, esté relacionado al flujo de entrada de la emulsión de hierro y escoria al sifón (sistema a escala completa), de acuerdo con

$$Q_{\text{modelo}} = \lambda^{2.5} Q_{\text{prototipo}} \quad 5.20$$

y la velocidad lineal del fluido será

$$V_{\text{modelo}} = \lambda^{1/2} V_{\text{prototipo}} \quad 5.21$$

En consecuencia, puede esperarse que el modelo reducido de agua del sifón a presión, con base en similitudes geométricas y dinámicas y en el criterio de semejanza del número de Froude, con un factor de escala $\lambda = 0.22$, simule los fenómenos de flujo que se presentan en el prototipo, adecuadamente.

5.4.1 Desarrollo del Modelo de Agua del Sifón a Presión

Con base en los criterios existentes, se elige un factor de escala, $\lambda = 0.22$, por las dimensiones de los materiales disponibles. Las dimensiones de la vista lateral del modelo de agua, a escala reducida, se muestran en la Figura 5.1. Una vista superior, se muestra en la Figura 5.2 y la Figura 5.3 es una representación esquemática del sistema utilizado en el modelo de agua.

La velocidad lineal del fluido en el modelo, de acuerdo con el criterio de semejanza del número de Froude es

$$V_m = (\lambda)^{1/2} V_p$$

Por lo tanto $V_m = (0.22)^{1/2} V_p$

o bien $V_m = 0.469 V_p$

La velocidad lineal del fluido en el prototipo (a partir de que la corriente abandona la piquera tiene una altura de caída libre de 0.52 m) antes de impactar con la superficie libre en la línea de escoria es

$$V_p = [2(9.81 \text{ m/s}^2)(0.52 \text{ m})]^{1/2}$$

$$V_p = 3.194 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, la velocidad en el modelo será de

$$V_m = 0.469 (3.194) = 1.498 \text{ m/s}$$

lo que implica una altura, entre la piquera y la superficie libre del baño de escoria

$$H = V_m^2 / 2g$$

$$H = (1.498)^2 / [2(9.81)] = 0.1144 \text{ m}$$

Otra variable a considerar es el gasto volumétrico, que en régimen estacionario en el prototipo es de $Q_p = 0.1838 \text{ m}^3/\text{min}$. Por lo tanto, en el modelo será

$$Q_m = (\lambda)^{5/2} Q_p$$

Numéricamente, tiene un valor de

$$Q_m = (0.22)^{5/2} Q_p$$

$$Q_m = 0.0227(0.1838 \text{ m}^3/\text{min})$$

$$Q_m = 4.17 \text{ l/min}$$

Las dimensiones anteriores se ajustan a los valores disponibles, quedando

$$\text{Diámetro de piquera} = 50.8 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro del sifón} = 220 \text{ mm}$$

$$\text{Altura del sifón} = 410 \text{ mm}$$

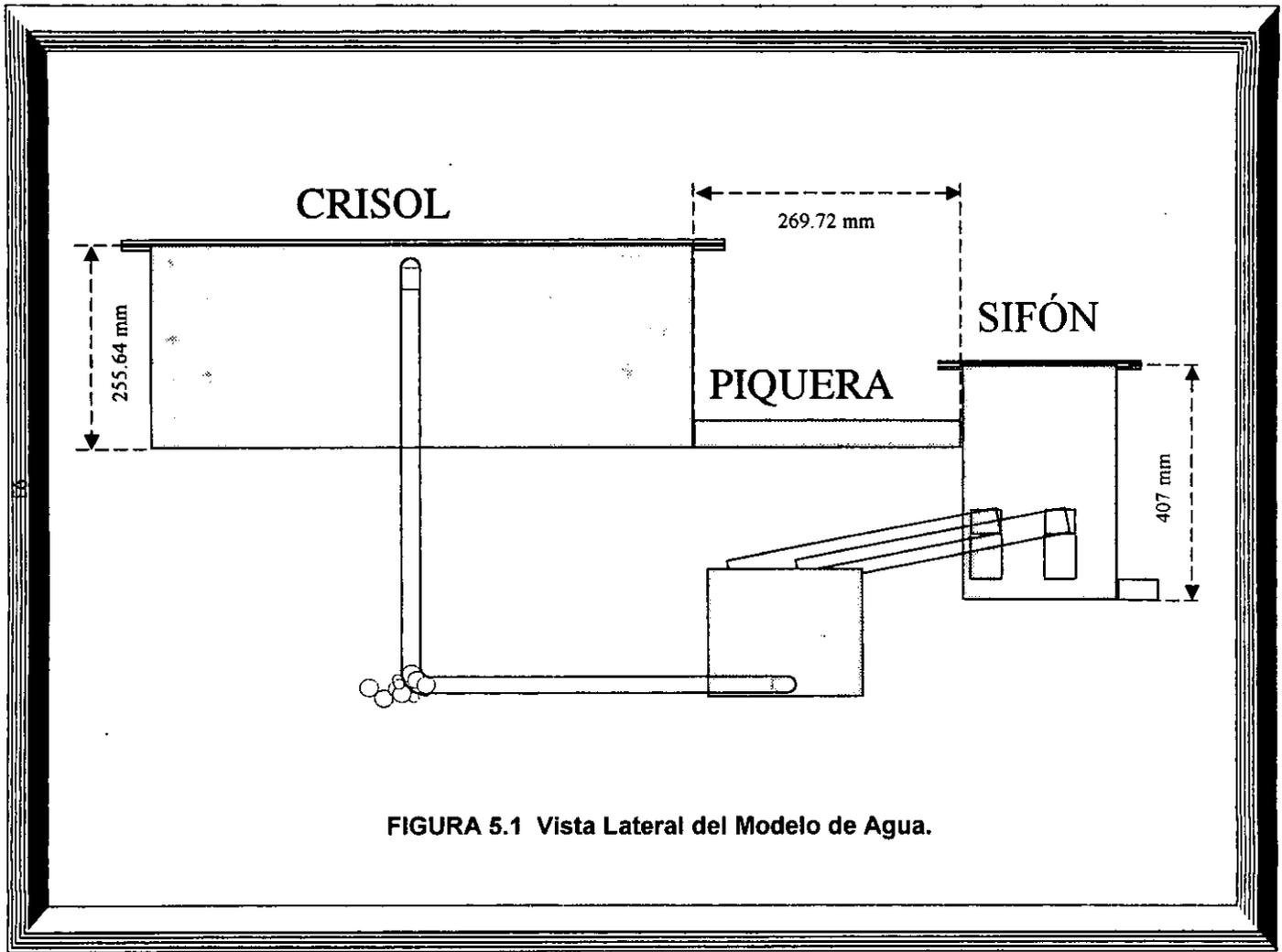
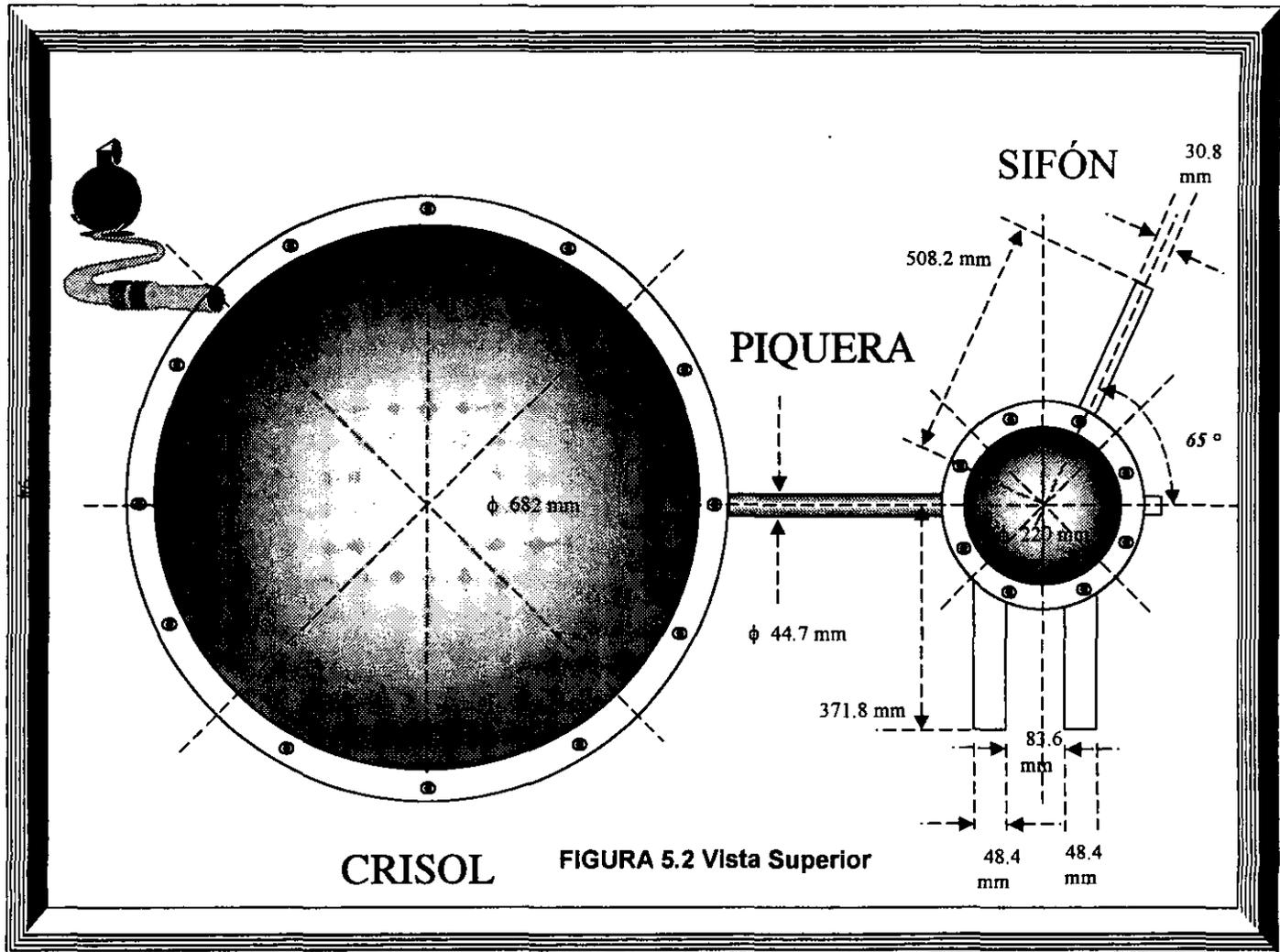


FIGURA 5.1 Vista Lateral del Modelo de Agua.



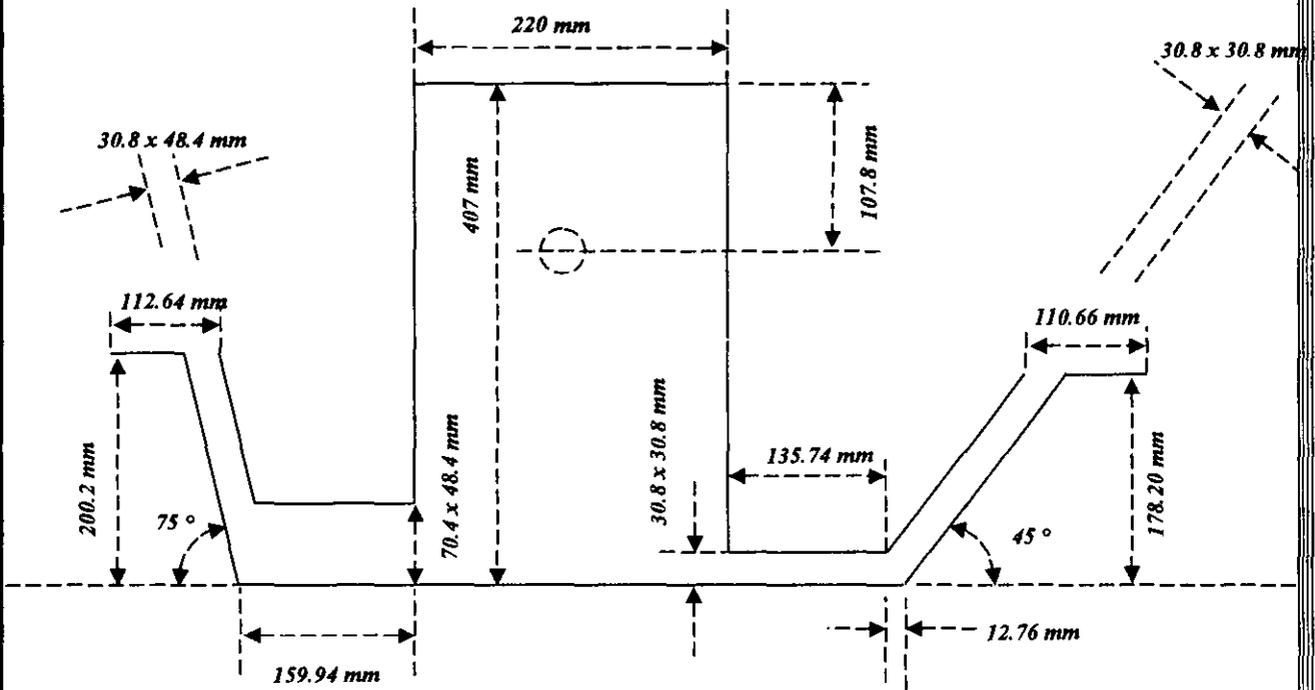


FIGURA 5.3 Representación Esquemática

CAPÍTULO 6

Optimización Geométrica del Sifón

Introducción.

En forma sencilla, el sifón es un recipiente cilíndrico que opera a presión interna, además de servir de tanque de balance para los flujos de escoria y arrabio líquidos, en el cual se lleva a cabo la separación de las dos fases líquidas (el arrabio es casi tres veces más denso que la escoria), debido a la diferencia de densidades.

El deterioro del revestimiento refractario depende de un gran número de variables, unas propias de cada material y, en gran parte, del comportamiento químico debido a la naturaleza de la escoria.

Además, existen factores originados en la práctica de instalación del monolito y de los procedimientos de curado, secado y calentamiento, hasta las temperaturas de operación (1600° C).

6.1 Descripción del Sistema.

La escoria y el arrabio líquidos comienzan a fluir desde el crisol del horno, a través de la piquera de sección transversal circular, unos 30 minutos después de iniciada la fusión, aproximadamente. La primera en caer dentro del sifón a presión es la escoria, como resultado de la combustión de la cama de coque, requerida para alcanzar la temperatura de fusión de la carga metálica dentro del crisol, inundando los canales de escoria y metal líquido. Luego, la emulsión de arrabio y escoria se vierte dentro del sifón. Por la diferencia de densidades entre el metal fundido y la escoria, con una relación de casi 3 a 1; el arrabio más pesado cae como una corriente compacta, desde la salida de la piquera, a través de la capa de escoria, hasta el fondo del sifón, llenando los canales de arrabio y escoria hasta el rebosadero del metal líquido. Para que la escoria alcance el nivel de su rebosadero, se requiere que las presiones en el sifón y los canales estén ligeramente desequilibradas, efectuando las fluctuaciones necesarias del baño de escoria y arrabio.

Cuando se aprecia visualmente la aparición del arrabio en el rebosadero de metal fundido, se levanta el nivel de este con masa refractaria, unos 10 cm, para tener una cantidad de arrabio disponible durante el flujo. Pasados 5 minutos, se retira la masa refractaria y el arrabio líquido fluye por el canal oscilante, hacia los carros torpedo o termos, que lo transportan al área de aceración. Alrededor de unos 15 minutos, después de iniciado el flujo de arrabio, comienza a rebosar la escoria por

su canal respectivo. Cada sifón a presión (dos en total) tiene dos salidas de escoria y una para el metal fundido. Se utiliza primero la salida de escoria que se encuentra del lado del horno, que es la que opera por más tiempo (alrededor de 4 días).

En el baño líquido dentro del sifón se lleva a cabo la separación de la escoria más ligera ($\rho = 2.6 \text{ g/cm}^3$), y del pesado arrabio ($\rho = 6.8 \text{ g/cm}^3$), al mismo tiempo que se presentan intensas reacciones entre la escoria y el metal fundido.

El nivel efectivo del hierro, la altura entre el canto superior de la sección horizontal del canal de escoria y el rebosadero de arrabio, es el responsable de las oscilaciones del baño líquido dentro del sifón a presión, y del flujo continuo de metal fundido y escoria, por un equilibrio de fuerzas.

Después de unas 50 horas de operación continua, se para el horno para hacer reparaciones (acondicionamiento) al canal de escoria en uso. 40 horas más tarde, nuevamente se para el horno, para hacer el cambio de canal de escoria, efectuando las reparaciones pertinentes. Finalmente, luego de otras 50 horas más de operación, se detiene la fusión en el horno, para efectuar el cambio de sifón.

La duración de la campaña del sifón en uso es de alrededor de 5 a 6 días de operación total, lo que se traduce en una producción de unas 10 000 toneladas de arrabio líquido.

6.2 Perfiles de Desgaste.

6.2.1 Antecedentes.

Al término de la campaña del sifón a presión, el horno se para y se pone en servicio al otro sifón, esta operación dura alrededor de 18 a 20 horas. El arrabio y la escoria contenidos en el sifón son vaciados por gravedad, a través de un orificio de drenaje que se localiza a nivel del piso del sifón. Después de 8-12 horas de enfriamiento, algunas veces hasta 24 horas, se empieza a demoler al refractario afectado, hasta una profundidad pertinente, en donde existe revestimiento en buenas condiciones. De modo que no se retira la totalidad de la masa refractaria (36 toneladas) sino, únicamente, la que se encuentra dañada. Típicamente, se requiere añadir, un espesor de revestimiento de alrededor del 50 % del total de trabajo, para la siguiente campaña.

Después de limpiar el piso y colocar los moldes para colar el concreto, se realiza la instalación del revestimiento refractario necesario, involucrando: mezclado húmedo, curado; esta primera etapa se realiza en un turno, mientras que el curado, es de 24 horas en una atmósfera aislada del aire ambiental. El aislamiento es necesario para evitar pérdidas del agua requerida para que el concreto forme su liga hidráulica. Después, se comienza el secado de la masa refractaria, y su rapidez es una operación crítica, que determina las propiedades estructurales y de

textura del revestimiento. Siguiendo un patrón escalonado de aumento en la temperatura, se lleva a cabo el calentamiento. Todo el proceso de secado y calentamiento dura alrededor de tres días, para alcanzar una temperatura cercana a la de operación, de 1200° C. Tanto el cuerpo del sifón como los canales para la salida de escoria (dos) y para la salida de arrabio líquido, deben alcanzar la temperatura anterior, estando al rojo vivo antes de que inicia la operación del horno.

El calentamiento se efectúa con un quemador de combustible gaseoso (gas natural) que presenta algunos problemas para controlar el flujo y la temperatura de los gases de combustión. Lo anterior, puede afectar considerablemente, la rapidez de evaporación del agua durante el secado; con abatimientos, generalmente drásticos, de las propiedades del material refractario.

6.2.2 Deterioro del Revestimiento refractario.

Los perfiles de desgaste del refractario del sifón, presentan un patrón más o menos estable. La Figura 6.1 muestra una vista lateral del sifón, mostrando el desgaste de la masa refractaria y la piquera (conexión del crisol con el sifón), en donde se observa un deterioro considerablemente mayor que en el lado opuesto (mirilla).

Aún cuando el revestimiento refractario es deteriorado por mecanismos tales como corrosión por la escoria y esfuerzos termomecánicos, parece ser que el primero tiene mayor impacto, en el desgaste del refractario. Sin embargo, durante el trayecto del crisol al sifón, en la piquera, la escoria agresiva reacciona intensamente, cambiando su composición química constantemente, intercambiado masa con el metal líquido y el refractario, para acercarse a su equilibrio, a muy altas temperaturas (1700° a 1800° C).

Por otra parte, la velocidad lineal en la piquera es muy baja (0.15 m/s), lo que favorece las reacciones que allí se llevan a cabo.

Además, esta velocidad en dirección horizontal, hace que el chorro de metal fundido, que cae como una corriente compacta a través de la capa de escoria, impacte al fondo del sifón a unos cuantos centímetros de la pared (5 a 7). A medida que la operación de fusión avanza, el deterioro del refractario, en dirección hacia el crisol va aumentando y, eventualmente, la corriente ya no impactará al fondo del sifón sino a escalones, formados en la pared del refractario; lo que puede explicar el perfil de desgaste del refractario en esta zona.

Cuando la corriente líquida sale de la piquera, comienza a aumentar su velocidad vertical, en dirección paralela al eje del sifón cilíndrico, debido a la aceleración gravitacional: alcanzando un valor de 3 m/s antes de impactar la superficie de escoria, produciendo un flujo turbulento en el baño líquido.

Después de la penetración del arrabio líquido a través de la capa de escoria, comienza la separación de las escorias emulsionadas, provocando cierta turbulencia en el baño de escoria. Estas turbulencias, transfiriendo cantidad de movimiento, completan el ataque por la penetración de la escoria, sobre el revestimiento. Debido a la porosidad del refractario, la escoria penetra y disuelve o debilita la ligas, dejando a las partículas de agregados a merced del movimiento del fluido, que arrastra a estas partículas.

Los efectos combinados anteriores, disminuyen el espesor del refractario y exponen nuevas superficies de refractario al ataque de nueva escoria.

Durante su camino hacia su rebosadero, la escoria permanece en contacto con el refractario, lo que puede explicar el desgaste en las porciones horizontal y vertical del canal de escoria. La Figura 6.2 muestra un deterioro mucho mayor en los canales de escoria, comparado con el desgaste en la salida de arrabio, aún cuando la velocidad lineal del arrabio es mucho mayor. Lo anterior refuerza la suposición de que el desgaste es producido, mayormente, por la interacción fisicoquímica refractario-escoria, descrito anteriormente.

El espesor horizontal de la pared del sifón, entre el sifón y el rebosadero de la escoria, se puede aumentar desplazando el cuerpo cilíndrico hacia la salida de arrabio; sin embargo, esta acción no es suficiente para aumentar la duración de la campaña del sifón. En la porción horizontal de la salida de escoria, se produce un desgaste en dirección vertical, hacia arriba (DA). Es este deterioro el que determina la duración de la vida útil del sifón, puesto que al alcanzar un espesor remanente crítico, puede presentarse la pulsación de la escoria, por el soplo aplicado en el crisol del horno y por la presión ferrostática.

Otra consideración importante es la temperatura de la coraza, en determinados puntos alrededor del sifón, que es función del espesor remanente de la pared del refractario.

Toda vez que se requiere un funcionamiento seguro del sifón, se tomaron los valores máximos, de desgaste horizontal (DR) y deterioro vertical (DA); Estos valores, base de nuestra consideraciones y propuestas, se encuentran en las Tabla 6.1 y Tabla 6.2, para el Sifón # 1 y Sifón # 2, respectivamente.

Una representación gráfica de los de los datos tabulados del desgaste del refractario de alta alúmina, con 15% de Carburo de Siliicio y un 1% de Carbón, se muestra en la Figura 6.3 y la Figura 6.4, respectivamente.

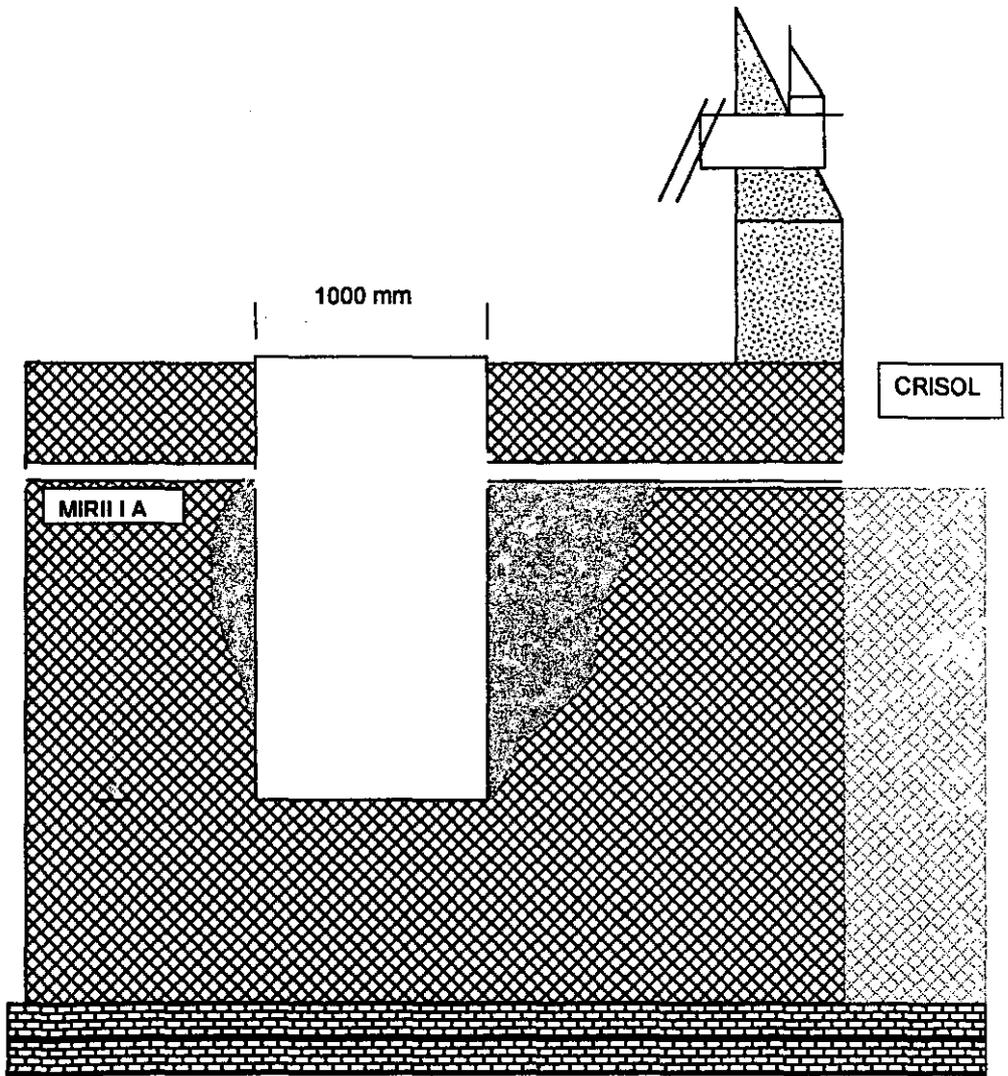


FIGURA 6.1 Perfil de desgaste en Piquera, lado canales de Escoria.

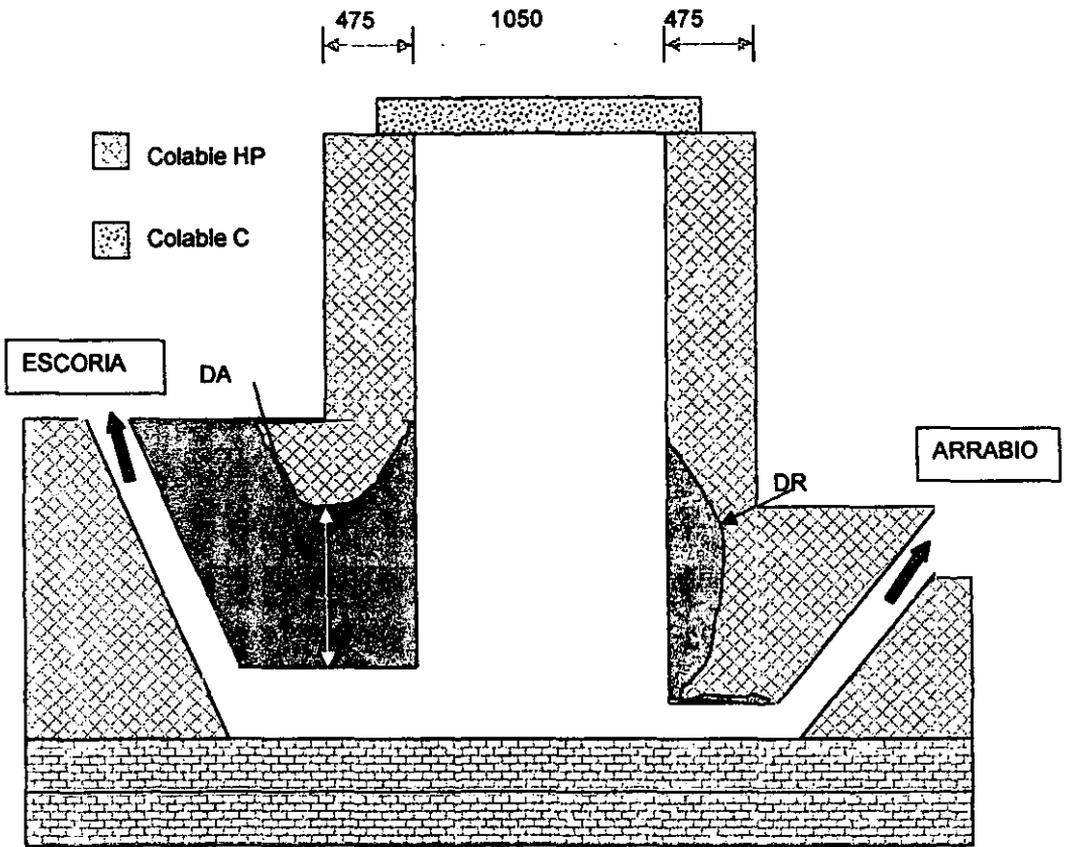


FIGURA 6.2 Vista Frontal del Sifón, mostrando el desgaste Vertical (DA) y Radial (DR).

Con base en las consideraciones anteriores y teniendo en cuenta:

- a) Temperatura exterior de placa, como función del espesor de refractario remanente.
- b) Perfil de desgaste horizontal (DR), entre las salidas de escoria y el sifón. Concluyendo que el desgaste es de 15-16 cm/día. (ver Tabla 5.1).
- c) Perfil de deterioro vertical (DA), desde el canto superior del canal de escoria hacia el rebosadero de escoria. Estableciendo que la rapidez de erosión es de 10 cm/día. Esta es la zona más crítica, pues determina la duración de la campaña del sifón. Cuando el espesor remanente en esta zona alcanza un valor crítico (25 cm), existe la posibilidad de que el soplo aplicado al horno pulse la escoria.
Por otro lado, tanto en la porción vertical y la porción horizontal de escoria, la rapidez de desgaste es muy similar, al igual que en el cuerpo del sifón. Es decir, el desgaste del material refractario está directamente relacionado con la producción de arrabio, como es de esperarse.
- d) De acuerdo con los flujos volumétricos y dimensiones de los canales, la Velocidad del arrabio (0.13 m/s) y de la salida de escoria (0.03 m/s), debería de presentarse un deterioro mucho mayor en la salida del metal líquido, si existiera erosión.
- e) Existen indicios de que la velocidad de flujo en el cuerpo del sifón tiene un valor menor, que la correspondiente en los canales de salida, debido a que el desgaste es menor. Este deterioro, tiene un valor máximo de 30 cm en el centro de esta interacción refractario-escoria, con una distribución normal.

Con fundamento en los análisis anteriores y de acuerdo a la bibliografía, se pueden establecer las siguientes conjeturas:

- i) El desgaste del refractario es un proceso que involucra mecanismos de corrosión-erosión. El ataque químico de la escoria debilita las uniones , entre los agregados del monolito, dejando expuestas a estas partículas a cualquier otro ataque. La erosión del fluido, retira las capas superficiales y deja expuesta nuevas capas de refractario al ataque de la escoria y, se repite el ciclo.
- ii) Como consecuencia de todo lo anteriormente expuesto, se proponen las siguientes líneas de investigación consecutivas, como medidas remediales para prolongar la duración de la campaña del sifón.

6.2.3 Medidas Remediales.

Aún cuando, aparentemente, las características físicas y químicas de la formulación refractaria y la prácticas de instalación del monolito han permanecido invariantes; la realidad es que las campañas de los sifones se han reducido a menos del 60% de su duración original, lo que representa una duplicación del costo de este rubro.

PRODUCCIÓN (Toneladas de arrabio)	DESGASTE AXIAL (DA) (cm)	DESGAST RADIAL (DR) (cm)
8 110	36	26
13 387	60	28
12 139	54	28
10 200	40	20
15 369	55	26
11 276	38	24
9 680	36	22
9 667	42	25
9 830	50	24
9 086	40	37
8 754	50	25
8 685	36	24

TABLA 6.1 desgastes Longitudinal y Transversal del Sifón # 1.

PRODUCCIÓN (Toneladas de arrabio)	DESGASTE AXIAL (DA) (cm)	DESGAST RADIAL (DR) (cm)
7 647	40	22
14 117	40	26
10 175	60	22
15 295	52	26
11 417	60	28
10 733	40	38
11 412	50	26
10 340	40	23
10 523	40	30
9 803	42	30
9 618	50	26

TABLA 6.2 Desgaste del Refractario para el Sifón # 2.

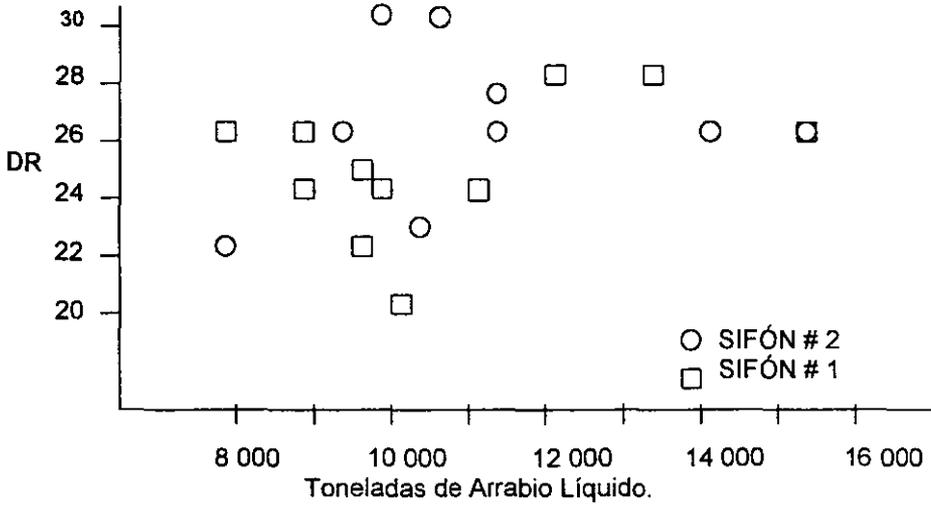


FIGURA 6.3 Perfil de Deterioro Radial del Sifón.

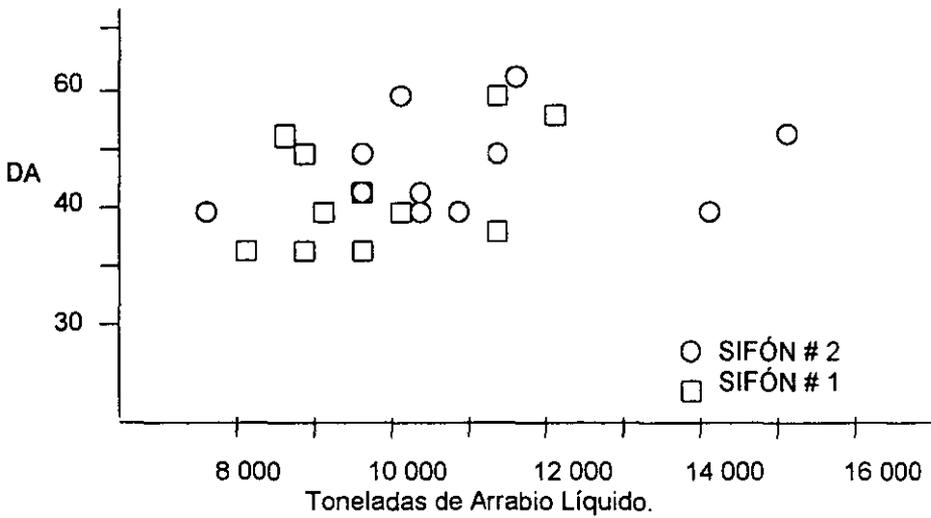


FIGURA 6.4 perfil de Desgaste Longitudinal del sifón.

Un estudio completo del desgaste del material refractario es una tarea muy difícil, puesto que el deterioro está determinado por una enorme cantidad de parámetros. Por un lado, se encuentran las propiedades extrínsecas del material (mineralogía, granulometría, porosidad, distribución de poros, etc.); la práctica de colocación del revestimiento, el curado, secado y calentamiento.

Por otra parte, está la naturaleza de la escoria, que está determinada por el proceso metalúrgico, características de la carga metálica y especificaciones del arrabio líquido producido.

Como una primera aproximación, se analiza el efecto de la interacción refractario-escoria. Posteriormente, en una segunda etapa, se realiza el estudio de propiedades de textura y estructura del monolito.

Dentro del contexto descrito, como una solución a corto plazo, se realizaron las siguientes tres etapas de investigación:

1.- Toda vez que es básico el conocimiento del comportamiento del flujo de los fluidos dentro del sifón a presión y en los canales de salida, se construyó el modelo de agua, a escala reducida; para estudiar, cualitativamente, el comportamiento hidrodinámico del sifón. (Capítulo 5)

2.- Se propone una optimización geométrica de modo que, con un pequeño aumento del refractario aplicado, dentro del funcionamiento seguro del sifón, se aumente su campaña. (sección 6.5)

3.- Se efectuó un estudio de la porosidad del monolito, toda vez que el área de contacto en la interacción escoria-refractario, es una función directa de esta propiedad, de textura. Se efectuaron pruebas de resistencia de la estructura como Módulo de Ruptura en Frío (CMOR), resistencia a la Ruptura por Compresión (CCS), de acuerdo a los estándares ASTM. (Capítulo 7)

Un estudio con mayor soporte sería la optimización de la formulación refractaria, por sustitución de la liga hidráulica por otro material, que aumente la resistencia al ataque de la escoria.

6.3 Fundamentos.

Considerando el caso en el que sobre una masa de fluido se experimenta una aceleración en la dirección vertical, Z. En la Figura 6.5 aparece el diagrama de equilibrio de un cilindro elemental de fluido, de volumen $\pi r^2 dZ$, en el centro del cual la presión interna es P. Aplicando la ecuación de movimiento en dirección vertical (Z), se tiene

$$\Sigma F_z = ma_z \quad (6.1)$$

$$F_a = [P - (dP/dZ) dZ/2] \pi r^2 \quad (6.2)$$

$$F_b = [P + (dP/dZ) dZ/2] \pi r^2 \quad (6.3)$$

$$W = \rho g \pi r^2 dZ \quad (6.4)$$

Toda vez que el elemento de fluido se encuentra en equilibrio, sustituyendo las ecuaciones de (6.2) a (6.4) en la ecuación 6.1, se llega a

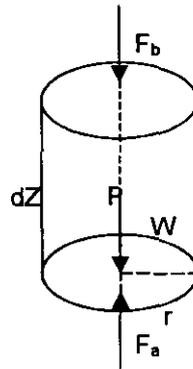


Figura 6.5 Diagrama de Equilibrio.

$$[P - (\partial P/\partial Z) dZ/2] \pi r^2 - [P + (\partial P/\partial Z) dZ/2] \pi r^2 - \rho g \pi r^2 dZ = \rho \pi r^2 dZ a_z \quad (6.5)$$

dando como resultado

$$\partial P/\partial Z = -\rho(a_z + g) \quad (6.6)$$

Como la única aceleración que actúa en la dirección Z, es la debida a la gravedad, se tiene

$$\partial P/\partial Z = -\rho g \quad (6.7)$$

que es la expresión general que relaciona la variación de la presión de un fluido en reposo, que solo depende de la profundidad. Es decir, la presión en cualquier punto que resulta de integrar la ecuación (6.7) es

$$(P - P_r) = -\rho g(Z - Z_r) \quad (6.8)$$

El signo negativo en la ecuación (5.8) establece que mientras Z aumenta, lo que implica una mayor elevación, disminuye la presión.

Con base en lo anterior, como una primera aproximación, se considera al sifón a presión como un recipiente que contiene un fluido estático. (el régimen es estacionario).

Para fluidos incompresibles como es el caso del arrabio y la escoria, la densidad es constante, y la ecuación (6.7), se puede integrar dando la ecuación (6.8).

6.4 Optimización geométrica del Sifón.

Como una primera aproximación se considera al sifón a presión como un sistema de vasos comunicantes, en donde se aplica la ley de Pascal y se cumple la condición de equilibrio de fuerzas.

Se tiene un nivel de arrabio, común a todos los vasos comunicados, que se fija de acuerdo con la velocidad de fusión, dimensiones geométricas de los canales de escoria y arrabio y la diferencia entre las alturas de los rebosaderos de escoria y metal líquido.

A partir de lo anterior, se definen las dimensiones pertinentes:

$$H_{ET} = H_T - H_a \quad 6.9$$

$$H_{EA} = H_A - H_a \quad 6.10$$

$$H_{EE} = H_E - H_a \quad 6.11$$

Si se utilizan solo los valores efectivos de las Alturas para efectuar un balance de presiones, se tiene

$$P_s + P_{EE} = P_{EA} \quad 6.12$$

Donde P_s = Presión del soplo en el crisol que actúa en el sifón, Pa.

P_{EE} = Presión efectiva de la escoria, Pa.

P_{EA} = Presión efectiva del arrabio, Pa.

La ecuación 6.12 establece que el equilibrio de presiones se tiene cuando la columna ferrostática es igual a la suma de la presión de la columna de escoria más la presión interna en el sifón, que actúa sobre la superficie libre del baño de escoria.

Para determinar numéricamente los valores de las presiones, se considera un sistema hidrostático en el sifón y se tiene

$$P_s + H_{EE} \rho_E g = H_{EA} \rho_A g \quad 6.13$$

Donde H_{EE} = altura efectiva de escoria, m.

H_{EA} = altura efectiva de arrabio, m.

ρ_E = densidad de la escoria, Kg/m^3

ρ_A = densidad del arrabio, Kg/m^3

g = aceleración debida a la gravedad, m/s^2 .

Como las alturas efectivas del arrabio y la escoria están relacionadas por

$$H_{EA} = H_{EE} - \Delta H \quad 6.14$$

Donde ΔH = diferencia de altura entre los rebosaderos de escoria y metal fundido.

Sustituyendo la ecuación 6.14 en la ecuación 6.13 y reorganizando, para P_s , se llega a

$$P_s = H_{EE} (\rho_A - \rho_E) g - \Delta H \rho_A g \quad 6.15$$

La ecuación 6.15 determina la presión dentro del sifón (función de la presión de soplado), necesaria para igualar las presiones en los vasos comunicantes y asegura un flujo continuo de arrabio y escoria. El nivel efectivo de hierro, causa las oscilaciones necesarias en los baños de escoria y arrabio, para mantener el régimen de flujo constante. La presión interna del sifón, requerida para el estado estable del flujo, es una función de las densidades de los fluidos y de la diferencia de altura entre los rebosaderos.

6.5 Acciones a Seguir

Con fundamento en las consideraciones anteriores se propuso la siguiente secuencia de acciones:

A.- PRIMERA ETAPA

1.- Levantar la altura del rebosadero de escoria en 100 mm (hasta 1020 mm) y mantener la altura del rebosadero de metal líquido actual de 750 mm.

2.- Desplazar el sifón de $\phi = 900\text{mm}$, 50 mm hacia la salida de arrabio.

Un balance de presiones

$$P_s = (1.02 - 0.25) (6\,800 - 2\,600) (9.81) - (0.27) (6\,800) (9.81)$$

$$P_s = 13\,676 \text{ Pa} \cong 137 \text{ mb} \quad (1 \text{ mb} = 100 \text{ Pa})$$

El volumen disponible para evitar embalses en la piquera y el crisol es de 0.33 m^3 (0.4 m^3 actual).

Por otro lado, existe un aumento en la cantidad de material refractario aplicado, por la disminución del volumen del sifón de $\Delta V = -0.17 \text{ m}^3$ que, considerando una densidad de material refractario de 3.11 g/cm^3 , se traduce en 529 Kg, de concreto colable.

B.- SEGUNDA ETAPA.

- 1.- Bajar el nivel del sífon en 100 mm.
- 2.- Desplazar el sífon de $\phi = 800\text{mm}$, 100 mm hacia la salida de arrabio.

Para esta situación

$$P_s = 17\,834 \text{ Pa} \cong 180 \text{ mb.}$$

La variación en el volumen, con respecto a las dimensiones actuales es de

$$\Delta V = -0.27 \text{ m}^3 \quad (846 \text{ Kg de Refractario})$$

Con las modificaciones geométricas anteriores, se pretendió aumentar la campaña del sífon dos días más (actualmente es de 6 días).

Las Figuras 6.6 y 6.7, muestran las modificaciones dimensionales correspondientes a cada etapa.

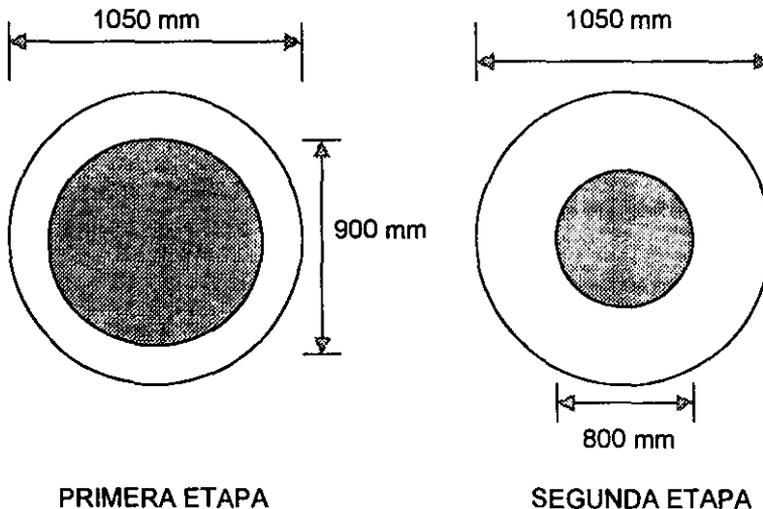


FIGURA 6.6 Vista Superior del sífon con las Modificaciones Dimensionales.

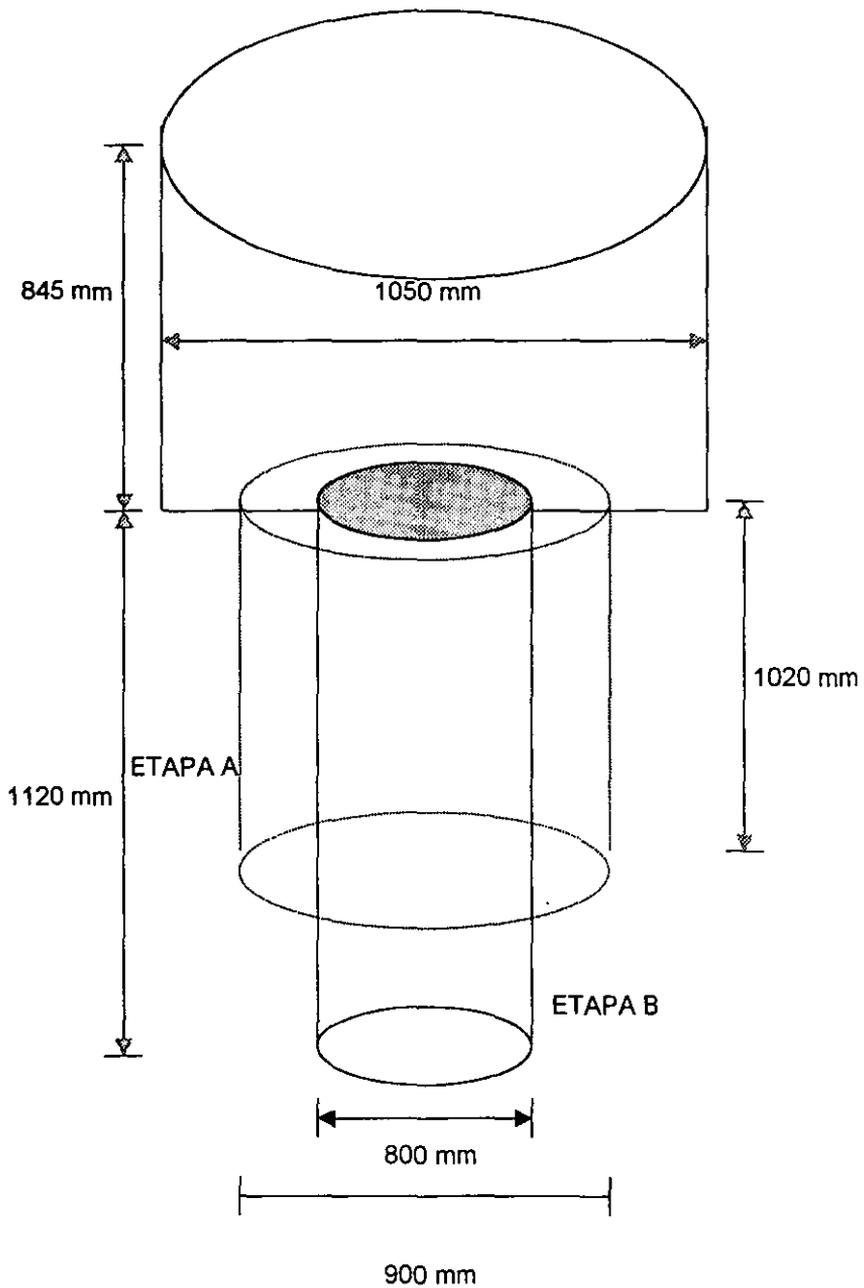


FIGURA 6.7 Vista Lateral del Sifón, variando las dimensiones originales.

CAPÍTULO 7

Minimización del Área de Contacto en la Interfase Refractario-Escoria

Introducción.

La porosidad del monolito es el factor determinante en la penetración de la escoria en el revestimiento y, consecuentemente, en la magnitud de la vida útil del refractario.

La instalación del colable debe ser tal, que se obtenga un producto monolítico tan compacto e impermeable como sea posible. La porosidad aparente requerida, después de calentarlos a los 1500° C, es del orden de 13-16% en volumen.

Dentro de la cantidad de variables que determinan la porosidad, la granulometría y mineralogía del agregado sólido, la práctica de colocación del colable, el curado, el secado y el calentamiento hasta su temperatura de operación (1 600° C). En este estudio se determinó la porosidad aparente y porosidad total, como una medida de la textura del monolito y, como una consecuencia de los factores anteriores.

Por otro lado, se determinó el Módulo de Ruptura en frío (CMOR) y la Resistencia a la Ruptura por Compresión (CCS). Estas propiedades indican la calidad de la estructura del revestimiento y fueron determinados después de calentar a los especímenes de prueba a 1 500° C.

Se efectuó una variación del tiempo de mezclado seco (0, 2 y 4 minutos), tiempo de mezclado húmedo (2, 4 y 6 minutos) y el contenido de agua (6, 9, 12 y 15 % en peso). Es posible que un tiempo excesivo de mezclado tenga efectos contraproducentes, porque puede desgastar a los agregados y generar finos.

Una evaluación más significativa, de la calidad del material instalado, que las anteriores es el Módulo de Ruptura en Caliente (HMOR), que se realiza a 1 500° C, pero no se efectuó en este estudio.

También, se requiere un estudio de las fases formadas mediante difracción de rayos X (XRD) y microscopía de barrido electrónico (SEM).

7.1 Antecedentes.

En general, el desarrollo de la resistencia a altas temperaturas en los refractarios de Al₂O₃-SiC-C, depende de la cantidad de cemento presente (CaO). En el sistema anterior, aparecen algunos puntos eutécticos de bajo punto de fusión

(1 300° -1 400° C), en la porción rica en CaO del diagrama de fases.

Una formulación refractaria colable, usualmente, consiste de agregados de mayor tamaño y una fracción de materiales reactivos ($< 45 \mu\text{m}$). La fase reactiva, llamada fase de unión (liga) es determinante en la refractabilidad de los monolitos. Generalmente, las partículas finas se incluyen en la fase de liga, aunque sean parte del agregado, en este caso, alúmina tabular.

En general, algunos factores que abaten la resistencia de los refractarios a temperaturas elevadas como la formación de líquidos, aunque las fases líquidas ricas en SiO_2 , tienen alta viscosidad.

Por otro lado, la formación de Mullita se sabe que mejora la resistencia a altas temperaturas. La formación de otras fases cristalinas, como anorthita, probablemente, también son favorables, toda vez que disminuyen la proporción de la fase líquida. La anorthita es menos refractaria que la mullita, debido a su menor punto de fusión (1 553° contra 1 850° C).

Cuando se calienta el monolito, el agua es removida y deja porosidades abiertas en la estructura. La porosidad es reducida por el sinterizado y la formación de líquido. La formación de mullita y anorthita, a partir de los óxidos, produce pequeñas expansiones de volumen.

La refractabilidad de los colables de bajo y ultra bajo cemento está influenciada por la relación microsilica/alúmina reactiva, para una determinada fracción total de volumen. Cuando no está presente la microsilica en la fase de liga, no hay formación de fases líquidas a 1 500° C.

7.2 Supuestos

La porosidad abierta y total de un monolito refractario es función de:

- 1.- La cantidad de agua añadida.
- 2.- El tiempo de mezclado.
- 3.- La rapidez de secado y calentamiento.

7.3 Desarrollo Experimental

Las propiedades del refractario colable Metpump HP4, se determinaron de acuerdo con los estándares ASTM respectivos.

7.3.1 Preparación de la probetas para pruebas. (ASTM 830-94)

Se mezcló suficiente refractario colable seco para obtener un exceso del 10%, al menos, de la cantidad requerida, para llenar los moldes, mezclando vigorosamente.

Se utilizó agua potable a temperatura ambiente, en la cantidad predeterminada, medida con una exactitud de 0.1 g. (en la Tabla 6.1 se representan las cantidades utilizadas). Se mezcló la cantidad necesaria, más un 10% de exceso, para colar 10 probetas cúbicas, de 2 pulgadas de arista.

Agua % nominal	6	9	12	15
Agua % Real	5.66	9.09	12	14.89
Refractario (Kg)	4.5	4.5	4.4	4.0
Agua (ml)	270	450	600	700
Peso total (Kg)	4.77	4.95	5.00	4.70
Volumen (l)	1.717	1.897	2.015	1.986

TABLA 7.1 Cantidades utilizadas para colar 10 probetas.

Se hizo un mezclado seco, para homogeneizar el material, puesto que contiene agregados de carburo de silicio de mayor tamaño. Después de agregar el agua, se mezcló durante los tiempos predeterminados.

Se registraron las dimensiones internas de los moldes, para ser utilizados como referencia cuando se determinen los cambios dimensionales durante el curado, secado y calentamiento.

Se llenaron los moldes con un exceso de mezcla refractaria, para poder rasar y darle una textura suave, sin utilizar vibradores mecánicos.

Inmediatamente después de colar las probetas, se cubrieron con un material impermeable, para evitar la evaporación del agua. Se almacenaron a una temperatura de 34° C, durante 24 horas, con suficiente ventilación para retirar el calor generado en la hidratación del colable. Después del curado se colocaron las probetas en un horno a 150°C, luego se siguió la curva de secado-calentamiento, de acuerdo con la Figura 7.1., siguiendo las etapas:

- 1.- Incremento de la temperatura de ambiente hasta 177° C, en una hora.
- 2.- Mantener en 177° C por 10 horas.
- 3.- Elevar de 177° C a 287° C, en dos horas, con una rapidez de 55° C/h.
- 4.- Mantener en 287° C por ocho horas.
- 5.- Elevar de 287° C a 452° C en tres horas.
- 6.- Mantener en 452° C por ocho horas.
- 7.- Elevar de 452° C a 672° C en cuatro horas.
- 8.- Mantener en 672° C durante 10 horas.
- 9.- Continuar con el calentamiento, hasta 1500° C, con una rapidez de 55° C/h.

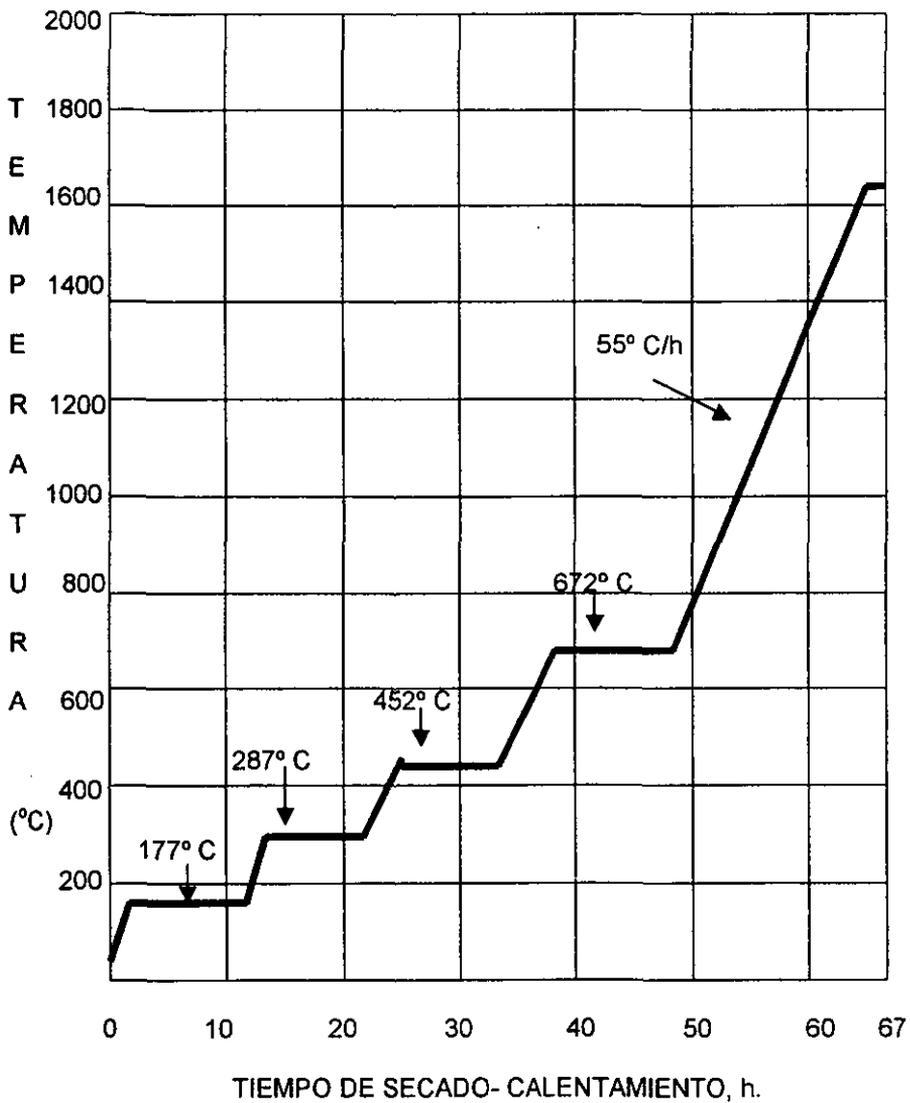


FIGURA 7.1 Gráfica de Secado-Calentamiento para HP4 (NCC).

7.3.2 Determinación de la Porosidad Aparente.(ASTM C-20-92)

La porosidad aparente, la densidad, la absorción de agua son propiedades utilizadas en la evaluación y comparación de la calidad del producto y como un factor en el criterio de selección y uso del material refractario.

Las pruebas realizadas son métodos primarios de estandarización, que son utilizados en el control de calidad, investigación y desarrollo, estableciendo criterios para evaluación de las especificaciones y proporciona datos para diseño.

El supuesto fundamental, inherente en estos métodos, es que el espécimen de prueba no es atacado por el agua, los poros de estos productos se llenan completamente con agua durante el tratamiento a ebullición y que el secado de la pieza saturada, se realiza en forma tal, que no hay pérdida del agua que llena los poros.

Las probetas se secaron a 110° C durante tres horas, para determinar el peso seco del material. Posteriormente se colocaron en un baño de agua para saturar los poros abiertos del espécimen de prueba, hirviendo durante dos horas. Se dejaron 15 horas en este baño, que se enfrió paulatinamente, antes de determinar el peso colgante, aplicando el principio de Arquímedes.

7.3.3 Determinación del Módulo de Ruptura y la Resistencia a la Compresión.

La resistencia en frío de un material refractario es una indicación de la conveniencia para su uso en una construcción refractaria. (no es una medida del rendimiento a temperaturas elevadas).

Debe tenerse atención considerable para comparar los resultados de diferentes determinaciones de la resistencia a la compresión en frío (CCS) o del módulo de ruptura (CMOR). El espécimen se clasifica según su tamaño y forma, la naturaleza de las caras del espécimen, la orientación de esas caras durante el ensayo, la geometría cargante y la velocidad de aplicación de la carga. Todos los anteriores parámetros afectan significativamente los resultados obtenidos.

Se calcula la Resistencia a la Compresión en Frío usando la ecuación

$$S = W/A \qquad 7.1$$

Donde S= Resistencia a la Compresión en Frío, Lbf/pulg², (Mpa)

W = Máxima carga total indicada por la máquina de ensayo Lbf, (N)

A = Promedio de las áreas de la superficie y la base del espécimen,
Perpendicular a la línea de aplicación de la carga, pulg² (mm²)

Para la Determinación del Módulo de Ruptura se utiliza la ecuación

$$\text{MOR} = 3PL/2bd^2$$

7.2

Donde P = Máxima carga aplicada a ruptura. Lbf (N)
L = Distancia entre apoyos, mm.
b = Amplitud o anchura del espécimen, mm
d = Profundidad del espécimen, mm.

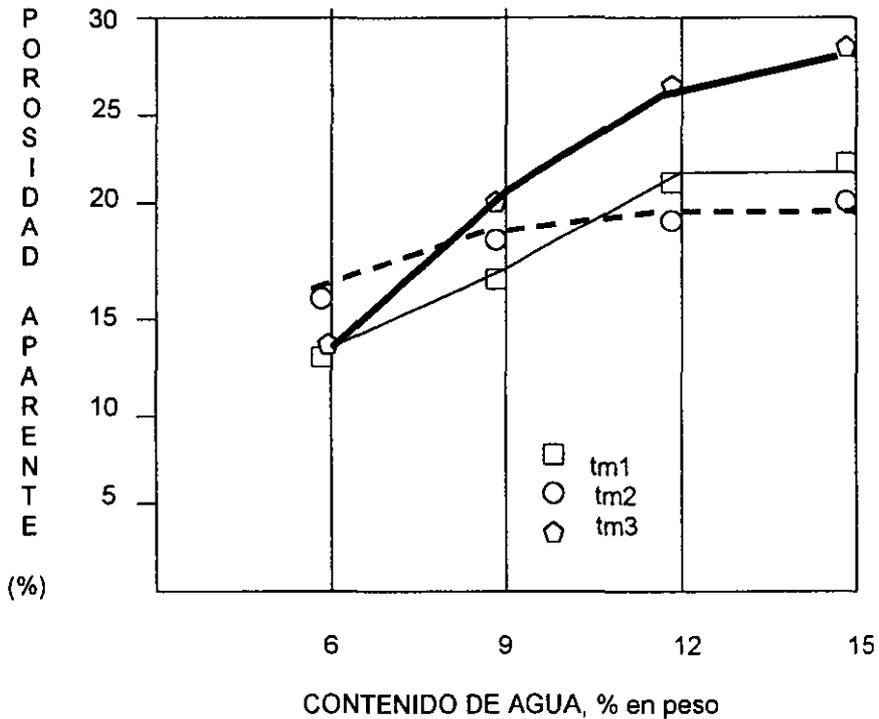


FIGURA 7.2 Efecto del Contenido de Agua sobre la Porosidad.

7.3.4 Análisis por Tamizado Húmedo. (ASTM C-92-95)

Se coloca el material de prueba dentro de un contenedor de aproximadamente 1 dm³ de capacidad y se añade suficiente agua para formar una pasta. Se deja que la disgregación o ablandamiento de los finos proceda durante una hora, después se puede añadir más agua, si es necesario. Posteriormente se transfirió el material de prueba al tamiz más fino (325), de los utilizados en el estudio. Se lavó con chorro de manguera, hasta que el agua que pasa a través del tamiz solo contenía trazas del material. Enseguida, se secó el residuo lavado retenido en el tamiz, hasta volumen constante a 110° C. Lo anterior, requiere usualmente dos horas. Inmediatamente, se transfirió el residuo seco, al tamiz superior, más abierto, del conjunto de tamices utilizado, en el análisis. Luego, se hizo el análisis diferencial y acumulado, con una precisión de pesado de 0.1% más cercano. Se utilizaron muestras de 250 g aproximado al 0.1g más cercano.

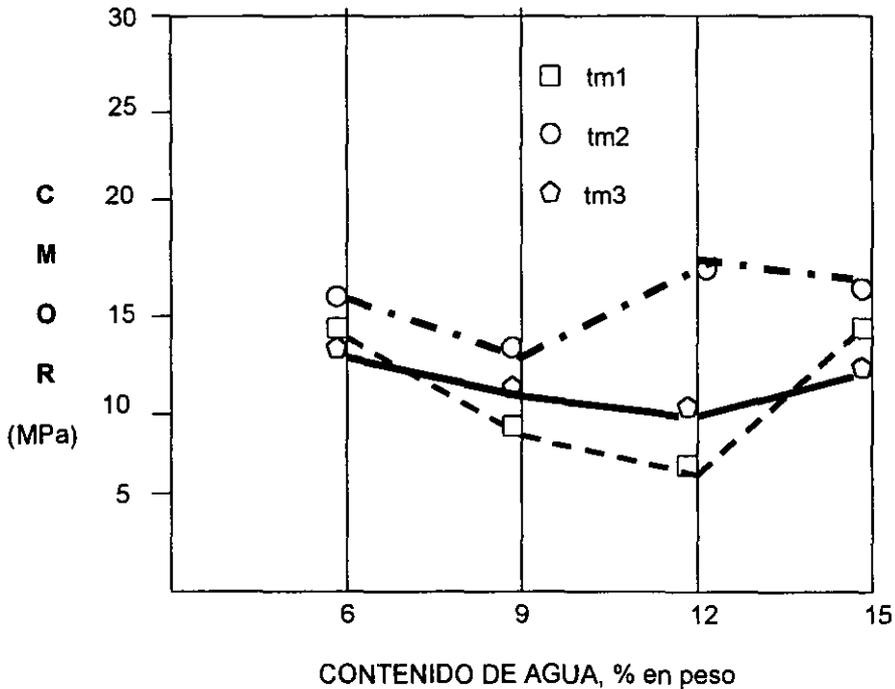


FIGURA 7.3 Efecto del Contenido Agua sobre el CMOR.

7.4 Análisis de Datos

Los resultados que se encuentran en la Figura 7.2, muestran una variación creciente de la porosidad, a medida que se aumenta el contenido de agua.

Parece que un tiempo de mezclado intermedio (2 minutos de mezclado seco y 4 minutos de mezclado húmedo) y un contenido de agua entre 9 y 12 % en peso, son las condiciones más favorables, para la textura del monolito.

No es muy definido el efecto que tiene la cantidad de agua sobre el Módulo de Ruptura en Frío (CMOR), aunque en forma cualitativa, se aprecia un descenso en este valor a medida que aumenta el contenido de agua, representativo de la resistencia de la estructura del material refractario. (ver Figura 7.3)

En la Figura 7.4, se puede apreciar un efecto considerable, del contenido de agua sobre la Resistencia a la ruptura por Compresión (CCS).

Los resultados del análisis por tamizado, no mostraron una formación significativa de finos, por desgaste de las partículas de agregados, durante el tiempo total de mezclado.

7.5 Conclusiones

Para conseguir contrarrestar el efecto de la escoria sobre el desgaste del material refractario del sifón a presión, parece que el contenido de agua óptimo esta en el intervalo de 6 y 8 % en peso, para que el monolito tenga una porosidad abierta del 13-15 % en volumen, disminuyendo el área de contacto en la interfase refractario-escoria.

Por otro lado la estructura del monolito también es afectada por el contenido de agua, pues los valores del Módulo de Ruptura en Frío (CMOR) y la resistencia a la Ruptura por Compresión (CCS), se ven drásticamente disminuidos a partir de su valor de 14 Mpa a cero contenido de agua, lo que es una medida del deterioro de la resistencia estructural del material colado.

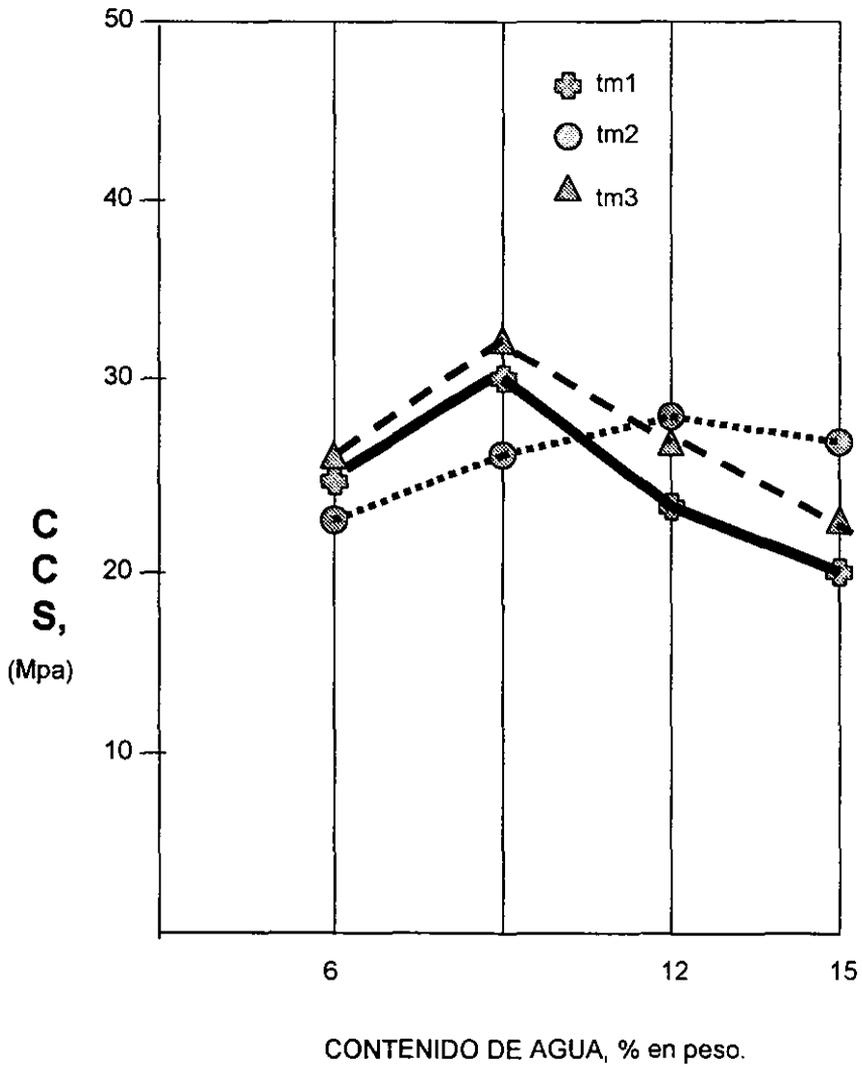


FIGURA 7.4 Efecto del Contenido de Agua en la CCS.

CAPÍTULO 8

Conclusiones, Recomendaciones y Propuestas

8.1 Conclusiones

Partiendo de que el acero se utiliza para conformar productos que no tienen alto valor agregado y que el mercado exige costos bajos de producción, se requieren alternativas para mejorar los procesos industriales, que requieran una inversión mínima.

Los resultados del análisis cualitativo del comportamiento hidrodinámico de los fluidos en el sifón, indican que el flujo es turbulento en el estado estable. Aún cuando se presentan turbulencias, el desgaste del revestimiento refractario parece ser de naturaleza termoquímica, producido por el ataque químico de la escoria sobre el monolito. Para hacer un análisis cuantitativo se requiere de la determinación de los campos de las velocidades de flujo y turbulencias, fuera del contexto de este trabajo.

A partir del análisis de los perfiles de desgaste del revestimiento refractario, que es crítico en la zona en contacto con la escoria, se establece que es un mecanismo termoquímico el causante del deterioro, complementado por una erosión mecánica.

Cuando las partículas de los agregados quedan debilitadas y a la deriva, debido a la disolución de las ligas por la escoria, el movimiento del fluido complementa el desgaste, mediante un mecanismo de desgaste mecánico.

La primera aproximación para contrarrestar el ataque de la escoria es la disminución del área de contacto de la interfase escoria-refractario, mediante una optimización geométrica y la disminución de la porosidad del monolito.

La optimización dimensional de la geometría del sifón a presión, aumentando el espesor de la pared entre la salida de escoria y el cuerpo del sifón, produce un aumento del 33% de la campaña actual del revestimiento, que significan 3 500 toneladas más de arrabio líquido. Aunque se requiere un aumento del volumen de monolito refractario aplicado, éste no es significativo con respecto al aumento en la producción de metal líquido. El costo de la tonelada de arrabio producido se reduce en 0.5 dólar con estos cambios.

La porosidad de un 13-14% en volumen, utilizando entre 6-8% en peso de agua, la rapidez y el tiempo de secado de 4-6 minutos así como un secado de acuerdo a las recomendaciones del proveedor de refractario, coadyuva a lograr un aumento de un 30% más de la campaña del sifón.

8.2 Recomendaciones

Se propone una cantidad de agua entre 6 y 9 % en peso, y respetar las recomendaciones de rapidez de secado-calentamiento del proveedor y un tiempo de mezclado entre 4 y 6 minutos.

Se sugiere que el secado y calentamiento, hasta 700° C, se efectúe con un calentador eléctrico, para tener un mayor control sobre la rapidez de enfriamiento. El calentamiento hasta la temperatura de operación, 1 400° C, se puede realizar con el quemador actual de gas natural.

No se debe omitir la capacitación del personal involucrado en la instalación del refractario colable y la actualización del equipo adecuado para realizar esta práctica.

Se requiere una mayor atención sobre los diferentes factores involucrados en el proceso del horno Oxícúpula, por parte de los elementos responsables del aseguramiento de la calidad.

8.3 Propuestas

Para fundamentar una solución radical al desgaste de la interfase refractario-escoria, se requiere un estudio ulterior que puede involucrar:

- a) La propuesta de una formulación refractaria que pueda formar materiales y fases de alto punto de fusión (mayor que 1 800° C) como Mullita y espinel de magnesio y/o Cromato de Magnesio, teniendo muy presente la capacidad del material para acomodar las variaciones volumétricas durante la formación de compuestos y fases.
- b) Otra ruta sería el cambio de agentes de liga que no sean hidráulicos, como los actuales, con mayor resistencia química a la escoria y que no tengan grandes cambios volumétricos durante su formación, para reducir la porosidad.
- c) Toda vez que la capa protectora solidificada por enfriamiento (skull), es un aislante térmico natural, constituida por escoria; es posible que se construya un sifón con revestimiento de escoria (con un espesor de 20-30 cm), si se tiene el aglutinante o agente de liga adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Aase M., "Substitution of Reactive Alumina With Microsilica on Low Cement and Ultra Low cement Castables, UNITECR '97, Vol I, pp 91-100, (1997).
- 2.- Ba Shir M., "Role of Aggregates on Properties and Performance of ULCC Based Products", UNITECR '97, Vol II, pp 657-674, (1997).
- 3.- Barreto J., "Physical and Mathematical Modelling of Steel Flow and heat Transfer in Tundishes Under non isothermal and non Adiabatic Conditions", ISIJ International, Vol 36, No 5, pp 543-552, (1996).
- 4.- Bobylev S., "Working Out an Ecologically Clean Metallurgical Laddles Monolithic Pouring Refractory Lining Drying Technology", UNITECR '97, Vol III, pp 37-40, (1997).
- 5.- Bustos J. J., "A. P. Green de México S. A., XIII Encuentro Nacional de Siderurgia, Puebla, Méx. , 1996.
- 6.- Damle Chandrashekar., "A criterion for Water Modelling of Non isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, vol 36, No 6, pp 681-689, 1996.
- 7.- Eade R., "More Gunning and Slag Splashing", New Steel, October, (1997).
- 8.- Formo A. D.; Segadaes A., "Effect of Silica fume Additions on the Hydration Behaviour of Calcium Aluminates", UNITECR 97, Vol III, pp 1305-1314, (1997)
- 9.- Franzini, J., Mecánica de Fluidos: con Aplicaciones en Ingeniería, McGraw-Hill, Novena edición, España, 1999.
- 10.- Gutiérrez C. "Estudio microestructural de Formación de Espinela In situ. Universidad de Carabobo, Venezuela, 1996.
- 11.- Harris D., "Water Modelling, a Viable Production Tool, Continuous Casting, Vol 1, Chap 2, pp 179-112, ISS-AIME, 1983.
- 12.- Heaslip L., Continuous Casting, Vol 2, Chap 2, ISS-AIME, 1983.
- 13.- Jaramillo D. Modelación Física Anisotrópica del Fenómeno de Intermezclado en el Distribuidor", XX Simposio Nacional de Siderurgia, Morelia, Mex., 1999.
- 14.- Kresta S., "Prediction of Three Dimensional Turbulent Flow in Stirred Tank, Aiche Journal, vol 37, No 3, pp 450-460, (1996).

- 15.- KÜTTNER-GHW, "Material Descriptivo de Entrenamiento", SICARTSA, (1996).
- 16.- Kyu Hang., "In Situ Spinel Bond Formation Expansi3n/Contraction During Firing, UNITECR '97, Vol III, pp 1575-1580, (1997).
- 17.- Mazundar D., "The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Tundish System, ISIJ International, Vol 39, No 6, pp 524-547, (1999).
- 18.- Oprea G., "Rheology Studies on Bindary System for Self Flow Refractory Castables", UNITECR 97, Vol II, pp 1120-1132, (1997).
- 19.- Palafox R., "Sistema Controlador de Flujo de Fluidos en un Distribuidor de M3ltiple Salida para Boom", XX Simposio Nacional de Siderurgia, Mich, M3x., 1999.
- 20.- Sahai Y., "Criteria for Water Modeling of Melt Flow and Inclusion removal in Continuous Casting Tundishes", ISIJ International, Vol 36, No 9, pp 1166-1173, (1996).
- 21.- Sen Y, "Deffect in Castables by vivration Means", UNITECR '97, pp 1297-1301, (1997).
- 22.- Sereno G. E., "Unteracci3n Escoria-Refractario en Ollas de Refinaci3n Secundaria", Refractarios mexicanos, 1996.
- 23.- Stahl Und Eisen, XXXIX International Colloquium on Refractories, Eurogress Aichen, September, 1996.
- 24.- The AISE Steel Foundation, "The Making, Shaping and Treating of Steel, 15th Edition, USA, (1999).
- 25.--The Iron and Steel Society, "Pneumatic Steelmaking, Vol Three, USA, 1996.
- 26.- Verlag Stahlesisen, Slag Atlas, Germany, 1995.
- 27.- Yoshimoto T., "Effects of Adition of MgO on Al₂O₃-SiC-C Castables, UNITECR '97, Vol I, pp 5-14, (1997).
- 28.- Zhang T. ; H3bnner H. "Effect of Hidratable Alumina Binder on the Ceep Behaviour of Cement Free High Alumina Refrdactory Castables, UNITECR ' 97, Vol III, pp 1337-1346, (1997).
- 29.- Zhao J., "The Properties of SiC-Based Refractories and Their Application in Blast Furnace", UNITECR '97, Vol II, pp 705-720, (1997).