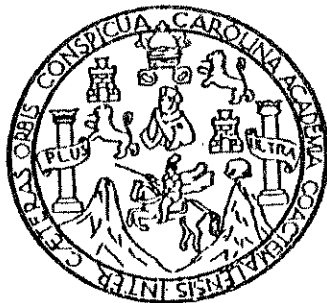


**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA.**



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CLASIFICACIÓN Y UTILIZACIÓN DE MATERIALES REFRACTARIOS
EN LA INDUSTRIA DEL ACERO**

TESIS

**PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

POR

LUBDING CONRADO MARTÍNEZ LEAL.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 1998

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Biblioteca Central

08
T(4148)
C.3

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de tesis titulado:

**CLASIFICACIÓN Y UTILIZACIÓN DE
MATERIALES REFRACTARIOS EN
LA INDUSTRIA DEL ACERO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil de esta Facultad, con fecha 22 de mayo de 1,997.



Lubding Contado Martínez Leal

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.



FACULTAD DE INGENIERÍA

MIEMBROS DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	ING. HERBERT RENÉ MIRANDA BARRIOS.
VOCAL PRIMERO:	ING. MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ GUERRA
VOCAL SEGUNDO:	ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLÓRZANO.
VOCAL TERCERO:	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRÍA MÉNDEZ.
VOCAL CUARTO:	BR. VÍCTOR RAFAEL LOBOS ALDANA.
VOCAL QUINTO:	BR. WAGNER GUSTAVO LÓPEZ CACERES
SECRETARIO:	INGA GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO.

DECANO	ING. JULIO ISMAEL GONZÁLEZ PODSZUECK.
EXAMINADOR	ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ
EXAMINADOR	ING. RAFAEL ENRIQUE MORALES OCHOA.
EXAMINADOR	ING. JOSÉ GABRIEL ORDÓÑEZ MORALES.
SECRETARIO.	ING. FRANCISCO JAVIER GONZÁLEZ LÓPEZ



Guatemala, 14 de octubre de 1,997

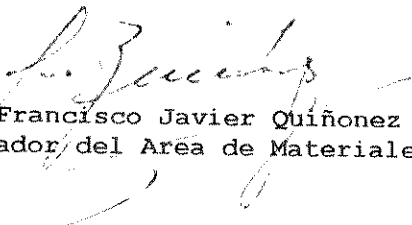
Ing. Jack Douglas Ibarra.
Director de la Escuela
de Ingeniería Civil.
Facultad de Ingeniería.
Universidad de San Carlos de Guatemala.

Señor Director:

Informo a usted que he revisado el trabajo de tesis titulado CLASIFICACION Y UTILIZACION DE MATERIALES REFRACTARIOS EN LA INDUSTRIA DEL ACERO, realizado por el estudiante universitario LUBDING CONRADO MARTINEZ LEAL, quien contó con la asesoría de su servidor.

El trabajo cumple con los objetivos para los cuales fué planteado y aporta valiosa información para la Ingeniería Nacional, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,
"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Francisco Javier Quiñonez
Coordinador del Area de Materiales

FJQ/jma



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica
Regional de Post-grado de Ingeniería
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor y Coordinador del Area de Materiales Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz del trabajo de tesis del estudiante Lubding Conrado Martínez Leal, titulado CLASIFICACION Y UTILIZACION DE MATERIALES REFRACTARIOS EN LA INDUSTRIA DEL ACERO, da por este medio su aprobación a dicha tesis.


Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano



Guatemala, noviembre de 1, 997.

JDIS/bbdeb.



FACULTAD DE INGENIERIA

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica y Regional de Post-grado de Ingeniería Sanitaria.

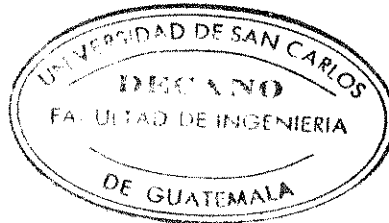
Ciudad Universitaria, zona 12
Guatemala, Centroamérica

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Ing. Jack Douglas Ibarra Solórzano, al trabajo de tesis CLASIFICACION Y UTILIZACION DE MATERIALES REFRACTARIOS EN LA INDUSTRIA DEL ACERO, del estudiante Lubding Conrado Martínez Leal, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:

Ing. Herbert René Miranda Barrios

DECANO



Guatemala, noviembre de 1,997

/bbdeb.

AGRADECIMIENTO

A DIOS, mi creador y guía.

Al Ing. Juan Carlos García Ovando, por su importante ayuda en la elaboración de la presente tesis.

Al Ing. Francisco Javier González López, por su asesoría y revisión del presente trabajo de tesis.

A la empresa Aceros de Guatemala, S. A., por su valiosa colaboración.

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre: Conrado Amilcar Martínez Guerra.

Mi madre: Reyna Leal de Martínez.

Mis hermanos: Roxana Frinee Martínez Leal
Amilcar Rolando Martínez Leal.

Mis tíos: John E. Nauss
Esperanza Leal Nauss.

Mi abuelita: María del Socorro Guerra vda. de Martínez.

Mi novia: Evelyn Maribel Ortíz Aguilar.

Mis primos en general.

ÍNDICE GENERAL

Páginas

GLOSARIO	I
INTRODUCCIÓN.	II
OBJETIVOS.	III
CAPÍTULO I	
SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	
1.1. COMPROBACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	1
1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	3
1.2.1. DE ACUERDO A SU COMPORTAMIENTO QUÍMICO	4
1.2.1.1. REFRACTARIOS ÁCIDOS	4
1.2.1.2. REFRACTARIOS BÁSICOS	4
1.2.1.3. REFRACTARIOS NEUTROS	4
1.2.2. DE ACUERDO A SU ORIGEN y/o CONSTITUCIÓN MINERALÓGICA	5
1.2.2.1. GRUPO DE LA SÍLICE	5
1.2.2.2. GRUPO DE LA ARCILLA	7
1.2.2.3. GRUPO DE ALTA ALUMINA	7
1.2.2.4. GRUPO DE LOS BÁSICOS	8
1.2.2.5. GRUPO DE CARBÓN	10
1.2.2.6. GRUPO DE LOS AISLANTES	11
CAPÍTULO II	
PREPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	
2.1. PREPARACIÓN DE LOS REFRACTARIOS.	12
2.1.1. MATERIAS PRIMAS	12
2.1.2. PROCESOS	13
2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS REFRACTARIOS Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES DE SERVICIO.	15
2.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA	17
2.2.2. REFRACTARIEDAD	17
2.2.3. CHOQUE TÉRMICO	21
2.2.4. RESISTENCIA	23
2.2.5. ABRASIÓN	25
2.2.6. EXPANSIÓN TÉRMICA	25
2.2.7. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR	27
CAPÍTULO III	
ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.	
3.1. ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.	31
3.2. MECANISMOS DE FRAGUADO DE ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.	31
3.2.1. FRAGUADO EN CALIENTE O LIGA CERÁMICA	32
3.2.2. FRAGUADO AL AIRE	33
3.2.3. FRAGUADO QUÍMICO	33
3.2.4. FRAGUADO HIDRÁULICO	33

3.3. APLICACIÓN DE ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.	34
3.3.1. MORTEROS REFRACTARIOS	34
3.3.1.1. MORTEROS DE FRAGUADO EN CALIENTE	35
3.3.1.2. MORTEROS DE FRAGUADO AL AIRE	35
3.3.2. CONCRETOS REFRACTARIOS	36
3.3.2.1. INSTRUCCIONES GENERALES PARA LA APLICACIÓN DE CONCRETOS REFRACTARIOS DE FRAGUADO HIDRÁULICO	37
3.3.2.2. CURVA DE CALENTAMIENTO PARA CONCRETOS AISLANTES Y DENSOS NORMALES	43
3.3.3. APISONABLES	44
3.3.3.1. APLICACIÓN DE LOS REFRACTARIOS APISONABLES	45
3.3.4. PLÁSTICOS REFRACTARIOS	45
3.3.4.1. APLICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS REFRACTARIOS	46
3.3.5. PROYECTABLES	48

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN, MANEJO Y PREPARACIÓN DE MATERIALES REFRACTARIOS.

4.1. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	50
4.1.1. ALTO HORNO	51
4.1.2. REGENERADORES	52
4.1.3. CANALÓN	52
4.1.4. TRANSPORTE DE ARRABIO LÍQUIDO	54
4.1.5. CONVERTIDOR BÁSICO AL OXÍGENO	55
4.1.5.1. MATERIALES REFRACTARIOS	55
4.1.5.2. REPARACIÓN POR PROYECCIÓN	56
4.1.5.3. MANTENIMIENTO DEL REVESTIMIENTO	57
4.1.5.4. TÉCNICAS DE OPERACIÓN	57
4.1.6. HORNO ELÉCTRICO DE ARCO	58
4.1.7. RÉCIPIENTE DE DEGASIFICACIÓN	58
4.1.8. CUCHARAS	59
4.1.9. COLADA CONTINUA	61
4.1.10. HORNO DE FOSO Y HORNOS DE RECALENTAMIENTO	61
4.2. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.	62
4.2.1. MATERIALES EN FORMA DETERMINADA	62
4.2.2. MANEJO Y ALMACENAJE	63
4.2.3. FORMA ESTÁNDAR	63

CONCLUSIONES

IV

RECOMENDACIONES

V

REFERENCIAS

VI

BIBLIOGRAFIA

VII

ANEXOS

VIII

GLOSARIO

1. Alto Horno:
Es un tipo de horno para la obtención de arrabio, partiendo del mineral de hierro.
2. ARRABIO:
Hierro fundido relativamente impuro hecho en un alto horno.
3. BASICIDAD:
Escala que indica qué tan básico es un ladrillo de acuerdo a su composición química.
4. CUCCHARAS: (Horno Cuchara).
Es un recipiente para sostener, transportar, o verter materiales fundidos.
5. DEFLOCULACIÓN:
Formación de una suspensión estable de arcilla muy fina o partículas de silimanita, generalmente por medio de un electrolito alcalino.
6. ESCORIA:
Es una sustancia formada por la fusión de fúndentes con la variedad de minerales en operaciones de fundición.

Es el medio por el cual las impurezas son separadas de muchos metales. Normalmente es un producto de desperdicio.
7. EXTRUSIÓN:
Forzar mezclas plásticas, como arcilla, a través de dados, por presión.
8. GUNITAJE:
Procedimiento de aplicación de refractarios proyectables, utilizando una pistola neumática.
9. REGENERADORES:
Es un intercambiador cíclico de calor, que alternativamente recibe calor de los gases producto de la combustión y los transfiere al aire o gas antes de la combustión.
7. SILIMANITA:
Es un mineral $Al_2O_3+SiO_2$.

8. SINTERIZADO:

Es darles cohesión a partículas individuales por medio de calentamiento a una temperatura menor que la de fusión completa.

II

INTRODUCCIÓN

Los materiales refractarios son materiales de construcción que tienen como característica principal su resistencia a elevadas temperaturas. Esta resistencia está dada por algunos componentes de tales materiales, tal es el caso de la Alúmina, el Sílice, la Magnesita, etc. En Guatemala se ha incrementado el uso de los materiales refractarios en diversos tipos de industria. Este incremento es debido a las necesidades de someter ciertas materias primas a procesos de transformación, como por ejemplo, laminación, forja, tratamientos térmicos, etc. En la actualidad se han mejorado los sistemas de construcción de hornos capaces de resistir temperaturas muy altas.

En este trabajo se describen las tendencias y desarrollos recientes, principalmente desde el punto de vista de las técnicas de utilización de los refractarios. Esta tendencia ha sido posible no sólo gracias al desarrollo de cada material refractario, sino que también por la integración de diversas técnicas relacionadas con el diseño y la operación de los hornos y con la fabricación y evaluación de los refractarios. Sin embargo, se prevé que la industria siderúrgica enfrentará situaciones difíciles, la primera de las cuales será el aumento de los costos de energía. Desde el punto de vista de los refractarios, contra este problema es necesario tomar las siguientes medidas:

1. Sustitución de las materias primas para refractarios.
2. Ampliación del área de utilización de los refractarios monolíticos.
3. Activa aceptación de los refractarios no quemados.

El segundo problema es la escasez de materias primas de alta calidad. Es por lo tanto importante desarrollar materiales o técnicas sustitutivas para utilizar materias primas de baja calidad para la fabricación de los refractarios de alta alúmina o de arcilla refractaria, que se han utilizado para colada continua y sueltas. El tercer problema lo constituye las exigencias desde el punto de vista de la fabricación de acero. La demanda de acero de mejor calidad y la necesidad de reducir los costos de producción aumentarán, haciendo necesarios nuevos procesos siderúrgicos.

Para superar estos problemas, los fabricantes y usuarios de refractarios debieran, primero que nada, cooperar en el aspecto de la disminución del consumo total de refractarios y de sus costos.

En este trabajo, se presenta una metodología de selección, clasificación y aplicación de los diferentes tipos de materiales refractarios en la industria del acero, así como también las diferentes formas de instalación; ya que un conocimiento razonable de las características, especificaciones y del servicio que serán sometidos los materiales refractarios permite un mejor aprovechamiento del equipo y un ahorro considerable de energía.

OBJETIVOS

1. Elaborar un método práctico para la selección, clasificación y aplicación de los diferentes tipos de materiales refractarios, en el caso más adecuado para la necesidad que corresponda en la industria del hierro y el acero.
2. Enunciar todas las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los materiales refractarios, así como sus caracteres y composición.
3. Describir los materiales refractarios según sus propiedades y características.
4. Conocer las mejores opciones de instalación, para una mejor aplicación de los materiales refractarios.

CAPÍTULO I

SELECCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS

1.1. COMPROBACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS¹.

Los materiales refractarios se pueden evaluar y seleccionar ampliamente en tres categorías:

- a) Pruebas físicas y químicas en un refractario sin usar.
- b) Pruebas en el refractario en servicio de ambiente simulado.
- c) Pruebas en el refractario en condiciones de servicio real.

a) PRUEBAS FÍSICAS Y QUÍMICAS EN UN REFRACTARIO SIN USAR.

En el capítulo siguiente se discutirán las pruebas para los distintos materiales refractarios, tales como, resistencia a la deformación bajo cargas, porosidad, permeabilidad, resistencia a la abrasión, expansión térmica y características de la conductividad térmica.

En años recientes los materiales refractarios han estado bajo pruebas más realistas, tales pruebas forman la base para un control de calidad del fabricante y/o en la siderúrgica.

b) PRUEBAS DEL REFRACTARIO EN SERVICIO SIMULADO.

Se ha inventado simular condiciones de servicio en un gran número de pruebas, debido a la gran variedad de mecanismos complejos en el uso de los refractarios. Un ejemplo simple en el fracaso de los refractarios, es someterlo en ambiente gaseoso especial, tal como el monóxido de carbono. El monóxido de carbono ocurre cuando se desintegra el carbono, depositando un gas alrededor de concentraciones de hierro en el refractario.

Las concentraciones de hierro catalizan esta reacción, produciendo altas concentraciones de carbón y el crecimiento en lugares del hierro, lo cual puede

¹ Según referencia No. 1

fracturar la parte de atrás de la cara caliente del refractario (la reacción anterior es altamente sensitiva a la temperatura). Las pruebas simuladas han sido diseñadas para predecir la resistencia a la desintegración del monóxido de carbono, en todo tipo de refractario, calentando el refractario por largos periodos en gas CO. Aunque los refractarios sin hierro no serán afectados por esta reacción, la remoción total del hierro de la mayor parte de la materia prima natural no es económicamente práctica. Una solución mas práctica incluye el manejo de materia prima conveniente en procesos para remover hierro ternario y minimizar la contaminación de hierro de pulverización. El control del hierro en los agregados quemados, en materiales monolíticos o productos quemados, han guiado al desarrollo de refractarios especiales de baja cantidad de hierro para revestimientos de hornos. El mejoramiento en los equipos de pulverización y separación magnética, se han usado para minimizar la contaminación de los refractarios. Ejemplos de pruebas de servicio simulado incluyen, la exposición de álcalis, hidratación, sulfuración u oxidación.

Muchas otras pruebas más complejas existen, cuando varias características mecánicas pueden ser simuladas a la vez. Por ejemplo, muestras de refractarios pueden ser expuestas a la escoria en un horno rotatorio con un quemador de oxígeno-gas. En esta prueba, el refractario reacciona químicamente con la escoria fundida, erosión por escoria, ciclo térmico y otros efectos pueden ser medidos varias veces, además las temperaturas y atmósferas. Los resultados obtenidos se relacionan con la composición química de los refractarios y con sus propiedades físicas. La erosión más baja por escoria, con una basicidad de 2.0 se obtiene de ladrillos que contienen una concentración más alta de MgO, pero además la porosidad más baja del ladrillo también tiene un efecto significativo en disminuir el ataque de la escoria. Pruebas de este tipo son muy complejas y se debe tener mucho cuidado al interpretar los resultados, en relación a los verdaderos ambientes de servicio.

c) PRUEBA DEL REFRACTARIO EN CONDICIONES REALES.

Para mejorar la vida de los materiales refractarios, se deben conocer los mecanismos por los cuales se consumen totalmente los refractarios. Un considerable y continuo esfuerzo se ha hecho para analizar completamente a los refractarios en uso, e integrar esta información para un mejoramiento en los productos. En su forma más simple, los refractarios usados se han examinado por análisis químico y por métodos microscópicos.

En los ladrillos de Magnesita sin alquitrán, CaO, FeO y SiO₂ se penetra la escoria al ladrillo a una profundidad de 25 a 75 mm y se altera la microestructura y las propiedades refractarias. Este tipo de refractario no se puede llevar uniformemente debido al resquebrajamiento de su estructura, también en la corrosión de la cara caliente y la erosión. En un ladrillo similar de Magnesita con alquitrán se ha retenido el carbono y la penetración se ha restringido a una sola área debido a la presencia del carbono en el ladrillo. El carbono minimiza y causa la formación de una capa densa impenetrable debido al MgO (volatilización).

Se pueden usar muchas técnicas más sofisticadas para las pruebas de refractarios usados, incluso radiografías, pruebas microscópicas del electrón o técnicas de sonda-electrón. La concentración de impurezas en el área del grano típico de material refractario, ayuda a explicar porqué cantidades pequeñas de tales impurezas a menudo producen efectos significantes perjudiciales, incluso la pérdida significativa de refractabilidad.

1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS².

Los materiales refractarios pueden ser clasificados en diferentes formas, ninguna de las cuales es completamente satisfactoria; sin embargo, las clasificaciones más aceptadas son: DE ACUERDO A SU COMPORTAMIENTO QUÍMICO Y DE ACUERDO A SU ORIGEN Y/O CONSTITUCIÓN MINERALÓGICA.

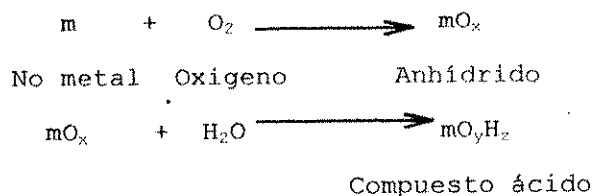
² Según referencia No.2

1.2.1. DE ACUERDO A SU COMPORTAMIENTO QUÍMICO.

Desde el punto de vista químico, los materiales refractarios pueden ser clasificados en: ÁCIDOS, BÁSICOS Y NEUTROS.

1.2.1.1. REFRACTARIOS ÁCIDOS.

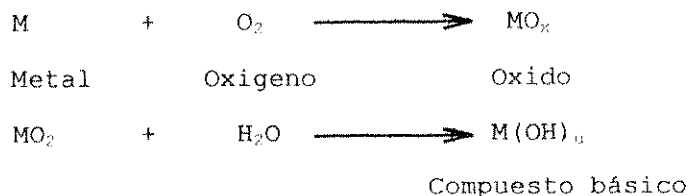
El compuesto ácido es:



Los refractarios ácidos, contienen cantidades substanciales de sílice (SiO₂) sin combinar, la cual puede reaccionar químicamente, en presencia de temperatura, con escorias, humos, gases o refractarios de naturaleza básica. Los refractarios ácidos más comunes son obviamente los de sílice y los de arcilla, también llamados silico-aluminosos.

1.2.1.2. REFRACTARIOS BÁSICOS.

El compuesto básico es:



Los refractarios básicos, tienen como sus principales componentes Cal (CaO) y Magnesita (MgO) y pueden reaccionar químicamente en presencia de temperatura con escoria, fúndentes o refractarios de naturaleza ácida. Los refractarios básicos más comunes son los de Magnesita, Dolomita, Magnesita-Cromo, Cromo-Magnesita y Forsterita.

1.2.1.3. REFRACTARIOS NEUTROS.

Los refractarios neutros, que también se les llama "anfóteros", son aquéllos que no son muy básicos ni muy ácidos y que dependiendo de las condiciones, se

pueden comportar como ácido o básico. Los refractarios neutros más comunes son los de Alta Alúmina, Mulita, Carbón de Silicio, Grafito y Cromo. Aunque este último en presencia de escorias ácidas, tiene un comportamiento básico.

Teóricamente, los refractarios ácidos no deben ser usados en contacto con escorias, gases y humos de naturaleza básica; a la vez que los refractarios básicos, no deben ser usados bajo condiciones ácidas. Pero en la práctica, estas reglas no siempre son seguidas, de aquí que la clasificación de los materiales refractarios de acuerdo a su comportamiento químico, es de poco valor como guía para las posibilidades actuales de servicio.

1.2.2. DE ACUERDO A SU ORIGEN Y/O CONSTITUCIÓN MINERALÓGICA.

La clasificación desde el punto de vista mineralógico, ofrece las mejores posibilidades para un claro entendimiento del origen y naturaleza de los materiales refractarios.

Desde el punto de vista mineralógico, la clasificación de los materiales refractarios puede hacerse ya sea tomando en cuenta las materias primas con que están fabricados o también con respecto al mineral predominante después de su fabricación; en cualquier caso, los materiales refractarios se pueden clasificar en los siguientes grupos:

SÍLICE
ARCILLA
ALTA ALUMINA
BÁSICOS
CARBON Y
AISLANTE.

1.2.2.1. GRUPO DE LA SÍLICE³.

Los refractarios de este grupo, contienen principalmente el dióxido de silicio (SiO_2), llamado comúnmente "Sílice", en cualquiera de sus tres formas cristalinas, tales como Cuarzo, Tridimita, Cristobalita.

³ Según referencia No.2

Las materias primas empleadas para la manufactura de los refractarios de sílice, oscilan entre los 96% y los 98% de SiO₂, siendo el Cuarzo el mineral más comúnmente usado.

Existen comercialmente dos (2) clases de refractarios de sílice, mismos que se muestran incluyendo su análisis químico típico en la tabla 1-1.

Lo más relevante en los ladrillos de sílice, sucede durante su quemado, el cual se efectúa entre los 1,450-1,500°C, pues es en este proceso, donde toma lugar la transformación del Cuarzo cambiando su estructura cristalina varias veces y estos cambios van acompañados de expansiones repentinas.

El cambio más pronunciado se presenta cuando la temperatura llega a los 575°C (1,063°F). En este punto, los cristales de Cuarzo pasan de la forma Alfa a la Beta con una rápida expansión. Durante el enfriamiento, la situación se invierte; cuando la temperatura del horno llega a los 575°C (1,063°F), los cristales de Cuarzo pasan de la forma Beta a la Alfa, con una rápida contracción. La inversión o transformación del Cuarzo es una de las razones, por las cuales es esencial contar con un ciclo lento, de calentamiento y enfriamiento, pues en caso contrario, la formación de grietas es inminente.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO DE REFRACTARIOS DE SÍLICE⁴

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)								
TIPO DE REFRACTARIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Alcális
<u>GRUPO SÍLICE</u>								
CONVENCIONAL	95.5-96.5	0.6-1.2	0.1-0.2	2.0-3.5	-	0.4-0.7	0.1	0.1-0.4
CALIDAD SUPERIOR	96.4-97.4	0.1-0.4	0.1-0.2	2.2-3.4	-	0.3-2.1	0.1	0.1
ELECTRO FUNDIDO	99.6-99.8	0.1-0.2	-	0.0-0.2	-	0.0-0.2	-	0.1-0.2

TABLA 1-1

⁴ Según referencia No.2

1.2.2.2. GRUPO ARCILLA⁵.

Los refractarios de este grupo también llamados "silicio-aluminosos", constan esencialmente de Silicato de Aluminio Hidratados, siendo el Caolín ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), la materia prima más común de este grupo.

Existe una gran variedad de arcillas, las cuales se diferencian por la cantidad de impurezas que contengan, aún las arcillas más puras, como el caolín, contienen variadas proporciones de óxidos de: fierro, calcio, magnesio, titanio y álcalis.

Los refractarios de arcilla contienen en su composición química variados porcentajes de alúmina y sílice, los cuales varían para la alúmina de 18-44% y para la sílice de 35-80%.

Existen comercialmente cinco tipos de refractarios de arcilla siendo: Semi-sílice, baja calidad, calidad intermedia incluyendo su análisis típico en la tabla 1-2.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO DE REFRACTARIOS DE ARCILLA⁶

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)								
TIPO DE REFRACTARIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Álcalis
<u>GRUPO ARCILLA</u>								
SEMI SÍLICE	69.6-79.0	18.0-26.9	0.1-0.4	0.1-0.4	-	0.6-2.0	0.8-1.6	0.2-0.4
BAJA CALIDAD	53.0-69.0	25.0-34.0	0.4-0.6	0.3-0.6	-	2.3-3.4	1.0-2.0	1.8-2.9
CALIDAD INTERMEDIA	60.3-63.0	35.0-38.0	0.5-0.6	0.2-0.4	-	1.8-3.4	1.3-1.9	1.0-2.7
ALTA CALIDAD	51.0-59.0	35.0-40.0	-	0.3-0.5	-	1.6-2.5	2.0-3.0	1.5-2.6
CALIDAD SUPERIOR	50.2-54.0	40.0-44.0	-	0.1-0.5	-	0.8-2.3	2.1-2.3	0.2-1.4

TABLA 1-2

1.2.2.3. GRUPO DE ALTA ALUMINA⁷.

Los refractarios de este grupo están constituidos principalmente por Alúmina (Al_2O_3) en mayor proporción y Sílice (SiO_2) en menor proporción.

⁵ Según referencia No. 2

⁶ Según referencia No.2

⁷ Según referencia No.2

Las materias primas utilizadas para la fabricación de los refractarios de alta Alúmina están la Bauxita, Silimanita, Cianita, Andalusita, Mulita Sintética, Corundum (Alúmina cristalizada) y Diásporo.

Estos refractarios tienen como mínimo 45% de alúmina, existiendo comercialmente productos de 50, 60, 70, 80, 90 y en algunos casos, hasta de 99% de alúmina.

En la tabla 1-3, se muestran algunos productos de alta alúmina, incluyendo su análisis químico típico.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO DE REFRACTARIOS DE ALTA ALUMINA⁸

COMPOSICION QUIMICA (%)								
TIPO DE REFRACTARIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Alcalis
GRUPO ALTA ALUMINA								
50%	43.0-47.0	47.0-51.0	0.5-0.6	0.5-0.6	-	0.9-1.6	2.2-2.4	0.8-1.3
60%	27.7-37.0	58.0-67.0	0.1-0.6	0.1-0.3	-	0.9-2.7	1.7-3.0	0.2-1.2
70%	19.4-28.0	68.0-76.7	0.1-0.2	0.1-0.3	-	0.9-2.2	2.0-3.3	0.2-1.2
80%	8.5-17.1	78.5-86.5	0.1-0.2	0.1-0.4	-	0.7-1.7	2.5-3.2	0.1-0.6
90%	3.5-10.0	87.5-95.8	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	97.7-99.0	0.0-0.1	0.1-0.2	-	0.1-0.3	0.0-0.3	0.1-0.3
MULITA	2.4-29.3	67.5-86.5	0.0-0.1	0.1-0.4	-	0.1-0.4	0.1-2.8	0.20.6
ELECTRO FUNDIDO	0.1-0.3	93.5-99.5	0.0-0.1	0.1-0.3	-	0.1-0.2	-	0.3-0.4

TABLA 1-3

1.2.2.4. GRUPO DE LOS BASICOS⁹.

Estos refractarios constan básicamente de óxido de magnesio (MgO), conocido comúnmente como magnesita y de óxido de cromo (Cr₂O₃), conocido comúnmente como cromita.

Las principales materias primas para la fabricación de los refractarios básicos son la magnesita natural, hidróxido de magnesio químicamente precipitado (mejor conocido como magnesita de agua de mar) y minerales de cromo.

⁸ Según referencia No.2

⁹ Según referencia No.2

Los refractarios básicos, según sus contenidos en los dos óxidos fundamentales, magnesita y cromita, se identifican y clasifican como Magnesita, Magnesita-cromo, Cromo-magnesita y Cromo, mismos que se muestran en la tabla 1-4, incluyendo su análisis químico típico.

Dentro de este grupo de refractarios básicos, también se pueden incluir la Dolomita, ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), a los refractarios impregnados (TAR BONDED) y a los refractarios de carbón-magnesita, que también se pueden ver en la tabla 1-4.

Los refractarios básicos de los diferentes tipos, pueden ser ligados o aglutinados, en varias formas tales como: liga cerámica, liga química y liga directa.

La liga cerámica se aplica prácticamente a todos los ladrillos que pasan por el proceso de quemado, que se efectúa por la vitrificación de las arcillas plásticas a una temperatura de $1,000^\circ$ a $1,350^\circ\text{C}$, que debido a un proceso de sinterización, une las partículas o granos del material.

La liga directa es propia de los ladrillos de magnesita-cromo y se desarrolla por la reacción del cromo, la alúmina y la sílice con la magnesita en la periferia de los granos a temperaturas superiores a la de la liga cerámica, resultando ladrillos de mayor refractabilidad que los ladrillos quemados.

También se puede incluir aquí al proceso de Impregnado o Alquitrinado que se efectúa a los ladrillos de magnesita quemados, los cuales se introducen en un tanque con alquitrán al alto vacío hasta saturarlos. Posteriormente, son sacados a una determinada temperatura, quedando atrapado en los poros abiertos del ladrillo, variadas cantidades de carbón, aumentando con esto la resistencia a la penetración y/o ataque químico con 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 en tránsito, almacenaje e instalación. Ya en operación, la placa metálica en la cara caliente se funde y se oxida combinándose con la magnesita del ladrillo formando una liga de gran refractabilidad. En la porción o cara fría del ladrillo, la lámina permanece inalterada, impartiendo rigidez al revestimiento e impidiendo la disgregación por carga o choque térmico.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO DE REFRACTARIOS BÁSICOS¹⁰

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)									
TIPO DE REFRACTARIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Alcalis	C
<u>GRUPO BÁSICOS</u>									
MAGNESITA	0.4-4.5	0.1-1.0	91.7-98.3	0.6-3.8	0.1-0.9	0.1-2.3	-	-	-
MAGNESITA CROMO	1.8-4.4	0.1-1.1	60.8-80.7	1.0-1.5	6.7-17.1	2.3-11.5	-	-	-
CROMO MAGNESITA	3.4-5.1	2.5-10.0	29.5-52.5	0.7-1.4	18.1-24.5	8.5-14.6	-	-	-
CROMO	4.9-8.3	8.8-26.7	18.4-22.5	0.5-0.7	29.9-32.8	12.0-14.6	-	-	-
DOLOMITA LADRILLO	0.3-1.0	27.3-29.1	38.0-43.0	0.0-57.0	0.1-0.3	0.2-1.1	-	-	4-5
DOLOMITA CALCINADA	0.3-0.3	0.3-1.8	9.3-21.8	28.9-32.4	0.0-0.1	0.3-1.8	-	-	-
IMPREGNADO	0.5-3.8	0.2-1.0	88.1-98.1	0.9-6.2	0.0-0.4	0.1-3.0	-	-	4-5
CARBO-MAGNESITA	0.4-0.8	0.1-0.2	94.5-96.5	0.8-2.3	-	0.1-0.2	-	-	8-14
ELECTRO-FUNDIDO	2.0-3.0	7.0-9.0	54.5-58.5	0.0-1.0	18.1-22.0	9.5-11.5	1.0-2.0	-	-

TABLA 1-4

1.2.2.5. GRUPO DE CARBON¹¹.

A los refractarios de este grupo, también se les podría llamar no-óxidos, ya que en su composición no contienen óxidos, siendo el carbón el principal constituyente.

Las principales materias primas para la fabricación de estos refractarios, son el grafito (natural o sintético), la antracita, coque (de petróleo o de fundición) y de carbón de piedra o carbón mineral, y son ligados con brea o alquitrán.

El grafito natural cuando se encuentra ligado con arcilla, se utiliza para la fabricación de tapones, boquillas, etc., ya que el proceso de purificación del grafito es muy costoso.

También se pueden incluir en este grupo de refractarios no-óxidos a los refractarios de Carburo de Silicio (SiC), Carburo de Boro (BC), y algunos otros como Nitruro de Silicio (Si₃N₄) y Nitruro de Boro (Bn).

¹⁰ Según referencia No.2

¹¹ Según referencia No.2

En la tabla 1-5, se muestran algunos de los refractarios de este grupo incluyendo su análisis químico típico.

ANÁLISIS QUÍMICO TÍPICO DE REFRACTARIOS DE CARBON¹²

COMPOSICIÓN QUÍMICA (%)									
TIPO DE REFRACTARIO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Alcalis	C
<u>GRUPO CARBON</u>									
GRAFITO	1.0-2.5	-	-	-	-	-	-	-	96-98
ANTRACITA	5.0-10.0	-	-	-	-	-	-	-	88-94

TABLA 1-5

1.3.2.6. GRUPO DE LOS AISLANTES.

Los refractarios de este grupo se caracterizan por su gran porosidad (40-70%) y ligero peso, teniendo una más baja conductividad térmica en comparación con otros refractarios.

Las materias primas que se utilizan para la fabricación de los aislantes son la Vermiculita, Perlita, Diatomita, Asbesto, Arcilla refractaria y minerales de alta alúmina.

Existe una gran variedad de refractarios aislantes, fabricándose en forma de ladrillos, concretos, blocks, fibras, etc., mismos que se identifican por su temperatura máxima de operación que va desde 800°C, hasta temperaturas por arriba de los 1,800°C.

¹² Según referencia No.2

CAPÍTULO II

PREPARACIÓN Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.

2.1. PREPARACIÓN DE LOS REFRACTARIOS.

Cada uno de los tipos de materiales refractarios descritos, previamente son usados en una variedad de formas, producidas por diferentes métodos de manufactura. Están incluidos los ladrillos sólidos, las formas en bloque y los materiales monolíticos granulares o formas moldeables.

La figura 2-1, es un diagrama de flujo bastante simplificado que ilustra los métodos de fabricación y los productos resultantes de los materiales refractarios. Esta figura será usada para describir ampliamente este capítulo.

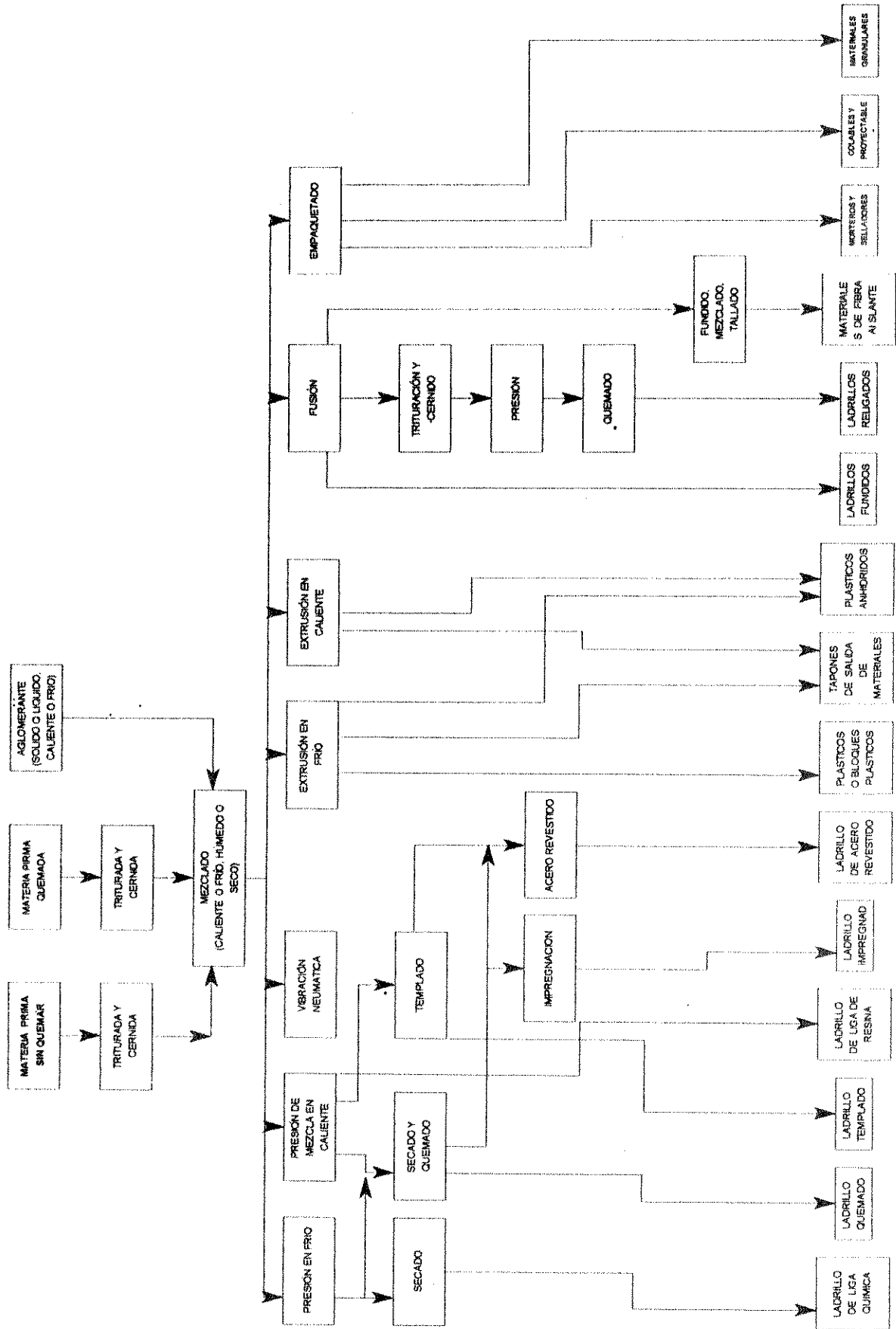
2.1.1. MATERIAS PRIMAS¹³.

Las materias primas de los materiales refractarios han sido escritas en el capítulo anterior. La figura 2-1, clasifica las materias primas como calcinadas, no calcinadas, o ligadas. Los materiales calcinados han sido quemados para removerles la humedad y las sustancias volátiles para minimizar reacciones y contracciones subsecuentes en servicio. La temperatura de calcinación estarán en un rango de 1,093-1,925°C. Los materiales o materias primas no calcinadas son más baratas de usar que los materiales calcinados y son usadas para impartir características deseables tales como plasticidad o expansión volumétrica a ciertos refractarios. Los materiales ligados son usados para proporcionar resistencia a los refractarios durante su fabricación o en servicio. Los tipos de materiales ligados incluyen:

- a.) Ligadores temporales, tales como, azúcar o ciertas arcillas, para mejorar la resistencia de manejo durante la fabricación.
- b.) Ligadores químicos, para dar resistencia durante la fabricación, después de la fabricación, o en la instalación como un material monolítico. Los ejemplos incluyen silicato de sodio, ácido fosfórico, cristales de fosfato, ácido crómico, ácido bórico y sulfato de magnesio.

¹³ Según referencia No. 1

2-1. HOJA DE FLUJO SIMPLIFICADA PARA MATERIALES REFRACTARIOS



- c.) Cementos ligadores, que secan hidráulicamente cuando se mezclan con agua. Los primeros ligadores de este tipo usados en materiales refractarios son los cementos de calcio-alumina que secan rápidamente y son capaces de retener su resistente unión a temperaturas intermedias.
- d.) Ligadores orgánicos, tales como breas o resinas, para uso en atmósferas reductoras, donde el carbón residual provee una unión resistente o actúa para inhibir alteraciones.

Los procesos de las materias primas antes de la manufactura de los refractarios tienen una gran influencia en la composición de las propiedades del producto final. Aunque algunas materias primas necesitan ser extraídas de la misma y tomadas para su uso, los materiales refractarios usan una gran proporción de las materias primas que envuelven una selectiva extracción de las mismas, refinación y varias formas de pretratamiento térmico, como pasos esenciales para proveer niveles aceptables de pureza y densidad.

2.1.2. PROCESOS¹⁴.

El conocimiento de varios pasos en el proceso de los materiales refractarios es muy importante para poder entender el comportamiento de los materiales refractarios en servicio. Como se muestra en la figura 2-1, todos los materiales refractarios son triturados, cernidos y mezclados o combinados como primer paso en manufactura. Estos pasos son necesarios para producir partículas del tamaño adecuado para la densidad y resistencia del producto. En una mezcla de material fino para producir un ladrillo denso, por ejemplo, las materias primas son trituradas y cernidas para producir partículas de un rango deseado como se ilustra en el cuadro 2-1:

¹⁴ Según referencia No. 1

MEZCLA PARA PRODUCIR UN LADRILLO DENSO¹⁵

TAMAÑO DE TAMIZ		PESO DE MEZCLA (%)
(mm)	TIPO DE TAMIZ	
4.6 - 1.65	4 - 10	20
1.65 - 1.17	10 - 14	30
1.17 - 0.83	14 - 20	5
0.83 - 0.30	20 - 48	5
0.30 - 0.15	48 - 100	5
0.15 - 0.07	100 - 200	5
0.07 - 0.04	200 - 325	10
Abajo de 0.04	Abajo de 325	20

CUADRO 2-1

Las técnicas de trituración y cernido son bastantes complejas, incluyen equipos de tamizado vibratorio y técnicas de clasificación con aire.

Los pasos de mezclado y combinado van desde la simple adición de agua a la arcilla, a mezclas en caliente de agregados precalentados con resinas seleccionadas u otros ligadores anhídridos (sin agua). Secuencias especiales de combinación de materias primas, el tiempo de mezclado y el uso de equipo de alta energía de mezclado, son usados para obtener mezclas uniformes y una homogénea distribución de aditivos. La figura 2-1, ilustra algunos de los métodos de formado que son usados después del mezclado y combinado. Los métodos de manufactura más usados incluyen prensado en frío de grano tamizado, combinado y mezclado para producir una forma de refractario denso.

El secado o prensado de la mezcla en formas es hecho por prensas mecánicas o hidráulicas, capaces de conformar los materiales húmedos (de 2 a 5% de agua), a presiones de 34.5 a 103.4 Mpa¹⁶. El grado de compactación obtenido en este rango de presión depende de la plasticidad y tamaño de la partícula, pero los ladrillos de más alta calidad son prensados hasta el punto de mayor presión que produciría laminaciones o grietas internas. La cámara de presión o molde puede ser vaciado o desairado para incrementar la densidad y prevenir laminaciones por el aire atrapado. El prensado en seco se presta para una amplia variedad de materiales y puede producir un amplio rango de propiedades. Ciertos productos pueden ser

¹⁵ Según referencia No.1

¹⁶ Según referencia No.1

prensados en caliente y estos materiales son usualmente plastificados con resina líquida.

Los materiales refractarios en formas pueden ser fabricados aplicando presión por otros medios, tales como, vibración, apisonado neumático, moldeado manual, o presión isostática. Muchos ladrillos y formas especiales compuestos por arcilla refractaria son también formados por extrusión¹⁷ seguida por un prensado a baja presión (proceso de reprensado o lodo tieso). En este proceso las mezclas más plásticas (10-15% de agua) son forzadas a través de un dado, por medio de un taladro, cortado en lingotes y entonces prensado a su forma. Este proceso usualmente incluye un vacío durante la extrusión.

La extrusión en caliente de resina u otro material de liga anhídrida puede también ser usado; sin embargo, esto es principalmente para materiales monolíticos.

En casos limitados las materias primas son fundidas en hornos eléctricos de muy alta temperatura y colados en lingotes en moldes de grafito. Estos lingotes pueden subsecuentemente ser cortados a la forma deseada o pueden ser quebrados y triturados para materia prima usados en el proceso convencional de ladrillos prensados o para usos monolíticos. En otro proceso más, los materiales refractarios derretidos o fundidos pueden ser sopladados, trefilados o hilados en fibras para su subsecuente uso en forma de mantas, alfombras o paneles.

Muchos materiales refractarios son utilizados en gran escala. Los refractarios granulares pueden ser usados en forma seca o mezclada con agua en el sitio de la planta antes de la instalación por colado o proyección. Los materiales húmedos extraídos pueden ser empacados para evitar que se sequen y embarcarlos al sitio de la planta; listos para su aplicación por apisonamiento en el lugar como una gran estructura monolítica.

¹⁷ Ver glosario .

2.2. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS REFRACTARIOS Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES DE SERVICIO.

La información anterior indica que hay una amplia variedad de refractarios, dependiendo de las materias primas, composición total y métodos de manufactura. Los requerimientos para los refractarios son igualmente diversos. El análisis de las condiciones de servicio en fábricas de acero y hierro en general muestran que los refractarios son requeridos para soportar:

- 1) Un amplio rango de temperatura, arriba de 1,760°C.
- 2) Repentinos cambios en la temperatura; altos esfuerzos de tensión que acompañan estos cambios rápidos de temperatura causando "Choque Térmico" y resultan agrietados o fracturados.
- 3) Los bajos niveles de esfuerzos compresivos en ambas temperaturas (bajas y altas).
- 4) Fuerzas abrasivas en altas y bajas temperaturas.
- 5) La acción corrosiva de las escorias, variando de un rango de carácter ácido a básico.
- 6) La acción de los metales fundidos, siempre a altas temperaturas capaces de aplicar grandes presiones y fuerzas de empuje.
- 7) La acción de gases incluyendo CO, SO₂, Cl, CH₄, y H₂O, óxidos volátiles y sales de metales. Todos capaces de penetrar y reaccionar con los refractarios.
- 8) Como un refractario está siendo sujeto de una o más de las condiciones previas establecidas, usualmente funciona como aislante de alta efectividad, o puede también ser requerido como conductor o absorbente del calor dependiendo su aplicación.

Por lo tanto cualquier ambiente de servicio particular usualmente envuelve más de uno de los factores arriba mencionados, predeterminando que la vida de un refractario es un complejo proceso que incluye información sobre las propiedades físicas y térmicas, según se determinan por pruebas de laboratorio, análisis del efecto en servicio o condiciones de proceso y medio sobre el refractario, y un conocimiento de las reacciones fundamentales de los refractarios y los varios contaminantes encontrados en servicio. En este capítulo las características

físicas y químicas de una selección de refractarios, son medidas en una variedad de pruebas de laboratorio y serán descritas como una guía general, para entender la naturaleza compleja de estos materiales en relación con sus ambientes de servicio.

2.2.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Como se describió anteriormente, en la clasificación de los refractarios, las materias primas usadas en la fabricación de los refractarios difieren apreciablemente y resultan en materiales con un amplio rango de composición. Se debe enfatizar que estos son refractarios duros sin uso y no son refractarios que han sido químicamente combinados en servicio. Los refractarios tienen la única característica de soportar alteraciones por penetración, contaminación y/o reacción en servicio y funcionan como materiales adecuados de ingeniería. Como regla general, recientes tendencias en el desarrollo de refractarios requieren refractarios con el mínimo contenido de impurezas, y estas impurezas son deliberadamente durante el proceso de la materia prima o del producto. EL cuadro 2-2 muestra la descripción de los constituyentes no deseables (originalmente presentes o productos de la contaminación) en muchos tipos de refractarios. Debe ser notado que otras muchas impurezas (tales como PbO, ZnO, B₂O₃, etc.) que son indeseables en todos los refractarios por sus bajos puntos de fusión no han sido mostrados.

AGENTES NO DESEABLES DE ALGUNOS REFRACTARIOS¹⁸

TIPO DE REFRACTARIO	IMPUREZAS INDESEABLES
Silicio	Al ₂ O ₃ , Alcális, TiO ₂
Arcilla refractaria (todo tipo)	Alcális, óxido de hierro, CaO, MgO
Alta alúmina (todo tipo)	Alcális, óxido de hierro, CaO, MgO
Cromo magnesita (todo tipo)	SiO ₂ , óxido de hierro
Magnesita (todo tipo)	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , óxido de hierro
Carbono	Alcális, óxido de hierro

CUADRO 2-2

2.2.2. REFRACTARIEDAD.

Propiedad de los materiales refractarios de soportar la acción del calor a elevadas temperaturas sin deformarse.

¹⁸ Según referencia No. I

La máxima temperatura de uso para los materiales refractarios puede ser medida por muchas técnicas. La temperatura de fusión de la mayoría de los materiales refractarios no es generalmente única, sino que se representa por una transición más o menos gradual del estado sólido al líquido. La cantidad de líquido que puede ser tolerada en un refractario al ser calentado, sin quedar inútil, es grandemente gobernada por la viscosidad del líquido y por si el líquido no es primariamente responsable por la unión de las demás partículas refractarias juntas. Por ejemplo, la arcilla refractaria puede desarrollar líquido y realmente empezar a suavizarse a temperaturas tan bajas como 980°C, pero debido a la alta viscosidad del líquido su temperatura de límite de servicio puede ser muchos cientos de grados más alta. Un procedimiento arbitrario ha sido establecido para calcular la refractariedad de tales materiales, y es llamado "El Cono Pirométrico Equivalente", o prueba CPE, en el cual el comportamiento de ablandamiento de conos pequeños del refractario son comparados con un estándar pirométrico conocido y un comportamiento de ablandamiento para una tasa de tiempo y temperatura de calentamiento. El CPE se reporta como el número de cono estándar que tiene un comportamiento de ablandamiento semejante al cono del refractario que está siendo investigado, cuando es probado de acuerdo con el método estándar de prueba para cono pirométrico equivalente (designación ASTM C-24). La composición de los conos estándar y el rango de temperatura cubierta hace la prueba del CPE más aplicable para medidas de refractariedad de refractarios silico-aluminosos. La figura 2-2, muestra el CPE de varios refractarios y la correspondiente temperatura de ablandamiento cuando son calentados bajo condiciones de la prueba.

CONO PIROMÉTRICO EQUIVALENTE PARA VARIOS REFRACTARIOS SÍLICE-ALUMINOSOS¹⁹

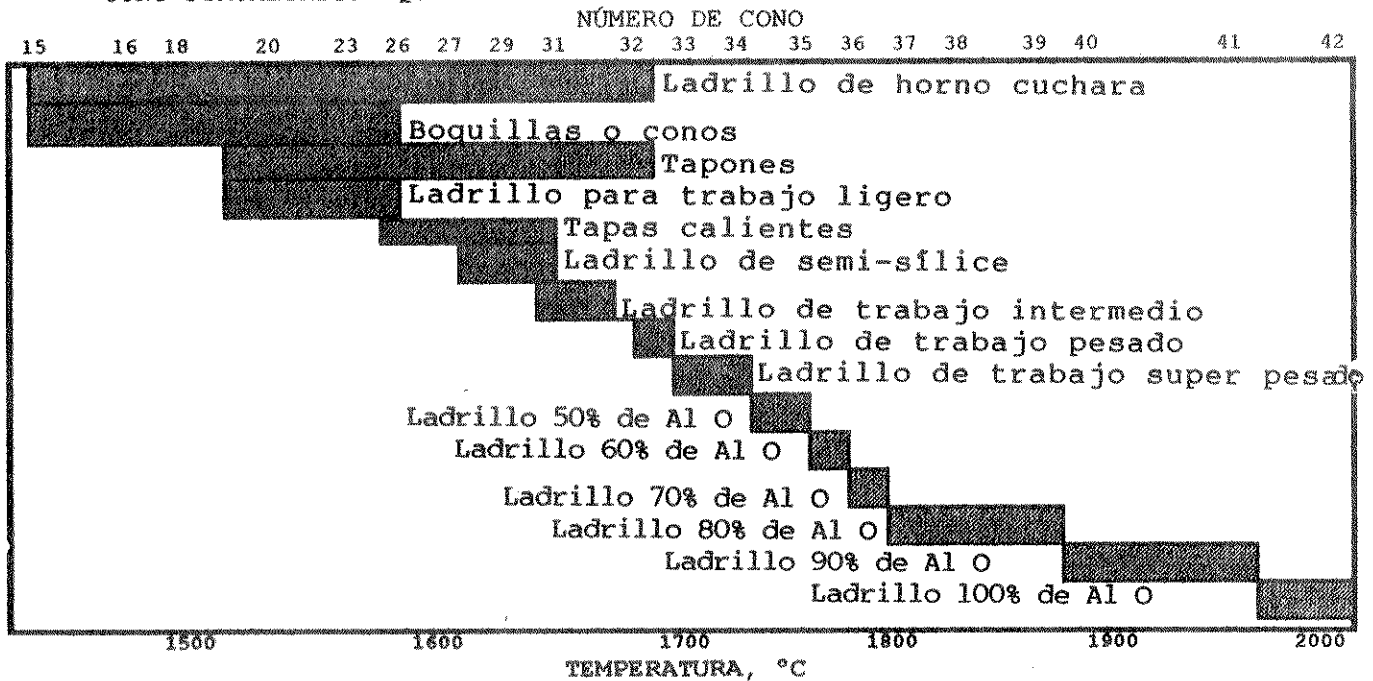


FIGURA 2-2

Debe ser reconocido que los puntos extremos de los conos pirometricos principalmente reflejan la influencia del tiempo y la temperatura, y por lo tanto son reproducibles solamente bajo condiciones idénticas. Un cono usado en un horno, quemado por una semana, puede ablandarse completamente a una temperatura que no lo afectaría en una corta prueba del CPE. Los refractarios de arcilla tienen un comportamiento similar, la influencia del tiempo es sorprendente en el caso de ladrillos de cucharón. Normalmente, las temperaturas máximas de servicio de los ladrillos de arcilla están considerablemente debajo de la temperatura de CPE, pero ladrillos de cucharón son usados exitosamente a temperaturas de 150°C arriba de su temperatura de CPE, debido a que la exposición raramente es por más de una hora de tiempo. Una medición más realista de la refractariedad para la mayoría de los materiales refractarios puede ser obtenida colocando al refractario bajo carga a una cierta temperatura y determinar su comportamiento. Esta prueba puede consistir de un simple procedimiento donde un refractario es sometido a compresión y su deformación o temperatura de falla es medida, o podría ser un procedimiento más complicado que involucra la medición de la termo deformación plástica durante un

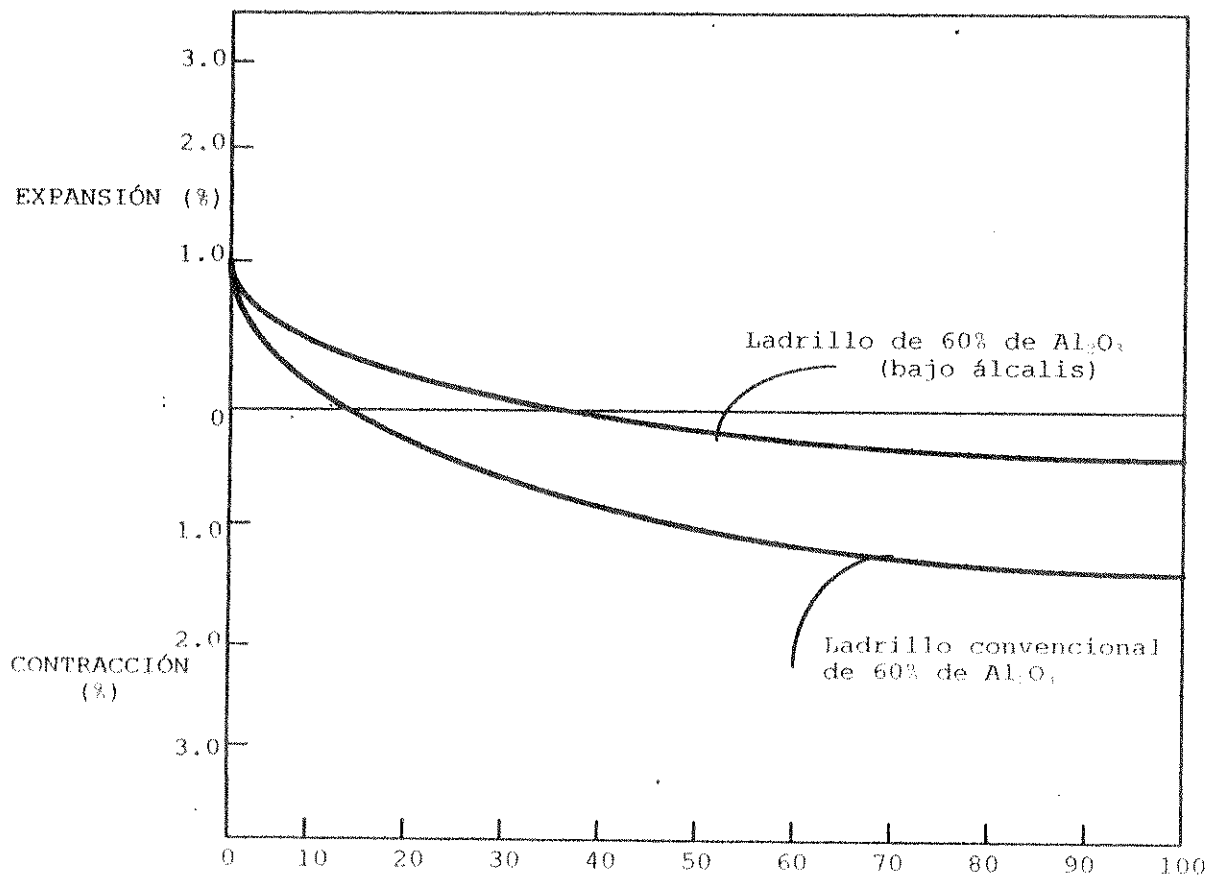
¹⁹ Según referencia No. 1

largo periodo de exposición del refractario a una temperatura más baja. La figura 2-3 muestra una prueba típica del tipo de termo deformación plástica en la que dos refractarios, con 60% de Al_2O_3 , han sido sometidos a $1,315^{\circ}C$ por 100 horas, bajo una carga de 172 Kpa (25 psi).

PRUEBA TÍPICA DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA²⁰

TIEMPO (Hrs)

FIGURA 2-3



Usando tales datos sería posible extra polar la resistencia a la termo deformación plástica para largos periodos de estos materiales y los ladrillos de más bajo álcalis serán obviamente preferidos si la aplicación requiere mínima deformación. En la aplicación de tal información, se debe considerar la presencia de cualquier gradiente de temperatura por medio de la muestra que puede existir en servicio. Por ejemplo, estos resultados tendrían considerablemente menos significado donde solo la cara caliente del refractario está a $1,315^{\circ}C$, con un gradiente en condiciones ambientales, en donde el refractario estuvo completamente

²⁰ Según referencia No. 1

a la temperatura de 1,500°C. El comportamiento de los refractarios silico-aluminosos bajo carga, está influenciado principalmente por la viscosidad de los líquidos de unión o la matriz de fase y es por tanto muy sensible a los niveles de impureza, en el ladrillo y a factores de control de la cantidad y distribución de esta fase cristalizada (microestructura, grado de quemado o prequemado, etc.).

2.2.3. CHOQUE TÉRMICO.

La resistencia al choque térmico es mal entendida como una propiedad de los refractarios y la más difícil de medir y predecir. Un severo choque térmico crea esfuerzos mecánicos que pueden causar una fractura catastrófica de los refractarios. El choque térmico frecuentemente ocurre donde un alto flujo de calor crea un agudo gradiente de temperatura en el refractario. Como la expansión térmica de cualquier sólido es una propiedad dependiente de la temperatura, los gradientes agudos de temperatura causan grandes diferencias de expansión térmica cuando ocurren. Los esfuerzos desarrollados por estas diferencias de expansión térmica y cuando el esfuerzo térmico excede los esfuerzos de tensión del refractario un fallo o descascaramiento normalmente ocurre. La existencia de un gradiente de temperatura en un refractario de muchas fases es especialmente crítico por que cada fase tiene propiedades únicas de expansión térmica. Por ejemplo, las partículas agregadas (grandes partículas) y la matriz de un ladrillo de arcilla difieren grandemente en cuanto expansión térmica. Los granos agregados de Mulita tienen relativamente una baja expansión. Esta diferencia en expansión causa las características micro grietas en la matriz de un refractario de arcilla. En servicio, los contaminantes del medio ambiente son absorbidos y alteran la microestructura. Esta microestructura alterada con composición y propiedades que varían con la profundidad, pueden causar un tipo de resquebrajamiento estructural.

Los materiales con buena resistencia a la fractura térmicamente inducida, generalmente tienen una alta resistencia, una alta conductividad térmica, una alta difusión térmica, un bajo modulo de Young de elasticidad y una baja emisibilidad. Como los refractarios de las plantas de acero son usados bajo fuertes gradientes de temperatura la inherente baja resistencia a la tensión de los refractarios, puede

resultar en agrietamiento térmico y resquebrajamiento. Un considerable interés, por lo tanto, existe en la predicción y el mejoramiento de la resistencia al choque térmico de los refractarios de las plantas de acero.

El método clásico de medición de la resistencia al choque térmico de los refractarios silico-aluminosos, es la prueba del panel de resquebrajamiento, en la cual paneles precalentados de refractario son alternativamente calentados y enfriados con rociadores de agua y la cantidad de pérdida de peso por agrietado y resquebrajamiento son medidas. Los recientes métodos empíricos de predicción de la resistencia al resquebrajamiento de un refractario, incluyen alguna propiedad física medible, después las muestras son recicladas muchas veces a través de un ciclo de temperatura, diseñado para reflejar las condiciones específicas de servicio. Estas mismas técnicas son también usadas para desarrollar materiales refractarios con niveles mejorados de resistencia al choque por ensayos de campo.

Los nuevos métodos de predicción de la resistencia al choque térmico de los refractarios han sido desarrollados en la resistencia a la propagación de grietas que han sido medidas en servicio. Estas mediciones, llamadas "Trabajo de Fractura", cuantifican la energía necesaria para formar nuevas superficies durante el proceso de fractura en una prueba de doblado en 3 puntos a una tasa de esfuerzo constante. La figura 2-4 ilustra los modos de falla del refractario que pueden ser obtenidas en estas pruebas; los tipos de comportamiento estable son preferidos para evitar fallas catastróficas debido al choque térmico. Las medidas de trabajo de fractura bajo temperaturas y condiciones atmosféricas específicas guiarán eventualmente al diseño de nuevas microestructuras para resistir la propagación de las grietas.

DEFINICIÓN DE FRACTURA ESTABLE²¹

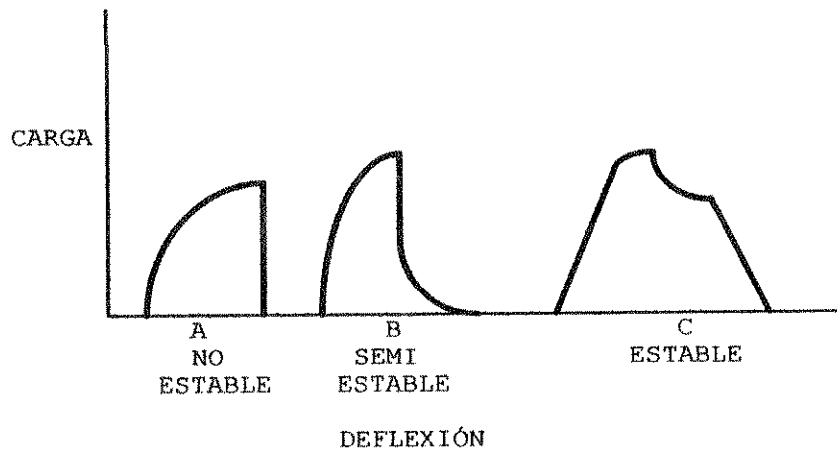


FIGURA 2-4

2.2.4. RESISTENCIA.

Los refractarios están sometidos a cargas estáticas, normalmente en compresión, en cualquier aplicación, porque la mayoría de los refractarios son muy manejados antes de la aplicación, deben tener suficiente resistencia para evitar quebradura y pérdida de esquinas. En servicio, los refractarios monolíticos deben desarrollar suficiente resistencia para soportar las cargas estáticas y abuso mecánico. En ciertas aplicaciones, los refractarios deben también soportar cargas de impacto. La resistencia de los refractarios deben estar normalmente especificadas por cualquiera de las arriba indicadas; es más, la resistencia se relaciona significativamente con otras propiedades, frecuentemente es usada como una medida de control de calidad. Como regla, la resistencia en frío de los refractarios es determinada en compresión o cargando 3 puntos para módulos de ruptura en flexión.

La tabla 2-1, lista las resistencias típicas en frío y en caliente para varios refractarios, junto con datos de porosidad y densidad de masa. En general, estos refractarios son de un tipo dado, con alta densidad (baja porosidad) y también tienen altas resistencias a temperatura ambiente.

Las medidas de porosidad y densidad son otros métodos convenientes para caracterizar la calidad de los refractarios y son frecuentemente usados en las

²¹ Según referencia No. 1

PROPIEDADES FÍSICAS TÍPICAS DE REFRACTARIOS PARA LA INDUSTRIA DEL ACERO

TIPO DE REFRACTARIO	POROSIDAD APARENTE (%)	DENSIDAD DE MASA (g/cm ³)	DENSIDAD DE MASA (lb/ft ³)	MÓDULOS DE RUPTURA								
				TEMPERATURA AMBIENTE			A 1260°C			A 1480°C		
				(psi)	(kpa)	(psi)	(kpa)	(psi)	(kpa)	(psi)	(kpa)	(psi)
Ladrillo de sílice	19.2 - 26.2	1.72 - 1.89	107 - 118	3210 - 7480	485 - 1085	6600 - 11000	900 - 1600	5500 - 7600	800 - 1200			
Sílice fundido	12.0 - 21.5	1.60 - 2.27	100 - 141	2620 - 10690	380 - 1550	—	—	—	—			
Ladrillo semi-sílice	23.4 - 30.8	1.77 - 2.05	110 - 128	2210 - 4140	320 - 600	no determinada	no determinada	—	—			
Ladrillo de arcilla	18.0 - 21.0	—	126 - 145	6210 - 10340	900 - 1500	—	—	—	—			
Bajo rendimiento	18.0 - 21.0	—	128 - 140	6210 - 11030	900 - 1600	—	—	—	—			
Rendimiento intermedio	4.2 - 30.4	1.81 - 2.49	113 - 155	2480 - 20130	360 - 2920	—	—	—	—			
Alto rendimiento	5.3 - 21.5	2.06 - 2.46	129 - 165	2380 - 23170	345 - 3360	5520 - 12960	800 - 1880	—	—			
Super rendimiento	20.0 - 24.0	2.00 - 2.16	125 - 135	6890 - 10340	1000 - 1500	—	—	—	—			
50% Al ₂ O ₃	13.0 - 28.4	2.07 - 2.56	129 - 160	3930 - 20240	570 - 2935	1450 - 9510	210 - 1380	—	—			
60% Al ₂ O ₃	14.6 - 28.6	2.25 - 2.79	140 - 174	5830 - 25100	845 - 3610	2480 - 9930	360 - 1440	—	—			
70% Al ₂ O ₃	14.3 - 28.7	2.45 - 2.97	153 - 185	4650 - 20510	675 - 4425	2170 - 37920	315 - 5500	—	—			
80% Al ₂ O ₃	15.5 - 26.8	2.67 - 3.00	167 - 187	6890 - 26130	1000 - 3790	3100 - 24480	450 - 3550	—	—			
90% Al ₂ O ₃	19.0 - 27.5	2.84 - 3.07	177 - 192	8170 - 24410	1185 - 3540	3000 - 17580	435 - 2550	—	—			
100% Al ₂ O ₃	12.0 - 24.1	2.31 - 2.66	146 - 166	8170 - 25170	1185 - 3650	2450 - 27580	355 - 4000	—	—			
Mullita	20.1 - 26.8	1.96 - 2.22	122 - 139	210 - 4170	30 - 605	—	100 - 500	—	—			
Concretos de arcilla o alta-alúmina	29.9 - 40.4	1.18 - 2.59	74 - 162	930 - 8890	135 - 1290	—	—	—	—			
Plásticos de arcilla	27.6 - 37.5	1.66 - 2.06	104 - 129	1450 - 6380	210 - 925	—	—	—	—			
Colabres 1095°C	28.4 - 37.8	1.71 - 2.15	107 - 134	1240 - 10100	180 - 1465	690 - 2100	100 - 300	—	—			
Colabres 1230°C	26.9 - 34.7	1.87 - 2.77	117 - 173	720 - 9070	105 - 1315	1150 - 3450	150 - 500	—	—			
Colabres 1480°C	15.8 - 30.9	2.07 - 2.93	129 - 183	0 - 7450	0 - 1080	1690 - 7340	245 - 1085	—	—			
Colabres 1650°C	17.4 - 30.3	2.33 - 2.65	145 - 165	170 - 8100	25 - 1175	380 - 9580	55 - 1390	—	—			
Plásticos de alta-alúmina o mezcla apisonada	17.3 - 30.7	2.40 - 2.96	150 - 185	760 - 5900	110 - 855	1550 - 9580	225 - 1390	—	—			
60% Al ₂ O ₃	12.7 - 30.4	2.68 - 3.09	167 - 193	450 - 13790	65 - 2000	2210 - 24130	320 - 2050	—	—			
70% Al ₂ O ₃	14.8 - 23.8	2.14 - 3.02	134 - 189	0 - 15240	0 - 2210	790 - 720	115 - 1555	—	—			
80% Al ₂ O ₃	15.5 - 19.0	2.90 - 3.10	182 - 193	4140 - 8960	600 - 1300	8270 - 17240	1200 - 2500	—	—			
Ladrillos básicos	15.0 - 17.0	1.65 - 1.72	103 - 107	24130 - 27580	3500 - 4000	—	—	—	—			
Ladrillos de carbono	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
Magnesita-cromo	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
Base de grafito	—	—	—	—	—	—	—	—	—			

especificaciones de los refractarios y en los programas de control de calidad. La porosidad aparente de un material indica la fracción del volumen total, que son espacios de poro abierto y por lo tanto es un indicador del área total de superficie disponible para reaccionar con escorias y gases. La porosidad total es la fracción del volumen total consistente de vacíos, abiertos y cerrados. Así, dependiendo de la naturaleza del material, el método de manufactura, y el grado de quemado, ésta puede acceder a la porosidad aparente o puede ser 2 veces más grande. La cantidad, tamaño y distribución de los poros en la microestructura de los refractarios, juegan papeles muy importantes en el establecimiento final de las propiedades de ingeniería. En general, el incremento de la cantidad de porosidad afecta negativamente la resistencia a la deformación bajo carga en caliente y la resistencia al ataque de gases y escorias. Por otro lado, una alta porosidad generalmente reduce la conductividad térmica interna.

Los datos de resistencias sobre refractarios deben ser interpretados cuidadosamente por que no haya relación común entre la resistencia de un refractario caliente y uno frío.

En este caso los valores de las resistencias en frío y en caliente son inversamente relacionados, según la formación del líquido y cristal que contribuyen a la alta temperatura ambiente, realmente causa un reducción en la resistencia a elevadas temperaturas.

El tipo de carga al que un refractario está expuesto debe también ser considerado cuando se use la información de resistencias. Por ejemplo, unas cargas relativamente bajas en magnitud son experimentadas en el interior de alto horno, la temperatura y la carga pueden ser usadas con información de resistencia en caliente o con información de la termo deformación plástica para seleccionar los refractarios para cualquier posición en el interior del horno. En otras aplicaciones las cargas de impacto, tales como las que ocurre en la carga de la chatarra deben ser consideradas y la resistencia exacta son normalmente seleccionadas por pruebas de campo empíricas, basadas sobre los niveles de medición de resistencia, donde el método de prueba y error prevalece.

2.2.5. ABRASIÓN.

Los refractarios son frecuentemente sujetos a abrasión por sólidos en movimiento o por sólidos arrastrados por gases. Está bien establecido que la resistencia a la abrasión ha sido medida por una variedad de diferentes técnicas, que pueden ser relacionadas a la resistencia en frío, de un material arriba del punto donde se desarrolla significante líquido en el refractario. La mayoría de los ambientes verdaderamente abrasivos son encontrados relativamente a baja temperatura (el medio abrasivo a más alta temperatura llega a ser parte del proceso de escoria).

Los materiales refractarios tienen un amplio rango de resistencia a la abrasión, como se ilustra en la tabla 2-2, que se observa a continuación. En la mayoría de los casos, la resistencia a la abrasión es inversamente relacionada a la resistencia al choque térmico y la selección de materiales resistentes a la abrasión normalmente requiere un compromiso de otras propiedades.

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN DE REFRACTARIOS SOMETIDOS A PRUEBA DE ARENA A PRESIÓN²²

MATERIAL	PÉRDIDA POR ABRASIÓN cc/min.
Colables resistentes a la abrasión	5-100
Ladrillo normal de arcilla	2-25
Ladrillo ácido resistente	0.5-1.0
Ladrillo de arcilla denso	0.5-1.0
Ladrillo de carbono de silicio	0.1-0.3
Ladrillo quemado de liga fosfórica y alta alúmina	0.1-1.0
Escoria fundida o seca	<0.1-0.3
Alúmina sinterizada de grano fino	<0.1

TABLA 2-2

2.2.6. EXPANSIÓN TÉRMICA.

Todos los refractarios se expanden en el calentamiento, de una forma que relaciona a sus componentes. La figura 2-5 muestra ejemplos clásicos de la expansión de tipos divergentes de refractarios.

²² Según referencia No 1

pasado, los ladrillos de sílice exhiben una baja y uniforme expansión y pueden ser termo ciclados sin daño entre 1,538 a 1,800°C. La composición física de los refractarios es también crítica en la determinación de tasas de calentamiento seguras y expansiones permitidas.

El calentamiento a baja temperatura, puede reducir las fallas de los ladrillos destemplados y resultar en un bajo rendimiento. Un ladrillo prequemado impregnado con resina y con ligadores cerámicos no muestra bajo rendimiento como los ladrillos de resina durante el calentamiento. Para un control adecuado de las propiedades de los ladrillos POB, es posible calentar forros de POB desde condiciones ambientales, hasta temperaturas para hacer acero en 2 o 3 horas sin dañar los forros.

2.2.7. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y TRANSFERENCIA DE CALOR.

Como aislantes los materiales refractarios siempre han sido usados para conservar el calor y su resistencia al flujo de calor es un factor principal en la selección en la mayoría de aplicaciones. La figura 2-6 muestra curvas de conductividad térmica para varios tipos de refractarios que van desde refractarios densos hasta ladrillos aislantes.

Algunos refractarios, por ejemplo, el carbón o carburo de silicio tienen conductividades muy altas, arriba de 43.26 watt/m.kelvin o 320 Btu/h/pies²/°F/plg mientras que otros tienen conductividades tan bajas como 0.14 watt/m.kelvin o 1 Btu/h/pies²/°F/plg, por ejemplo, los bloques aislantes o formas de fibra refractaria.

CURVAS TÍPICAS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA VARIOS LADRILLOS REFRACTARIOS²⁴

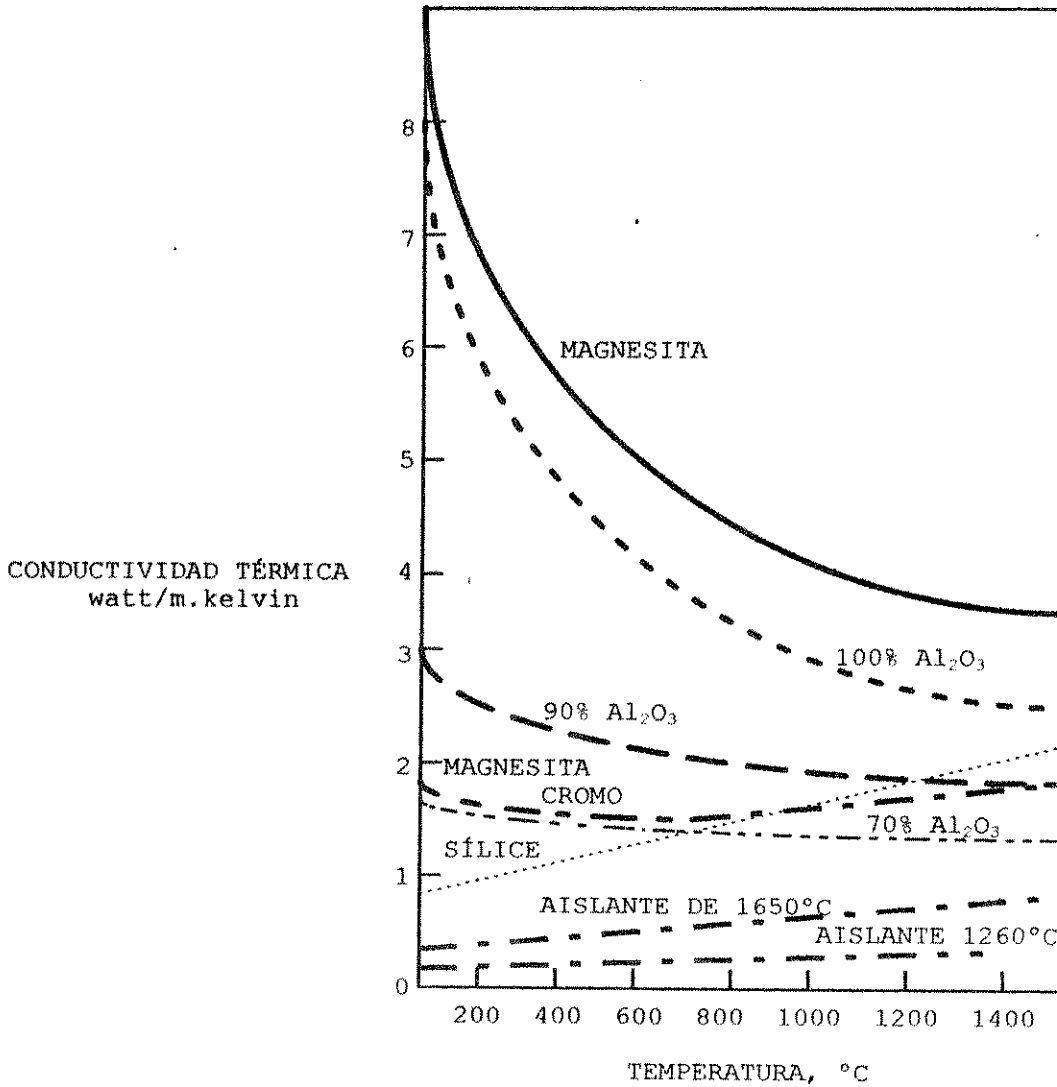


FIGURA 2-6

Usando los valores de conductividad, las pérdidas de transferencia de calor a través de paredes de refractario simples o múltiples pueden ser calculados usando la fórmula general²⁵:

$$Q/A = \frac{t_1 - t_2}{L_1/K_1 + L_2/K_2 + \dots + L_N/K_N}$$

Donde:

Q/A = Pérdida de calor expresada, en watts/m²

²⁴ Según referencia No.6

²⁵ Según referencia No.6

t_1 = Temperatura de la superficie más caliente, en °C
 t_2 = Temperatura de la superficie más fría, en °C
 $L_1, L_2 \dots L_n$ = Espesor de cada material, en metros
 $K_1, K_2 \dots K_n$ = Conductividad térmica de cada material, en watt/m.kelvin

Tales cálculos son rápidamente hechos, usando simulaciones por computadora, donde las tasas calculadas de transferencia de calor pueden ser balanceadas con las pérdidas de la superficie externa del refractario por radiación y por convección natural o forzada.

Cada construcción con materiales refractarios debe ser diseñada para minimizar las pérdidas de calor, este no es siempre el caso, y se debe tener mucho cuidado en algunas situaciones incluyendo las siguientes:

- 1) La cara caliente de los refractarios en una aplicación particular debe ser capaz de soportar las más altas temperaturas que resultan cuando las capas de material altamente aislantes sean añadidas en la parte de atrás.
- 2) La propiedades del refractario deben ser adecuadas para el medio ambiente. Por ejemplo, la mayor parte del material aislante no deberá estar expuesto al metal o a la escoria, y los materiales de respaldo pueden estar sujetos al ataque de componentes vaporizados del proceso (álcalis, componentes del azufre, ácidos, etc.) o sus condensados. Se deben dejar canales de salida de gas a través de materiales permeables para prevenir partes rojas o puntos rojos en la estructura metálica del horno.
- 3) El aislamiento incrementa la profundidad de penetración y ataque químico sobre las capas de la cara caliente.

Los hornos que operan bajo ciclos de altas temperaturas pueden beneficiarse al usar materiales de baja densidad, y el calor requerido para mantener las condiciones de equilibrio puede ser considerablemente reducido.

Muchas aplicaciones de refractario en plantas de fabricación de acero, nunca alcanzan el equilibrio térmico y deben emplearse cálculos dinámicos de transferencia de calor en el análisis de tales aplicaciones. En un horno de cuchara de acero, por ejemplo, las pérdidas de calor del acero y la temperatura de

la estructura metálica dependerá grandemente del precalentamiento interior del horno, del ciclo del tiempo y de las propiedades del refractario usado.

En ciertos ambientes severos, construcciones de refractario son enfriados con agua o aire para proveer más resistencia a la escoria, al metal, a la abrasión, al choque térmico, o a otros mecanismos de desgaste. En general, estos mecanismos de enfriamiento son diseñados para congelar o solidificar reacciones químicas y proveer un grosor del refractario estable que puede ser expresado como sigue²⁶:

$$X = K (T/7380 - 0.0605)$$

Donde:

X = Grosor estable del refractario, en pulgadas

T = Temperatura mínima del proceso de la reacción del refractario, en °F

K = Conductividad térmica, en Btu plg/pie²/h/°F

En este caso, la alta conductividad de los materiales tiene la ventaja obvia de un mayor grosor estable sin sus naturalmente bajas temperaturas mínimas de proceso de reacción del refractario. Así, los refractarios de más alta conductividad y compatibilidad son preferidos para tales ambientes.

La tabla 2-3, muestra la conductividad de las fibras aislantes en comparación a los materiales refractarios más convencionales. La fibra es usada por muy baja conductividad y su característica de bajo almacenamiento de calor, en comparación a otros materiales cerámicos. Estos materiales son usados donde lo más importante sea el ahorrar calor y la rapidez de la aplicación del producto.

²⁶ Según referencia No.6

COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES AISLANTES DE LA FIBRA REFRACTARIA CON OTROS MATERIALES

FORMA DEL MATERIAL	DENSIDAD DE MASA		CONDUCTIVIDAD TéRMICA (a la temperatura media indicada)							
	(kg/m ³)	(lb/pie ³)	(Btu pig/pie ² .°F.h)							
			260°C	540°C	815°C	1095°C	500°F	1000°F	1500°F	2000°F
Fibra refractaria	64 - 128	4 - 8	0.048 a	0.087 a	0.144 a	0.205 a	0.33 a	0.6 a	1.00 a	1.42 a
Fibra de silicato de calcio (970° a 1040°C)	336 - 384	21 - 24	0.079 0.092 a	0.149 0.107 a	0.288 —	0.459 —	0.55 0.64 a	1.03 0.74 a	2.00 —	3.18 —
Ladrillos aislantes										
1095°C	561	35	0.14	0.176	0.212	—	0.97	1.22	1.47	—
1260°C	673	42	0.218	0.276	0.333	0.390	1.51	1.91	2.31	2.70
1425°C	769	48	0.277	0.32	0.364	0.407	1.92	2.22	2.52	2.82
1540°C	929	58	0.289	0.361	0.433	0.505	2.00	2.50	3.00	3.50
1650°C	1009 - 1073	63 - 67	0.447	0.462	0.483	0.519	3.10	3.20	3.35	3.60
Concretos Ligeros (1095° a 1425°C)	465 - 977	29 - 61	0.130 a	0.159 a	0.216 a	0.260 a	0.90 a	1.10 a	1.50 a	1.80 a
Concretos de mediana densidad	1249 - 1410	78 - 88	0.231	0.252	0.289	0.375	1.60	1.75	2.00	2.60
Concretos de alta densidad y plásticos	1874 - 2146	117 - 134	0.346 a	0.303 a	0.390 a	0.433 a	2.40 a	2.10 a	2.70 a	3.00 a
Concretos de alta densidad y plásticos			0.462	0.779	0.736	0.664	3.20	5.40	5.10	4.60
Concretos de alta densidad y plásticos	1874 - 2146	117 - 134	0.923 a	0.952 a	0.952 a	0.996 a	6.40 a	6.60 a	6.60 a	6.90 a
Concretos y plásticos de alta densidad y alta alúmina	2227 - 2723	139 - 170	1.27	1.241	1.210	1.226	8.80	8.90	8.40	8.50
Concretos y plásticos de alta densidad y alta alúmina			1.154 a	1.154 a	1.154 a	1.226 a	8.00 a	8.00 a	8.00 a	8.50 a
Concretos y plásticos de alta densidad y alta alúmina			1.890	1.717	1.573	1.515	13.10	11.90	10.90	10.50

CAPÍTULO III

ESPECIALIDADES REFRACTARIAS

3.1. ESPECIALIDADES REFRACTARIAS²⁷.

En los últimos 15 a 20 años los materiales refractarios sin forma determinada, comúnmente conocidos como "Especialidades Refractarias", han estado ganando gran importancia en la construcción, reparación y mantenimiento de revestimientos refractarios de equipos de procesos químicos y metalúrgicos.

El éxito de su gran aceptación está basado en los grandes ahorros en tiempo de instalación, bajo costo mano de obra y por la gran maleabilidad que poseen para ser usados en reparaciones.

Las especialidades refractarias son mezclas de materiales refractarios, cuidadosamente seleccionados y balanceados en su tamaño de grano y agregados (aditivos), procesados y envasados generalmente en seco o con algún porcentaje de humedad, que se utilizan para la construcción y/o reparación de revestimientos monolíticos y no monolíticos.

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

3.2. MECANISMOS DE FRAGUADO DE ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.

Un claro entendimiento del tipo de mecanismos de fraguado usado en las especialidades refractarias, asegurará sin lugar a dudas un éxito tanto en la selección así como en la instalación de esos materiales.

El conocer los fundamentos básicos de tales mecanismos obliga al usuario, a seguir estrictas reglas para aplicar y asegurar una liga o fraguado en particular,

²⁷ Según referencia No.2

se derivan de aquí las propiedades óptimas que fueron diseñadas en ese producto refractario.

Los cuatro tipos básicos de sistemas de fraguado son²⁸:

1. Fraguado en caliente o liga cerámica.
2. Fraguado al aire.
3. Fraguado químico.
4. Fraguado hidráulico.

3.2.1. FRAGUADO EN CALIENTE O LIGA CERÁMICA.

Como su nombre lo dice es el tipo de fraguado diseñado para que un material endurezca solamente con la aplicación de calor.

Este fraguado en caliente algunas veces llamado de fraguado o liga cerámica, se desarrolla en un rango de temperaturas entre los 1,000° y 1,350°C, en donde partículas microscópicas se combinan sin llegar a fundirse.

La velocidad de fraguado depende en gran parte de la composición química del material y de la cantidad de calor que se utilice durante su quemado o servicio.

En los productos de fraguado en caliente, el endurecimiento inicial durante su colocación, es debido a la interacción de la arcilla y el agua, la cual es proporcionada para dar un soporte suficiente mientras ocurre el fraguado o liga cerámica.

Muchos productos usan métodos auxiliares de fraguado que los mantienen rígidos mientras se realiza el fraguado o liga cerámica.

Un concreto, por ejemplo, no podría mantenerse rígido a través de una temperatura entre los 25° y 1,000°C, a no ser por el agente ligante auxiliar que se haya utilizado. Por lo tanto, a pesar de que el fraguado en caliente es el más importante de los mecanismos de fraguado de las especialidades refractarias, este mecanismo no es generalmente empleado en los productos de hoy en día.

²⁸ Según referencia No.2

3.2.2. FRAGUADO AL AIRE.

Este tipo de mecanismo de fraguado es usado para dar cierto grado de rigidez a temperatura ambiente, debido a un agente químico ligante que asegura su endurecimiento al simple contacto con la atmósfera.

Estos productos también desarrollan su liga cerámica a alta temperatura, lo cual es deseable para proporcionar al material su máxima resistencia.

Los productos de fraguado al aire, presentan una alta resistencia mecánica a través de su espesor. Por otro lado, estos materiales ofrecen una gran variedad de rangos de temperaturas a los cuales pueden ser aplicados. Además y a diferencia de los materiales de fraguado en caliente, a los que es necesario aplicar calor inmediatamente, los productos de fraguado al aire pueden ser aplicados un día y ser quemados uno o dos días después, e incluso en algunos productos, hasta ser omitido el quemado.

3.2.3. FRAGUADO QUÍMICO.

Los productos de fraguado químico son usados para proporcionar una máxima rigidez, misma que se realiza por la adición de agentes químicos ligantes (como el ácido fosfórico), que asegura y desarrolla su máxima rigidez relativamente a baja temperatura, conservando excelente resistencia en su servicio.

Este sistema de fraguado solamente se emplea con materias primas de alta pureza, ya sean magnésitas o alúmina con el fin de evitar, con la adición de los ácidos o agentes químicos ligantes, que se generen compuestos inestables.

Los productos de fraguado químico dada la naturaleza de sus agentes ligantes, tienen un límite de vida en el almacenaje, por lo que requiere un estricto control, el cual debe incluir el tiempo de tránsito y almacenaje.

3.2.4. FRAGUADO HIDRÁULICO.

Los productos de fraguado hidráulico emplean un cemento que al mezclarse con agua, desarrolla una reacción química de fuerte fraguado o endurecimiento a temperatura ambiente.

El grado de alcance de esta reacción depende de la cantidad, temperatura y calidad del agua, del tiempo de mezclado, del tiempo y eficiencia de curado y de las condiciones térmicas circundantes.

Una instalación exitosa depende en un alto grado de los procedimientos de aplicación seguidos, existiendo para cada caso en particular reglas y precauciones para la aplicación, curado y quemado de los materiales de fraguado hidráulico.

3.3. APLICACIÓN DE ESPECIALIDADES REFRACTARIAS.

Las especialidades refractarias más conocidas y de mayor uso son:

1. Morteros
2. Concretos
3. Apisonables
4. Plásticos
5. Proyectables

Para lograr una instalación satisfactoria de las especialidades refractarias, se debe observar en el material a aplicar una adecuada granulometría, el contenido correcto de humedad y una adecuada consistencia, mismas que deben observarse en los productos que se presentan listos para usarse y controlarse, en los productos en seco al prepararlos, ya que del control de esta etapa y operación dependerá en gran parte el rendimiento de las aplicaciones.

3.3.1. MORTEROS REFRACTARIOS²⁹.

Los morteros son agentes refractarios ligantes, constituidos por una mezcla de compuestos refractarios finamente molidos, con agregados de otras sustancias que pueden no ser refractarias y que en estado húmedo se utilizan para adherir ladrillos o piezas refractarias.

La función principal de los morteros refractarios es la de evitar la penetración de líquidos, humos, gases, y uniformizar superficies y facilitar la instalación de los ladrillos.

²⁹ Según referencia No.2

Los morteros se clasifican e identifican por su comportamiento de fraguado, de los cuales se encuentran de **fraguado en caliente y de fraguado al aire**, aunque también los hay de fraguado hidráulico y de fraguado químico, siendo este último de poca importancia y de muy poco uso.

3.3.1.1. MORTEROS DE FRAGUADO EN CALIENTE.

Como su nombre lo indica, este tipo de morteros requieren relativamente alta temperatura para desarrollar su liga o adherencia y dependiendo de la calidad y características de los mismos, esta liga se efectúa entre los 1,000°C y 1,350°C.

Los morteros de fraguado en caliente que también se les llama de fraguado cerámico se presentan generalmente en forma seca, a los que agregándoles la cantidad suficiente de agua, hasta darle la consistencia adecuada, adquiriendo excelente trabajabilidad y fácil aplicación.

La característica principal de estos morteros, es que debido al gradiente de temperatura, sólo una parte del mortero o sea la zona más caliente (cara expuesta), logra desarrollar su liga cerámica, permaneciendo el resto inalterada.

Por lo anterior, este tipo de morteros es ideal para usarse en el ensamble de una boquilla con una porta-boquilla, ya que permite el rápido cambio de la boquilla, con un mínimo de destrucción de la porta-boquilla.

3.3.1.2. MORTEROS DE FRAGUADO AL AIRE.

Este tipo de morteros generalmente se presentan en forma húmeda, listos para usarse y vienen provistos con un agente químico ligante, que asegura el fraguado al simple contacto con la atmósfera.

Los agentes químicos ligantes mencionados, mantienen la potencia de la liga a temperaturas bajas e intermedias y aún a temperaturas por arriba de las que la liga cerámica toma lugar.

La característica principal de estos morteros, y a diferencia de los de fraguado cerámico, es que forman una unión completa y uniforme a través de todo el refractario, misma que va desde la cara caliente hasta la cara fría, resultando

juntas mecánicamente más fuertes, con alta resistencia a la abrasión y a la erosión.

Por lo anterior, estos morteros son ideales para usarse en aquellos lugares en donde se requiere evitar la penetración de líquidos, humos, gases y polvos a cualquier temperatura.

Dada la presentación en estado húmedo de este tipo de morteros, se recomienda que la mezcla o preparación se haga en el mismo recipiente, hasta obtener la consistencia adecuada a cada aplicación, siendo en ocasiones necesario agregar agua, ya que entre más homogénea sea la mezcla estos morteros adquieren mejor trabajabilidad.

Los mejores resultados se obtienen cuando las juntas presentan un espesor no mayor de 1/16", juntas más gruesas son inadecuadas y pueden llegar a provocar penetraciones y por lo tanto perforaciones que pongan en peligro la seguridad del personal y pérdidas considerables en la producción y en el equipo.

3.3.2. CONCRETOS REFRACTARIOS³⁰.

Estos productos están constituidos por una mezcla de materiales refractarios granulados cuidadosamente seleccionados en su tamaño, con agregados de un cemento resistente al calor, que asegura el fraguado hidráulico al mezclarse con agua a temperatura ambiente.

La forma tradicional para aplicar los concretos es en forma de vaciado y compactados con un vibrador sumergido, similar al tratamiento de un concreto de construcción ordinario, aunque también pueden aplicarse como apisonados y pistoleados.

Para aplicar concretos refractarios de fraguado hidráulico en la forma tradicional, es necesario observar y seguir estrictas normas, para obtener el máximo rendimiento del producto.

Las instrucciones que a continuación se describen, cubren los principios básicos aplicables a todos los concretos.

³⁰ Según referencia No.2

3.3.2.1. INSTRUCCIONES GENERALES PARA LA APLICACIÓN DE CONCRETOS REFRACTARIOS DE FRAGUADO HIDRÁULICO.

a) No usar concretos refractarios que se hayan deteriorado durante su almacenamiento o estén fuera de la fecha límite después de fabricado.

La mayoría de los concretos están diseñados para permanecer en buenas condiciones por seis meses a partir de la fecha de manufactura. En algunas ocasiones, los concretos refractarios que han sido almacenados bajo condiciones ideales, con baja humedad relativa en el medio ambiente, se encuentran en buenas condiciones por tiempos hasta de un año.

b) Usar el tipo de anclaje recomendado.

Los tipos de anclaje utilizados para concreto estructural (portland) no son adecuados para las instalaciones refractarias. En la construcción ordinaria, se utilizan varillas largas o malla de acero soldada, colocadas paralelamente a la superficie, dando buenos resultados, pues el cambio de temperatura raramente excede a los 32°C. Sin embargo, en el caso de los concretos refractarios las condiciones son completamente diferentes, los cuales están destinados a operar a temperaturas mucho más altas y en estas condiciones, el acero expande aproximadamente 2½ veces lo que el concreto refractario por cada incremento de 1° de temperatura, por lo tanto, una varilla larga o una malla soldada expande mucho más que el refractario y en lugar de reforzar el concreto refractario, la expansión del metal causará el rompimiento del mismo.

Otro problema es que la armadura de varillas o malla es calentada a la misma temperatura que el concreto que la rodea, pues no hay manera de enfriarla. A menos que la temperatura sea más bien baja, el refuerzo de metal será sobrecalentado, causando que se oxide, resultando en un excesivo crecimiento del diámetro de la varilla, con el consiguiente rompimiento del concreto refractario.

A través de muchos años de experiencia, actualmente se ha desarrollado un sistema de anclaje basado en anclas metálicas de una adecuada aleación o anclas refractarias para soportar las más drásticas condiciones de temperatura.

Dichas anclas metálicas son diseñadas de tal forma que exista transferencia de calor de la parte caliente del ancla hacia la coraza, evitando así un sobrecalentamiento del ancla y por consiguiente, evitar la expansión que pudiera romper el concreto refractario.

Excepciones a lo anterior se hacen cuando se tienen capas delgadas de concreto, operando a temperaturas inferiores a 425°C, que pueden anclarse con malla de acero o galvanizada. A temperaturas tan altas o mayores a los 650°C y en donde exista abrasión fuerte, a menudo se utiliza como anclaje malla hexagonal de acero.

c) Impermeabilizado de formaletas o cimbras.

Es de mucha importancia 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 no se agrega suficiente agua, esta reacción no llega a ser completa y el concreto refractario no desarrolla su resistencia total. Las formaletas o cimbras de madera que no hayan sido impermeabilizadas previamente, pueden absorber agua que el concreto necesita para desarrollar su liga hidráulica.

Un método para evitar que salga agua de la mezcla de concreto, es cubrir la formaleta, con algún tipo de cubierta impermeable, tal como aceite, parafina fundida o pintura de aluminio. Algunas veces es más conveniente usar una lámina impermeable de plástico como subpiso antes de vaciar el concreto refractario.

d) Revolver todo el material del saco antes de agregar agua.

Durante el transporte y manejo, puede tomar lugar alguna segregación de partículas finas y gruesas, y si no es pre-mezclado en su totalidad el contenido del saco antes de agregar agua, se encontrarán partes pobres del material de liga, originándose por consiguiente variaciones en su resistencia y trabajo. Esto es más marcado cuando se usan partes parciales del saco, por lo que es todavía más importante pre-mezclar el contenido del saco, con el fin de homogenizar la mezcla y lograr así los resultados esperados del material.

e) Evitar la contaminación.

Si se introduce dentro del concreto refractario durante el mezclado, algún material que lo contamine, podría:

- 1) Causar que el concreto refractario frague lento o parcialmente.
- 2) Fraguar más rápidamente de lo que debía y no permitir suficiente tiempo para que sea instalado adecuadamente.
- 3) Originar que el concreto tenga baja resistencia.

Entre los materiales contaminantes se podría mencionar al aceite, sal, azúcar, harina, otros cementos, morteros y algunos tipos de plásticos refractarios.

f) Usar la cantidad correcta de agua.

Una cierta cantidad de agua es necesaria para desarrollar la liga hidráulica. Una cantidad menor de agua reduce la resistencia y además, no tiene la trabajabilidad adecuada y es difícil de trabajar o compactar en una masa sólida que tenga la resistencia necesaria.

Demasiada agua reduce la resistencia del concreto refractario, presentándose incluso segregaciones entre los agregados y el material de liga al momento de la instalación.

El método de la pelota, es una prueba práctica que ayuda rápidamente a comprobar el contenido de humedad en la mayoría de los concretos y consiste en tomar con el puño un poco de material y lanzarlo al aire 1" o 2", varias veces, si la pelota se rompe en pedazos, indica que le falta agua; si la pelota se escurre entre los dedos, indica que tienen demasiada agua; si se forma perfectamente bien la pelota, indica que tiene la cantidad correcta de agua.

g) Mezclado apropiado y homogéneo.

Nunca debe mezclarse un concreto refractario sobre un piso o una caja con escapes de agua, donde algo del material de liga pueda ser arrastrado con el agua que escapa.

Cuando se mezcla a mano, el agua debe agregarse gradualmente y en el caso de mezclar por medio de una máquina, la mayor parte del agua debe ponerse en la mezcladora primero y mientras se mezcla, la cantidad adicional de agua necesaria se agregará para proporcionar la consistencia para su uso.

El tiempo de mezclado es igualmente tan importante como el uso del equipo adecuado. Si el concreto refractario no es mezclado suficiente tiempo o a una

velocidad muy alta, tendrá que agregarse más agua para desarrollar la trabajabilidad adecuada para su instalación, por otro lado tiempos muy largos podrían afectar el desarrollo de su liga hidráulica y por consiguiente su fraguado o endurecimiento se verá afectado.

h) Instalar el concreto refractario dentro del tiempo recomendado.

La mayoría de los concretos refractarios fraguan considerablemente más rápido que los concretos de construcción ordinarios. Si transcurre un periodo de tiempo largo antes de instalar el concreto refractario, empieza a fraguar y pierde parte de su resistencia, y si se utiliza no se obtendrá una buena instalación. Una vez que el concreto ha empezado a fraguar, no agregar agua para volver a producir una consistencia trabajable, por lo que debe tirarse esta carga y mezclarse nuevo material.

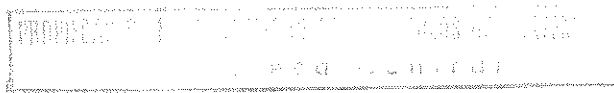
Algunos concretos refractarios endurecen unos cuantos minutos después del mezclado por aglutinamiento y no hay que confundir esta acción con la del fraguado hidráulico. Si el endurecimiento es causado por aglutinamiento y no por fraguado, se puede obtener nuevamente una buena consistencia trabajable simplemente mezclando nuevamente sin agregar agua, aunque es recomendable consultar las especificaciones del material, que proporciona el fabricante, en donde se identifican claramente las características de estos concretos refractarios.

i) Vibrado apropiado para eliminar bolsas de aire.

Un vibrado deficiente del concreto provoca oclusiones o bolsas de aire que dan por resultado una estructura porosa con baja resistencia. Las bolsas de aire y cavidades deben eliminarse para obtener homogeneidad y una estructura resistente.

Para el vibrado del concreto solo es necesario utilizar una pieza de madera, por ejemplo de 1" * 2" ó 2" * 4", o simplemente la cuchara de albañil. Pero para grandes masas de concreto, lo más efectivo es utilizar un vibrador para concreto de 1" de diámetro. Con el vibrador es posible instalar fácilmente el concreto obteniéndose muy buena consistencia.

Aunque la causa de problemas más frecuente es insuficiente vibrado, demasiado vibrado también es dañino; ya que puede causar la segregación del material de liga hacia la superficie o concentrarlo cerca del vibrador, si éste no se mueve



continuamente y si se retira rápidamente puede dejar un orificio en el concreto refractario.

j) No alisar las superficies para obtener un acabado terso.

Algunas veces el trabajador quiere hacer un trabajo bonito, alisando la superficie hasta obtener un acabado terso; esto causa que los finos lleguen a la superficie sellándola, ocasionando un secado deficiente al no permitir un fácil desalojo de la humedad, misma que ya en operación la capa delgada de la superficie puede desprenderse.

k) Evitar temperaturas extremas durante la instalación y mientras el concreto refractario está desarrollando su liga hidráulica.

Son indeseables tanto bajas como altas temperaturas del concreto refractario y de la atmósfera en que es instalado; las temperaturas ambiente más deseables están comprendidas entre los 15 y 32°C.

A temperaturas más bajas, disminuye la velocidad a la cual el concreto refractario fragua o desarrolla su resistencia. A temperaturas ligeramente superiores a los 0°C, el tiempo del concreto refractario aumenta a más de 2 veces el tiempo requerido normalmente.

Temperaturas muy altas incrementan la velocidad a la cual el concreto fragua o endurece. Esto significa que habrá menos tiempo para el mezclado y colocación del material.

l) No permitir que la superficie del concreto seque al aire en las 24 horas siguientes a su instalación.

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 se necesita para desarrollar su liga hidráulica.

Un modo de proteger la superficie del concreto refractario de la evaporación es rociarlo a intervalos regulares con una fina llovizna de agua. A este proceso se le llama cura, y debe empezar en el momento en que al frotar la superficie del concreto con el dedo no se manche, indica que está suficientemente duro para rociarlo y evitar que el mismo rocío arrastre el material de liga.

Los concretos refractarios ligeros, es decir, los concretos refractarios aislantes, no requieren rocío tan pronto ni tan menudo como los concretos densos, ya que se les ha agregado más agua para obtener la apropiada trabajabilidad para su instalación. En atmósferas calientes y secas, el rocío se requiere más frecuentemente. En general, es aconsejable rociar los concretos densos cada 30 min. a 1 hora, hasta que termine el período de 24 horas de curado.

Un método mejor de curado es aplicar sobre la superficie ya terminada y libre de humedad, una capa de material a base de resinas. Este tipo de material fue desarrollado para proteger a la superficie del concreto de la evaporación, pues forma una membrana impermeable que evita la evaporación del agua. El costo de la mano de obra se reduce considerablemente y este método es más seguro que el rocío de agua.

Después de que el concreto refractario ha desarrollado totalmente su liga hidráulica, puede permitirse secar al aire por tiempo indefinido antes de aplicar calor para completar el secado y llevar el equipo a las temperaturas de operación.

m) Calentar lentamente el concreto refractario por primera vez.

Como se explicó anteriormente, debe permitirse un mínimo de 24 horas para el curado antes de empezar el secado y calentamiento. Cuando la temperatura sea baja hay que alargar el tiempo de 48 a 72 horas.

Hay 2 razones por las cuales no debe calentarse demasiado rápido a los concretos refractarios por primera vez. Una es que éstos tienen una permeabilidad considerablemente más alta comparándola con los ladrillos o plásticos refractarios. Si se calienta demasiado rápido, el agua al evaporarse desarrolla alta presión dentro del concreto, lo cual romperá el revestimiento, arruinándolo.

Otra razón para no calentar los concretos refractarios demasiado rápido la primera vez, es que se pueden desarrollar una serie de grietas en la fase fría, las cuales se extienden dividiendo al concreto a través de fase caliente. En otras palabras, si se calienta demasiado rápido, causará que la fase caliente seque y eleve su temperatura, mientras que el resto del concreto se mantiene fría por la evaporación del agua. La fase caliente se expande causando el desarrollo de cuarteadas en la fase fría. Como resultado, el revestimiento de concreto

refractario no es fuerte y se pierden algunas de las ventajas del revestimiento monolítico.

3.3.2.2. CURVA DE CALENTAMIENTO PARA CONCRETOS AISLANTES Y DENSOS NORMALES³¹.

- a) Inmediatamente después del vaciado, el concreto se cubre con paños húmedos para que mantengan su humedad durante 24 horas. También se pueden usar los mismos sacos del concreto o un compuesto de curado.
 - b) Después de las 24 horas de curado, se retiran los paños o sacos y se deja secar al aire por otras 24 horas.
 - c) Se comienza a calentar a $25-35^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta $110-120^{\circ}\text{C}$.
 - d) Mantener a dicha temperatura 1 hora por cada pulgada de espesor de revestimiento.
 - e) Seguir calentando a razón de $40-50^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta la temperatura de operación.
- Si en algún momento del calentamiento se observa salida excesiva de vapor, debe mantenerse a esa temperatura hasta que cese la salida de vapor, luego continuar calentando a la misma razón de temperatura.

En la figura 3-1 se muestra la curva de calentamiento para concretos aislantes y densos normales.

CURVA DE CALENTAMIENTO PARA CONCRETOS AISLANTES Y DENSOS NORMALES

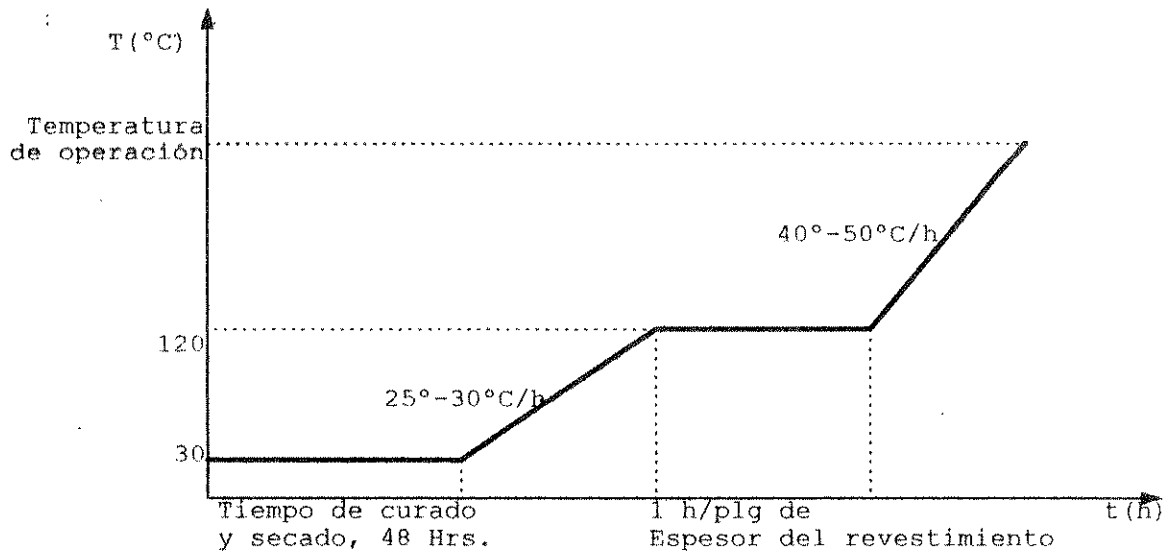


FIGURA 3-1

³¹ Según referencia No.5

La figura 3-2, muestra la curva de calentamiento para moldeables densos de alta pureza.

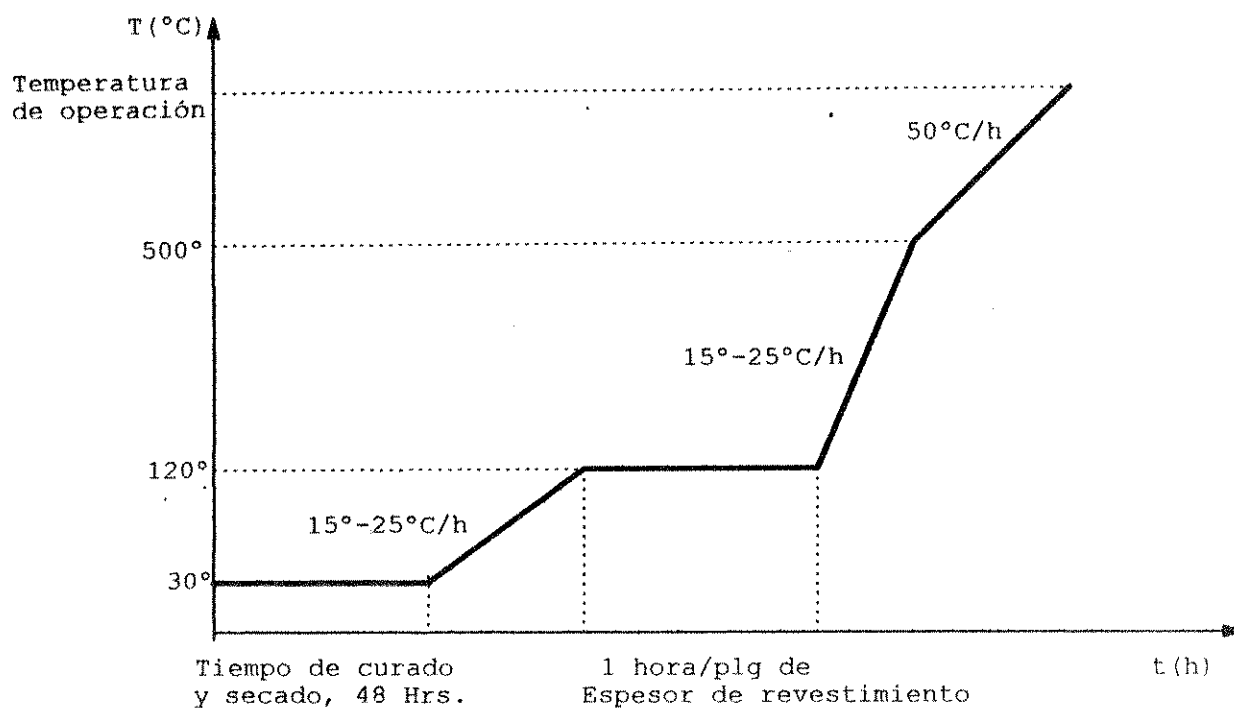


FIGURA 3-2

3.3.3. APISONABLES³².

Los 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, formando estructuras monolíticas de una dureza excepcional al endurecer al simple secado con el aire o bien al aplicarles temperaturas.

Los Apisonables se presentan en estado húmedo listos para usarse y en estado seco a los que es necesario agregar agua, hasta que adquiera consistencia y trabajabilidad.

La consistencia en los apisonables se la da el grado de humedad, misma que en ningún caso será mayor a un 10%. Una manera práctica para tener una idea de la consistencia y trabajabilidad de los apisonables, es tomar con la mano una parte del material y oprimirlo cerrando la mano con fuerza, y tomar la muestra con las

dos manos y tratar de partirla en dos, si así sucede, significa que el apisonable tiene buena consistencia y trabajabilidad; si no, seguramente la humedad no es la correcta o la granulometría no es adecuada.

3.3.3.1. APLICACIÓN DE LOS REFRACTARIOS APISONABLES.

Dada las características de los apisonables, éstos pueden ser aplicados en 2 diferentes formas:

Una sería en capas de 3 a 4" y compactar a 1½ ó 2", mediante herramientas neumáticas, como las pisonetas, en donde los pisones pueden ser de hule o metálicos y el diámetro de los mismos variará de acuerdo a cada aplicación; pero en general no usar pisones con un diámetro menor de 1½". Al apisonar una capa, es muy importante raspar su superficie hasta tenerla rugosa, con el objeto de que al aplicar la siguiente capa, se tenga continuidad con toda la masa del apisonable y evitar laminaciones, mismas que al secarse el material y en operación correrán el peligro de levantarse, este defecto es más frecuente en la última capa, la cual debe procurarse no sea menor de 1" de espesor.

Otra manera de usar los apisonables es aplicarlo y apisonarlo en forma continua no por capas, obteniéndose excelentes resultados en cuanto a compactación. Además que con este método se eliminan prácticamente las laminaciones ya que existe una mejor continuidad con toda la masa del apisonable.

3.3.4. PLÁSTICOS REFRACTARIOS³³.

Los plásticos son productos constituidos esencialmente por una mezcla íntima y en proporciones determinadas de materiales refractarios en estado natural o calcinados, con o sin otras substancias, que mezclados y amasados con agua adquieren plasticidad para ser moldeados, formando estructuras monolíticas con capacidad de endurecer y mantener sus características físicas desde bajas temperaturas (110°C) hasta las de uso.

³² Según referencia No.7

³³ Según referencia No.7

Generalmente los plásticos se presentan de fraguado al aire, aunque existen tipos de fraguado cerámico.

La principal diferencia entre los plásticos y los apisonables es su contenido de humedad y por consiguiente su trabajabilidad, que a través de la prueba del índice de trabajabilidad se encuentran valores de un 15% como promedio.

3.3.4.1. APLICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS REFRACTARIOS.

Para aplicar los plásticos se pueden emplear herramientas manuales, pero es preferible con herramientas neumáticas, observando las siguientes recomendaciones:

a) Limpiar perfectamente de polvo u otros materiales la zona donde se aplicará el plástico.

Es recomendable antes de aplicar el plástico sopletear o lavar con agua y/o aire la zona donde se aplicará, con el fin de asegurar un buen sello entre el plástico y la zona afectada o por rellenar.

Cuando se trate de reparar desgaste u orificios en paredes o revestimientos con uso, es recomendable quitar la cascarilla superficial, hasta encontrar superficies de refractario sanas, ya que si se aplica sobre la superficie usada se corre el riesgo de que ya en operación dicha cascarilla o costra puede levantarse y ocasionar desprendimientos parciales y en casos extremos hasta totales. En algunos casos, si se desea mayor seguridad en la aplicación, puede rociarse la superficie con algún mortero de fraguado al aire, mismo que servirá como agente ligante entre el plástico y la parte usada.

b) Cortar secciones de aproximadamente 3" del plástico.

Dadas las características de envase de los plásticos, algunos fabricantes lo envasan ya seccionado en 4 o más fracciones de aproximadamente 3" de grueso, facilitando su manejo y uso, pero si no se presenta así, será necesario cortarlo en las dimensiones ya mencionadas, ya que para apisonar este material, se tendrá más control del apisonado y se disminuirán los desperdicios principalmente al final y cuando no se consuma el total del envase, éste puede ser protegido del ambiente y utilizarse posteriormente.

c) Colocar las secciones de plástico preferentemente longitudinales y apisonarlas hasta que queden fuertemente adheridas.

El tratar de colocar y apisonar en forma longitudinal o sea paralela a la cara de trabajo, superficie caliente, es una forma de asegurar el apisonado de tal manera que se eviten posibles grietas y/o laminaciones, tener siempre una superficie fija de apoyo y que al compactar se reduzca de 3" a 2 ó 2½" el espesor de la sección de plástico, asegurando una buena adherencia, con el mínimo de esfuerzo y presión de la herramienta.

Dadas las características de estos materiales y a diferencia de los apisonables, al aplicarlos no se requiere una gran presión de la herramienta y/o un excesivo apisonado, ya que esto favorecerá la formación de una capa superficial muy fina, misma que dificultará que la siguiente sección a aplicar no se adhiera y se formen capas o laminación, que al secarse y ya en operación, se formarán grietas disminuyendo la calidad del material y de la aplicación.

d) Antes de colocar la siguiente sección, raspar la superficie aplicada.

Frecuentemente al apisonar un plástico, es posible la formación de una capa superficial muy fina, misma que al aplicar la siguiente sección impedirá una buena adherencia, formando laminaciones; por lo que es necesario remover esa capa superficial raspando, por ejemplo, con una cuchara de albañil, hasta dejar una superficie rugosa y a continuación aplicar la siguiente sección.

e) Repetir los incisos c y d tantas veces como sea necesario hasta terminar la aplicación.

En este inciso sólo se agregará que la última sección a aplicar no debe ser menor de 2" de espesor, ya que al compactar esta capa presentaría un alto riesgo de quedar laminada y con muchas posibilidades de levantarse o desprenderse durante la operación.

f) Evitar superficies lisas al terminar la aplicación.

Es conveniente dejar rugosa la superficie al terminar la aplicación, raspando la cara expuesta con una cuchara de albañil, con el fin de facilitar la eliminación de humedad, pues de otra manera la presión que el vapor de agua ejerce al tratar de

salir a la atmósfera puede botarlo provocando explosiones que lo destruyan, reduciendo la eficiencia de la aplicación.

g) Secar lentamente hasta que haya sido eliminada totalmente la humedad.

Los plásticos pueden secarse a razón de 10 a 24°C por hora, hasta llegar a una temperatura de entre 200 a 260°C y mantener esa temperatura hasta que deje de salir vapor. Para estimar este tiempo, se puede tomar como norma mantener la temperatura de entre 200 a 260°C, una hora por pulgada de espesor de la pared.

Una vez hecho lo anterior, elevar la temperatura a razón de 40°C por hora hasta alcanzar la temperatura de operación. Estos criterios para secado y quemado de plásticos pueden emplearse también para los apisonables.

3.3.5. PROYECTABLES³⁴.

Son aquellos materiales refractarios cuidadosamente elaborados y balanceados en cuanto a su tamaño de grano, que contienen agregados que le dan una alta adherencia, diseñados especialmente para aplicarse con máquina de proyección y que se utilizan para revestir y/o reparar aquellos equipos con las más intrincadas configuraciones, en áreas inaccesibles para aplicar refractarios por medio de otros métodos o simplemente como parte de programas de mantenimiento de equipos refractarios principalmente en caliente.

La utilización de estos productos y su aplicación por método de proyección, es ideal especialmente para aplicar o colocar grandes cantidades de material en un tiempo extremadamente más corto comparado con cualquier otro método, además de que 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. Los proyectables se identifican y clasifican básicamente por su densidad y se dividen en dos grandes grupos: los de alta densidad (pesados) de grano grueso, medio y fino; y los de baja densidad (peso ligero) de grano grueso, medio y fino.

³⁴ Según referencia No. 7

Los proyectables de alta densidad, son usados principalmente para mantenimiento de hornos de procesos metalúrgicos, hornos de recalentamiento, hornos para forja, etc., que operan a altas temperaturas.

Los proyectables de baja densidad como los aislantes, son usados ya sea como componentes de trabajo de revestimientos aislantes y/o mantenimiento de los mismos o también como aislamientos detrás de los revestimientos de mayor densidad y mayor refractabilidad.

En cualquier operación de procesos metalúrgicos, el principal objetivo es lograr la mejor vida del refractario al más bajo costo posible.

CAPÍTULO IV.

APLICACIÓN, MANEJO Y PREPARACIÓN DE MATERIALES REFRACTARIOS.

4.1. APLICACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.

Sin lugar a dudas el éxito o fracaso en la aplicación de los refractarios, está determinado en gran parte por una adecuada selección y principalmente por la preparación de los mismos.

Una buena preparación de materiales refractarios puede ser afectada, si no se tienen los conocimientos necesarios sobre las características de los diferentes materiales, mismas que determinan las condiciones de manejo y almacenaje apropiado que garanticen su conservación, pues son altos los costos de las empresas, no sólo por desperdicios (romperse el envase, materiales caducos o pasados, etc.), sino también por bajo rendimiento de las aplicaciones, por mala preparación al no seguir las reglas mínimas.

La crisis del petróleo en 1,973 actuó en un momento crucial, haciendo más lento el ritmo de la producción, pero aumentando considerablemente las exigencias tecnológicas de la industria, tales como equipos a gran escala, continuación de las líneas de producción, ahorros en mano de obra y recursos, así como mejoramiento de la calidad y diversificación de los productos. No debe pasarse por alto el papel desempeñado por los materiales refractarios durante estas últimas décadas en la satisfacción de los requerimientos de la producción, alta capacidad y en contribuir a hacer posibles tales innovaciones tecnológicas. Algunos problemas nuevos que están surgiendo, especialmente a raíz de la necesidad de ahorrar energía en la industria, están exigiendo servicios más sofisticados y duraderos de los refractarios, como parte de los repetidos problemas en relación con estos materiales que exigen una solución en la historia de la siderúrgica.

Las siguientes aplicaciones dan una idea general de la utilización actual de los materiales refractarios.

4.1.1. ALTO HORNO.

Para lograr una larga vida del horno, los refractarios más importantes son los de la parte interior de la cuba y del crisol. En el anexo-1, se muestra la figura del perfil del revestimiento de un alto horno gigante. Se considera que la parte principal, causa de desgaste de los refractarios de la parte inferior de la cuba, es la alteración y destrucción por los vapores alcalinos y depósitos de carbono, por la desintegración del CO del gas del horno bajo la acción catalítica del óxido de hierro en los ladrillos de arcilla refractaria y la destrucción resultante de los ladrillos. En consecuencia, en esta zona se han utilizado de preferencia ladrillos densos de arcilla refractaria, de bajo contenido de óxido de hierro o ladrillos de alta alúmina. Recientemente, se han utilizado ladrillos de carburo de silicio debido a su elevada resistencia a los vapores alcalinos.

Algunos investigadores hicieron notar recientemente los casos de fractura por sollicitación térmica y descascaramiento de los ladrillos en la parte interior de la cuba debido a los cambios de temperatura en los ladrillos, por la adhesión y eliminación de las colgaduras y menor capacidad de retención de los ladrillos a causa del uso de enfriadores en forma de placas, que conducen al descascaramiento de las puntas de los ladrillos.

Para evitar estos daños, resultan efectivos los ladrillos de carburo de silicio, ya que poseen una elevada resistencia mecánica y resistencia al choque térmico. De hecho, este tipo de ladrillos se utiliza en cierta medida en la parte inferior de la cuba, como se muestra en el anexo-1.

En cuanto al crisol de los altos hornos, los bloques de carbono están reemplazados en gran medida por los ladrillos de arcilla refractaria, utilizándose a menudo en los hornos pequeños para prolongar la vida del crisol en base al efecto enfriador derivado de la alta conductividad térmica de los bloques de carbono. Generalmente, para el crisol se usan dos tipos de bloques de carbono: unos son los bloques de carbono en base a grafito, que se utilizan principalmente para la parte baja del crisol, para lograr un efecto enfriador fuerte a través del sistema enfriador, por agua o aire bajo el crisol, debido a su elevada conductividad térmica. Los otros, son los bloques de carbono en base a antracita, usados

principalmente en la parte superior del piso del crisol. Estos bloques requieren resistencia a los álcalis, resistencia a la penetración de arrabio líquido e insolubilidad en el arrabio líquido. En el cuadro 4-1, se incluyen las propiedades típicas de los refractarios para altos hornos.

En los altos hornos gigantes, la duración del revestimiento de los crisoles no siempre ha sido satisfactoria en relación a la de los hornos pequeños, algunos de los cuales pueden operarse dos o tres veces, con reparación de sólo el etalaje y cuba. Actualmente se requieren muchos mejoramientos para obtener crisoles de mayor duración, en base a diversas investigaciones relacionadas con material, diseños, enladrillados y mantenimiento.

4.1.2. REGENERADORES.

El uso de ladrillos de sílice es característico de los regeneradores, debido a la necesidad de obtener viento a mayor temperatura. Para evitar la pérdida de calor inherente al viento a alta temperatura, se usan de preferencia ladrillos aislantes silicosos, que tienen una elevada resistencia a las altas temperaturas, buena resistencia a la fluencia y baja conductividad térmica. Debido al uso de grandes cantidades de ladrillos de sílice, las velocidades de calentamiento y de enfriamiento durante el encendido y el apagado del regenerador, respectivamente, deben controlarse en forma estricta para evitar la formación de grietas durante la transformación de la sílice. Los regeneradores operados de la manera mencionada podrán utilizarse durante dos o tres campañas del alto horno.

4.1.3. CANALÓN.

Se usan materiales apisonados que contienen ligantes en base a alquitrán o brea. Las características de los materiales para apisonado es el uso de granos de carburo de silicio, conjuntamente con granos de alta alúmina (fundidos o tabulares) y granos de bauxita calcinada o de arcilla refractaria, que tienen buen rendimiento y larga duración. Actualmente, en la instalación de canalones se hace amplio uso de los materiales para apisonado, con apisonado manual o semi automático, pero se han desarrollado algunos métodos nuevos de instalación para reducir el trabajo

PROPIEDADES DE LOS LADRILLOS PARA ALTOS HORNOS Y REGENERADORES

TIPO DE LADRILLO	Carbono	SiC		Alta-alúmina		Arcilla refractaria	Silice
		Fondo del AH	Parte inferior de la cuba	Fondo	Toberas		
Refractariedad	-	-	-	35*	40*	33	33
Porosidad aparente	17.9	13		12.7	16	10.5	19.7
Densidad aparente	1.58	2.56		2.35	3.12	2.25	1.85
Resistencia a la compresión en frío (kgf/cm ²)	438	1,661		1,216	1,141	695	611
Conductividad térmica	11.5	15.9					
Refractariedad bajo carga (T ₂ °C)				1,500	1,700	1,365	1,636
Composición química	95.6	81.1					
(% en peso)				43.8	94.7	31.2	1
				54.5	1.5	61.8	96.1
				0.9	0.4	1.5	0.7
				0.6		2.7	

físico en atmósferas calientes y para mejorar las condiciones sanitarias y ambientales durante la instalación en caliente y ruptura de los canalones usados.

Uno de los nuevos métodos de instalación es el método de vaciado, este método es básicamente igual a la conformación de los concretos refractarios. El material húmedo se vacía entre el canalón gastado y el molde interno y se llena totalmente con un vibrador. Luego del curado y fraguado para endurecer la masa, el canalón se seca y se precalienta. Como una de sus características, este material tienen una buena fluidez, con una menor adición de agua (6 a 9%) que la de los concretos refractarios usuales, debido a que se utiliza en forma efectiva el efecto de defloculación y coagulación del sistema de arcilla con agua. Debido a la poca adición de agua, la masa que se obtiene por este método tienen una alta densidad. Este método puede aplicarse a todo tipo de canalones, siempre que sobre el piso de la zona se distribuyan los materiales hacia el canalón.

El otro nuevo método de instalación es el método de conformación por vibración. En este método, se lanzan en el canalón gastado materiales húmedos y tixotrópicos, que poseen fluidez cuando están sometidos a fuerzas externas tales como la vibración, que se solidifican por eliminación de las fuerzas y a continuación, el molde externo en el cual se encuentran los vibradores se comprime en el material con vibración, en seguida, se extrae el molde interior. Este método permite también obtener un cuerpo denso con menos adición de agua.

En el método de instalación por apisonado, luego de la ruptura y la eliminación de todo el material refractario residual, se apisona una nueva masa. Si el material para apisonado está fuertemente sinterizado durante su uso, se hace difícil romper el material residual. Por otra parte, si los restos son fácilmente quebrables, estos materiales podrían tener un rendimiento deficiente. Desde este punto de vista, el mejoramiento de los materiales de apisonado es un problema complicado.

En contraste con el método de apisonado, los nuevos métodos para instalar el canalón, luego de eliminar sólo las adherencias y escoria de la superficie del canalón usado, tienen la gran ventaja de que los materiales que quedan del canalón usado pueden utilizarse totalmente para la instalación siguiente. Por lo tanto,

los métodos hacen que la vida del revestimiento sea semi permanente. En estos métodos, como los materiales se aplican solamente en las áreas erosionadas, puede disminuirse considerablemente el consumo de refractarios. Un resultado típico de rendimiento de canalones es el siguiente:

**1 millón de toneladas para el arrabio que ha pasado por el canalón
y 0.38 kg/t de arrabio para el consumo de refractarios.**

4.1.4. TRANSPORTE DEL ARRABIO LÍQUIDO.

El transporte del arrabio líquido, desde el alto horno a la acería, se lleva a cabo principalmente por medio de carros torpedo, para evitar la baja de temperatura durante el transporte y debido a su facilidad para ser usados como recipientes de reacción, para la desulfuración. Como cada vez se desea acero de mejor calidad se ha adoptado ampliamente la desulfuración del arrabio por medio de ciertos tipos de métodos de inyección.

Al aumentar la desulfuración mediante compuestos de calcio, los refractarios del carro torpedo sufren severos daños provocados por el aumento de la basicidad de la escoria por mayor fuerza de la agitación. A medida que aumenta la tasa de desulfuración, disminuye la duración del revestimiento de los carros torpedo. Para hacer frente a esta situación, se ha ensayado en el revestimiento de los carros torpedo el uso de ladrillos de alta alúmina y ladrillos que contengan carbono, tales como los de magnesia-grafito y de Mulita ligados con carbono, pero estos materiales no siempre resultan satisfactorios. En el anexo-2, se muestra la figura de uno de los revestimientos de prueba de un carro torpedo.

En cuanto al mantenimiento del revestimiento de los carros torpedo, cuyo desgaste es difícil de observar directamente, la medición de la temperatura por medio de una cámara de rayos infrarrojos ha dado buenos resultados. Por la medición a distancia de la temperatura de la carcasa, pueden determinarse en forma precisa el área y tiempo de reparación, permitiendo así hacer mejor uso del revestimiento. La cámara de rayos infrarrojos se ha aplicado también a diversos hornos tales como convertidores básicos al oxígeno, recipientes para

desgasificación y hornos de recalentamiento, contribuyendo a una disminución del consumo de refractarios y ahorros de energía.

4.1.5. CONVERTIDOR BÁSICO AL OXÍGENO.

Para un mejor aprovechamiento del convertidor básico al oxígeno se deben cumplir las siguientes características:

- 1) Uso de refractarios de buena calidad
- 2) Sucesivas reparaciones por gunitaje.
- 3) Mantenimiento del revestimiento con un alto grado de confiabilidad.
- 4) Técnicas de operación tales como control de la escoria por medio de cal dolomítica.

4.1.5.1. MATERIALES REFRACTARIOS:

En una de las primeras etapas, los principales refractarios para el revestimiento eran ladrillos de dolomita sin quemar, ligados con alquitrán, sin quemar para el cono, cuerpo y fondo y ladrillos de dolomita estabilizada quemada para la plataforma de carga. En años recientes se han reemplazado por ladrillos de magnesia-dolomita quemados e impregnados con alquitrán. Los ladrillos de magnesia-dolomita usados comúnmente en la actualidad se caracterizan por ser de magnesia de agua de mar y clinker de dolomita sintética con alto contenido de MgO. La composición química del clinker de dolomita sintética es la siguiente: 73-76% de MgO; 21-24% de CaO; 0.3% de Al_2O_3 ; 0.6% de SiO_2 y 1% de Fe_2O_3 . En comparación con el clinker de dolomita natural, los componentes fúndentes, es decir, el SiO_2 , el Al_2O_3 y el Fe_2O_3 son muy bajos. El clinker de magnesia usado para los refractarios del convertidor básico al oxígeno tiene un bajo contenido de B_2O_3 ($< 0.1\%$) y una relación CaO/ SiO_2 relativamente elevada (2-3). Los ladrillos hechos con los clinkers mencionados tienen buena resistencia a la escoria del convertidor debido a los componentes susceptibles de eliminar la formación de fase líquida a altas temperaturas y una buena resistencia al desconchamiento. Para la parte del revestimiento expuesta al ataque de escorias agresivas, el ladrillo que contiene

grano de MgO fundido, en lugar de clinker de magnesia de agua de mar, muestra una buena durabilidad, pero una buena parte de estos ladrillos hacen aumentar el costo del revestimiento de los convertidores básicos al oxígeno.

El desarrollo más reciente en cuanto al revestimiento de convertidores básicos al oxígeno es el uso creciente de ladrillos de magnesia-grafito. Luego de los buenos resultados de los ladrillos de magnesia-grafito para alargar la duración de los fondos de los convertidores, estos ladrillos se han aplicado a un área más extensa del convertidor, debido a su mayor resistencia al choque térmico y al ataque de la escoria. La durabilidad de los ladrillos en el lado del muñón del cuerpo del convertidor es de una y media a dos veces mejor que los ladrillos convencionales de dolo-magnesita. Actualmente, la aplicación de ladrillos de magnesia-grafito se ha hecho extensiva al cono superior, línea de escoria y plataforma de carga. En el cuadro 4-2, se incluyen las propiedades de los refractarios para convertidores al oxígeno usados generalmente. El ladrillo de magnesita-grafito típico es uno de los ladrillos no quemados, ligados por resina, susceptible de endurecerse con el calor y contiene 15 a 20% de carbono.

4.1.5.2. REPARACIÓN POR PROYECCIÓN.

Los materiales para proyección utilizados en una etapa inicial eran materiales ligados con solución de silicato de sodio o fosfato. Más adelante, el método de gunitaje se reemplazó por un método semi seco, en que se agrega agua en la parte superior de la boquilla. En consecuencia, los materiales se han reemplazado por algún complicado tipo ligado con fosfato. Paralelamente al mejoramiento del material para gunitaje, se ha desarrollado una máquina automática de gunitaje, que contribuye a ahorrar mano de obra en la reparación.

En el anexo-3, se muestra la figura de un perfil típico del revestimiento de un convertidor básico al oxígeno.

PROPIEDADES TÍPICAS DE LOS LADRILLOS PARA CONVERTIDORES BÁSICOS AL OXÍGENO

Tipo de ladrillo	Magnesia-dolomita quemada e impregnada con alquitrán		Magnesia-graftito ligado con resina	Ladrillos ligados con alquitrán	
	Estándar	Alta-MgO		Magnesia dolomita	Magnesia
Porosidad aparente (%)	13.50	13.80	4.00	5.50	6.30
Densidad aparente (gr/cm ³)	2.99	3.03	2.82	2.90	3.05
Resistencia a la compresión en frío (gr/cm ²)	765.00	685.00	364.00	450.00	550.00
MgO	81.90	90.50	77.30	56.60	90.60
CaO	15.40	8.10	0.60	33.20	1.10
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	2.30	1.30	2.60	2.60	2.90
C	-	-	21.40	4.00	5.40

4.1.5.3. MANTENIMIENTO DEL REVESTIMIENTO.

Para obtener un perfil uniforme del revestimiento gastado y disminuir las pérdidas de material de gunitaje, es muy importante contar con una técnica para medir el perfil gastado. Como se indicó anteriormente, también se utilizan para esto una cámara de rayos infrarrojos y se han obtenido buenos resultados. En algunas plantas siderúrgicas, se ha usado un aparato para medir el perfil gastado por medio de un rayo láser. En este método, se almacena en la memoria de la computadora información tal como puntos estándar en el labio del convertidor y perfil recientemente revestido y se comparan las mediciones a distancia por el rayo láser con los datos almacenados. A partir de esta comparación, se obtiene el perfil gastado.

Este perfil gastado se aplica en forma efectiva a la reparación por gunitaje, es decir, una delgada área del revestimiento se repara con concentración. Esta técnica permite disminuir considerablemente el consumo de material de gunitaje.

4.1.5.4. TÉCNICAS DE OPERACIÓN.

Es bien sabido que algunas condiciones de operación, es decir, contenidos de Si y Mn en el arrabio líquido, proporción de coladas sopladas dos veces, control de la escoria, consumo de espatofluor, etc. afectan la vida del revestimiento. Las recientes condiciones de operación, representadas por mayores temperaturas de colada debido al aumento del uso de la colada continua y de la desgasificación han reducido la vida del revestimiento. Pero se han desarrollado muchas técnicas de operación para disminuir los efectos dañinos sobre la vida del revestimiento y recientemente, la total automatización de las operaciones con el sistema de lanza sumergida. Esta técnica de operación permite disminuir la proporción de coladas sopladas dos veces y el tiempo entre el término del soplado hasta la colada, gracias a una alta probabilidad de dar en el blanco.

En consecuencia, se logra una cierta reducción del tiempo de permanencia del acero líquido en el convertidor, de los contenidos de óxidos de hierro en la escoria y de la temperatura de colada, lo que redundará en una prolongación de la vida del revestimiento.

4.1.6. HORNO ELÉCTRICO DE ARCO.

En la fabricación del acero el proceso básico en hornos eléctricos de arco, los esfuerzos y ataques a que se someten los refractarios hacen necesario el uso de diversas calidades, tanto en construcción como en mantenimiento.

Para lograr una buena productividad, la mayoría de los hornos de arco se operan con alta potencia o ultra alta potencia. El revestimiento típico de los hornos de arco se muestra en el cuadro 4-3.

REVESTIMIENTO TÍPICO DE LOS HORNOS DE ARCO³⁵

ELEMENTO	REFRACTARIO	TIPO DE REFRACTARIO
Solera Paredes	Apisonado Ladrillos	Magnesia o dolomita Sin quemar, de magnesia-cromo directamente ligados o elec- trofundidos.
Área caliente de la pared Parte principal de la bóveda	Ladrillos Ladrillos	Magnesia-grafito. De alta alúmina o de sílice o básicos del tipo suspendido.
Centro de la bóveda	Ladrillos o apisonado	Alta alúmina.

CUADRO 4-3

Actualmente, han aumentado los hornos contruidos por bloques con agua y este sistema de enfriamiento se está extendiendo de las paredes a la bóveda. Si se efectúa un adecuado mantenimiento del agua de enfriamiento, las vidas de los revestimientos enfriados con agua es muy larga y además, el sistema es competitivo en relación al revestimiento convencional en lo que se refiere a los costos.

En el anexo-4, se muestra la figura de un perfil típico de horno eléctrico de arco.

4.1.7. RECIPIENTE DE DESGASIFICACIÓN.

El proceso de desgasificación al vacío facilita la eliminación de carbono, hidrógeno y oxígeno en el acero líquido, disminuye las inclusiones no metálicas y permite mejorar la calidad del acero por medio de la alimentación de aleaciones al

³⁵ Según referencia No.4

vacío. Como proceso de desgasificación, los métodos R-H y D-H son los más populares para tratar grandes volúmenes de acero. Es necesario que los refractarios usados en los recipientes de desgasificación sean estables en atmósferas al vacío a altas temperaturas, soporten la abrasión por la circulación de acero líquido y resistan las fallas por desconchamiento provocadas por los cambios de temperatura entre los períodos de operación y los de parada.

Al principio se usaron ladrillos de alta alúmina para los recipientes de desgasificación debido a su estabilidad en vacío a alta temperatura. Más adelante, se investigaron materiales más resistentes a la erosión. Se probaron en recipientes industriales ladrillos de magnesia quemados, ladrillos de magnesia-cromo de liga directa y ladrillos de magnesia-cromo fabricados por fusión y vaciado, y ahora se ha popularizado el uso de los ladrillos de magnesia-cromo de liga directa.

4.1.8. CUCHARAS.

Los refractarios de las cucharas se consumen en la mayoría de los casos como refractarios de carrera, para la fabricación de acero. Se usan de preferencia ladrillos de arcilla refractaria cuyo mineral original principal es la pirofilita y los así llamados ladrillos "Roseki", para las cucharas de colada, debido a su gran eficiencia y bajo costo. La composición química de los ladrillos Roseki es 57 a 85% de SiO_2 , 15 a 20% de Al_2O_3 y 0.3 a 1.5% de R_2O . Es bastante durable frente al ataque de la escoria debido a su adecuada expandibilidad y formación de una fase líquida rica en sílice en la cara de trabajo durante el servicio. Pero el aumento de la temperatura del acero líquido y la prolongación del tiempo de permanencia en la cuchara debido al aumento del uso de la colada continua, desgasificación y burbujeo con gas acortan la vida de la cuchara. Contra estas severas condiciones se han tomado medidas correctoras.

Una de ellas es el revestimiento zonificado con ladrillos de circonio y ladrillos Roseki. En el anexo-5, se muestra la figura de un ejemplo de un perfil de revestimiento de una cuchara de colada en relación al tipo de acero. Las propiedades de estos ladrillos se incluyen en el cuadro 4.4. Las paredes de las

PROPIEDADES TÍPICAS DE LOS LADRILLOS PARA CUCHARAS DE COLADA

Tipo de ladrillos	Roseki		Circón		
	Quemados		Quemados	Sin quemar	
	General	Bajo R ₂ O	ZB-2	Z-4	Z-5
Refractariedad (SK)	27	30	38	28	26
Porosidad aparente (%)	14.9	13.5	18.2	13.3	9.6
Densidad aparente (gr/cm ³)	2.18	2.24	3.66	3.27	3.02
Resistencia a la compresión en frío (gr/cm ²)	600	500	1100	430	500
Refractariedad bajo carga (T ₂ , °C)	1310	1480	1540	1350	1300
SiO ₂	80.3	77.6	34.7	44.8	56.7
Al ₂ O ₃	17.2	21	2	3.8	7.3
Fe ₂ O ₃	0.8	0.3	0.2	0.4	0.6
R ₂ O	1.3	0.3	-	0.9	1.1
ZrO ₂	-	-	62.9	48.9	32.4

cucharas de cierto tipo de acero colado a elevadas temperaturas se revisten con ladrillos de circón y aquellas para aceros calmados comunes, se revisten con ladrillos Roseki, a excepción de las líneas de escoria superior e inferior, que se revisten con ladrillos de circón. Para el acero efervescente se usan cucharas revestidas con ladrillos Roseki, a excepción de la línea superior de escoria, que se reviste con ladrillos de circón. En los dos últimos casos, el fondo de la cuchara se reviste con ladrillos Roseki para ladrillos usados para revestimientos de seguridad se cambian para satisfacer cada condición de servicio diferente.

Las técnicas de reparación de las cucharas han contribuido en gran medida a disminuir el consumo de refractarios y los costos. Una técnica típica para la reparación de cucharas es el método de revestimiento auxiliar. En este método, la superficie de los ladrillos gastados se empareja con parches de masa plástica y enseguida se pegan nuevos ladrillos sobre la superficie. Como esta práctica de reparación se realiza muchas veces, el consumo de refractarios disminuye.

Entretanto, se han desarrollado revestimientos monolíticos para cucharas, como por ejemplo, el método "Slinger" de proyección de arena, de apisonado y método de vaciado, que se están ensayando en algunas plantas siderúrgicas. Pero la duración y costo total de las cucharas revestidas con estos métodos no compiten con las cucharas enladrilladas. En cuanto a la vida de los revestimientos, el método de vaciado ha dado resultados excelentes. En este caso, el método es prácticamente el mismo utilizado para la instalación de vaciado de los canalones, ya mencionado. El material para el vaciado es silicoso (93 a 97% de SiO_2) y el efecto de defloculación y coagulación por medio de una pequeña adición de arcilla en este material, permite el vaciado con una pequeña cantidad de agua. El método de vaciado se caracteriza por el hecho de que el único volumen totalmente gastado se llena con el material, de manera que la cuchara puede usarse para la repetición de reparaciones en pequeña escala, pero, debido al debilitamiento del revestimiento residual, se dice que debe efectuarse una reparación cíclica a gran escala (reparando conjuntamente con el revestimiento de seguridad).

Se están efectuando numerosos ensayos para la obtención de ladrillos alternativos para el revestimiento de las cucharas, tales como básicos (magnesia-

dolomita y magnesia-cromo), de alta alúmina no quemados, de espinel y de magnesia-grafito. Las cucharas revestidas con estos ladrillos aún no se han usado adecuadamente, debido a que necesitan una alta temperatura de precalentamiento para evitar la formación de costras y un menor cambio de temperatura para evitar el desconchamiento. Actualmente se están haciendo enérgicos esfuerzos para usar satisfactoriamente estos ladrillos, los que continuarán en el futuro.

4.1.9. COLADA CONTINUA.

De acuerdo con el frecuente aumento del uso de la colada continua, el papel de los refractarios está adquiriendo gran importancia en la operación de la máquina de colada con alta productividad.

Se requiere que los refractarios para colada continua funcionen no sólo como revestimiento para el recipiente de acero líquido sino que también como un medio de control del flujo y de protección contra la oxidación del acero.

Más aún, para algunos tipos de refractarios para las buzas o para las placas de las válvulas deslizantes, se exige que tengan una maquinabilidad tan precisa como la de los componentes metálicos. Se ha prestado suficiente atención a los grandes esfuerzos hechos por los fabricantes de refractarios para mejorar la calidad de los refractarios y la precisión de las formas.

4.1.10. HORNOS DE FOSO Y HORNOS DE RECALENTAMIENTO.

En cuanto a los hornos de la línea de laminación, tales como los hornos de foso, hornos de recalentamiento y hornos y cajas de recocido, los principales desarrollos técnicos, en el uso de refractarios, son un aumento de las instalaciones monolíticas en estos hornos y los ahorros de energía por el refuerzo de las aislaciones.

Como ya se ha informado muchas veces acerca de las instalaciones monolíticas de estos hornos, solo se presentarán algunos resultados fructíferos de aislaciones para hornos de foso y hornos de recalentamiento.

El cuadro 4-5 muestra el ahorro de energía obtenido por el recubrimiento con fibra cerámica, que es bien conocido como técnica adicional de aislación sobre

ladrillos o pared monolítica. En este caso, se ahorró aproximadamente un 15% de energía, en relación a la pared monolítica convencional. La figura 4-1 y el cuadro 4-5 muestran el método de instalación de la aislación compuesta en los tubos de deslizamiento de los hornos de recalentamiento y el efecto sobre el ahorro de energía. En este método, se enrollan mantos de fibra cerámica sobre los tubos de deslizamiento enfriados con agua, sobre los cuales se instalan concretos refractarios livianos, ahorrando así hasta 30% más que con el método de instalación usando sólo concretos refractarios livianos.

EFFECTO DE LA AISLACIÓN³⁶

CUADRO 4-5

	ANTES DE LA AISLACIÓN	DESPUES DE LA AISLACIÓN
TEMPERATURA DEL AGUA (°C)		
ENTRADA	33	29
SALIDA	55	51
DIFERENCIA	22	22
CANTIDAD DE AGUA (m³/h)	161.3	114.5
PÉRDIDA DE CALOR (x 10³ kcal/h)	3,512.8	2,501.8
ENERGÍA AHORRADA (x 10³ kcal/h)	1,011.0	

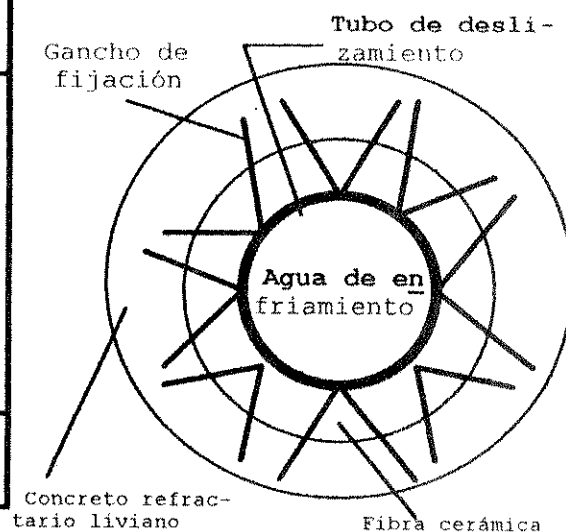


Figura 4-1

4.2. PRESENTACIÓN DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS.

Los materiales refractarios que se suministran a la industria en general se presentan para su consumo en dos formas principales:

MATERIALES EN FORMA DETERMINADA.

MATERIALES SIN FORMA DETERMINADA.

4.2.1. MATERIALES EN FORMA DETERMINADA.

Como su nombre lo indica son todos aquellos productos refractarios que durante su fabricación, han pasado por un proceso de formado o moldeo, a los cuales

³⁶ Según referencia No.4

se les ha dado formas determinadas. Posteriormente al pasarlos por un proceso de secado y quemado, adquieren características físicas finales y uniformes.

Entre los materiales refractarios con forma determinada se pueden mencionar los ladrillos con forma estándar, ladrillos o piezas con forma especial, boquilla, mangas, canales, placas aislantes, etc.

4.2.2. MANEJO Y ALMACENAJE.

El manejo de este tipo de materiales no requieren un gran cuidado, ya que dadas las características físicas de los mismos soportan un manejo rudo, colocando incluso hasta 3 o 4 tarimas por estiba, sin sufrir consecuencias que puedan afectar su rendimiento futuro.

Con respecto al almacenaje lo que se tiene que buscar es protegerlos contra la lluvia, con mayor interés o dando prioridad a aquellos productos de naturaleza básica, pues fácilmente se hidratan al absorber agua afectando considerablemente su rendimiento ya en operación, por lo que en general se sugiere que todos estos minerales sean almacenados en espacios bajo techo.

4.2.3. FORMA ESTANDAR.

Cuando se hablan de formas estándar se hace referencia, principalmente, a los ladrillos con forma rectangular y a todas aquellas formas que se derivan del mismo. De acuerdo a lo anterior los ladrillos o piezas de forma estándar son:

- a) Rectangular
- b) Dovela Canto
- c) Dovela Punta
- d) Dovela Circulo.

CONCLUSIONES

1. Las pruebas en los materiales refractarios se deben hacer en ambientes reales, para obtener resultados acordes a las necesidades que se requieran.
2. La calidad de los materiales refractarios no depende únicamente de la calidad de la materia prima, sino también del proceso de preparación y control de calidad de los mismos. Razón por la cual se debe escoger como proveedor al que garantice un mejor proceso de preparación.
3. Las especialidades refractarias son de gran importancia para la reparación de equipo en la industria del acero, debido a la rápida instalación, la gran maleabilidad que poseen y al bajo costo de mano de obra.
4. Después de la aplicación de los materiales refractarios en cualquier tipo de trabajo, es importante tener un calentamiento lento para un mejor servicio y alta durabilidad de los mismos.
5. Los materiales refractarios son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, en las cuales se debe tener un conocimiento adecuado para el aprovechamiento del equipo.
6. Usando una mezcladora de paletas, los concretos refractarios densos (pesado) requieren de 3 a 6 minutos de mezclado. No es prudente reducir el tiempo de mezclado a menos de 2 minutos.
7. Los concretos de peso ligero (aislantes) deben mezclarse el tiempo suficiente, que varía de 1 a 3 minutos con el fin de evitar la desintegración de los agregados ligeros, requiriendo un mezclado demasiado largo en un tiempo mínimo. Un tiempo de mezclado demasiado largo causará un mayor peso por metro o pie cúbico, reduciendo la eficiencia del aislante.
8. En cualquiera de los métodos de aplicación de los apisonables, una vez iniciado el trabajo se debe continuar hasta su finalización, evitando suspensiones que puedan causar que el material de la superficie se seque y pierda la liga con el material que se adicione posteriormente. Por otro lado, una vez terminado el trabajo, dejar las superficies rugosas con el objeto de facilitar la expulsión del agua durante su secado

RECOMENDACIONES

1. Las latas o botes de mortero que no hayan sido totalmente consumidas, se les debe agregar una capa delgada de agua y taparlas perfectamente, con el fin de que no pierda sus características y pueda utilizarse posteriormente.
2. Para que un concreto refractario permanezca en buen estado el máximo tiempo, debe mantenerse en condición totalmente "anhídrida". No debe almacenarse en donde pueda llover o donde existan goteras que mojen los sacos y/o almacenarse directamente los sacos en el suelo húmedo o de concreto.
3. No es recomendable usar concretos refractarios que contengan terrones o grumos, algunas ocasiones y cuando los concretos han sido almacenados en estibas muy altas, a los sacos de la parte inferior se le formarán terrones, pero son fácilmente devueltos a su tamaño original de grano presionándolos con los dedos. Por el contrario, si se encuentran terrones duros y que con la presión de los dedos no se pueden devolver a su tamaño original de grano, definitivamente el material ha fraguado, convirtiéndose en inadecuado para su uso, siendo preferible desecharlo, ya que no hay manera de reprocesar dicho material.
4. Cuando se va aplicar concreto refractario sobre una superficie vieja de refractario, debe rociarse varias veces con agua hasta saturarla, evitando solamente la formación de charcos de agua cuando el concreto sea vaciado.
5. Los concreto refractarios han sido cuidadosamente elaborados en las fábricas y no debe agregárseles nada, excepto agua limpia y eliminarse cualquier fuente de contaminación.
6. Si durante el secado apareciesen en el plástico grietas o pequeños desprendimientos, deben ser sellados con plástico o con una mezcla de 50/50% de plástico y mortero.

REFERENCIAS

1. UNITED STATES STEEL. "The making shaping and treating of steel". Décima edición. U.S.A. Publicado por la Association of Iron and Steel Engineers. 1,985
2. BARROMEX Refractarios. "Fabricación de especialidades refractarias silico-aluminosas y de alta alúmina". Primera edición. México. 1,990.
3. ASTM STANDARS. "Annual book of ASTM Standars". U.S.A. 1,987.
4. NIPPON STEEL. "Catalogo Técnico: Siderurgia Latinoamericana". Buenos Aires, Argentina. 1,980.
5. COORPORACION CERAMICA CARABOBO. "Catalogo Técnico: Productos Refractarios". Séptima edición. Colombia. Editorial Binev.
6. FIBRAREX, S. A. "Método simplificado para cálculo de transferencia de calor a través de paredes refractarias". México. 1,995.
7. AP GREEN. "Información Técnica: Materiales refractarios". México. Enero 26, 1,996.

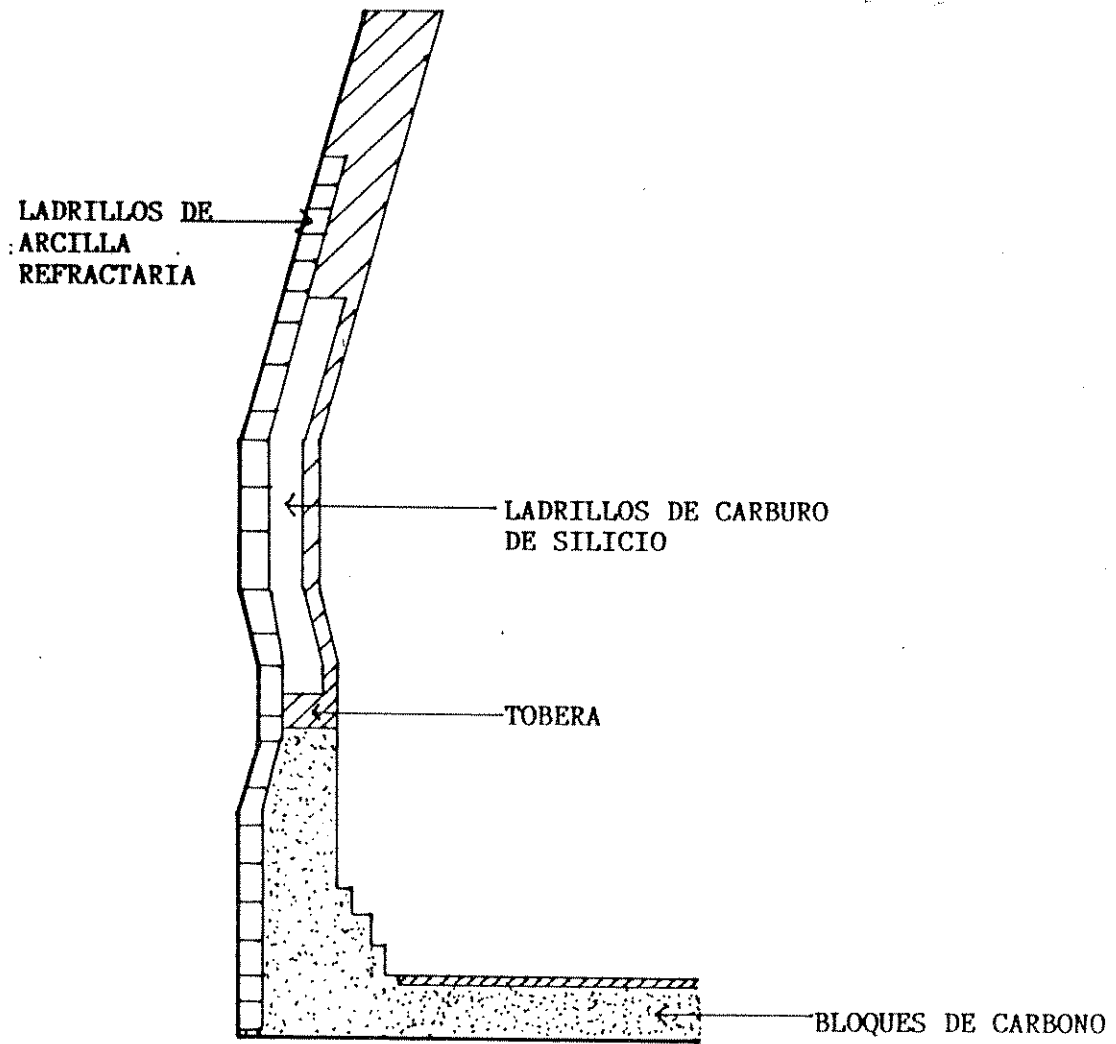
BIBLIOGRAFIA

1. ELECTIC FURNACE STEELMAKING. "Theory and Fundamentals". Volumen II. U.S.A. 1,978.
2. BETHLEHEM STEEL EXPORT CORPORATION. "Productos del acero". Catalogo 182. U.S.A. 1,946.
3. U. S. REFRACTORIES DIVISION. "Products for the steel industry". U.S.A. Grefco. 1,976.
4. SYDNEY, H. Avenner. "Introducción a la metalurgia física". Segunda Edición. Editorial McGraw-Hill. México 1,988.
5. WILLIAMS S., ROBERT Y HOMERBERG, VICTOR. "Principles of Metallography". Editorial MacGraw-Hill. U.S.A. 1,948

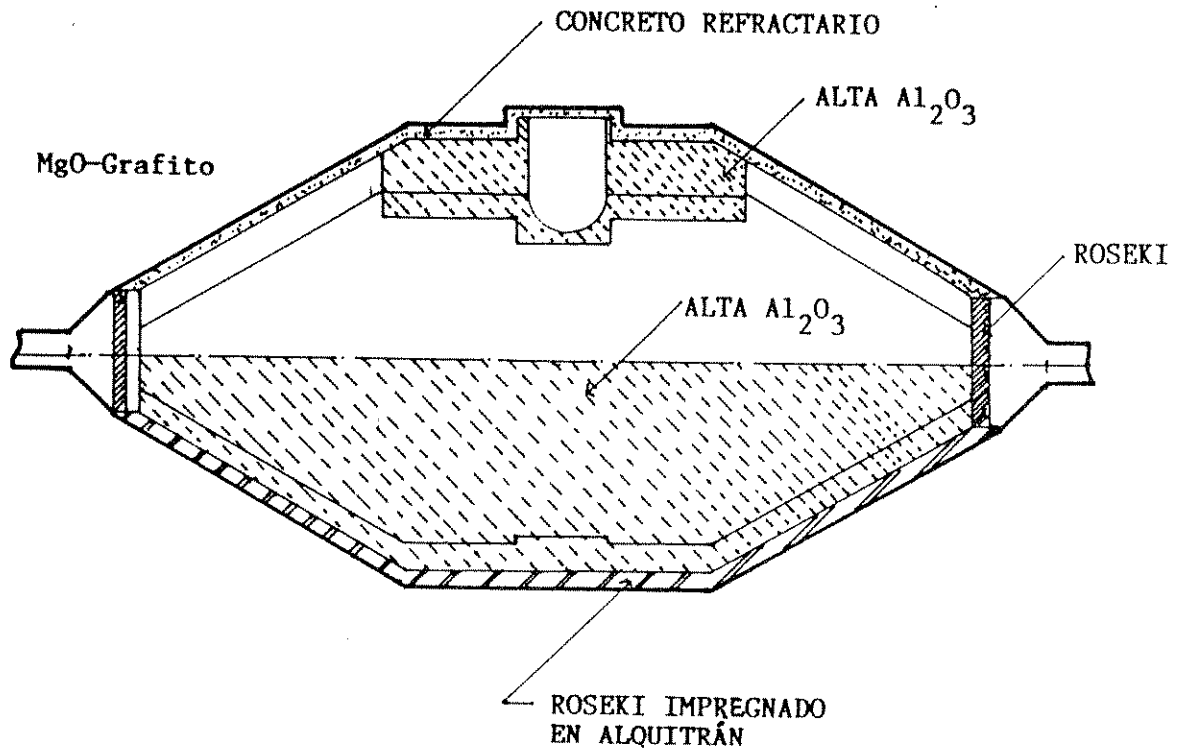
ANEXO

- i. Perfil de un revestimiento de un alto horno.
- ii. Perfil de un revestimiento de un carro torpedo.
- iii. Perfil reciente del revestimiento de un convertidor básico al oxígeno.
- iv. Perfil de un revestimiento de un horno eléctrico.
- v. Perfil del revestimiento de un recipiente para desgasificación R-H.
- vi. Perfil del revestimiento de un recipiente para desgasificación D-H.
- vii. Perfil del revestimiento de una cuchara de colada.

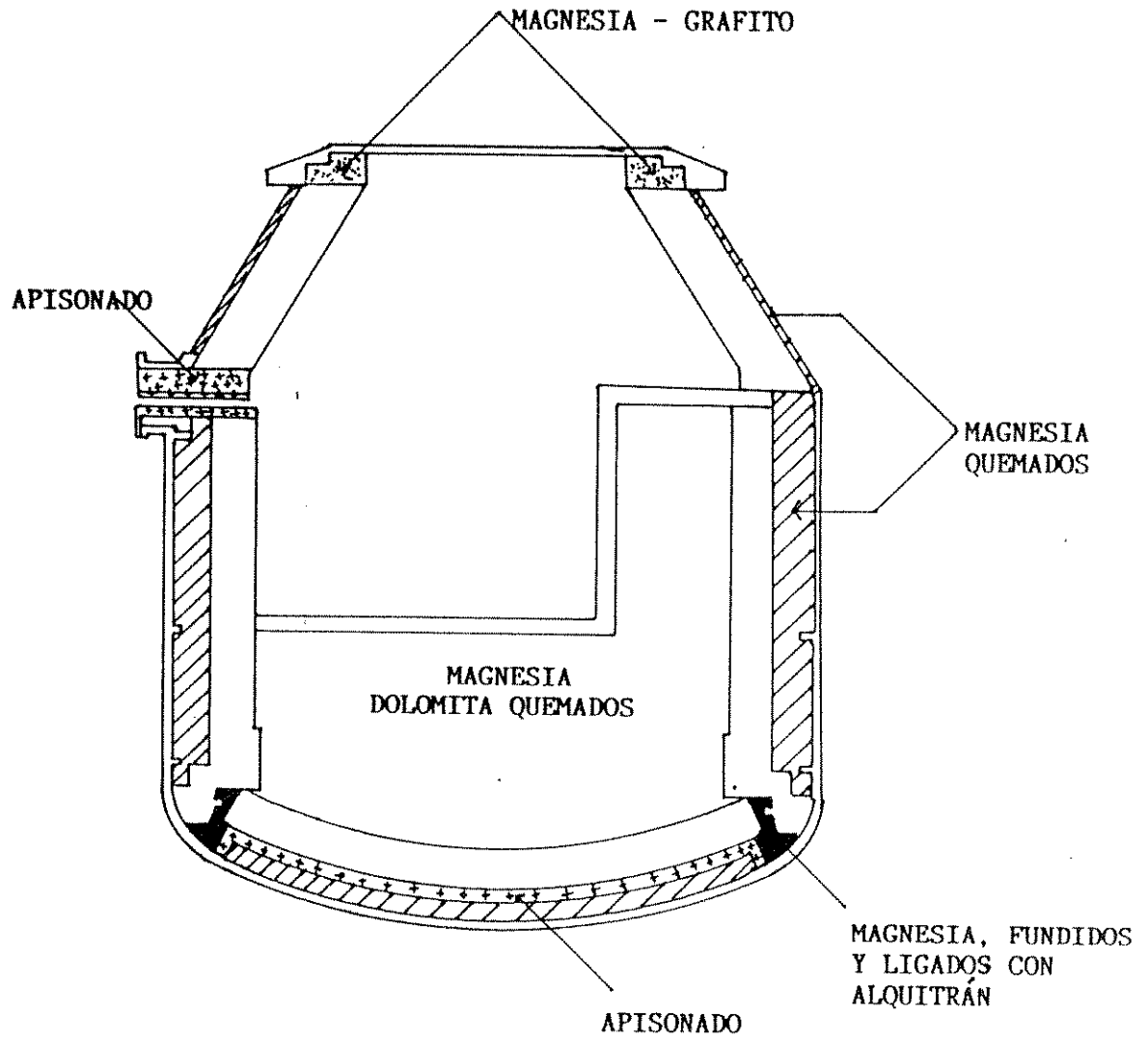
PERFIL DE UN REVESTIMIENTO DE UN ALTO HORNO



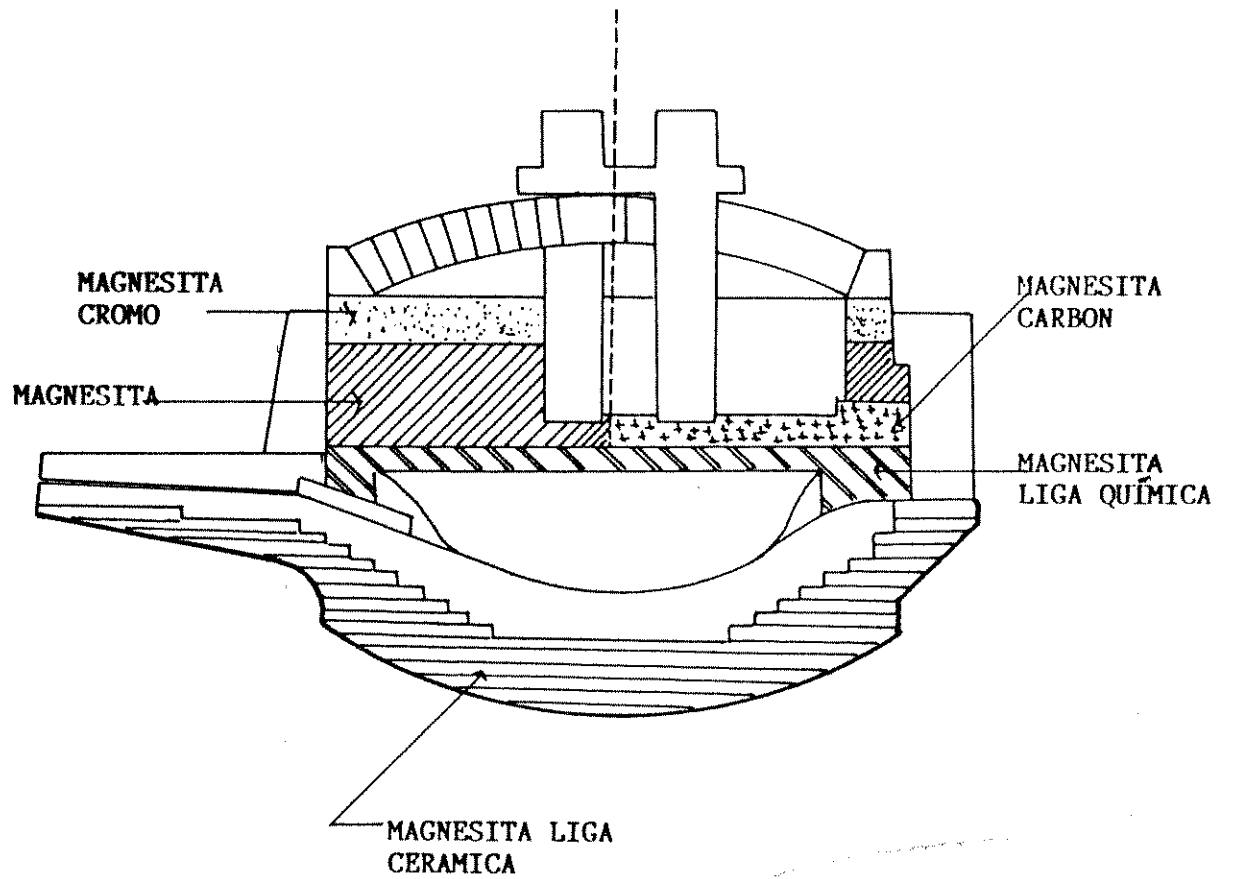
PERFIL DEL REVESTIMIENTO DE UN CARRO TORPEDO



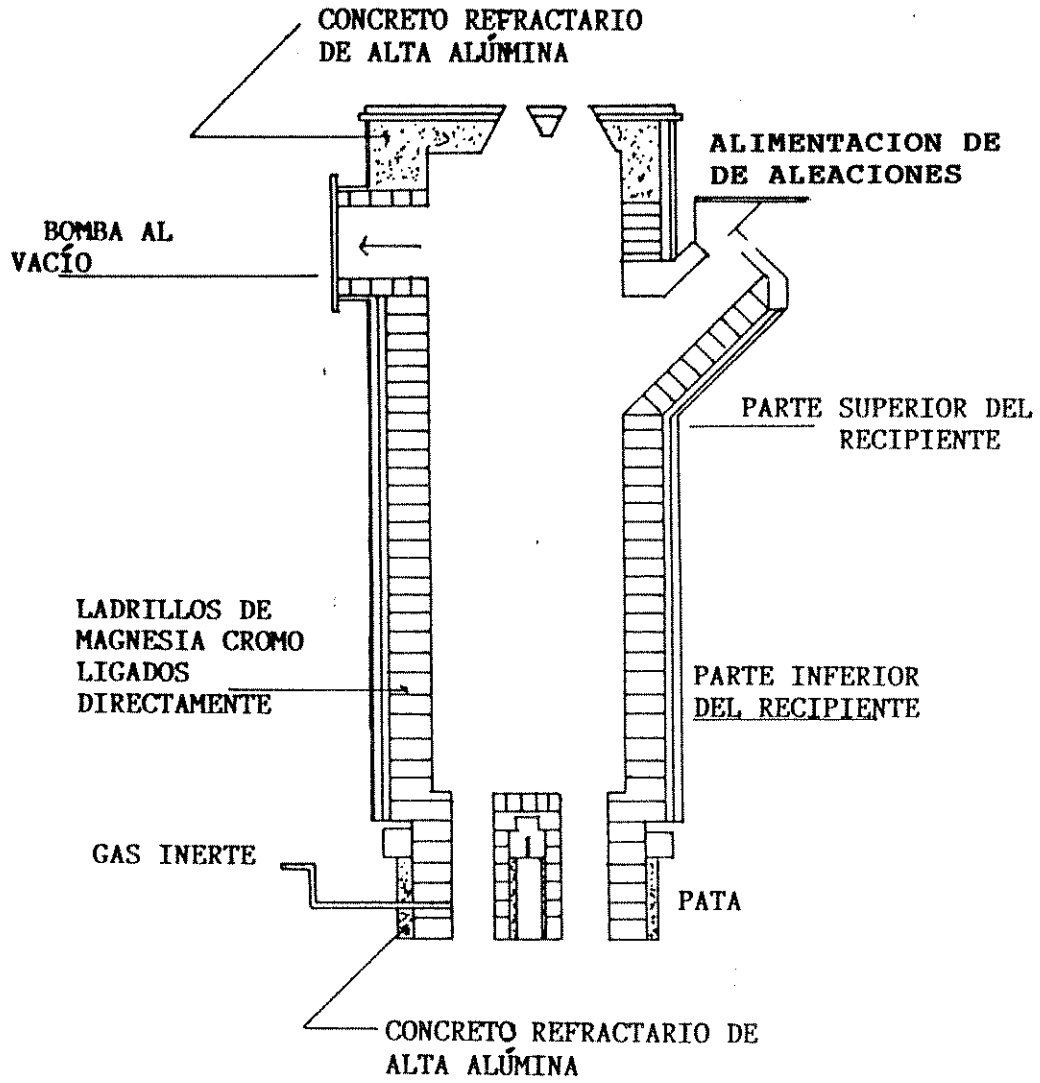
PERFIL RECIENTE DEL REVESTIMIENTO DE UN CONVERTIDOR BÁSICO
AL OXÍGENO



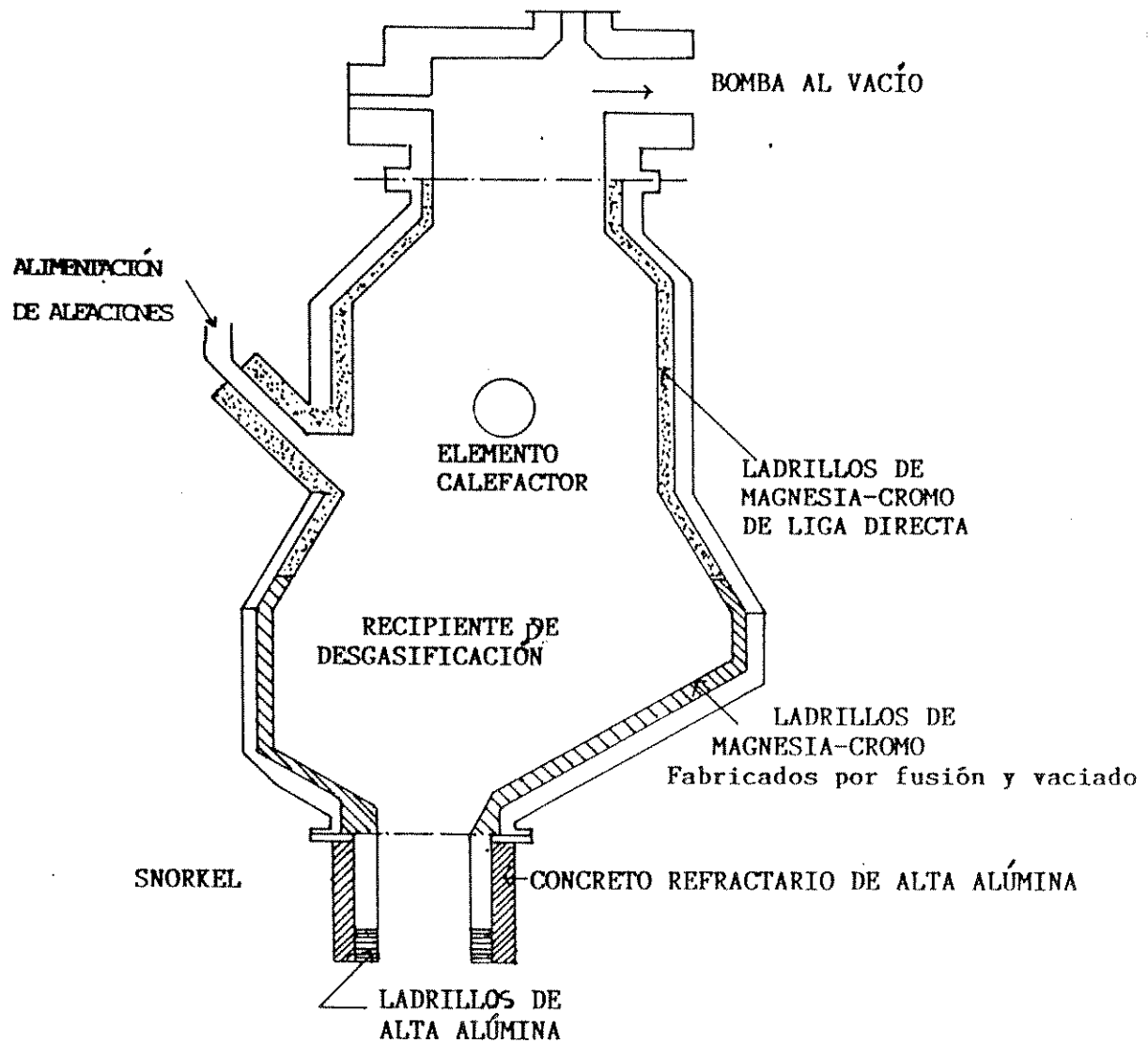
PERFIL DE UN REVESTIMIENTO DE UN HORNO ELECTRICO



PERFIL DEL REVESTIMIENTO DE UN RECIPIENTE PARA
DESGASIFICACIÓN R-H



PERFIL DEL REVESTIMIENTO DE UN RECIPIENTE PARA
DESGASIFICACIÓN D-H



PERFIL DEL REVESTIMIENTO DE UNA CUCHARA DE COLADA
PARA EL ACERO COLADO A ALTA TEMPERATURA

