

DESARROLLO TECNICO-COMERCIAL DEL SECTOR DEL LADRILLO REFRACTARIO
EN COLOMBIA DURANTE LOS ULTIMOS 30 AÑOS

JUAN DIEGO PINEDA QUINTERO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

INGENIERIAS

INGENIERIA MECANICA

MEDELLIN

2014

DESARROLLO TECNICO-COMERCIAL DEL SECTOR DEL LADRILLO REFRACTARIO
EN COLOMBIA DURANTE LOS ULTIMOS 30 AÑOS

JUAN DIEGO PINEDA QUINTERO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

INGENIERIAS

INGENIERIA MECANICA

MEDELLIN

2014

DESARROLLO TECNICO-COMERCIAL DEL SECTOR DEL LADRILLO REFRACTARIO
EN COLOMBIA DURANTE LOS ULTIMOS 30 AÑOS

JUAN DIEGO PINEDA QUINTERO

Trabajo de grado en la modalidad de asistencia a la investigación para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesor

LUIS JAVIER CRUZ RIAÑO

Ph. D.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

INGENIERIAS

INGENIERIA MECANICA

MEDELLIN

2014

Dedico este trabajo primeramente a Dios quien me brindo la vida, la salud y el conocimiento para lograr mis objetivos.

A mis padres y hermanos que siempre me apoyaron y confiaron en mí, que nunca dudaron en que lograría conseguir este objetivo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy especial a mi director Ph. D. Luis Javier Cruz Riaño por su paciencia, tiempo y esfuerzo durante la elaboración de mi trabajo de grado.

Agradezco también a todos mis profesores y amigos que me apoyaron durante este largo camino de aprendizaje y en general a la Universidad Pontificia Bolivariana por facilitarme sus instalaciones.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	16
1. MATERIAS PRIMAS.....	19
1.1. Refractarios ácidos:.....	21
1.2. Refractarios básicos:	21
1.3. Refractarios de Óxido de Magnesio:.....	21
1.4. Refractarios de alta alúmina:	21
1.5. Refractarios neutros:	22
1.6. Refractarios especiales:.....	22
1.6.1. Alúmina (Al_2O_3):	22
1.6.2. Nitruro de aluminio (AlN):.....	22
1.6.3. Carburo de silicio (SiC):.....	22
1.6.4. Nitruro de silicio (Si_3N_4):	22
1.6.5. Circonia (ZrO_2):.....	22
1.6.6. Carburo de boro (B_4C):	22
2. PROPIEDADES.....	29
2.1. Características o propiedades estructurales.	32
2.1.1. Composición química:	32
2.1.2. Composición mineralógica. Grado de vitrificación:.....	32
2.1.3. Tamaño de los cristales:.....	32

2.1.4.	Porosidad y densidad. Tamaño y tipo de poros:	33
2.1.5.	Permeabilidad (Al aire, gases o vapores):	33
2.2.	Propiedades térmicas.	33
2.2.1.	Capacidad calorífica. Calor específico:	33
2.2.2.	Dilatación térmica:	33
2.2.3.	Refractariedad. Resistencia pirosfópica:	33
2.2.4.	Aislamiento térmico. Conductividad térmica:.....	34
2.2.5.	Resistencia al choque térmico:	35
2.2.6.	Variación permanente de dimensiones (Postvariación dimensional):.....	35
2.3.	Propiedades Mecánicas.....	36
2.3.1.	Resistencia a compresión en frío:	36
2.3.2.	Resistencia a la tracción:	36
2.3.3.	Resistencia al desgaste:.....	37
2.4.	Propiedades Mecánico-Térmicas.....	37
2.4.1.	Resistencia a la flexión en caliente:	37
2.4.2.	Refractariedad bajo carga:.....	37
2.4.3.	Fluencia bajo presión:.....	37
2.5.	Propiedades Químicas.	38
2.5.1.	Resistencia al ataque por escorias:	38
2.5.2.	Resistencia a gases y vapores:	38
2.5.3.	Resistencia a los ácidos:	38
2.5.4.	Resistencia a la hidratación (vapor de agua):	39
3.	TÉCNICAS DE FABRICACIÓN	44
3.1.	Ladrillos	44
3.1.1.	Cocido convencional:.....	44

3.1.2.	Cocido liga directa:	44
3.1.3.	Cocido e impregnado:.....	44
3.1.4.	Químicamente ligado:.....	45
3.1.5.	Ligado con alquitrán:	45
3.1.6.	Templado:	45
3.1.7.	Electrofundidos:.....	45
3.1.8.	Aislantes:.....	45
3.2.	Especialidades.	45
3.2.1.	Tierra refractaria:	45
3.2.2.	Argamasa:	46
3.2.3.	Mortero:.....	46
3.2.4.	Hormigón:.....	46
3.2.5.	Plástico:.....	46
3.2.6.	Masa para proyectar:.....	46
3.2.7.	Masa para apisonar:.....	46
3.2.8.	Hormigón tixotrópico:.....	46
3.3.	Materia Prima.	47
3.4.	Trituración y molienda.	47
3.4.1.	Trituración basta:.....	48
3.4.2.	Trituración fina:.....	48
3.4.3.	Equipos de molinos:	48
3.5.	Clasificación.	48
3.6.	Mezcla y Homogenización.	49
3.7.	Preparación del pastón.....	49
3.8.	Moldeado.....	50

3.8.1.	Prensado mecánico:	50
3.8.2.	Extrusión:	51
3.8.3.	Moldeado a mano:	52
3.9.	Secado.	53
3.10.	Cocción.....	53
4.	APLICACIONES	55
4.1.	Partes Principales de los Hornos.	57
4.1.1.	Cimientos.	57
4.1.2.	Plataforma.	58
4.1.3.	Solera.....	58
4.1.4.	Paredes.....	58
4.1.5.	Bóveda.	59
4.1.6.	Canales.	60
4.1.7.	Juntas Térmicas.	60
4.1.8.	Esqueleto Metálico.	60
4.1.9.	Ventanas de Trabajo.	61
4.2.	Tipos de Hornos.	61
4.2.1.	Horno Alto.	61
4.2.2.	Horno Eléctrico.	63
4.2.3.	Horno Rotatorio.	65
5.	INVESTIGACIÓN.....	70
	CONCLUSIONES.....	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	83
	ANEXO 1.....	86
	ANEXO 2.....	87

ANEXO 3.....	90
ANEXO 4.....	92
ANEXO 5.....	94
ANEXO 6.....	97
ANEXO 7.....	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los refractarios según su composición química.....	20
Tabla 2. Factores que afectan el revestimiento refractario en un horno.	30
Tabla 3. Características de los principales tipos de materiales refractarios.....	31
Tabla 4. Clasificación de los ladrillos refractarios frente a reacciones de contacto.....	32
Tabla 5. División de los materiales en buenos aislantes térmicos, moderados o pobres..	35
Tabla 6. Módulos de rotura y módulos de elasticidad para materiales refractarios.....	36
Tabla 7. Temperaturas de cocción de los grupos de materias primas más importantes...	54
Tabla 8. Refractarios empleados en procesos industriales.	67
Tabla 9. Propiedades mecánicas de los hormigones.	77

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Horno alto (horno vertical o de cuba)	62
Ilustración 2. Horno eléctrico de arco	64
Ilustración 3. Horno rotatorio de cemento	66

GLOSARIO

Abrasión: Se denomina abrasión a la acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido.

Calcinar: La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, pero por debajo de su entalpía o punto de fusión, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias.

Ladrillo refractario: Ladrillo usado para soportar temperaturas altas y cambios de temperatura bruscos; se los emplea en chimeneas y hornos por su alta resistencia.

Molienda: La molienda es una operación que consiste básicamente en la disminución o reducción de tamaños de sólidos. Esto se realiza por medio de la fractura, corte o quebrantamiento de los mismos, mediante la aplicación de fuerzas que ejercen las maquinarias utilizadas en este proceso.

Morteros refractarios: El mortero o cemento refractario se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para tomar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

Refractarios Ácidos: Contienen cantidades importantes de SiO₂ (sílice) que reacciona con refractarios básicos a altas temperaturas, por ejemplo refractarios basados en SiO₂ (sílice), en Al₂O₃ (alúmina) y en arcillas.

Refractarios Básicos: Refractarios que reaccionan con refractarios ácidos a altas temperaturas por ejemplo MgO (magnesia), dolomita (CaCO₃, MgCO₃) y cromita.

Refractarios Especiales: Incluye materiales Refractarios de alto coste: ZrO₂ (circonia), SiC (Carburo de silicio), Si₃N₄ (nitruro de silicio).

Refractarios Neutros: Refractarios que no reaccionan con refractarios ácidos ni con básicos a altas temperaturas por ejemplo Carbón y mullita.

Resquebrajamiento: Producir una grieta superficial o poco profunda en algunos cuerpos duros, sin romperlos.

Vitrificación: La vitrificación es el proceso de conversión de un material en un sólido amorfo similar al vidrio, carente de toda estructura cristalina. Esto se consigue por medio de calentamiento o enfriamiento muy rápido o mediante la mezcla con un aditivo.

RESUMEN

El siguiente trabajo muestra un estudio sobre la evolución de los materiales refractarios haciendo énfasis en algunos temas fundamentales como materias primas, donde se analizan las principales utilizadas en la construcción de materiales refractarios, sus principales fuentes de obtención, su clasificación según su composición química y tipo de materia prima; propiedades, donde se muestran cuales son ideales en materiales refractarios, los factores que afectan dichas propiedades y los tipos de materiales más adecuados para cada aplicación; técnicas de fabricación, donde se explican los diferentes métodos de fabricación para materiales refractarios, la clasificación de acuerdo a su proceso de fabricación y los diferentes ciclos que componen el proceso de fabricación de materiales refractarios; aplicaciones, donde se observan los diferentes usos de los materiales refractarios, se hace énfasis en la principal aplicación que son los hornos, se explican los diferentes tipos de hornos en los que se utilizan materiales refractarios y sus diferentes partes, también se muestran los distintos tipos de refractarios utilizados en los diferentes procesos industriales, además de otras nuevas aplicaciones en las que se utilizan los refractarios; investigación, donde se mencionan temas como la evolución en los procesos de fabricación de estos materiales, la adaptación de los materiales refractarios a las nuevas tecnologías para potencializar sus propiedades, nuevas pruebas y ensayos para el estudio de los defectos presentes en los materiales refractarios, investigación en el cuidado del ambiente para reciclar los residuos de estos materiales y la obtención de materias primas a través de otros métodos diferentes a los convencionales.

Este trabajo también contiene un listado con información de las empresas más representativas del sector de los cerámicos refractarios que contiene el nombre, la ubicación y el teléfono, también hay una encuesta técnica realizada a estas empresas con el fin de conocer más sobre sus procesos y técnicas en la producción de materiales refractarios, esta encuesta fue enviada con una carta de presentación por parte del grupo de investigación sobre nuevos materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana la cual se encuentra anexa en el presente trabajo, también anexo están los correos con las respuestas que dieron las empresas frente a las encuestas realizadas.

Finalmente se encuentra un diario de campo con el registro de las actividades y reuniones con el director del proyecto y de las horas invertidas para la realización del trabajo, se encuentra el anteproyecto y un artículo con información sobre la comercialización de productos cerámicos en Colombia.

PALABRAS CLAVE: REFRACTARIOS, PROPIEDADES, APLICACIONES, INDUSTRIA, EVOLUCIÓN, TECNOLOGÍA.

INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo se plantea un estudio acerca de la evolución de los materiales refractarios en Colombia que tiene como fin servir de tesis de pregrado y como parte del desarrollo de las labores investigativas del grupo de investigación sobre nuevos materiales (GINUMA) de la Universidad Pontificia Bolivariana.

El objetivo principal de este trabajo es analizar desde un punto de vista tecnológico y de mercado la evolución del sector de los cerámicos refractarios en los últimos 30 años, realizando un estudio que permita definir los cambios que ha tenido el sector de los cerámicos refractarios en diferentes temas fundamentales como lo son materias primas, propiedades, técnicas de fabricación, aplicaciones e investigación.

En consecuencia de ello mediante la interacción con las empresas más representativas de este sector industrial se elaboró un directorio técnico, además se desarrollaron una serie de preguntas que permitieron analizar el estado tecnológico y de mercado de la industria Colombiana en el tema de cerámicos refractarios, esto también servirá como base para futuros contactos, para el montaje de proyectos de asesoría, transferencia e investigación.

Para desarrollar lo anterior es necesario conocer algunos aspectos sobre los refractarios, la mayoría de los refractarios industriales se preparan a partir de mezclas de compuestos cerámicos, los refractarios cerámicos utilizados en la industria se clasifican de acuerdo a su composición en refractarios ácidos, básicos, neutros y especiales. La mayoría de los compuestos cerámicos presentan bajas conductividades térmicas lo que les convierte en buenos aislantes térmicos, además presentan elevados puntos de fusión y por estas razones muchos materiales cerámicos se utilizan habitualmente como materiales refractarios. Las materias primas más comunes en la fabricación de refractarios son la sílice, la alúmina, la mullita, la magnesia, la cal, el carbono o grafito, el circón, algunos nitruros, carburos y boruros y los feldespatos. La combinación de materias primas hace posible la mejora de propiedades, además las investigaciones han permitido que nuevos materiales sirvan como complemento para la mejora de propiedades.

Para la selección del refractario más adecuado debe conocerse bien las características del material y las condiciones de trabajo a las que va a estar sometido. Los factores que afectan la duración de un refractario se pueden dividir en tres grandes grupos, químico, térmico y mecánico. Una de las propiedades importantes a tener en cuenta en los refractarios es el secado durante la fabricación del material ya que se pueden evitar

muchos fallos en esta parte. En ocasiones los materiales refractarios se combinan para dar una mayor eficiencia o conseguir ciertas características especiales según la aplicación donde se desempeñen. Para la mejora de propiedades se ha experimentado mucho tanto en el aspecto de la construcción, como el de la forma, geometría y arreglo, cómo se disponen estos materiales y como es el aspecto microestructural.

Existen diversos métodos para la fabricación de materiales refractarios, uno es el de cortar piezas de la forma deseada a partir de materias primas o de fundir composiciones determinadas en moldes para obtener las piezas. Se han implementado principios para fabricar productos altamente refractarios en los que las materias primas refractarias, una vez preparadas se moldean por medio de aglomerado químico, extrusión o prensado isostático. Los refractarios de acuerdo a su proceso de fabricación se clasifican en dos tipos: Ladrillos y especialidades.

Los ciclos que componen el proceso de fabricación de materiales refractarios son: Materia prima, trituración y molienda, clasificación, mezcla u homogenización, preparación del pastón, moldeado, secado y cocción.

Una de las principales funciones del refractario es la protección, por eso una de sus principales funciones es en hornos y existen varios tipos en la industria. En los hornos es esencial un buen control de la temperatura para la producción y los factores importantes son la constancia en el tiempo y la uniformidad en la sección del horno. Los refractarios son materiales consumibles, tienen una vida útil aún bajo condiciones óptimas de operación e instalación. Debido a las propiedades del refractario, tienen una aplicación específica en las diferentes partes del horno. Todos los hornos se dividen de acuerdo a los fines con que fueron ideados y por lo tanto tienen sus estructuras apropiadas para cada caso. Tienen sin embargo, toda una serie de elementos constructivos comunes, aunque con diseños distintos. Las partes principales de un horno son los cimientos, la plataforma, la solera, paredes, bóveda, canales, juntas térmicas, esqueleto metálico y ventanas de trabajo.

Así como son más las investigaciones cada día en materiales refractarios así también son las aplicaciones en donde se viene usando cerámicos ultra refractarios como absorbedores solares de alta temperatura.

Las aplicaciones de los materiales cerámicos refractarios se hacen mayores con el crecimiento de la tecnología, debido a que cada vez las aplicaciones se hacen más extensas y se quiere mejorar las ya existentes para llegar a un nuevo nivel, esto implica que cada vez los materiales y las técnicas de fabricación deben estar en constante mejoramiento para obtener procesos más rápidos y eficientes, creando materiales mucho más resistentes, con mayores prestaciones, con mayor durabilidad, que también sea posible crearlos a partir de procesos amigables con el ambiente, además que sean más económicos. Muchas aplicaciones de los materiales cerámicos refractarios como es la industria aeroespacial, continúan esforzándose por una mayor eficiencia y mejor

funcionamiento de estos materiales. Se han hecho investigaciones en el ámbito del cuidado del ambiente como lo es el reciclado de residuos de lavado de carbón para la fabricación de arcilla base de ladrillos cerámicos refractarios, también se han hecho estudios en el campo de la medicina.

CAPITULO 1

1. MATERIAS PRIMAS

La mayoría de los compuestos cerámicos presentan bajas conductividades térmicas, debido a sus fuertes enlaces iónicos o covalentes, lo que les convierte en buenos aislantes térmicos. Además presentan normalmente puntos de fusión elevados y son generalmente inertes, incluso en caliente, a la acción de medios agresivos. Por estos motivos, muchos materiales cerámicos se utilizan habitualmente como refractarios, esto es materiales para aislamiento, en las industrias metalúrgicas, químicas, eléctricas y del vidrio, entre otras.

La mayoría de los refractarios industriales se preparan a partir de mezclas de compuestos cerámicos. Los materiales puros, como la magnesia o la alúmina resultan demasiado caros y difíciles de conformar, a pesar de sus excelentes propiedades refractarias. Según su composición los materiales preparados tendrán diferentes propiedades que les harán más adecuados para unas u otras aplicaciones. Pero también la densidad y porosidad del material procesado es de gran importancia. Así, los materiales más densos y con baja porosidad tienen buena resistencia mecánica y al impedir la penetración de líquidos y gases, resisten muy bien a la corrosión y erosión. Pero por el contrario, al disminuir la porosidad también disminuye su capacidad de aislamiento térmico. Por tanto, es necesario mantener un equilibrio entre ambas propiedades.

Los refractarios cerámicos industriales habitualmente utilizados en la industria se clasifican de acuerdo a su composición en refractarios ácidos, básicos, neutros y especiales, los primeros se diferencian entre refractarios de sílice, arcilla y los de alta alúmina, según el contenido en este último componente. (Mesa Rueda, 2012)

La tabla 1 muestra la clasificación de los materiales refractarios según (Lopez, 2012) en su composición química.

Tabla 1. Clasificación de los refractarios según su composición química.

Refractarios de sílice	% SiO ₂ : 94-97% (CaO < 2%)
Refractarios de semisílice	% Al ₂ O ₃ < 10%, el resto es SiO ₂
Refractarios silicoaluminosos	% Al ₂ O ₃ : 10-30%, el resto es SiO ₂
Refractarios aluminosos	30-35 % Al ₂ O ₃ 35-39 % Al ₂ O ₃ 39-41 % Al ₂ O ₃ 41-43 % Al ₂ O ₃ 43-45 % Al ₂ O ₃
Refractarios con alto contenido de alúmina	45-56 % Al ₂ O ₃
Refractarios de muy alto contenido de alúmina	-Productos de alúmina pura (> 56% Al ₂ O ₃) -Productos de mullita sintética -Productos grupo Silimanita -Productos en base a Al(OH) ₃ y bauxita -Productos a base de corindón
Refractarios básicos y neutros	-Magnesita: 90-97% de MgO -Cromita: % Cr ₂ O ₃ > 32% -Magnesita – Cromo: 5-18% Cr ₂ O ₃ -Cromo – Magnesita: 18-32% Cr ₂ O ₃ -Forsterita: % MgO ~ 40%, el resto SiO ₂ -Espinela: Al ₂ O ₃ , MgO, constituyente principal -Dolomita: % CaO + % MgO > 80%
Refractarios de carbono	Coque o antracita, grafito
Refractarios de carburo de silicio	SiC > 50%
Refractarios de circonio	ZrO ₂ y ZrO ₂ .SiO ₂
Refractarios especiales	-Carburos (BC, TiC, etc.) -Nitruros (AlN, BN, ZrN, etc.) -Boruros (CrB, TiB ₂ , etc.) -Siliciuros (MoSiO ₂ , WSi) -Óxidos altamente refractarios (BeO, ThO, etc.) -Cermets

Clasificación de los materiales refractarios de acuerdo a sus propiedades acido-base según (Lopez, 2012).

Refractarios ácidos (Refractarios de sílice, semisílice y sílico-aluminosos)

Refractarios básicos (Refractarios de magnesita, dolomita, forsterita)

Refractarios anfóteros (Refractarios de alta alúmina)

Refractarios inertes (Refractarios de magnesita-cromo y de cromo-magnesita)

Refractarios especiales

1.1. Refractarios ácidos: Se emplean para fundir metales. Los refractarios de sílice, tienen alta resistencia y capacidad estructural a temperaturas elevadas, se utilizan en los techos arqueados de los hornos de la producción de acero y vidrio y reactores químicos que trabajan a temperaturas de más de 1650°C. Para estas aplicaciones, debe evitarse drásticamente la posible presencia de alúmina, pues disminuye fuertemente la temperatura de fusión del material al formarse un eutéctico (con un 7.7% en peso de alúmina).

Estos materiales refractarios son también resistentes a las escorias ricas en sílice (denominadas escorias ácidas). Por otro lado son atacables por escorias que tienen una alta proporción de CaO y/o MgO (escorias básicas). (Lopez, 2012)

Los refractarios de arcilla se obtienen por combinación de sílice y alúmina (25-45%) y soportan temperaturas de hasta 1587°C. Se utilizan en revestimientos de hornos de fundición de aluminio, altos hornos de cemento, incineradoras etc. Las fases presentes en el material son la cristobalita y la mullita. Pueden llegar a presentar pequeñas cantidades de fase líquida sin que las propiedades del refractario se resientan. Estos compuestos se forman por cocción de arcillas con diferentes tamaños de grano. Las partículas más pequeñas funden dando lugar a una fase vítrea que cohesiona las partículas más grandes y aumenta la resistencia del material. Aun así, su resistencia es generalmente baja y no pueden ser utilizados si deben soportar cargas, pero son muy baratos. (Mesa Rueda, 2012)

1.2. Refractarios básicos: Están formados básicamente por periclasa o magnesia y cal, aunque también pueden presentar pequeños porcentajes de cromo y hierro. Tienen altas densidades, altas temperaturas de fusión, estos refractarios son resistentes a escorias que contienen altas concentraciones de MgO y CaO que se producen en la fabricación de aceros. Son más costosos que los refractarios ácidos y se utilizan habitualmente en acerías que afinan el acero con oxígeno. (Mesa Rueda, 2012)

1.3. Refractarios de Óxido de Magnesio: Son producidos a partir de la descomposición de la dolomita Mg, Ca (CO₃) a temperatura de 1600°C para producir el MgO, cuya resistencia a la temperatura es de 2000°C. (Lopez, 2012)

1.4. Refractarios de alta alúmina: La estructura de estos refractarios está constituida principalmente por Mullita - Alúmina y/o corindón. Soportan mejor la temperatura que los de arcilla y son más resistentes mecánicamente, pero mucho más caros. Los ladrillos refractarios de alta alúmina se fabrican por prensado y posterior quemado a temperaturas

entre 1500 y 1600°C, se utilizan en revestimiento de hornos y reactores de alta temperatura (fosfatos, carbón negro, coque, oro, etc.). (Mesa Rueda, 2012) (Lopez, 2012)

1.5. Refractarios neutros: Se pueden emplear para dividir las zonas de refractarios ácidos de los básicos y así evitar el ataque. Están formados por óxido de cromo y el óxido de cromo-magnesia. (Mesa Rueda, 2012)

1.6. Refractarios especiales: Son refractarios que se utilizan en aplicaciones donde se necesiten excelentes propiedades mecánicas, térmicas o químicas. Muchos de ellos son de alta pureza y poca porosidad. El carbono o el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente en procesos donde no hay oxígeno. Dentro de este grupo también se encuentran los refractarios de alúmina, circonia, circón y diversos nitruros, carburos y boruros.

1.6.1. Alúmina (Al₂O₃): Utilizada inicialmente para fabricación de crisoles, su alta resistencia térmica y mecánica, además de su carácter aislante, permiten su utilización como substrato en circuitos integrados, implantes ortopédicos y empastes, bujías, tubos para hornos, etc. Por otra parte, dopada con cromo es un láser frecuentemente utilizado.

1.6.2. Nitruro de aluminio (AlN): Es un buen aislante eléctrico y al mismo tiempo tiene una alta conductividad térmica. Compite con la alúmina en su utilización como substrato para circuitos integrados, porque el calor desprendido por los circuitos se disipa muy rápidamente, lo que evita la fractura de la base.

1.6.3. Carburo de silicio (SiC): Presenta una extraordinaria resistencia a la oxidación a muy elevadas temperaturas, por lo que suele utilizarse para recubrir los aceros, así como para reforzar composites de matriz cerámica o metálica, también se utiliza habitualmente en la fabricación de resistencias eléctricas para calefactores, revestimientos de hornos y fabricación de crisoles..

1.6.4. Nitruro de silicio (Si₃N₄): Sus propiedades son parecidas a las del carburo de silicio, aunque su resistencia es algo menor y su preparación es muy costosa. Sin embargo se está estudiando mucho en la actualidad por que la combinación de sus propiedades es óptima para muchas aplicaciones industriales. En especial se investiga la fabricación de motores de combustión que trabajarían a altas temperaturas, serian menos pesados, no necesitarían refrigeración y serían más resistentes a la corrosión y al desgaste que los convencionales.

1.6.5. Circonia (ZrO₂): Combinada con MgO presenta una tenacidad muy elevada que impide la propagación de grietas. Se utiliza para mejorar las propiedades de otros cerámicos.

1.6.6. Carburo de boro (B₄C): Es extremadamente duro y al mismo tiempo muy ligero. Se utiliza en la protección contra radiaciones nucleares y en general como revestimiento

para evitar la corrosión. Sin embargo, su dureza disminuye drásticamente con la temperatura. (Mesa Rueda, 2012) (Lopez, 2012)

Los refractarios según la anterior composición química, se les puede determinar su grado de acidez mediante la relación: % peso compuestos básicos sobre % peso compuestos ácidos, cuando la relación es mayor a uno el refractario es básico y si es menor a uno es ácido. (Lopez, 2012)

Existe una gran variedad de materiales disponibles para la fabricación de refractarios; materiales clásicos como la Alúmina y la sílice son ampliamente usados para la fabricación de arcillas refractarias y nuevos materiales que son utilizados en la creación de productos de acuerdo a nuevos desarrollos y aplicaciones que vienen surgiendo con el avance de la tecnología. La elección de los materiales depende del diseño, el proceso, la aplicación y las condiciones a las cuales va a estar sometido el refractario. (Guerrero, 2008)

Los feldespatos constituyen casi el 60 por ciento de las rocas ígneas y por ello han sido tema de gran interés para los geólogos. Cabría definir técnicamente los feldespatos como aluminosilicatos de sodio, potasio y calcio. También pueden formarse con otros cationes alcalinos o alcalinotérreos, pero se trata de minerales raros. Raramente se encuentra un miembro final puro, de la serie de los feldespatos, los materiales comerciales son mezclas de feldespatos de potasio, sodio y calcio en varias proporciones como soluciones solidas o como cristales mezclados.

Los feldespatos se emplean en la industria de la cerámica como fundente para formar una fase vítrea en las pastas, a fin de promover la vitrificación y la translucidez. También sirven como aportación de álcalis y alúmina en vidriados y en vidrios. Su utilidad radica en su bajo coste y en que son una de las pocas fuentes de compuestos alcalinos insolubles en agua.

Hay existencia de otros feldespatos raros y de minerales parecidos al feldespato como: Espodumeno, Petalita, Celsiana (isoforma con la ortoclasa), Microclina rubidio, Polucita, Feldespato de estroncio y Berilo. (Norton, 1975)

Existen otros tipos de fundentes como la Sienita nefelina que es una roca que contiene aproximadamente un 50 por ciento de albita, 25 por ciento de microclina y 25 por ciento de nefelina, así como pequeñas cantidades de minerales de hierro. Estos últimos se eliminan con separadores magnéticos y queda un producto con más alúmina y sosa que un feldespato de sosa. La Sienita nefelina no contiene cuarzo, o muy poco, y es pues, un fundente más activo cuando se emplea en pastas que vitrifican a baja temperatura. Otro de los fundentes es el granito gráfico, que es una roca compuesta esencialmente por dos minerales, la microclina o microclina-microperthita y el cuarzo. Este se presenta en una textura reticulada característica. Esta roca se presenta en grandes masas uniformes de composición bastante constante, con 25 por ciento de cuarzo y 75 por ciento de

feldespato. La piedra de Cornualles es otro de los fundentes que es una roca utilizada en la industria de la porcelana blanca. Es una pegmatita parcialmente descompuesta que contiene feldespatos de sosa y potasa, cuarzo y pequeñas dosis de caolín y de fluoruros. Otros de los fundentes son la Aplita y las Cenizas de huesos, la primera es una roca que contiene, sobre todo, albita, anortita, zoisita y sericita, la segunda es un fundente empleado en la fabricación de porcelana blanda o de huesos. Se prepara por calcinación de huesos de buey y molienda húmeda. Si bien está compuesta principalmente por fosfato cálcico, aparecen materias coloidales que mejoran las propiedades de la pasta. El Berilio se ha utilizado como fundente en porcelanas y vidriados, suele hallarse en prismas hexagonales macizos, asociado con el feldespato, debido a la toxicidad de los compuestos de berilio, el berilio se emplea muy poco como fundente. (Norton, 1975)

En cuanto a los feldespatos, son uno de los minerales más abundantes, algunos de los yacimientos más importantes en Colombia se encuentran en Antioquia y Tolima. Los feldespatos son de composición bastante uniforme excepto en cuanto a proporción sosa-potasa. Los espatos de sosa se emplean en vidrios y vidriados y los espatos con gran proporción de potasa en pastas de cerámica fina. El motivo de que estos se prefieran para la cerámica blanca no está muy claro porque con los espatos de sosa se preparan excelentes pastas. La diferencia es que las piezas fabricadas con pastas con potasa suenan mejor al golpearlos, porque su coeficiente de amortiguación es más bajo. En cuanto a la composición química, el contenido de hierro es escaso, de 0,04 a 0,2 por ciento, lo cual es importante para la blancura de las pastas y para que los vidriados y vidrios sean incoloros. La cal no suele abundar aunque no es perjudicial. De magnesia no es frecuente encontrar más que indicios.

El feldespato es el primer mineral cuya especificación ha sido normalizada. Este paso tan grande lo emprendió el Feldespar Grinder's Institute, en 1929 (Instituto de molienda de feldespato). Y fue concluido con la colaboración del National Bureau of Standards al año siguiente (Oficina Nacional de Normalización). La norma comercial resultante fue la C.S. 23-30. (Norton, 1975)

Debido a la diversidad de aplicaciones existentes para los ladrillos refractarios, existen gran variedad de materias primas necesarias para darle una propiedad específica según la aplicación del ladrillo, a cada material se le puede dar una preparación diferente y así obtener una variedad de resultados con respecto a las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas del ladrillo; según (Norton, 1975) la formación de los materiales refractarios depende de muchos factores como las características de las materias primas, naturaleza y concentración de las arcillas, temperaturas de cocción, tiempo de procesado, atmosfera del horno, presión durante la cocción y la distribución de las fases en el sistema inicial.

Existen muchas clases de materiales que permiten mejorar una propiedad específica en el refractario, es el caso del óxido de cromo, que se utiliza para mejorar las propiedades térmicas y mecánicas. Hay otra variedad de materiales que se convierten en

componentes fundamentales a la hora de conformar un refractario, como la mullita, que es un silicato de Alúmina obtenido a partir de caolín (arcilla blanca que se utiliza para la fabricación de porcelanas), que según (Levy, Artioli, Gualtieri, Quartieri, & Valle, 1998) es el mayor componente de los materiales refractarios de alta temperatura.

Los óxidos más apreciados como refractarios son el aluminio, el magnesio, el circonio, el berilio y el torio, todos ellos son sinterizables en pastas densas con el tratamiento adecuado, no obstante, la alúmina, es con mucho el óxido más utilizado. Las mezclas de óxidos también sirven como refractarios especiales. Entre los centenares de compuestos de elevado punto de fusión que se encuentran en los diagramas de fase, solo unos cuantos son de uso corriente por su buena trabajabilidad, de estos la mullita y el circón son los más empleados por su buena trabajabilidad y sus excelentes propiedades como elevados puntos de fusión y gran resistencia al ataque por ácidos.

Se han hecho grandes esfuerzos para determinar las propiedades de los carburos, boruros, nitruros y siliciuros refractarios como contribución al programa espacial. Estos materiales presentan interesantes propiedades físicas, pero, salvo en algunos casos, no resisten la oxidación. Se pueden conseguir densas estructuras de los mismos por sinterización en atmósfera controlada y por prensado en caliente. (Norton, 1975)

La mullita es un mineral raramente encontrado en la naturaleza y es formado bajo condiciones especiales de presión y temperatura, en la industria de los aluminosilicatos, dicho elemento constituye el 70% de los materiales refractarios usados. La importancia de la formación de mullita en los productos refractarios, responde fundamentalmente al hecho de que la mullita, es el único compuesto estable de alúmina y sílice a altas temperaturas y una atmósfera de presión (1 atm), otros aluminosilicatos como la silimanita, la andalucita y la cianita (minerales del grupo de los silicatos de aluminio polimórficos) se convierten en mullita a temperaturas de 1545°C, 1390°C y 1370°C respectivamente. La mullita confiere propiedades interesantes a los materiales que lo contienen, como estabilidad química, resistencia mecánica, baja expansión térmica a altas temperaturas y resistencia al choque térmico. (Ribero, Restrepo, Paucar, & García, Highly refractory mullite obtained through the route of hydroxyhydrogels, 2008)

Entre los carburos refractarios está el carburo de silicio, este ha sido el carburo con más aplicaciones como refractario, porque se fabrica a partir de materiales baratos y resiste bien la oxidación. La mayor parte de dichos carburos se emplean en refractarios pesados, pero pueden obtenerse en forma de pastas de densos cristales finos. El producto se fabrica por procedimientos clásicos como el prensado en seco y la extrusión con aglutinantes orgánicos. Si es preciso se puede mecanizar en estado de pre cocción. La cocción definitiva tiene lugar en la atmósfera reductora a elevadísimas temperaturas. Si las tolerancias han de ser muy precisas se recurre a rectificado con diamante. Este material resiste muy bien la abrasión y los ácidos, no lo humedecen los metales no féreos y resiste la oxidación hasta 1650°C. Se ha utilizado para puntas de cohetes, componentes

de válvulas, crisoles, resistencias eléctricas y piezas de intercambiadores de calor. También se emplea mucho para barras de caldeo. (Norton, 1975)

Otro de los carburos refractarios es el carburo de circonio, este material, de alto punto de fusión se ha fabricado por prensado en caliente a 420Kg/cm² en matrices de grafito, a 2000°C, durante 30 minutos, inundando la matriz con argón. El carburo de circonio resiste muy bien el calor, pero no tanto la oxidación. Otro de los carburos, es el carburo de boro, este material sumamente duro se ha fabricado en cantidades considerables, durante muchos años, para elementos resistentes a la abrasión, a base de prensar en caliente en moldes de grafito. (Norton, 1975)

Los boruros de más interés son los boruros de circonio y de titanio, estos son sumamente refractarios y bastante resistentes a la oxidación hasta 1000°C. Se pueden formar por prensado en caliente.

Dentro de los nitruros más usados, los nitruros de circonio y de titanio son también sumamente refractarios, de aspecto metálico. Empiezan a oxidarse a partir de 1000°C aproximadamente.

Dentro de los siliciuros refractarios, el único miembro de esta clase de materiales de interés como refractario, es el disiliciuro de molibdeno, muy utilizado en elementos de caldeo. Su conductividad eléctrica es buena y su resistencia a la oxidación es excelente, lo que permite utilizarlo a 2100°C. (Norton, 1975)

También existen materiales que ofrecen muy buenas propiedades pero que en condiciones específicas de temperatura tienden a perder sus propiedades y a convertirse en una desventaja para el refractario, es el caso del carbón, el cual es usado en los refractarios de magnesia-carbón (MgO-C), que son ampliamente usados en la industria del acero, para hornos de oxígeno básicos, hornos de arco eléctrico y cucharones de acero, debido a su alta refractoriedad, excelente resistencia al choque térmico y a la corrosión, resultado de una alta conductividad térmica, una baja expansión térmica, la alta refractoriedad del MgO y una baja mojabilidad del grafito que permite que la escoria no penetre en la estructura, ocasionando así que la vida de servicio de los ladrillos aumente. La oxidación del carbón o grafito es el principal problema en los refractarios de MgO-C, causando aumento de porosidad, disminución de fuerza y resistencia a la corrosión del ladrillo, la oxidación de los ladrillos de MgO-C ocurre en un rango de temperaturas elevado, entre 1300°C y 1500°C, en este tipo de problemas otro tipo de materiales como metales, compuestos o aleaciones que son llamados antioxidantes, se añaden durante la fabricación para prevenir el proceso de oxidación del carbón. (Gokce, Gurcan, Ozgen, & Aydin, 2006)

Los efectos del tipo de resina y el contenido de grafito en las propiedades físicas y mecánicas de los refractarios de MgO-C, como la densidad, la porosidad y la fuerza fueron estudiados en (Hashemi, Nemat, & Faghihi-Sani, 2005). Los resultados indican

que resinas de baja viscosidad proveen compresibilidad pero degradan la fuerza. Alto contenido de resina mejora la compresibilidad pero causa mayor porosidad después de un precalentamiento a 600°C. Los resultados muestran que la porosidad y la densidad de las muestras templadas fueron decreciendo cuando el contenido de grafito fue aumentando. Durante el proceso de oxidación el rango de pérdida de peso fue alto al comienzo, pero disminuyó gradualmente cuando el espesor de la capa descarbonizada aumentó. El alto contenido de grafito incrementa la pérdida de peso, pero esto reduce el espesor de la capa oxidada. (Hashemi, Nemati, & Faghihi-Sani, 2005)

Debido al gran avance tecnológico que se ha tenido en materia de refractarios, el rango de propiedades y aplicaciones se ha hecho más variado, a causa de esto se han hecho estudios de nuevas materias primas, nuevas combinaciones y nuevas adiciones de componentes para la conformación de refractarios. Las propiedades de materiales cerámicos refractarios en relación con su aplicación dependen principalmente de la composición química y mineralógica de las materias primas, es el caso de los ladrillos de Dolomita, que es un mineral compuesto de carbonato de calcio y magnesio y que abunda en la naturaleza, a los cuales se les han hecho mejoras adicionándoles porciones de magnesia o carbón para mejorar condiciones de servicio específicas y para contrarrestar el efecto dañino de la escoria, lo que también ocasiona un incremento de los costos.

En el grupo de los refractarios aluminosilicatos, las diferencias son relacionadas en el contenido de alúmina y sílice, siendo la composición para la alúmina entre 25-45% en peso y para la sílice menor a 85% en peso. Los ladrillos de alumina-silice son usados para la fabricación de hornos y equipos de procesamiento de calor. Se han hecho estudios sobre composiciones químicas, mineralógicas y comportamiento térmico de arcillas provenientes de Camerún de sitios como Mayouom y Mvan, los resultados muestran que éstas materias primas son caoliniticas y contienen muy pocas cantidades de óxidos fundentes, ambas arcillas pueden ser usadas para la fabricación de productos refractarios, las diferencias entre ellas provienen de la cantidad de cuarzo, ya que la arcilla proveniente de Mvan tiene mayor contenido y granos más gruesos. La arcilla proveniente de mayouom muestra un alto contenido de mullita, asociado con el bajo contenido de cuarzo, esto favorece la reducción de porosidad, mientras que la arcilla proveniente de Mvan tiene existencia de grandes poros a causa de la existencia de una interface débil entre la matriz de arcilla y el chamote. (Rabah & Ewais, 2008) (Djangang, y otros, 2007)

Otro de los desarrollos que se vienen realizando en la producción de refractarios, es la mezcla de residuos de papel procesado con diferentes arcillas para la obtención de cerámicos porosos. El carácter poroso de la cerámica fue proporcionado por la adición de residuos de papel procesado, muestras con 30-40% en peso de residuos de papel procesado calcinados entre 1200-1400°C contienen anortita como fase principal y algunas fases secundarias menores como la mullita o gehlenita, dependiendo la proporción de acilla que se tenga. La anortita es un mineral del grupo de los silicatos, subgrupo

tectosilicatos y dentro de ellas pertenece a los feldespatos denominados plagioclasas, es un raro constituyente en rocas magmáticas y metamórficas. Los cerámicos de anortita son materiales prometedores para el uso en la industria de la electrónica debido a sus buenas propiedades físicas como el coeficiente de expansión térmica de $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ y la baja constante dieléctrica de 6.2 a 1 MHz, su coeficiente de expansión térmica está muy cercano al de la mullita $5.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. La cerámica de anortita base cristal, también puede ser usada en una amplia variedad de aplicaciones como catalizadores para la conversión de gases de combustión de motores en intercambiadores de calor industrial para turbinas de gas debido a su bajo coeficiente de expansión térmica, resistencia al choque térmico y baja constante dieléctrica. Otra aplicación prometedora es con el sistema binario de fluoropatita-anortita en el campo de la biomedicina, como material para juntas de prótesis o raíces dentales, a causa de estas buenas propiedades, la cerámica de anortita tiene atraída la atención y según (Sutcu & Akkurt, 2010) varios estudios han sido llevados a cabo para disminuir la temperatura de calcinación y cristalización por debajo de 1000°C . (Sutcu & Akkurt, 2010)

Gracias a la amplia variedad de aplicaciones, es posible encontrar diversidad de materiales refractarios para la fabricación de ladrillos. La combinación de materias primas hace posible la mejora de propiedades, además las investigaciones han permitido que nuevos materiales sirvan como complementos para la mejora de propiedades, obteniendo así mayores eficiencias por parte de los materiales para cada aplicación. (Norton, 1975)

CAPITULO 2

2. PROPIEDADES

Para poder seleccionar el tipo o tipos de materiales refractarios más adecuados para cada caso concreto (proceso, horno, etc.), es necesario conocer con la mayor exactitud posible, por una parte, las características o propiedades de los materiales refractarios y por otra las solicitaciones y las condiciones de trabajo a que va estar sometido en servicio. Un refractario de una chimenea puede llegar a estar sometido a la acción química producida por el H₂SO₄, por lo tanto se debe evaluar su comportamiento ante dicha acción.

Normalmente, es muy difícil que un solo material refractario reúna todos los requisitos exigidos, por lo que se tendrá que ajustar la selección a los conceptos de mayor relevancia o importancia para su utilización. También puede recurrirse a la utilización de varios tipos de materiales refractarios simultáneamente.

Las propiedades del material refractario ideal son las siguientes:

1. Alta refractariedad.
2. Estabilidad volumétrica a las temperaturas de operación.
3. Estabilidad química (frente a gases, vapores y escorias).
4. Resistencia al choque térmico.
5. Alta resistencia mecánica en caliente.
6. Alta densidad.
7. Baja conductividad térmica.
8. Alta resistencia a la abrasión.
9. Baja conductividad eléctrica a altas temperaturas

Es cierto que la única manera de saber si un material es adecuado para una determinada aplicación, sería realizar los ensayos de los materiales refractarios en las mismas condiciones a las que está expuesto en la realidad y observar los resultados que se obtienen. A escala de laboratorio es imposible reproducir exactamente las condiciones y

el nivel de solicitaciones que van a actuar sobre el material refractario durante su servicio industrial, a pesar de esto se puede determinar, en el laboratorio, una serie de características y propiedades (Estructurales y operativas).

Todos los factores que afectan a la duración del revestimiento refractario de un horno se pueden dividir en tres grandes grupos: químico, térmico y mecánico, que representan los esfuerzos y las acciones a las que van a estar sometidos los materiales refractarios.

La tabla 2 muestra según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) los factores que afectan un revestimiento refractario.

Tabla 2. Factores que afectan el revestimiento refractario en un horno.

Factores químicos	<ul style="list-style-type: none"> - Atmosfera del horno. - Combustible. - Productos de combustión. - Materiales reaccionantes. - Productos resultantes de la reacción (Escorias, metales fundidos, etc.) - Eventual influencia de la humedad ambiental o por vapor de agua.
Factores térmicos	<ul style="list-style-type: none"> - Tipo de horno. - Tamaño del horno. - Calentamiento multilateral o unilateral. - Distribución de temperaturas en el horno. -Energía por unidad de tiempo. -Gradiente o temperatura en el revestimiento. - Acumulación de calor en las paredes. - Trabajo continuo o discontinuo del horno.
Factores mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> - Horno fijo o móvil. - Características físicas de los productos reaccionantes. - Movimiento de los productos reaccionantes. - Velocidad de los gases de combustión. - Atmosfera pulverulenta. - Influencias mecánicas exteriores, Por ejemplo, forma de la carga y descarga, vibraciones, deformaciones de la coraza, etc.

Los condicionantes anteriores no se deben considerar individualmente a la hora de elegir el material refractario, pues normalmente, actúan de forma conjunta como causa de desgaste. Así, por ejemplo una subida de la temperatura en un horno no solo significa una mayor carga térmica en el ladrillo, sino una mayor infiltración de productos fundidos (escorias, metales, etc.), que dan lugar a un posible ataque y en todo caso a una mayor

densificación del ladrillo con la consiguiente disminución de su elasticidad, que lo hace más sensible a esfuerzos mecánicos variables.

Dado que los factores anteriores no influyen por igual en todas las partes del horno, según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) se debe identificar las zonas de principal desgaste o deterioro, para así elegir los tipos y las calidades de materiales refractarios más adecuados en cada caso y conseguir un desgaste homogéneo.

A la vista de las solicitaciones y condiciones de trabajo se puede hacer también una división o clasificación de las características y propiedades principales de los materiales refractarios, que hay que tener en cuenta a la hora de la elección. Así, por ejemplo, un material refractario que está situado en una zona donde la temperatura puede cambiar bruscamente, hay que tener en cuenta a la hora de su elección que ha de tener una buena resistencia al choque térmico.

Los factores que determinan el comportamiento de un material refractario (como de cualquier material) son por un lado su composición química y por otro una serie de características físicas. Todos estos factores son, lógicamente, consecuencia de las materias primas utilizadas y del proceso de fabricación (distribución granulométrica de las materias primas, presión de conformación, temperatura de cocción, etc.).

La tabla 3 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra algunas características de los principales materiales refractarios dadas.

Tabla 3. Características de los principales tipos de materiales refractarios.

Tipo Refractario	Composición aproximada	Temperatura aproximada de fusión	Densidad real (g/cm ³)	Porosidad total en volumen	Dilatación térmica a 1000°C	Dilatación térmica a 1300°C	Contracción permanente a 1500°C	Resistencia a la compresión en frío	Resistencia a la acción de las escorias
Sílice	SiO 95%	1720°C	2,33	24%	1,15%	1,25%	a 1300°C 0,1-0,2%	400kg/cm ²	Resistencia a la acción de las escorias ácidas
Sílico aluminoso	SiO 40-63% Al O 21-45%	1610°C 1700°C	2,6	22%	0,50%	0,60%	-	500kg/cm ²	-
Dolomita	CaO 41% MgO 39%	1900°C	3,4	22%	-	-	1%	600kg/cm ²	Muy resistente a las escorias básicas
Magnesita	MgO85-90%	2000°C	3,45	22%	1,30%	1,85%	0,65%	600kg/cm ²	Muy resistente a la acción de las escorias básicas
Cromita	Cr ₂ O ₃ 40%	1900°C	3,75	16%	0,75%	1,15%	a 1600°C 0,2-0,4%	800kg/cm ²	Fuertemente resistente a todas las escorias ácidas y básicas
Cromo magnesia	Cr ₂ O ₃ 30% MgO 42%	1950°C	3,8	22%	0,85%	1,35%	0,45%	250kg/cm ²	Muy resistente a la acción de las escorias tanto ácidas como básicas
Silimanita	Al ₂ O ₃ 60%	1840°C	3,15	22%	0,40%	0,65%	0,12%	500kg/cm ²	Muy resistente a la acción de las escorias básicas y neutras
Aluminoso 50	Al ₂ O ₃ 50%	1780°C	2,7	20%	0,71%	0,81%	a 1500°C 0,05-0,1%	400kg/cm ²	Muy resistente a las acción de las escorias alcalinas y calcáreas
Carburo de silicio	SiC 85%	2000°C	2,85	12%	0,45%	0,65%	-	1000kg/cm ²	Fuertemente resistente a las escorias ácidas

2.1. Características o propiedades estructurales.

2.1.1. Composición química: La composición química de un material refractario sirve para hacer su clasificación y determinar su carácter químico, siendo de gran importancia para decir cuál será su resistencia a los ataques por escorias, vidrio fundido, gases y vapores, etc. Además de las reacciones químicas de los materiales refractarios con las sustancias existentes en la atmosfera del horno o con los materiales a procesar y sus productos de reacción (escorias, metales fundidos, vidrio, etc.), se producen reacciones en el contacto de ladrillos refractarios de distinta composición, en una pared de un horno trabajando a temperaturas altas.

La tabla 4 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra la clasificación de los ladrillos frente a reacciones de contacto.

Tabla 4. Clasificación de los ladrillos refractarios frente a reacciones de contacto.

Grupo ácido	Grupo básico	Grupo neutro
Material de cuarzo 99% SiO ₂	Ladrillos de dolomita sinterizada	Ladrillos de carbono
Ladrillos de sílice 94-97% SiO ₂	Ladrillos de magnesia	Ladrillos de alta alúmina
Ladrillos de carburo de silicio	Ladrillos de cromo-magnesia	
Ladrillos de cristobalita de circonio	Ladrillos de forsterita	Ladrillos de cromita
Ladrillos de silicato de circonio		

2.1.2. Composición mineralógica. Grado de vitrificación: El comportamiento de los ladrillos refractarios de una misma composición química depende de las materias primas utilizadas y de las reacciones que se hayan producido durante el proceso de cocción, es decir de los compuestos finalmente presentes en el material refractario. Para determinar la composición mineralógica se utilizan según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) técnicas instrumentales como son la difracción de Rayos X (DRX) y el análisis cuantitativo por microsonda (SEM-EDAX). También utilizando microscopia se puede realizar un análisis de fases y su mutua ordenación.

2.1.3. Tamaño de los cristales: Los agregados de pequeños cristales pueden disolverse y transformarse por infiltración de sustancias más rápidamente que una estructura cristalina gruesa. Para reconocer la estructura mineral se utilizan generalmente

dos métodos independientes entre sí: Utilizando microscopios de polarización pueden hacerse visibles micro estructuras, distintos minerales y su mutua ordenación. Una segunda posibilidad para analizar las fases cristalinas es la inspección radiográfica de estructura fina o análisis de rayos de difracción (RBA).

2.1.4. Porosidad y densidad. Tamaño y tipo de poros: La porosidad de un material conformado incide directamente en su resistencia mecánica (que disminuye al aumentar la porosidad). Otras características importantes como el comportamiento frente al ataque químico, la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico, quedan también influenciadas por el tamaño, forma, número y distribución de los poros. Así, cualquier porosidad residual tendrá un efecto negativo en las propiedades elásticas y en la resistencia.

2.1.5. Permeabilidad (Al aire, gases o vapores): Es la propiedad que tienen los cuerpos a dejarse atravesar por los fluidos. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

2.2. Propiedades térmicas.

Por propiedad o característica térmica se entiende la respuesta de un material al ser calentado. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones aumentan. La energía puede transportarse de las regiones calientes a las regiones más frías de la muestra si existe un gradiente de temperatura y, finalmente la muestra puede fundirse. La capacidad calorífica, la dilatación térmica, la conductividad térmica y la refractariedad (Resistencia pirosfópica) son propiedades muy importantes en la utilización práctica de los materiales y, en particular, de los materiales refractarios.

2.2.1. Capacidad calorífica. Calor específico: Cuando se calienta un material sólido, este experimenta un aumento de temperatura, indicando con ello que absorbe energía. La capacidad calorífica es una propiedad que indica la capacidad de un material de absorber calor de su entorno. Representa la cantidad de energía necesaria para aumentar la temperatura del material en una unidad.

2.2.2. Dilatación térmica: Todos (o la mayoría) de los materiales sólidos experimentan variaciones dimensionales (dilatación o contracción) por efecto de la temperatura, así se expanden cuando son calentados y se contraen cuando son enfriados. Aunque estos cambios suelen ser pequeños no por ello dejan de ser importantes, sobre todo si se quiere utilizar materiales distintos en una unión.

2.2.3. Refractariedad. Resistencia pirosfópica: La resistencia térmica o refractariedad de un material está ligada a su punto de fusión. Solo los compuestos puros tienen un punto de fusión verdadero definido. Para un compuesto puro el punto de fusión es la

temperatura a la cual se verifica el cambio de fase o la transformación del estado sólido al líquido de un determinado constituyente (sólido↔líquido). Los materiales refractarios, salvo algunos casos, no son compuestos puros, y en realidad presentan una zona de reblandecimiento, por lo que ambos términos no deberían utilizarse indiscriminadamente. Cabe más bien hablar de punto de reblandecimiento, fluencia plástica o, a lo sumo, de punto medio de fusión ya que esta es siempre gradual al ser diferente para los diversos compuestos que integran el material.

El reblandecimiento es más significativo que el punto de fusión verdadero, ya que un material es de relativo valor refractario si se deforma a partir de 1500 °C, aunque la fusión completa no se produzca hasta que se alcancen los 1700 °C según se menciona en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez). El reblandecimiento es debido a que determinados componentes (generalmente en la fase vítrea) funden antes que otros, formando con los no fundidos una masa plástica que se deforma por su propio peso o por una carga aplicada. El fenómeno depende, pues, de factores tales como la proporción sólido-líquido (los diagramas de equilibrio entre fases proporcionarán una valiosa información al respecto), la viscosidad del líquido que se forma, el tamaño de los cristales, etc.

2.2.4. Aislamiento térmico. Conductividad térmica: El objetivo principal del aislamiento térmico en los equipos que trabajan a alta temperatura es:

- Ahorrar energía, minimizando las pérdidas a través de las paredes.
- Proteger al individuo, al hábitat y al medio ambiente.

La conductividad térmica es una propiedad muy importante a la hora de elegir el material más adecuado desde el punto de vista de aislamiento térmico. En general, en los materiales refractarios, y especialmente en los aislantes, se requiere una baja conductividad térmica al objeto de minimizar las pérdidas de calor por las paredes de los hornos industriales, etc. La transmisión de calor a través de un material es un fenómeno de transporte complejo, debido a que al ser un sólido poroso intervienen en él, en mayor o menor grado, los tres mecanismos de transmisión de calor: conducción, convección y radiación.

La tabla 5 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra la división de los materiales en buenos, medios y malos aislantes.

Tabla 5. División de los materiales en buenos aislantes térmicos, moderados o pobres.

Tipo material	Conductividad Térmica (Btu.in/h(ft) ² °F)	Conductividad térmica (W/m.k)	Conductividad térmica (Kcal/m.h.°C)
Buenos aislantes	0,3-2,0	0,043-0.288	0,037-0,25
Moderados aislantes	2,0-5-0	0,288-0,721	0,25-0,62
Pobres aislantes	>5,0	>0,721	>0,62

2.2.5. Resistencia al choque térmico: La mayoría de las aplicaciones de los materiales refractarios implican la existencia de gradientes de temperatura variables en el tiempo. Estos gradientes producen dilataciones diferenciales en las piezas y, consecuentemente, tensiones. Si las tensiones creadas superan a la tensión de fractura del material, tiene lugar la rotura de la pieza. Junto con la corrosión y la abrasión, el fallo debido a las sollicitaciones termo mecánicas es uno de los mecanismos fundamentales de degradación de las piezas refractarias en servicio. La resistencia al choque térmico es una propiedad de un material refractario que pone de manifiesto su capacidad para resistir los cambios bruscos, en magnitud y tiempo, de la temperatura. Tal resistencia influye de manera decisiva en su utilización y comportamiento, ya que las tensiones térmicas provocadas en su masa por un calentamiento desigual (gradientes de temperatura) y por la existencia de constituyentes mineralógicos con diferentes coeficientes de dilatación lineal, pueden superar a la tensión de rotura del material refractario y dar lugar a la formación de grietas y al desprendimiento de trozos (desconchados), con riesgo de destrucción total.

2.2.6. Variación permanente de dimensiones (Postvariación dimensional): La variación permanente de las dimensiones por acción del calor es la dilatación o contracción que permanece en un producto refractario conformado que es calentado hasta una temperatura determinada durante un tiempo dado y posteriormente, enfriado hasta temperatura ambiente. La variación permanente de dimensiones (o irreversible) tiene su origen en que algunas de las reacciones que se produjeron durante la sinterización cerámica (cocción) del material refractario no se pudieron concluir de forma total. Después de un calentamiento a elevadas temperaturas y enfriamiento final, quedan frecuentemente deformaciones permanentes, tanto en el sentido de la dilatación como en el de la contracción, denominadas postdilatación y postcontracción. Resulta, pues, según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) que un material refractario que no se ha cocido adecuadamente puede presentar un grado de expansión lineal, positiva o negativa, irreversible (permanente) más elevado que otro de la misma calidad que ha experimentado el proceso de cocción (aglomeración cerámica) adecuadamente (completamente).

2.3. Propiedades Mecánicas.

Muchos materiales, cuando prestan servicio, están sometidos a fuerzas o cargas, ejemplos de ello son los revestimientos refractarios de los hornos, las aleaciones de aluminio con las cuales se construyen las alas de los aviones, el acero de los ejes de los automóviles o las vigas y pilares de los edificios. En tales situaciones es necesario conocer las características del material y diseñar la pieza de tal manera que cualquier deformación resultante no sea excesiva y no se produzca la rotura. El comportamiento mecánico o las propiedades mecánicas de un material reflejan la relación entre la fuerza aplicada y la respuesta del material (o sea, su deformación). Algunas de las propiedades mecánicas más importantes son la resistencia, la dureza, la ductilidad y la rigidez.

2.3.1. Resistencia a compresión en frío: La resistencia a la compresión en frío, σ_{cf} , ha sido considerada como uno de los máximos exponentes de la resistencia mecánica general de un material refractario. Sin embargo, hoy en día no se considera tan importante porque las roturas a compresión representan una pequeña proporción de los problemas que aparecen en la construcción de hornos. De cualquier forma, resulta útil como comprobación indirecta de otras propiedades y porque puede poner de relieve defectos de fabricación.

2.3.2. Resistencia a la tracción: Esta prueba es realizada muy pocas veces, variando mucho la forma de las probetas según la máquina que se emplee, no estando normalizado en casi ningún país. La resistencia a la tracción de los materiales refractarios varía según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) entre 1/8 y 1/57 de la resistencia a la compresión, tomándose como término medio 1/28 de la resistencia a la compresión.

La tabla 6 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra valores característicos del módulo de rotura y módulo de elasticidad para varios materiales refractarios.

Tabla 6. Módulos de rotura y módulos de elasticidad para materiales refractarios.

Materiales	σ (Mpa)	E (Gpa)	$\sigma/E(x10e-4)$
Alúmina electrofundida sinterizada (99%)	12,6	81	1,5
Alúmina tabular sinterizada (99%)	18,6	77	2,4
Silicoaluminoso (42% Al ₂ O ₃)	7,3	24	3,1
Alúmina-mullita (85% Al ₂ O ₃)	15	40	3,7
Magnesita natural (96%)	13,2	85	1,6
Magnesita-cromo (59-23%)	11,8	75	1,6
Al ₂ O ₃ -C (31%C)	11	13	8
MgO-C (12%)	9	25	3,6

2.3.3. Resistencia al desgaste: Los ladrillos refractarios no se someten a esfuerzos mecánicos solo con la pura presión de carga, sino también con el ataque abrasivo producido por el material del horno que se desliza lentamente en la mampostería de altos hornos, hornos de cuba, cámaras de coque, hornos rotativos, cámaras de combustión y similares y por el efecto de choque de los gases que en su paso rápido llevan finas partículas sólidas. Por lo tanto, no basta la resistencia a la compresión en frío para caracterizar el desgaste de los ladrillos.

2.4. Propiedades Mecánico-Térmicas.

Las propiedades mecánico-térmicas son aquellas en que se hace intervenir la temperatura, al mismo tiempo que la carga.

2.4.1. Resistencia a la flexión en caliente: Uno de los parámetros más usados para caracterizar el comportamiento mecánico de los refractarios es el la resistencia a la flexión a temperaturas elevadas o módulo de rotura en caliente (MDRC) y con un incremento constante del esfuerzo. La determinación de esta propiedad exige el ensayo de un cierto número de muestras en idénticas condiciones debido a su variabilidad. Dado que, en general, los refractarios presentan fractura no lineal a elevadas temperaturas, los valores del MDRC dependen del tamaño de la muestra, de la velocidad de carga y del sistema de carga utilizado.

2.4.2. Refractariedad bajo carga: Por refractariedad bajo carga se entiende la temperatura a la cual una probeta de material refractario, denso o aislante, sometida a una carga constante y a un determinado régimen de calentamiento, experimenta un cierto tanto por ciento de contracción, con respecto al punto de máxima dilatación (punto de culminación de la curva % Dilatación/Contracción en función de la temperatura). Por tanto, esta propiedad informa sobre el punto o la zona de reblandecimiento de un material sometido a temperatura ascendente bajo una carga de presión constante.

2.4.3. Fluencia bajo presión: Se entiende por termo fluencia o simplemente fluencia, la deformación plástica lenta y continua que, a lo largo del tiempo, experimentan los materiales sometidos a cargas inferiores a las que producirían deformaciones permanentes a temperatura ambiente, cuando trabajan a temperaturas suficientemente elevadas. Esta deformación continua y no reversible puede llevar, finalmente, al fallo del material. Estos cambios de forma son generalmente perjudiciales, siendo un factor que limita la vida de un determinado componente. Así, por ejemplo, las piezas que soportan las hileras de colada en la industria del vidrio o los tubos para la suspensión de piezas en hornos túnel, deben de reemplazarse antes de que las piezas toquen el suelo del horno o se salgan de sus apoyos provocando el paro inmediato del horno. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

2.5. Propiedades Químicas.

2.5.1. Resistencia al ataque por escorias: Los materiales refractarios, durante su utilización, se ven sometidos a acciones químicas, entre las que destaca el ataque de las escorias. La elección de un refractario para una aplicación determinada, depende considerablemente de su resistencia frente a las escorias. Así, en la manufactura del acero por el procedimiento Siemens, la solera del horno está sometida al ataque de escorias básicas de afino, formadas por la interacción de la cal con las impurezas silíceas y las trazas de azufre. Las escorias metalúrgicas se caracterizan, al igual que los materiales refractarios, por estar constituidas, básicamente, por óxidos metálicos féreos: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , etc. Además, aparecen en su composición otros componentes, en menor concentración, tales como óxidos metálicos (Fe_2O_3 , FeO , MnO , etc.) y óxidos alcalinos (Na_2O , K_2O , etc.).

La escoria que aparece durante un proceso metalúrgico, debe ser suficientemente fluida y, a la vez, de alta actividad química, con el fin de facilitar los intercambios de materiales. Como consecuencia, el refractario que se elija, debe tener una composición adecuada, de tal manera que la escoria no sea fundente suyo. Ello exige, que la acidez o basicidad de ambas sustancias sea paralela. No obstante, es imposible evitar cierta interacción físico - química entre ellas. Así, los constituyentes (disperso y matriz) del refractario y de la escoria pueden reaccionar y dar lugar a compuestos químicos diferentes.

2.5.2. Resistencia a gases y vapores: No son solo las escorias líquidas o las fusiones de vidrio son las causas que producen la destrucción de ladrillos, sino que los gases y vapores influyen también considerablemente en la duración. Los ejemplos más conocidos son: Un caso especial de agresividad química, a 400-500°C, lo constituye el monóxido de carbono contenido en la atmosfera que se encuentra en contacto con el material refractario.

La deposición de carbono en los poros abiertos del material refractario, se encuentra catalizada (acelerada) por la presencia de carburo de hierro, el cual se forma en atmosfera reductora a partir de partículas de Fe_2O_3 presentes como impurezas en las materias primas refractarias, a temperaturas comprendidas entre los 400°C y 700°C. Se produce la acumulación de carbono en el interior del ladrillo, que puede conducir a reblandecer y a romper la estructura del ladrillo. El carbono que se deposita en los poros y fisuras del material, puede dar lugar a grandes tensiones mecánicas cuyo resultado puede ser la desintegración total o parcial de las piezas de refractario.

2.5.3. Resistencia a los ácidos: Se especifica un método para determinar la resistencia de los productos refractarios de conformación densa al ataque del ácido sulfúrico. Se utiliza dicho ácido porque proporciona resultados considerados como característicos de

los obtenidos en la exposición de materiales refractarios a numerosos ácidos (otros ácidos distintos al fluorhídrico).

2.5.4. Resistencia a la hidratación (vapor de agua): Destrucción de los productos que contienen carburo de silicio en atmosfera oxidante con contenido de vapor de agua a 900-1100°C. Los ladrillos refractarios que contienen gran cantidad de CaO libre pueden descomponerse materialmente por completo antes de proceder al montaje por la circunstancia del vapor de agua que contiene el aire, debido a la transformación del CaO en Ca(OH)₂ con el consiguiente aumento de volumen. Estas muestras surgen en los ladrillos de magnesia sin CaO libre y que se denominan de hidratación, a lo sumo cuando se someten a atmosfera acuosa durante un tiempo largo a temperaturas superiores, pero siempre por debajo de la temperatura de transformación de los hidróxidos de magnesia que pudieran haberse formado eventualmente. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

Otras propiedades importantes a tener en cuenta en la fabricación de materiales cerámicos es el secado y no debe menospreciarse si se quiere evitar fallos que aparecen en la fase de cocción. No solo es necesario extraer el agua de forma bastante rápida sino que esto debe hacerse sin provocar tensiones que puedan deformar o fracturar el producto. Únicamente se pueden establecer las condiciones de secado eficaz con un conocimiento de la realidad del mecanismo de secado. Las superficies sólidas, sin exceptuar la arcilla, adsorben una capa de agua de una o varias moléculas de espesor y además, recogen agua en los capilares. La cantidad total de agua adsorbida es función de la presión parcial de vapor de agua. Así pues, la arcilla seca es higroscópica y gradualmente llega al equilibrio con la atmosfera; por tanto, las condiciones de equilibrio pueden representarse por isotermas vapor-presión-humedad. El significado de las isotermas es que la arcilla cuya curva presenta un crecimiento pronunciado para valores bajos de humedad, se secará rápidamente, pasando a contener poca agua, en aire ordinario, mientras que las arcillas cuyo crecimiento es gradual se secarán lentamente y tendrán más humedad de equilibrio.

El conocimiento de las características de contracción de las arcillas (suelo o roca sedimentaria de grano muy fino (<0,002 mm) y alta plasticidad, compuesta principalmente de silicatos y que mezclada con agua se puede moldear y cocida se endurece; se usa para fabricar objetos cerámicos) y de las pastas cerámicas (tipo de mezcla constituida por arcilla, desgrasante, y fundente. El desgrasante, también denominado aplástico o antiplástico, disminuye la plasticidad natural de la arcilla, reduce la formación de tensiones y grietas en el proceso de secado, anterior a la cocción. Además, está el fundente que permite conseguir una mejor vitrificación, con la disminución de la porosidad, o consiguiendo la misma porosidad a menor temperatura de cocción.) es útil al establecer un plan de secado porque, al terminar la contracción, el resto de agua puede eliminarse fácilmente. Las arcillas naturales dan curvas de contracción variables con la frecuencia de las películas de agua y con las características de empaquetamiento de las partículas. Las

pastas cerámicas se contraen menos que la arcilla porque, con la incorporación de una fracción relativamente gruesa de desgrasante, disminuye la frecuencia de películas de agua y la porosidad en seco es menor.

El secado suele asociarse con el calor, pero hay varias formas de extracción de agua en las que no se utiliza el calor. Por ejemplo, si se comprime una masa de arcilla húmeda contra un bloque seco de escayola (yeso de alta calidad y grano muy fino), el agua pasara de la arcilla a la escayola tratando de establecer un estado de equilibrio. Esta forma de secado se da en los artículos torneados con molde y en los obtenidos por colada. Así mismo, es posible extraer el agua de un material poroso por fuerza centrífuga. Este método se emplea regularmente para secar sólidos granulares. Sin embargo, se han realizado ensayos que indican que el método es muy poco efectivo en el caso de arcillas y pastas ya que el agua puede quedar fuertemente retenida en las diminutas capilaridades. El agua puede eliminarse a la temperatura ambiente por vacío, más para las arcillas resultaría muy caro comparado con el secado por calor.

El método más corriente de secado es el de suministro de calor por evaporación del agua. Este calor suele aplicarse a la superficie de la pieza por convección o por radiación, pero el calentamiento por alta frecuencia genera calor en toda la masa. Como el aire es el medio de suministro de calor y de transporte del vapor de agua, es esencial conocer sus propiedades. Cuanto más elevada sea la temperatura inicial del aire, más vapor de agua recoge, motivo por el cual se produce el secado a altas temperaturas. Pero si el aire cargado de agua se expone a superficies cuya temperatura sea inferior a su punto de saturación, el exceso de agua se condensara como líquido. Por lo tanto, el punto de saturación debe ser superior a la temperatura de las piezas que entran de lo contrario se producirá condensación. Ciertamente conviene formar la cerámica a elevada temperatura de modo que pueda entrar al secador a temperatura superior a la del ambiente. Las ventajas que se derivan son: se requiere menos calor durante el secado, la viscosidad del agua es más baja y esta se dirige más rápidamente a la superficie y el aire de salida en el secador puede llevar más humedad. (Norton, 1975)

Cada material refractario posee diferentes propiedades las cuales influyen en gran medida en la aplicación en la cual se desarrollen, cada uno de estos materiales posee propiedades únicas, y en ocasiones son combinados para dar una mejor eficiencia o conseguir ciertas características especiales según la aplicación donde se desempeñen.

Para conseguir una mejora de propiedades, se han hecho experimentos para el análisis de la transferencia de calor por convección a través de diferentes arreglos de ladrillos en hornos de túnel. Los experimentos realizados se han hecho a escala de laboratorio, simulando una sección del horno de túnel a una escala de 1:4. Seis ajustes diferentes de la disposición de los ladrillos se han examinado experimentalmente para números de Reynolds desde 6000 a 33000 y con flujo de calor constante. Las mediciones se llevaron a cabo con los ladrillos en la dirección longitudinal y transversal del flujo.

Los resultados son reportados por los coeficientes de transferencia de calor por convección local y promedio, y también por la caída de presión a través de la configuración. Los resultados muestran que la caída de presión y los coeficientes de transferencia de calor por convección depende fuertemente de los parámetros establecidos. Mejora de un 56% en Nusselt (Nu) es obtenido por el espaciado entre los ladrillos que incrementa desde 5 a 26 mm para la configuración de red en $Re=15000$ mientras el espaciado de columna tiene un efecto moderado, proporcionando que la brecha en el techo se mantenga sin cambios.

Los hornos que utilizan configuración de red, con igual espaciado entre columnas y entre ladrillos, logran el mayor coeficiente de calor por convección, el menor tiempo de producción y proporcionan un alto ahorro de energía. Por otro lado, los hornos que usan configuración de red de separación pequeña de columna y gran número de ladrillos, proporcionan la mayor productividad. Correlaciones usadas para su uso en el cálculo de las caídas de presión y las tasas de transferencia de calor por convección en la cocción de materiales refractarios se presentan en forma de grupos adimensionales. Los números de Nusselt para todos los datos están bien correlacionados con el número de Reynolds y algunos otros grupos geométricos, o con el número de Reynolds y el factor de fricción. (Abou-Ziyan, 2003)

Los hormigones refractarios son monolíticos compuestos de cemento refractario, agregados de alta temperatura y contenido mínimo de agua. Algunos otros componentes tales como los humos de sílice están incluidos en pequeñas cantidades con el fin de mejorar la capacidad de flujo, propiedades químicas o propiedades mecánicas. Dominios de trabajo de alta temperatura como para la fabricación de metal, son usados para construir capas de cojinetes de alta temperatura con ladrillos refractarios cocidos hechos de magnesia u otros materiales cerámicos. Aunque estos materiales son convenientes, la construcción de una larga y compleja geometría consume tiempo y es costoso. Además, en muchos casos la necesidad de juntas entre los ladrillos crea un desorden con un uso prolongado.

Similar al hormigón ordinario, el hormigón refractario tiene la capacidad de adaptarse a formas geométricamente complejas, lo que reduce el tiempo de construcción y por tanto el coste de construcción. Esta ventaja es eficaz en la construcción inicial y también en reparaciones eventuales. Estas ventajas son tan grandes que los proveedores de materiales refractarios intentan utilizar el hormigón en lugar de ladrillos refractarios, siempre que sea posible. Sin embargo a temperaturas muy altas (más de 1700°C), los ladrillos refractarios siguen siendo fuertemente competitivos. Además el uso de hormigones refractarios requiere de una fase de secado que se añade a la programación de construcción, lo que puede reducir el tiempo que ahorra en comparación con el uso de ladrillos refractarios.

Muchos estudios sobre el hormigón refractario, investigan el material a temperatura ambiente después de que ha sido cocido a diferentes temperaturas. Los estudios miden

las propiedades residuales de los materiales después de tratamientos térmicos a través de pruebas de tracción, compresión y flexión. Algunos estudios investigan el comportamiento del material cuando es sometido a altas temperaturas. Otros estudios son muy usados para el modelamiento de estructuras industriales hechos de este material. El comportamiento del material debe ser modelado y es necesario que las pruebas realizadas determinen la evolución de los parámetros del modelo con la temperatura. (Ouedraogo, Roosefid, Prompt, & Deteuf, 2011)

La mejora de propiedades también es estudiada en los hormigones refractarios, donde se estudia el comportamiento a la compresión uniaxial bajo condiciones de ensayo de alta temperatura. Dos hormigones refractarios con la misma composición de matriz, uno basado en agregado de andalucita y otro en agregado de bauxita, han sido estudiados en (Ouedraogo, Roosefid, Prompt, & Deteuf, 2011) en rangos de temperatura desde temperatura ambiente hasta 1200°C máximo.

Las muestras fueron secadas a 110°C durante 24 horas para crear muestras secas estándar, y otras cocinadas a diferentes temperaturas, se sometieron a varios ensayos de compresión uniaxiales a diferentes temperaturas. La evolución del comportamiento global de los materiales desde frágil a viscoso fue evidenciada y correlacionada con la evolución de su microestructura. Las pruebas de carga/descarga, la fluencia y rango de tensión ayudaron a definir el comportamiento de la naturaleza visco plástica y de deteriorabilidad. La influencia de la temperatura de cocción y la duración en el comportamiento del material es reportada y discutida en (Ouedraogo, Roosefid, Prompt, & Deteuf, 2011).

Otros estudios también se han llevado a cabo para la mejora de las propiedades a nivel microestructural, como las interacciones sólido-líquido, que es considerada la clave para la evolución microestructural en cerámicos según se dice en (Lee, Jayaseelan, & Zhang, 2008). Cinco ejemplos son utilizados para ilustrar el significado de la alta temperatura en las interacciones solido-liquido en la elaboración de la cerámica y su uso. Cada sistema de varios volúmenes de líquido actúan como huéspedes para reacciones que controlan la evolución microestructural. Estos líquidos pueden tener composición diferente en función de su entorno local y desempeñan un papel dinámico que puede conducir a la heterogeneidad, a menudo a un no equilibrio de las microestructuras. Lo anterior, a menudo acompañado de procesos de cristalización, formación de líquido (disolución y fusión) y volatilización son altamente complejos pero de gran importancia práctica.

Un aspecto importante en la evolución microestructural es el impacto de la formación de líquido y su interacción con las fases sólidas durante la cocción a altas temperaturas y el uso de complejos sistemas multi fase cerámica. La interacción sólido-líquido es mal entendida incluso en sistemas simples, el modelado en escala atómica incluso a temperatura ambiente implica interfaces entre sílice amorfa pura y agua pura. La complejidad adicional de la variación de la composición del líquido, PH, temperatura y viscosidad, así como la composición del sólido, cristalinidad, microestructura, temperatura, defecto de contenido y la atmosfera han sido poco considerados según se

dice en (Lee, Jayaseelan, & Zhang, 2008). Estos sistemas son de gran importancia e incluyen el reemplazo de fluidos refractarios/escoria, residuos radioactivos de alto nivel, vidrio/depósitos de agua y composites de fase líquida y viscosa sinterizados de cerámicos comerciales. Los ejemplos específicos del impacto de la composición líquida y viscosa demostrará que estos sistemas están generalmente lejos del equilibrio termodinámico y que los líquidos formados son a menudo significativamente heterogéneos variando en composición (y por tanto en propiedades) con locación en la microestructura. (Lee, Jayaseelan, & Zhang, 2008)

Estudios acerca de la utilización de materiales residuales como lo son las cenizas industriales para la creación de nuevos materiales cerámicos también se han llevado a cabo en (Quaranta, 1998), para tratar de mejorar las propiedades de los mismos. El uso de energía eléctrica para la generación de cenizas volátiles como material de partida para la preparación de materiales cerámicos es estudiado. Las piezas cerámicas son obtenidas de las cenizas con dos diferentes composiciones, por moldeo y cocción a una temperatura entre 700 y 1300°C. Una temperatura de sinterización mayor a 1100°C fue establecida. Los productos fueron caracterizados por microscopía óptica y electrónica y análisis de rayos X, porosidad y micro dureza son determinados como una función de la composición y temperatura de cocción. La sinterización de las cenizas produce mullita, apropiado para el uso en cerámicos. Los mejores resultados son obtenidos con las cenizas teniendo un contenido inicial alto de carbono (17.88%) y por un tratamiento a 1200°C. (Quaranta, 1998)

También la fabricación de ladrillos refractarios con la combinación de otros refractarios como la magnesita y el carbón como principales materias primas es utilizada en (Ni & Kuangchan Zonghe Livong, 1999) para mejorar propiedades. La posibilidad de producir ladrillos refractarios de cordierita-mullita (cordierita, formada por un silicato de magnesio y aluminio, las placas de cordierita-mullita se pueden obtener a partir de talco, arcilla y alúmina, se queman entre 1310 y 1320°C) usando magnesita y carbón como principales materias primas es estudiado, los resultados muestran que el alto grado de los ladrillos refractarios de cordierita-mullita pueden ser producidos por una cuidadosa selección de carbón de alto contenido de caolinita y bajo contenido de óxidos de metal alcalino y magnesita con alta pureza. Los ladrillos refractarios tienen muy buena resistencia al choque térmico y baja conductividad térmica. El rango de temperatura de servicio de estos productos fue entre 1320-1470°C según se reporta en (Ni & Kuangchan Zonghe Livong, 1999).

CAPITULO 3

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN

En la industria de los materiales refractarios se utilizan diversos métodos para su fabricación. El sistema más sencillo es el de cortar piezas de la forma deseada, a partir de las materias primas naturales o producidas artificialmente. Otro método diferente es el de fundir una composición determinada en moldes para obtener ladrillos o bloques, los materiales fabricados por este principio se denominan productos electrofundidos.

Se han implementado principios y técnicas de trabajo de la cerámica fina para fabricar productos altamente refractarios, en los que las materias refractarias una vez molidas con la máxima finura y después de una preparación en húmedo, se moldean por medio de aglomerado químico, extrusión o también por prensado isostático. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

Los refractarios de acuerdo a (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008) se clasifican según su proceso de fabricación en dos tipos: Ladrillos y especialidades.

3.1. Ladrillos

Existen distintos tipos según la forma de ligar las materias primas.

3.1.1. Cocido convencional: en el caso de los refractarios sílico–aluminosos durante la cocción se produce incipiente fusión de los compuestos formados por los óxidos constituyentes e impurezas, formando de esta manera una matriz soporte que es la que le da la rigidez al ladrillo.

3.1.2. Cocido liga directa: en el caso de los refractarios de magnesia, se comprobó que como un contenido muy bajo de impurezas a alta temperatura (aprox.1800°C), se unían los cristales de Periclasa (MgO) directamente, sin la matriz soporte o siendo ella muy reducida (según el contenido de impurezas).

3.1.3. Cocido e impregnado: la impregnación ejerce sobre el ladrillo una función protectora contra el ataque de las escorias. Cuanto más poroso sea el ladrillo, posee una mayor superficie expuesta a la corrosión de la misma. De esta manera se introduce

carbono, el cual frente a la acción del FeO de la escoria produce CO, depositándose el Fe que no ataca al refractario.

El ladrillo es expuesto al vacío, se inyecta alquitrán que penetra en los poros por diferencia de presión. Se impregnan los refractarios básicos, lográndose una importante resistencia al impacto (por ejemplo carga de chatarra).

3.1.4. Químicamente ligado: No tiene cocción previa. Lo que se hace es la calcinación de las materias primas. En el pastón formado se agrega un elemento químico que produce a través de reacciones químicas la ligazón entre los granos, lográndose la resistencia necesaria para ser transportado, instalado y soportar el peso propio de la instalación. Al evitarse la cocción se obtiene una importante reducción en el costo.

3.1.5. Ligado con alquitrán: La ligazón de las materias primas se logra con la adición de un alquitrán bituminoso y posterior prensado.

3.1.6. Templado: Al ladrillo ligado con alquitrán se lo somete a un calentamiento a baja temperatura (400 a 500 ° C) a fin de lograr la deposición del carbono y obtener la resistencia necesaria.

3.1.7. Electrofundidos: Mediante un electrodo se funden las materias primas llevándolas al estado líquido y luego se las vierte en un molde. El horno no tiene paredes, la misma materia prima sirve de contención y se funde en zonas aledañas al electrodo. Una vez colado el lingote, se corta con sierras abrasivas.

3.1.8. Aislantes: Con los materiales se trata de reducir el flujo calórico por convección, conducción y radiación. El aislante ideal debería tener una estructura tipo colmena, de celdas diminutas y paredes muy delgadas llenas de aire y construido con un material de baja conductividad térmica.

Para lograr ello, en la elaboración del refractario aislante se mezclan las materias primas con elementos combustibles, como aserrín o viruta de madera. Durante la cocción del aislante las sustancias combustibles se queman, dejando los agujeros que confieren al ladrillo la debida porosidad y ligereza. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

3.2. Especialidades.

Recopila a todos los materiales refractarios que no tienen forma definida, existen distintos tipos.

3.2.1. Tierra refractaria: Mezcla de dos o más materias primas al estado natural sin haber sufrido proceso de calcinación. Solo han sido sometidas a trituración, molienda y clasificación de tamaños (dosificación).

Al ser aplicada no desarrolla ningún tipo de resistencia mecánica. Se la utiliza para sellar imperfecciones de ladrillos.

3.2.2. Argamasa: La única diferencia que tiene con la tierra refractaria, es que parte de las materias primas que la constituyen son previamente calcinadas.

3.2.3. Mortero: Producto construido por la mezcla de argamasa con un elemento ligante, que puede ser un cemento aluminio –cálcico, que en presencia de agua le confiere a la mezcla una resistencia mecánica a temperatura ambiente. Se lo utiliza como elemento ligante entre piezas conformadas de material refractario.

3.2.4. Hormigón: Por medio de una granulometría más grande y un aglomerante de propiedades hidráulicas adecuado, se pueden colar piezas monolíticas o pre moldeadas de forma tal que reemplacen a un número importante de ladrillos.

3.2.5. Plástico: Es una mezcla de materias primas calcinadas, crudas (arcillas muy plásticas) y agua. Pueden ser de endurecimiento al aire o al fuego. En servicio adquiere una menor resistencia mecánica que el hormigón, pero es más poroso lo que lo hace un mejor aislante.

3.2.6. Masa para proyectar: Es una masa refractaria húmeda que se aplica mediante una máquina de proyección y queda adherida por impacto. Es importante tener en cuenta el contenido de humedad, pues si es poca la proyección resulta pulverulenta, si es mucha chorrea el material. Otro factor a determinar es el índice de rebote, que refleja el material no adherido y que no debe ser superior al 5% del total.

3.2.7. Masa para apisonar: Material refractario que se aplica en seco, mediante repetidos golpes de una herramienta mecánica. De esta manera se logra una elevada densidad lo que implica una mayor resistencia a la abrasión.

3.2.8. Hormigón tixotrópico: También llamado hormigón denso o de bajo cemento. Es un producto constituido fundamentalmente por:

- Materias primas pre calcinadas e inertes que conforman un espectro de mezcla de diferentes tamaños, de manera tal de disminuir al máximo los espacios vacíos entre granos.
- Un aglomerante de fragüe hidráulico.
- Aditivos especiales que le confieren características lubricantes y fluidificantes.

Al minimizar el volumen de espacios vacíos entre granos, el contenido de cemento es bajo, lo que permite ser elaborado con una menor cantidad de agua (aproximadamente 4 a 6 %) para promover su total hidratación. Una vez colocada en el molde, la mezcla es vibrada de modo tal de alcanzar su máxima densidad y resistencia. Durante la vibración, el aire contenido es expulsado de la mezcla, la que siendo muy compacta adopta un comportamiento tixotrópico. Esto es que durante y después de la vibración aumenta mucho su fluidez. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

Los ciclos que componen, según (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008), el proceso de fabricación de materiales refractarios son los siguientes:

- Materia prima
- Trituración y molienda
- Clasificación
- Mezcla u homogeneización
- Preparación del pastón
- Moldeado
- Secado
- Cocción

3.3. Materia Prima.

En general las materias primas de que parte el proceso de fabricación de materiales refractarios son de origen natural y proceden directamente de mina. Cuando se utilizan, en todo o en parte, materias de origen primario (naturales), es necesario realizar una serie de operaciones previas con el objeto de obtener una materia de calidad adecuada, que permita obtener un producto refractario cocido con las propiedades deseadas. Por ello y una vez extraída la materia prima natural de la mina o cantera, se procede a su lavado, con objeto de eliminar materias solubles que puedan actuar como posibles fundentes y por tanto disminuirán las propiedades refractarias del producto a fabricar.

En algunos casos es necesario realizar un proceso de concentración y posterior o paralelamente, una calcinación del producto, con el objeto de eliminar el CO₂ de los carbonatos o H₂O de los hidratos presentes en la materia prima. Si no se realizara esta operación, dichas sustancias volátiles se evacuarían en el proceso de cocción de las piezas refractarias y provocarían la rotura de las mismas, con las consiguientes pérdidas económicas. En este sentido, se tiene la chamota que es el producto resultante de calcinar materiales arcillosos. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.4. Trituración y molienda.

En esta etapa no solo se busca la reducción del tamaño de los granos de las materias primas, sino obtener un conjunto de partículas que posean la distribución granulométrica necesaria para su posterior tratamiento. Además del tamaño final del grano, es importante la dureza de la materia prima para elegir el equipo conveniente. Otra característica importante es la humedad de la materia prima. Si es menor del 4% se producen pérdidas de polvos. Si es mayor del 4% el material se empasta, presentando adherencias entre partículas o con elementos de la máquina. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

Según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) por regla general y debido a circunstancias de tipo económico, el proceso de trituración se realiza escalonadamente: Trituración basta - trituración fina - molienda.

Para ejecutar este tipo de trituración existen un gran número de máquinas de diferentes tipos como por ejemplo:

3.4.1. Trituración basta: triturador de mandíbulas, triturador de impacto, triturador de cono, triturador de rodillos.

3.4.2. Trituración fina: triturador de impacto, triturador de cono, triturador de rodillos.

3.4.3. Equipos de molinos: Molino de rodillos anulares, molino de bolas, molino oscilante.

Los aspectos fundamentales para la elección apropiada del equipo de trituración según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) son la dureza y la maleabilidad del material a moler, el grado de fragmentación prevista, la forma de grano y otros de carácter similar. El grado de rendimiento técnico para la trituración en todas estas máquinas es extraordinariamente bajo y está situado por debajo del 1 %, siendo todavía inferior para los equipos de molienda fina.

La mayor parte de la energía utilizada se transforma durante el proceso de trituración en calor. Un factor importante de costos en la trituración es el desgaste de los elementos moledores. En líneas generales, se ha valorado el principio de que para materiales duros deberán utilizarse herramientas resistentes y para el material blando la herramienta dura.

La intensidad de la molienda y la forma de llevarla a efecto dependen de la forma y tamaño de grano deseados. En general interesan granos angulosos e irregulares con preferencia a formas redondeadas o planas a fin de conseguir una buena compacidad y cohesión de las piezas. Los granos irregulares, en cuanto a forma, presentan una mayor superficie por unidad de peso y dan lugar a una mayor isotropía de características térmicas y mecánicas. Por esta causa deben utilizarse procedimientos de molienda con molinos de impactos o de percusión. Los tamaños de molienda dependen de la textura cristalina de la materia prima y de su homogeneidad cristalográfica.

Debe destacarse que para evitar contaminaciones no deseadas en las etapas de molienda, en las fábricas de refractarios, se dispone de circuitos de molienda separados para las distintas materias primas refractarias. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.5. Clasificación.

Una vez efectuada la reducción del tamaño de la partícula, se procede a separarlas en función de los distintos diámetros obtenidos. Esta operación se realiza haciendo pasar el material a través de zarandas o tamices, con aberturas de distintas medidas, reteniéndose en cada una los granos que tienen mayor tamaño que los orificios de este tamiz y que han pasado por la zaranda anterior, de orificios mayores. El material retenido en la primera zaranda o tamiz, es el que tiene medidas que superan a las máximas necesarias en el proceso. Esta parte del producto, es devuelta al molino para su posterior trituración o molienda. Cada uno de estos tamaños obtenidos, es almacenado en un silo determinado. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

3.6. Mezcla y Homogenización.

Posteriormente se procede al dosaje de los componentes, que después de su oportuno mezclado, formaran el pastón destinado al prensado. La dosificación se realiza según peso o volumen. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

Para la preparación de la masa a moldear, se mezclan los componentes en un mezclador según la materia prima indicada y la fórmula de la granulometría, se añade un aglomerante y después se procede a la homogeneización que suele ser normalmente en mezcladores discontinuos. En la industria del refractario han ido tomando base los mezcladores de contracorriente, mezcladores de rotor muy pesado (aproximadamente 3 toneladas) y mezcladores de eje doble. Son las características físicas del ladrillo las que determinan si es más conveniente la instalación de un mezclador de rulos. El mezclador de rulos suministra normalmente masas para fabricar ladrillos de textura más densa. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.7. Preparación del pastón.

Una vez obtenidas las cantidades necesarias de los distintos intervalos granulométricos y con el objeto de conseguir el máximo empaquetamiento de los granos, es necesario someterlos a un intenso amasado, operación que se realiza en un mezclador. Además para facilitar la homogénea distribución de los granos finos en la mezcla, se le añade un ligante o aglomerante, que contribuye también a dar más cohesión a la mezcla y le confiere una cierta plasticidad que ayuda de forma notable en su posterior conformación.

La mezcla y amasado de la pasta debe ser muy intensa con el objeto de hacerla perfectamente homogénea, ya que de no ser así la contracción o dilatación de la pieza durante la cocción no será uniforme en toda la masa de la misma. En algunos casos, el ligante usado es simplemente agua, ya que ésta permite poner en suspensión las partículas, lo que hace que estas se puedan distribuir de una forma homogénea en la masa. En los casos en que no sea posible utilizar agua o junto con ella, se pueden adicionar aglomerantes, bien sean orgánicos o inorgánicos, procurando que los mismos no contaminen, ni afecten a la composición química del material. Los aglomerantes inorgánicos más usuales son: cal, silicato sódico, sulfato de magnesio, ácido fosfórico, fosfato de mono aluminio, cemento refractario, etc. Entre los orgánicos: alquitrán, almidón, melazas, etc.

Durante la cocción, los primeros (inorgánicos) reaccionan con las partículas cristalinas contribuyendo a formar vidrios de sinterización, mientras que los segundos (orgánicos) se eliminan total o parcialmente por combustión, una vez sinterizados entre sí los granos de la pasta. La cantidad de agua incorporada a la masa, en general, es inferior al 10 %, y tiende a hacerse mínima para conseguir la máxima economía en el secado. Sin embargo, cuando la materia prima son arcillas, el porcentaje puede alcanzar el 30 %. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.8. Moldeado.

Una vez obtenida la mezcla ya homogeneizada, se la somete al moldeado, según alguno de los tres procedimientos siguientes, mencionados en (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008):

- Prensado mecánico
- Extrusión
- Moldeado a mano

3.8.1. Prensado mecánico: En el conformado de las piezas, en el caso de masas secas (humedad < 10%), es posible realizarlo en prensas, cosa que no se puede hacer con las masas plásticas (humedad >10 %), ya que lo impediría la incompresibilidad del agua, estas masas plásticas se suelen extrusionar. El prensado además de permitir la conformación de las piezas, disminuye considerablemente la porosidad, quedando ésta, en algunos casos, por debajo del 20 %.

El prensado uniaxial tiene por objeto la compactación de la mezcla dentro de un molde rígido aplicando la presión en una sola dirección por medio de un embolo, o un pistón o un punzón rígido. Es un procedimiento de elevada capacidad de producción y fácil de automatizar. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

Las etapas generales en el prensado son:

- Llenado de molde.
- Compactación y conformado de la pieza.
- Extracción de la pieza.

Existen tres tipos de prensas:

- Mecánicas: Las prensas de tipo mecánico carrera simple, tienen una alta capacidad de producción y son fáciles de automatizar. El ciclo de prensado se repite de 6 a 100 veces por minuto, dependiendo del tipo de prensa y de la forma de la pieza a fabricar. La capacidad de producción oscila entre 1 y 20 toneladas, pudiendo alcanzarse las 100 toneladas.

Otro tipo de prensa mecánica es la rotativa. En ella numerosos moldes se colocan sobre una mesa rotatoria. El punzón pasa sobre levas cuando la mesa gira, causando un ciclo de llenado, compresión y expulsión similar al de una prensa de carrera simple. Las velocidades de producción que pueden alcanzarse con una prensa rotativa están en el rango de 2000 piezas por minuto. La capacidad de presión está en intervalo de 1 a 100 toneladas.

Aún otro tipo de prensa mecánica es la prensa de palanca, que, comúnmente, se usa para el prensado de ladrillos refractarios y es capaz de ejercer la presión de hasta, aproximadamente, 800 toneladas. Las prensas de palanca cierran un volumen determinado de tal modo que la densidad final está controlada, en gran parte, por las características de la alimentación. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

- Hidráulicas: Las prensas hidráulicas transmiten la presión a través de un fluido que actúa sobre un pistón. Por lo general, operan a una presión determinada, de modo que el tamaño y las características del componente prensado están determinados por la naturaleza de la alimentación, la cantidad de llenado del molde y la presión aplicada. Las prensas hidráulicas pueden ser muy grandes, pero tienen un ciclo de trabajo mucho más largo que las mecánicas.

Las presiones alcanzadas por las prensas van desde los 400 a los 2000 Kgf/cm²; los valores más altos se logran con las prensas de las últimas generaciones. Hoy día ya es posible la utilización de prensas semiautomáticas, que dosifican y sacan la pieza refractaria sin la intervención del operario de la misma.

Para que la acción del prensado sea uniforme en toda la masa de la pieza y a su vez no introduzca heterogeneidad en la orientación de los granos, que redundaría en una menor resistencia mecánica en sentido transversal a la presión, se debe procurar limitar el espesor de la pieza, lubricar las paredes laterales del troquel y de ser posible realizar un prensado isostático. Este puede lograrse intercalando un fluido o cuerpo elástico entre la matriz y la pieza, que transmita la presión en todas las direcciones y caras. Con presiones elevadas es conveniente así mismo que el troquel o cámara de prensado esté bajo vacío, a fin de facilitar la expulsión del aire incluido en la masa evitando la retención de vacuolas gaseosas.

Para productos refractarios especiales de alta calidad se ha impuesto el método de prensado isostático. Por este método se rellenan moldes elásticos de goma con masa cerámica de polvo fino. Una vez cerrado el molde de goma, se somete la masa a presión en una autoclave. La presión empleada actúa en forma líquida por todas las direcciones sobre el cuerpo a prensar, consiguiendo de ésta manera una densidad uniforme en el ladrillo. En la industria del refractario se aplican presiones que llegan a alcanzar los 300 MPa utilizando prensas isostáticas. Este tipo de prensas encuentran su aplicación para la fabricación de bloques de formatos grandes, piezas de formas especiales como son buzas, tubos, etc. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

- Fricción: El pistón está vinculado a un tornillo sin fin, que en su otro extremo tiene una rueda horizontal, la cual se puede vincular a una o dos ruedas que giran solidarias a un eje normal al sentido de prensado. Con ello se logran los movimientos de ascenso y descenso del pistón. Mediante la prensa a fricción el operador puede reprensar las veces que quiera, utilizándose principalmente para piezas de considerable espesor. Es una prensa dinámica. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

3.8.2. Extrusión: La extrusión se usa en el conformado de materiales compuestos y la extrusión en caliente puede usarse para la obtención de electrodos de grafito. Las presiones que se alcanzan en la industria varían desde los 4 MPa para productos de porcelana hasta los 15 MPa para algunos materiales plastificados con productos orgánicos.

La capacidad de producción varía en función del tamaño de la pieza a fabricar, aproximándose a las 100 ton/h para piezas de gran tamaño. La velocidad de extrusión medida en términos de la velocidad de salida del material de la máquina, también varía

ampliamente y está controlada por la velocidad de corte y del sistema de transporte. Una velocidad de 1m/minuto es común en la extrusión de piezas de gran tamaño.

Esta técnica de conformado se emplea en la fabricación de productos cerámicos de sección constante. Básicamente el proceso de extrusión consiste en forzar el paso, mediante la aplicación de una presión, de la pasta con una consistencia plástica (Elevada viscosidad) a través de una matriz. Se obtiene un producto lineal con una sección transversal controlada, que luego se corta a la longitud requerida por el producto a obtener. Es un método de conformado continuo muy efectivo y eficiente, que usa un equipamiento simple.

Se han desarrollado varios métodos para forzar el paso de la pasta a través del dado: giro de unos rodillos, empuje de un pistón o rotación de una hélice (tornillo de Arquímedes). Las máquinas extrusoras de tornillo pueden ser simples o de tornillos gemelos. Por su parte, las máquinas extrusoras de pistón pueden alcanzar presiones muy elevadas, que, usualmente, se consiguen mediante bombas hidráulicas. Su mantenimiento es mínimo y, generalmente, tienen una menor contaminación por desgaste, que se limita a las paredes del cilindro.

Una desventaja de las máquinas extrusoras de pistón, es que ésta máquina trabaja con lotes de material, con una cantidad limitada. Esto puede causar problemas si un bajo coste de producción es un factor significativo y si la extrusión representa un porcentaje grande del coste total. Otra desventaja es que el incremento de carga que se produce en el cilindro, puede causar la estratificación de la mezcla, que da lugar a interrupciones en el modelo de flujo en el Cilindro/Dado, así como a la existencia de aire atrapado, que puede causar cambios en el comportamiento de la extrusión y defectos en las piezas en verde.

Las máquinas que realizan esta función constan de tres partes principales:

- El sistema propulsor, que tiene por objeto el empujar la pasta a través de la matriz.
- La matriz, que depende del tipo de pieza a realizar.
- La cortadora, que tiene la misión de cortar la columna que sale de la matriz en piezas de longitud determinada.

El sistema de hélice está especialmente indicado para masas plásticas, el sistema de cilindros, que se compone de dos o tres cilindros laminadores, se utiliza para pastas consistentes y el sistema de pistón, que empuja la pasta a través de la matriz por medio de un émbolo, se utiliza para pastas muy desgrasantes. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.8.3. Moldeado a mano: Se utiliza este procedimiento si la pieza es muy grande (más de 100 mm de lado), o si la pieza es muy complicada. También cuando las cantidades requeridas no justifican la fabricación de la matriz metálica, la cual generalmente es muy costosa. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

3.9. Secado.

El secado tiene por objeto eliminar el agua libre, no combinada, contenida en la pasta cruda e incorporada durante la preparación de las materias primas. La necesidad e importancia de esta operación, previa a la cocción, está en consonancia con el porcentaje de humedad de la pasta. Es por tanto particularmente relevante en las masas plásticas de arcilla y, por el contrario, es innecesaria en la preparación de masas prensadas en seco o aglomeradas químicamente.

El agua libre de la pasta puede diferenciarse, en agua de poro y agua intergranular. La primera rellena los espacios huecos entre las partículas del agregado, sin contribuir al volumen total aparente de la masa. La segunda recubre las partículas granulométricas base, y añade su volumen al total. La eliminación por secado del agua intergranular afecta pues al volumen de la pieza verde, en tanta mayor cuantía cuanto más próxima sea la humedad inicial al punto de saturación. Este fenómeno explica la contracción de las pastas húmedas o verdes, en particular de las arcillosas, durante la operación de secado y la nula contracción de las pastas secas.

El agua de poro debe eliminarse a temperaturas próximas a la de ebullición. Si su extracción se efectúa durante la cocción, la elevada temperatura superficial de la pieza y su pequeña conductividad térmica dará lugar a que la porción final de humedad sea eliminada a través de una capa sinterizada del material, lo que originará un mayor porcentaje de porosidad abierta en la pieza cocida. La operación de secado, como fase previa de la cocción, se justifica pues, al objeto de que el material absorba la fuerte contracción térmica inicial, de forma lenta y homogénea, evitando la aparición de fisuras, y en razón de obtener la mínima porosidad abierta.

El proceso de secado se efectúa normalmente a temperatura ligeramente superior a 100°C, en secadores tipo túnel de producción continua, por lo que la operación de secado se concatena dentro del proceso general de tratamiento térmico en régimen de recuperación de calor sensible. Los conductos del gas caliente se disponen bajo la solera del secadero y por tanto separados de la carga. Por la cámara de secado se hace circular aire seco, en contracorriente del material e impulsado mediante ventiladores a fin de evitar que se sature con el vapor del agua. La temperatura y humedad del aire se controlan a lo largo del secadero con objeto de regular la velocidad de secado de acuerdo con las características del proceso de eliminación del agua de la masa. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

3.10. Cocción.

La cocción es sin duda la etapa más delicada del proceso de fabricación ya que condiciona las propiedades más importantes y específicas del producto final. Los parámetros básicos de la cocción son la temperatura, el tiempo de tratamiento y la velocidad de calentamiento y enfriamiento.

La temperatura de cocción debe ser como mínimo igual a la de utilización del material, ya que de no ser así ciertos fenómenos que se operan durante su trascurso tendrán lugar en

el horno de forma incontrolada e indeseada. Tal es el caso, fundamentalmente, de la variación permanente de dimensiones de la pieza.

Los procesos que se desarrollan durante la cocción son complejos y dependen de cada material en particular. En general, se puede decir que la cocción da lugar a los siguientes efectos:

- Transformaciones cristalográficas o cambios de fase en estado sólido, con aparición de especies estables a elevada temperatura que deben mantenerse o hacerse reversibles en lo posible al enfriar el material, y recristalizaciones.
- Descomposición térmica de minerales hidratados (hidróxidos, agua de composición, etc.), carbonatos, sulfuros, materias orgánicas, etc.
- Sinterización de los granos cristalinos bien sea mediante formación de fases vítreas intercristalinas directas o procedentes de la matriz de aglomeración.

La descomposición térmica de los minerales y las transformaciones cristalográficas tienen lugar en su mayor parte durante el proceso de calentamiento. Como estos fenómenos llevan aparejados, o bien una pérdida de masa, o bien una variación de densidad en las fases cristalinas involucradas, dan lugar a contracciones o en su caso dilataciones permanentes que deben ser absorbidas lo más homogéneamente posible por el material, ello obliga, en la generalidad de los casos, a que el calentamiento sea progresivo y adecuado al comportamiento físico-químico de la materia.

La cocción es la operación más costosa del proceso de fabricación de refractarios y por ello es importante una alta eficiencia térmica del horno a utilizar. El horno túnel permite un alto grado de regeneración de calor y por ello se ha ido generalizando su uso en las modernas instalaciones de producción. Las temperaturas de cocción según (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) se clasifican en función de los grupos de materias primas más importantes como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Temperaturas de cocción de los grupos de materias primas más importantes.

Materias Primas	Temperatura de cocción
Ladrillos de chamota	1250 - 1500 °C
Ladrillos de sílice	1450 - 1500 °C
Ladrillos aluminosos	1500 - 1800 °C
Ladrillos de magnesia	1500 - 1800 °C

CAPITULO 4

4. APLICACIONES

Existen diversidad de usos para los materiales cerámicos refractarios, pero aun así se siguen haciendo estudios para la implementación de estos materiales en nuevas aplicaciones y para mejorarlos en las aplicaciones ya existentes.

Una de las principales funciones del refractario es la protección, por eso una de sus principales funciones es en hornos, como protección de la estructura metálica a altas temperaturas dentro del horno, protección de la estructura metálica de los gases en el horno (corrosión), de los materiales en el interior del horno (abrasión) y aislamiento del horno (ahorro de la energía térmica). (Norton, 1975)

Existen varios tipos de hornos de uso corriente, está por ejemplo los hornos periódicos fijos, estos antiguos hornos raramente sirven en la actualidad para la cerámica, debido al coste de la mano de obra necesario para colocar y retirar las piezas en un espacio limitado. Existe también los hornos con elevador, que suelen llamarse también hornos de campana, se emplean mucho en las instalaciones pequeñas, para producción regular y en instalaciones más grandes para productos especiales o series cortas en conjunción con los hornos de túnel. También están los hornos de puertas, se constituyen sobre cimentación permanente y cerrados por una puerta por uno de sus extremos. Las piezas se colocan en un carro que se introduce en el horno, en ciertos casos el horno de puerta se prolonga para que se acomode varios carros a la vez. El horno envolvente también es otro tipo, en el que las piezas se colocan en un hogar fijo abierto que después se cubre con el horno rodante. Otro de los hornos son los hornos rotativos, estos hornos se emplean en la industria para calcinar o sinterizar materiales granulados como el caolín.

Existen otro tipo de hornos que son los hornos de túnel, estos hornos precisan cuatro elementos esenciales: un suministro de calor controlado, medios de transferir el calor del suministro a las piezas, una base para colocar las piezas y un revestimiento refractario para confinar el calor. Un horno de túnel consiste en un túnel de sección bastante uniforme por donde pasa la cerámica en unas vagonetas o sobre un transportador de banda, de forma que cualquier pieza se someta sucesivamente a todo el programa de distribución de temperaturas a lo largo del horno. Aunque suelen ser rectos y horizontales, dichos hornos también pueden ser circulares. En muchos casos las piezas se exponen directamente a los gases de combustión y en otros se calientan por radiación y convección mediante mufla.

Los hornos de túnel con vía y mufla son otro de los tipos de horno que se emplea principalmente para cocción de vidrio en colocación abierta, los gases de combustión y el aire de enfriamiento circulan a contracorriente de las piezas, como en el horno de caldeo directo, pero están separadas del túnel principal por secciones de mufla. El gas circula pues, en sentido contrario al de las piezas, pero su control es más sencillo porque está confinado en unos conductores herméticos de forma que, con un ventilador de aspiración, se pueden lograr vacíos de varias pulgadas de columna de agua.

En los hornos es esencial un buen control de la temperatura para la producción de cerámica y los factores importantes son la constancia en el tiempo y la uniformidad en la sección. La medida y la regulación de la temperatura se basan en el empleo de termopares de metal base o platino dispuestos a lo largo del horno y conectados a indicadores o registradores que, a su vez, regulan el suministro de gas y de aire.

El control de la temperatura a lo largo del túnel se lleva a cabo de varias maneras. En los hornos de varios quemadores, la zona caliente se puede regular a voluntad, en el tramo de precalentamiento se puede incrementar la temperatura aumentando el caudal o por recirculación, en el horno de llama abierta, el enfriamiento se ajusta por variación del caudal de aire frío o por la cantidad de radiación. En los hornos de sección transversal pequeña, la uniformidad de temperatura suele ser aceptable, pero en hornos de gran sección, se debe conseguir la uniformidad por convección. En los hornos modernos y bien proyectados, aunque sean de gran sección, la desviación térmica es inferior a $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Es más difícil lograr esta uniformidad en la zona de precalentamiento, pero se consigue por convección forzada y recirculación. (Norton, 1975)

La capacidad de producción depende de la sección transversal y de la velocidad de paso de las piezas. La ventaja económica de una cocción rápida es grande porque reduce el espacio necesario en planta, el coste inicial del horno y del combustible por pieza cocida. En pocos casos se ha estudiado la manera de establecer un ciclo para la máxima rapidez de cocción y tampoco se ha investigado mucho sobre las pastas para cocción rápida. Las baldosas de pasta con talco se han llegado a cocer en una hora o menos. (Norton, 1975)

Los refractarios son materiales consumibles, tienen una vida útil, aún bajo condiciones óptimas de operación e instalación. Existen dos clases principales de materiales refractarios, productos aluminosos (ácidos) y productos básicos. Los productos ácidos poseen más alta refractabilidad y una baja resistencia contra los álcalis (los álcalis son óxidos hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles. De tacto jabonoso, pueden ser lo bastante corrosivos como para quemar la piel, al igual que los ácidos fuertes). Los productos básicos de alta pureza poseen una alta refractabilidad, baja resistencia a los choques térmicos y por tanto una alta fragilidad, una expansión térmica dos veces más alta que los productos ácidos, por lo tanto los productos básicos requieren normalmente un "elastificante" (amortiguador elástico entre los cristales de la matriz). Debido a estas propiedades los diferentes tipos de refractarios, sean ácidos o básicos tienen una aplicación específica en las diferentes

partes del horno, como por ejemplo, en la zona de precalentamiento se utilizan refractarios ácidos, en las zonas de transición y cocción se utilizan tanto refractarios ácidos como refractarios básicos. (Gross, 2007)

4.1. Partes Principales de los Hornos.

Todos los hornos se dividen de acuerdo a los fines con que fueron ideados y, por lo tanto tienen sus estructuras apropiadas para cada caso, tienen sin embargo, toda una serie de elementos constructivos comunes, aunque con diseños distintos.

La parte principal de cada horno es la zona de trabajo, donde se efectúa el proceso tecnológico prefijado. En la mayoría de los casos, dicha zona se separa del ambiente por la bóveda, las paredes y la solera, construidas de materiales refractarios y termoaislantes. En su base tienen los cimientos, construidos de materiales comunes. La mampostería refractaria de cada horno está unida por el esqueleto metálico o por un blindaje que la abarca en su totalidad.

Los hornos, donde la energía térmica es resultado de la ignición de un combustible, tienen los hogares para los sólidos o los mecheros o quemadores para el combustible. Muchas veces los hogares se suprimen, y la ignición de los combustibles se efectúa directamente en la zona de trabajo del horno. La eliminación de los productos de combustión a la atmósfera se hace por la chimenea, a través de canales adecuados.

Muchos hornos tienen también instalaciones de intercambio o aprovechamiento del calor de los gases de escape, llamadas los regeneradores y los recuperadores. Para regular las corrientes de los gases tanto en los hornos como en los conductos se utilizan las válvulas, las aletas y otros cierres.

4.1.1. Cimientos.

Los cimientos son la parte del horno que se apoya directamente en el suelo reconocido como apto para ese fin y que sostienen todas las demás partes del horno. Por supuesto, lo único que se requiere de los cimientos es su absoluta solidez como para aguantar toda la carga estática de las partes del horno dispuestas encima, así como eventualmente las posibles cargas dinámicas, sin sufrir deterioro alguno. Los cimientos deben tener dimensiones suficientes, como para que la presión contra el suelo no pase los valores admisibles.

4.1.2. Plataforma.

La plataforma es el plano inmediatamente superior a los cimientos del horno y el inferior de la mampostería. Para su construcción se emplean distintos materiales: ladrillos refractarios y termoaislantes. El tipo de construcción y el espesor de la plataforma se dictan por la estructura del horno. Su fin principal es dar una superficie sobre la cual pueden ser dispuestas todas las partes inferiores del horno.

4.1.3. Solera.

Solera es la parte del horno sobre la cual se dispone el metal fundido o los materiales a calentarse. Como soporta la carga del material debe ser suficientemente sólida, impermeable para el metal líquido, material vítreo y escorias, y químicamente estable respecto a estas últimas. En la mayoría de los casos tiene una forma de bañera bajo los hornos de reverbero o los eléctricos de fundición.

La solera debe ser capaz de soportar:

- El impacto mecánico a la caída de la chatarra.
- La erosión por el acero fundido.
- La penetración del acero y otros metales de bajo punto de fusión.
- La hidratación posible entre campañas.

4.1.4. Paredes.

Las paredes rodean la zona de trabajo del horno. Generalmente ellas mantienen la bóveda. Deben proteger la zona de las pérdidas de calor, no permitir el escape de los gases de hogar ni succión del aire de la atmósfera hacia el interior del horno. La cara más importante de las paredes es la interior. Debe ser pareja, limpia, tener juntas delgadas. Se hacen con ladrillos enteros y sanos tanto de sus caras, como de aristas y ángulos.

Los refractarios de la pared a la altura de la línea de escorias deben eliminar o reducir la penetración de la escoria y ser compatibles con ella.

Por su parte, el refractario de la parte superior de las paredes debe soportar:

- El ataque de los humos con FeO

- Las salpicaduras de escoria al utilizar las lanzas de O₂ y por el arco
- Choque térmico por las fuertes fluctuaciones de temperatura desde el baño fundido a la carga de chatarra fría (posibilidad de desconchado, si no tiene resistencia al choque térmico).

4.1.5. Bóveda.

La bóveda es una de las partes más importantes del horno. Generalmente soporta temperaturas muy altas y se calienta mucho. Como los gases calientes en la parte superior de la zona de trabajo se encuentran bajo una presión superior a la normal, la bóveda debe ser impermeable para con los mismos.

Los refractarios de la bóveda deben ser capaz de soportar:

- El ataque de los humos con FeO, CO, etc.
- La radiación térmica del arco, cuando no está sumergido en la escoria espumosa.
- El choque térmico por fuertes variaciones de temperatura y en ocasiones, impacto mecánico.

Existen cuatro tipos de bóvedas:

1. Planas, de ladrillos de grandes dimensiones
2. De arco
3. Semicirculares
4. Suspendidas

Las bóvedas se hacen con ladrillos acuñaados. Hay dos modos de construirla: la mampostería con trabazón y la anular, la ventaja del primer método está en la mayor densidad de la obra; en cambio, se dificulta la expansión de los ladrillos, porque se encuentran firmemente ligados entre sí. Por eso en la bóveda de este tipo las grietas y los desplazamientos pueden extenderse mucho.

El sistema anular proporciona una bóveda de menor densidad. Entre los anillos se forman grietas, a través de las cuales los gases se abren camino con relativa facilidad. En cambio, se facilita la reparación, porque, generalmente, suelen caer ladrillos enteros y los huecos formados tienen la forma rectangular. Las bóvedas de este tipo son más frecuentes.

Existen otro tipo de bóvedas, que son las bóvedas suspendidas. Estas bóvedas se construyen con ladrillos perfilados que se fijan en las estructuras metálicas suspendidas en estribos especiales. El uso de las bóvedas suspendidas permite disminuir el consumo de calor para calentar la mampostería, porque, primero el volumen de la misma es menor y, segundo, es posible el empleo de materiales refractarios más livianos. Sus inconvenientes están en la construcción más complicada que la de otras bóvedas.

4.1.6. Canales.

Los canales sirven para conducir los gases hasta la chimenea y suelen ser de sección rectangular y de techo plano o abovedado. El área de la sección se calcula a partir de la velocidad media admisible del movimiento de gases que ingresan en el canal que se toma 1-2 m/s y de la cantidad de gases que entran por segundo.

4.1.7. Juntas Térmicas.

Las juntas térmicas deben compensar la dilatación volumétrica de la mampostería por el calor. Asegurando la integridad de la mampostería, las juntas a la vez no deben rebajar la solidez de la misma y ser causa de escapes de gases, de metales o escorias. El ancho y la disposición de las juntas se determinan en concordancia con el calentamiento de una parte dada del horno y de los coeficientes de dilatación de los materiales por el calor.

4.1.8. Esqueleto Metálico.

Se llama esqueleto la estructura metálica que sujeta todas las partes del horno y absorbe los esfuerzos que se originan en la mampostería tanto durante su ejercicio, como posteriormente en los procesos de su trabajo. El esqueleto transmite estos esfuerzos a los cimientos. Las partes del esqueleto se aprovechan también para montar sobre ellas los accesorios del horno, como: marcos, tapas, puertas, ventanas, mecheros, toberas, etc.

Cuando se calienta el horno, los tensores deben aflojarse, para que el calor no haga que la bóveda se hinche hacia arriba por dilatación. Para ello se aflojan las tuercas de los tensores en un mismo grado en cada viga. Una vez se alcanza la temperatura máxima, los tensores quedan invariables por apretarse las contratueras.

4.1.9. Ventanas de Trabajo.

Para cargar y descargar los materiales y objetos, para vigilar el proceso a que se someten y para arreglarlo, en las paredes del horno se practican diversas aberturas, llamadas ventanas de trabajo. Las aberturas se cierran por sus correspondientes puertas a bisagra o a guillotina. (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez)

4.2. Tipos de Hornos.

4.2.1. Horno Alto.

En los altos hornos se llama tragante a la zona por donde se cargan las materias primas. Se llama cuba al cono truncado superior. Vientre es la parte más ancha, donde se empalman los conos superior e inferior. Etalaje es el tronco de cono inferior. Crisol es la parte cilíndrica inferior donde se reúnen escoria y arrabio para separarse por densidad.

En la zona del tragante, la principal sollicitación es la abrasión mecánica. La silimanita es lo más conveniente para ello. En el tragante y la parte superior de la cuba, se produce la siguiente reacción (a temperaturas de 500° C): $2CO \rightarrow CO_2 + C$

El carbono se deposita en los poros del ladrillo, se va acumulando y provoca tensiones que agrietan el mismo. Para esta zona se utilizan ladrillos sílicoaluminosos de 45% Al_2O_3 , con una porosidad de 18 a 20%.

En la parte inferior de la cuba, vientre y etalaje las sollicitaciones principales son:

- Abrasión y corrosión por parte de la escoria y arrabio líquido.
- Corrosión por álcalis (Na_2O y K_2O)
- Erosión por los gases.

El ataque del álcalis es uno de los efectos más perjudiciales, pues ataca al refractario formando compuestos diversos, en general de baja refractariedad. Entran en el Alto Horno como silicatos complejos, en la ganga del mineral y en las cenizas del coque. Penetran en los poros de los ladrillos como vapores, que se condensan dentro de los mismos provocando la corrosión del ladrillo. En esta zona se utilizan ladrillos de alta alúmina (90% Al_2O_3), con muy baja porosidad (11 a 15%). La tendencia actual es utilizar ladrillos de carburo de silicio, muy resistentes a los vapores alcalinos, sumado al hecho de tener muy buena conductividad térmica. El problema es que se degrada frente a los vapores de H_2O , teniendo en cuenta que se utilizan en la zona de refrigeración. La zona de toberas está sometida a choque térmico. Para ello lo más conveniente son ladrillos de silimanita.

En el crisol las sollicitaciones son:

- Corrosión por escoria.

- Erosión por escoria y arrabio líquido.
- Variación dimensional generada por tensiones térmicas y mecánicas.

Los bloques de carbono son los más adecuados para esta zona, ya que poseen baja humectabilidad frente a los líquidos, baja permeabilidad, gran estabilidad volumétrica y alta conductividad térmica. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

La ilustración 1 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra un ejemplo de un horno alto.



Ilustración 1. Horno alto (horno vertical o de cuba)

4.2.2. Horno Eléctrico.

Los hornos eléctricos pueden ser de 3 tipos:

Hornos de resistencia
Hornos de inducción
Hornos de arco eléctrico

Para la fabricación de aceros, el horno de arco eléctrico es el tipo más utilizado; le siguen los hornos de inducción. Los hornos de resistencia no se utilizan debido a las altas temperaturas involucradas pero sí para el calentamiento de otros metales

El revestimiento de seguridad de la solera, está constituido por varias filas de ladrillos de magnesita cocida (95% de OMg). El revestimiento de trabajo de la solera, ésta formada por una masa apisonada de óxido de magnesio (más de 95% de OMg), enérgicamente compactada en varias capas con un vibrador.

La solera se encuentra sometida a las siguientes sollicitaciones: Impacto de chatarra, erosión del acero líquido y ataque de la escoria durante el basculamiento del horno.

Para que la solera recién constituida no sea dañada durante el primer cargamento, es necesario tomar los siguientes recaudos:

- Cubrir toda la extensión de la solera con chapas finas.
- Evitar la chatarra pesada en la primera carga.

Durante las cargas subsiguientes siempre se deja un resto líquido, para que sirva de amortiguante de las cargas posteriores. En las paredes laterales el ataque de la escoria sigue siendo el responsable del desgaste de los refractarios, aunque en menor medida que la pared lateral inferior. También es atacado por los humos provenientes de la aceración, cuyo principal agente de corrosión es el FeO que transportan. La pérdida de material refractario se debe a rajaduras originadas por el spalling (desprendimiento), por las cuales se introduce la escoria y los humos ocasionando su degradación.

El refractario entonces deberá tener baja porosidad y resistencia al choque térmico. Por eso las paredes se conforman con ladrillos de magnesita ligada en alquitrán. La bóveda de un horno eléctrico tiene forma de cúpula y contiene electrodos, para la salida de humos y en algunos casos, para la carga continua de materias primas. La existencia de estas aberturas debilita la bóveda.

La bóveda está sometida a: Temperaturas elevadas causada por la radiación del arco, ataques químicos por parte de la escoria y por los humos y por las tensiones termo mecánicas que ocasiona un enfriamiento repentino, que ocurre cuando se desplaza la bóveda para la carga, seguida de un calentamiento rápido. Las bóvedas de los hornos generalmente están conformadas con ladrillos de 70 -85% de Al₂O₃ y en el centro de la bóveda se utiliza un hormigón de 90% de Al₂O₃ con liga fosfórica.

Una nueva tendencia es la de utilizar ladrillos de magnesita-carbón. Su resistencia a la corrosión y erosión es muy buena, sumada a su gran resistencia al shock eléctrico.

Debido a que su conductividad térmica es alta, su vida se puede incrementar, mediante un enfriamiento intenso desde el exterior con paneles refrigerados por agua, para reducir la temperatura de la superficie en servicio. (Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires, 2008)

La ilustración 2 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra un ejemplo de un horno eléctrico de arco.

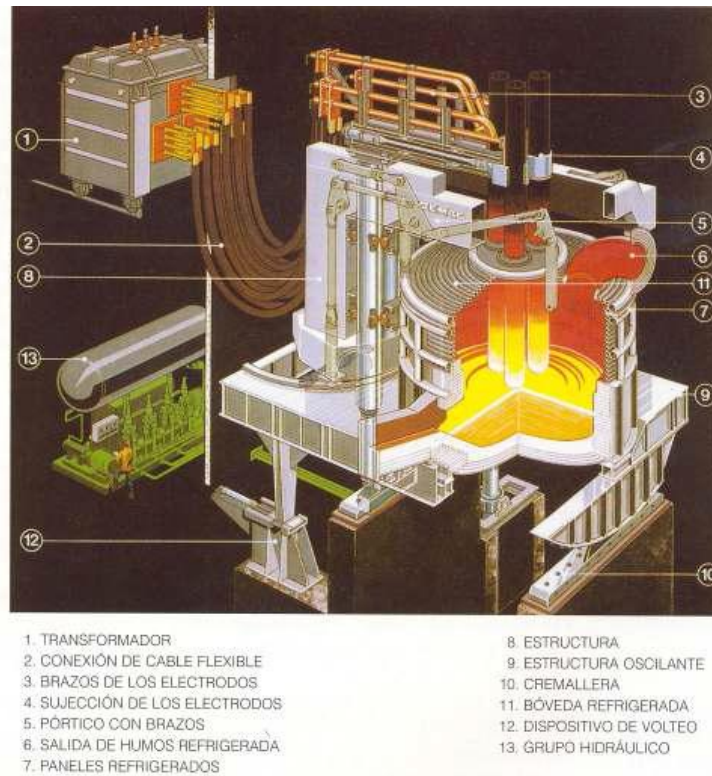


Ilustración 2. Horno eléctrico de arco

4.2.3. Horno Rotatorio.

Los hornos rotatorios usados para la fabricación de Clinker para cemento, se dividen principalmente en tres zonas, zona fría, zona intermedia y zona caliente. Cada una de las zonas del horno están expuestas a diferentes condiciones de operación, por esta razón los ladrillos refractarios utilizados son diferentes en cada zona.

- Zona fría: En esta zona del horno rotatorio, los ladrillos refractarios deben soportar diversas condiciones de servicio, de las cuales la acción abrasiva de la carga es la más severa. El impacto mecánico por la carga alimentada, así como también el ataque por álcalis son otras de las condiciones de operación presentes en esta zona.

De acuerdo con esto, en esta zona se requiere un revestimiento refractario formado con ladrillos refractarios densos que puedan soportar la acción abrasiva de la carga. Normalmente en esta zona se colocan bloques de 15 cm en forma de ladrillos de arcilla refractaria densa.

- Zona intermedia: Los ladrillos utilizados en esta zona están expuestos a diferentes condiciones de operación, como son ataque químico por los álcalis, desgaste por abrasión, choque térmico, entre otras. Normalmente en esta zona se emplean ladrillos refractarios de alta alúmina (70% Al_2O_3).

- Zona caliente o básica: Debido a que en esta sección del horno rotatorio se presentan las temperaturas más elevadas, esta zona presenta las condiciones de operación más severas. Solamente los refractarios básicos pueden soportar las elevadas temperaturas en esta zona, además de ser estables ante las reacciones químicas con las fases del Clinker para cemento.

La zona básica puede ser subdividida en tres áreas; zona de quemado o de sinterización, zona de transición baja y zona de transición alta. Debido a que las condiciones de operación varían de una sub-zona a otra en la zona básica, se requieren diferentes ladrillos refractarios básicos.

Zona de transición alta: En esta zona, los ladrillos refractarios de magnesia – espinela ($MgAl_2O_4$) y de magnesia con adiciones de circonia han sido utilizados satisfactoriamente, aunque también se utilizan ladrillos de alta alúmina (60 – 70% Al_2O_3).

Los ladrillos de magnesia – espinela ($MgAl_2O_4$) son utilizados en esta zona debido a que no facilitan la formación de un recubrimiento inestable, mientras que los ladrillos de magnesia – circonia se emplean en esta zona debido a su excelente resistencia al choque térmico y a la corrosión por álcalis.

Zona de quemado: La función principal del revestimiento refractario en la zona de quemado es permitir la formación de un recubrimiento estable a partir de la materia prima del Clinker para cemento sobre el ladrillo refractario, el cual protege contra el desgaste al mismo ladrillo, además de favorecer la reducción de las pérdidas de calor a través de la carcasa del horno, especialmente en esta zona. Por esta razón, los ladrillos refractarios básicos capaces de retener un recubrimiento son los más efectivos en la zona de quemado.

Los ladrillos refractarios de dolomita (CaCO_3 , MgCO_3), dolomita con adiciones de circonia, magnesia – dolomita con adiciones de circonia, magnesia – espinela (MgAl_2O_4) y magnesia – circonia, son normalmente utilizados en la zona de quemado.

Los ladrillos de dolomita - circonia (alrededor de 2% en peso de ZrO_2) retienen todas las características de los ladrillos de dolomita, pero se incrementa la resistencia al descascaramiento. La adición de circonia de alta pureza crea micro grietas en la microestructura del ladrillo, las cuales absorben o interrumpen la propagación de las grietas a través del ladrillo.

Los ladrillos de magnesia – circonia (1-5% en peso de ZrO_2) se emplean en esta zona debido a que tienen una elevada resistencia en contra de los silicatos de calcio del Clinker para cemento, además de que presentan una elevada resistencia al choque térmico.

Zona de transición baja: En esta zona del horno rotatorio se utilizan los ladrillos refractarios de magnesia – espinela (MgAl_2O_4), magnesia – dolomita – circonia, entre otros.

Los ladrillos de magnesia – espinela (MgAl_2O_4) son los más utilizados en esta zona, así como en la de transición alta, mientras que los ladrillos de magnesia – dolomita – circonia se comienzan a utilizar, debido a que son una atractiva alternativa de costo y funcionamiento en contra de los ladrillos de magnesia – espinela (MgAl_2O_4). (CDIGITAL)

La ilustración 3 obtenida en (Blanco Alvarez, Web de Francisco Blanco Alvarez) muestra un ejemplo de un horno rotatorio de cemento.

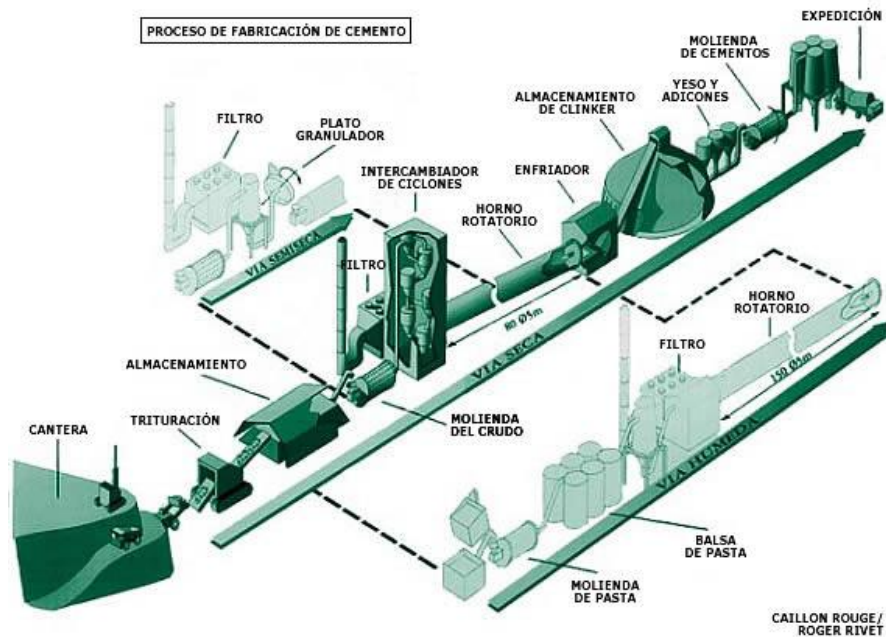


Ilustración 3. Horno rotatorio de cemento

La tabla 8 obtenida en (Itescam) muestra los principales sectores de aplicación de los ladrillos refractarios, las temperaturas de proceso y el tipo o tipos de refractarios utilizados.

Tabla 8. Refractarios empleados en procesos industriales.

Sector	Instalación	Temperatura Proceso (°C)	Refractarios
Industria petroquímica	Cracking	900 - 1200	Monolíticos, aislantes
	Hornos	1650	Ladrillos: Silimanita, mullita
Química	Hornos negro de humo	1600	Ladrillos: Corindón, aislantes.
	Carbón activo	1400	Monolíticos sin hierro
	Reactores obtención fosforo	1550	Ladrillos monolíticos de carbono, sin hierro a base de Al ₂ O ₃ con SiC
Acería	Hornos de coque preparación materias primas	900 - 1200	Ladrillos: silicios silicoaluminoso monolíticos
	Horno alto	1700	Ladrillos carbono, semi grafito, SiC, mullíticos, silicoaluminosos alta calidad.
	Estufas	1800	Ladrillos: silicoaluminosos, sílice, magnesita
	Cucharas torpedo	1500	Ladrillos: silimanita, silicoaluminosos alta calidad.
	Convertidores	1600 - 1700	Ladrillos básicos (magnesita, dolomita MgO-C)
	Cucharas transporte acero	1600	Monolíticos y ladrillos síliceos, dolomita, bauxita.
	Horno tratamiento térmico	900 - 1100	Monolíticos, ladrillos, mullita, corindón.
Fundición	Cúpula	1100 - 1400	Monolíticos: silicios, silicoaluminosos.
	Horno inducción	1400	Monolíticos: silicios, silicoaluminosos.

Continuación tabla 8.

Aluminio	Hornos fusión	900	Ladrillos: bauxitas, silicoaluminosos alta calidad, monolíticos.
Plomo	Hornos cubilote rotatorio	1100	Ladrillos: magnesíticos, cromo-magnesia
	Hornos de re fusión	330	monolíticos
Cobre	Horno cubilote, convertidores	1250	Refractarios silicoaluminosos
	Horno de arco, horno de re fusión	1100	monolíticos
Zinc	Hornos rotatorios	1100	Ladrillos magnesíticos
	Celdas de galvanizado	420	monolíticos
Cemento	Hornos rotatorios	800 - 1600	Ladrillos: silicoaluminosos, mullítico, magnesita, monolíticos, sin hierro, resistentes a la abrasión.
	Pre calentadores	800 - 1100	Monolíticos: resistentes a la abrasión.
Cerámica	Horno túnel	900 - 1800	Ladrillos: silicoaluminosos, mullíticos, corindón, silíceos.
	Hornos arrastre	900 - 1800	Ladrillos: silicoaluminosos, mullítico, corindón.
	Hornos multicanal	800 - 1100	Ladrillos: silicoaluminosos, mullíticos, monolíticos.
	Preparación fritas - esmaltes: Hornos rotatorios cubilote	800 - 1800	Ladrillos: silicoaluminosos, corindón, magnesita.
Vidrio y fibras de vidrio	Hornos rodillos	1400 - 1700	Piezas alta alúmina
	Horno fusión	1650	Ladrillos silíceos: alúmina, circonia electro fundida, silicoaluminosos.
Esmaltes y fritas	Horno fusión	1550	Ladrillos: mullítico, silimanita, monolíticos.

Así como son más las investigaciones cada día en materiales refractarios, así también son las aplicaciones, en donde se viene usando cerámicos ultra refractarios como absorbedores solares de alta temperatura. Es bien conocido que la eficacia

termodinámica de las plantas solares incrementa la temperatura de trabajo. En la actualidad el principal límite a la ampliación de la temperatura es la capacidad del absorbedor para soportar altas temperaturas. El absorbedor solar ideal trabaja a altas temperaturas, tiene una baja emisividad térmica y una alta capacidad de absorción en el intervalo del espectro solar. En (Sani, Mercatelli, Francini, Sans, & Sciti, 2011) se informa sobre la caracterización de la emisividad a alta temperatura de muestras cerámicas de carburo de circonio. La investigación se ha realizado a muestras de diferentes composiciones químicas.

La tecnología solar es segura, sostenible y un rentable suministro de energía. La máxima temperatura de operación de una planta de energía solar está restringida a menos de 900°K, porque por encima de esta temperatura los componentes se degradan rápidamente. Los materiales absorbedores comerciales son con muy pocas excepciones, capaces de operar a temperaturas de hasta 800°K. Sin embargo la eficiencia de la energía solar en las centrales térmicas incrementa rápidamente con el incremento de la temperatura de trabajo, por tanto, es necesario mejorar la estabilidad a altas temperaturas, especialmente del receptor.

El carburo de circonio es un metal de transición refractario de los grupos 4-6 de la tabla periódica. Su más importante propiedad es su alto punto de fusión (~3420°C), alta dureza (~25.5GPa), alta conductividad eléctrica ($78 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$) y su alto módulo de elasticidad (~440MPa). Este compuesto es adecuado para muchas aplicaciones tales como emisores de campo, revestimiento de partículas de combustibles nucleares y ambientes de ultra alta temperatura. Recientemente se ha encontrado que la transición más refractaria de los carburos metálicos también tiene la característica de ser materiales selectivos solares intrínsecos, sin embargo muy poco se sabe sobre las propiedades ópticas de estos materiales, especialmente a altas temperaturas.

En (Sani, Mercatelli, Francini, Sans, & Sciti, 2011) se reporta la caracterización de la emisividad en alta temperatura de dos muestras de carburo de circonio, con el fin de evaluar su rendimiento en términos de su potencial, en uso como absorbedores en plantas de energía solar. Los materiales a investigar fueron una muestra pura de carburo de circonio (ZC), y una muestra de carburo de circonio con 10% de MoSi₂ (siliciuro de molibdeno, un compuesto intermetálico, es un refractario de cerámica con uso principal en los elementos de calefacción) como ayuda para la sinterización. Esta se ha comparado con una muestra de carburo de silicio (SiC) con óxido de aluminio y óxido de itrio como auxiliares de sinterización. Las muestras cerámicas fueron preparadas a partir de polvos comerciales. La morfología de la superficie de los materiales sinterizados fue analizada por microscopía electrónica de barrido y por espectroscopia de dispersión de energía de rayos X. (Sani, Mercatelli, Francini, Sans, & Sciti, 2011)

CAPITULO 5

5. INVESTIGACIÓN

Hasta hace relativamente poco, las arcillas y las pastas se trabajaban en estado plástico a mano o pisando el material. Este proceso se ayudaba con largos periodos de envejecimiento. Las fuentes de energía se empleaban hasta cierto punto. El vapor no se empleó hasta finales de la década de 1880, cuando se utilizaron las máquinas de vapor para moldear la porcelana de huesos, para las máquinas de amasar en la industria de la porcelana dura y en los molinos o propulsores helicoidales para preparar la loza. Otro adelanto fue el horno de barbotina calentado por combustibles en lugar de la exposición al sol para deshidratar las barbotinas. La prensa de filtro es muy reciente como máquina universal para esta aplicación. Durante los 75 años siguientes hubo pocos cambios en la maquinaria y en los métodos, hasta la introducción del expulsor de vacío. La evacuación del aire incluido en el material por tratamiento de vacío, fue una de las pocas ideas realmente originales en el arte de la cerámica.

En cuanto a la cocción, la cerámica primitiva se cocía de una manera muy sencilla, se apilaba en el suelo y se rodeaba con una hoguera. El siguiente paso fue el horno de paredes bajas para confinar el calor. Un horno, tal como hoy se entiende, no se pudo construir hasta que no se conocieron los principios de la bóveda de ladrillo. Uno de los avances más notables en cuanto a hornos fue el de cámara larga, se trata de un horno de recuperación que funcionaba con la mitad de combustible que el de cámara simple.

En cuanto a la medición de la temperatura, representó un gran avance en la cocción el cálculo de la temperatura por la contracción de la arcilla, descubrimiento atribuido a Josiah Wedgwood en 1740. El cono pirométrico inventado por Seger en 1886 resultó aún más útil. Hacia 1890, sobre todo debido a la investigación de Le Chatelier en Francia, se convirtieron en instrumentos normales el termopar de platino y el pirómetro óptico. (Norton, 1975)

Las aplicaciones de los materiales cerámicos refractarios se hacen mayores con el crecimiento de la tecnología, debido a que cada vez las aplicaciones se hacen más extensas y se quiere mejorar las ya existentes para llegar a un nuevo nivel; esto implica que cada vez los materiales y las técnicas de fabricación deben estar en constante mejoramiento para obtener procesos más rápidos y eficientes y crear materiales mucho más resistentes, con mayores prestaciones, con mayor durabilidad y que también sea posible crearlos a partir de procesos amigables con el ambiente y que sean más

económicos. Por esta razón se investiga exhaustivamente las materias primas y su mezcla con otros materiales para obtener combinaciones que puedan potencializar sus propiedades, se ha hecho mucho énfasis en la combinación con materiales residuales de otros procesos o con materiales que a través de procesamientos puedan dar un rendimiento igual o parecido a materiales que resultan muy difíciles de obtener y por ende resulta más costosos el producto final.

Muchas aplicaciones de los materiales cerámicos refractarios como es la industria aeroespacial continúan esforzándose por una mayor eficiencia y mejor funcionamiento de estos materiales, el incremento de la demanda de materiales refractarios de alta fuerza y resistencia que puedan obtenerse en forma de fibra reforzada continua emergen como lo más prometedor para esta demanda, muchos materiales refractarios muy atractivos no están en forma de fibra continua. Según (Parthasarathy, Kerans, Chellapilla, & Roy, 2006) la próxima generación de vehículos aeroespaciales volarán por encima de números mach de 8, a estas velocidades se espera que alcancen temperaturas que excedan la capacidad de los compuestos carbono-carbono. Los cerámicos de ultra alta temperatura tienen puntos de fusión muy alto, del orden de los 3000°C, presentan alta resistencia termoquímica y a la erosión, debido a los altos puntos de fusión son más difíciles de procesar que los cerámicos convencionales, debido al gran interés por estos materiales y a la no disponibilidad en forma de fibras de alta resistencia, se han convertido en materiales de investigación.

Dentro de la investigación a cerámicos refractarios, también se da lugar al estudio de fracturas y otro tipo de defectos presentes en los cerámicos refractarios para poderlos evitar y así mejorar las propiedades de estos. Se han estudiado nuevos procedimientos para hacer pruebas de erosión que consisten en el comportamiento que tiene el material frente a este tipo de ataques, prueba que es realizada bajo ciertas condiciones de temperatura, el material removido por la erosión hasta que llega a un estado de equilibrio es analizado a través del tamaño máximo de grano y así determinar la erosión necesaria para que el material llegue a su punto de equilibrio y observar su comportamiento, el objetivo de las pruebas planteadas en (Engman, 1995) es reducir el tiempo de erosión a altas temperaturas. Para controlar el ensayo, este fue realizado a tres muestras diferentes del mismo material para analizar su reproducibilidad. (Engman, 1995)

Se llevan a cabo estudios de como las tensiones residuales influyen en la resistencia a la tensión térmica. Las tensiones residuales son formadas a través del calentamiento de muestras a diferentes rangos, entre 1600 y 2300°K, la cinética de formación y distribución de la tensión residual depende de la temperatura de exposición. La formación de tensiones residuales es posible en productos de materiales cerámicos refractarios en campos de temperaturas elevadas y no uniformes, las tensiones residuales aparecen en los elementos de calefacción, revestimientos de cerámica de naves espaciales, hornos metalúrgicos, etc. Las tensiones residuales pueden causar una influencia esencial en la capacidad y duración de la vida de operación. La investigación de condiciones de origen

de la tensión residual se lleva a cabo utilizando varios métodos permitiendo así una amplia variación del nivel de tensión residual y métodos para su medición. El problema esencial de los estudios realizados en (Lanin & Deryavko, 1999) es determinar la influencia de la tensión residual sobre la resistencia al estrés térmico y comportamiento a la fractura de la cerámica. (Lanin & Deryavko, 1999)

Otro de los estudios que se han realizado es la influencia de la aparición de daño térmico a escala micro estructural en el comportamiento termomecánico de los refractarios. Debido a la gran cantidad de aplicaciones los materiales refractarios se utilizan en muchas áreas de la industria, estos materiales proveen resistencia a alta temperatura a partes específicas necesarias para muchas instalaciones industriales, si son bien seleccionados, de acuerdo con la aplicación deseada, los materiales refractarios pueden asegurar mayor resistencia contra la corrosión de los mecanismos y las cargas mecánicas externas, sin embargo en aplicaciones especiales de choque térmico, que implica altas tensiones térmicas locales no es suficiente las especificaciones anteriores para seleccionar el material refractario más apropiado.

El estudio de la resistencia al choque térmico de los materiales refractarios es una cuestión que se viene estudiando hace décadas, a causa de muchos aspectos es muy difícil predecir el comportamiento térmico y mecánico de los materiales refractarios a una escala macroscópica, sin embargo es bien sabido que la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre las fases induce un desgaste que es principalmente responsable de la presencia de micro fisuras y desligantes en la microestructura de varios refractarios.

Un estudio más específico es realizado al compuesto magnesia-espinela, materiales con falta de coincidencia en la expansión térmica entre fases, induciendo micro fisuras radiales dentro de la matriz de magnesia. La primera parte del estudio consiste principalmente en destacar y cuantificar el daño térmico en los diferentes composites. La segunda parte se centra en la caracterización a alta temperatura de los mecanismos responsables de este daño térmico, esta caracterización se lleva a cabo desde temperatura ambiente hasta altas temperaturas, a través de una serie de pruebas experimentales. Por último se estudia la influencia de estos daños térmicos en el comportamiento no lineal del material. Todos estos estudios mencionados en (Grasset-Bourdel, y otros, 2011) son desarrollados con el fin de mejorar el comportamiento y el funcionamiento de los materiales refractarios en las aplicaciones que han ido surgiendo durante los últimos años.

El comportamiento de las fracturas de los materiales cerámicos refractarios también se ha estudiado. En muchos casos de estrés mecánico y térmico, los refractarios muestran una fragilidad reducida correspondiente con un pronunciado comportamiento no lineal del material. Una caracterización de la fractura mecánica es basada en una prueba que permite la propagación de grietas estables para muestras suficientemente grandes, con el fin de identificar el micro proceso responsable del comportamiento no lineal, una técnica para la preparación de las muestras ha sido desarrollada, que permite la investigación

microscópica antes y después de la propagación de las grietas. Especialmente para los ladrillos cocidos de magnesia la influencia de la unión de la cerámica entre el grano y la matriz fue reconocido en (Harmuth, Rieder, Krobath, & Tschegg, 1996); la reducción de la resistencia de unión provoca una disminución de la energía para la iniciación de la grieta y al mismo tiempo la deflexión de ésta, generada por los granos junto con efectos no lineales en el proceso como la fricción, ayudan a evitar una disminución en la energía de fractura para la propagación de ellas. Aparte de parámetros de mezcla y tecnología de producción, la unión del ladrillo puede ser influenciada por componentes de la estructura los cuales muestran diferentes expansiones térmicas comparadas con la de la magnesia. Así durante el proceso de cocción las micro grietas pueden ser inducidas dentro de la matriz y el límite de grano. La estructura de la matriz de grano grueso de materiales cerámicos refractarios ofrece oportunidades especiales para mejorar el rendimiento mediante el aumento de procesos no lineales durante la propagación de la grieta. (Harmuth, Rieder, Krobath, & Tschegg, 1996)

Pruebas de corrosión también han sido investigadas para observar el comportamiento de ciertos materiales refractarios de aluminosilicatos. El estudio a un ladrillo refractario de composición en gran medida de andalucita y silimanita fue comparado con otro ladrillo refractario de composición de mullita y silimanita, ambos hechos por diferentes fabricantes para el uso en diferentes hornos de Frita (Material vítreo obtenido a partir de la fusión a altas temperaturas (+1500°C) y un enfriamiento rápido de una combinación de sustancias inorgánicas). La industria de la frita usa los ensayos de corrosión para productos comerciales usados en la pared como los azulejos. Las pruebas de corrosión llevadas a cabo en condiciones isotérmicas proporcionan datos cuantitativos y reproducibles sobre el comportamiento de la corrosión en refractarios.

En el estudio hecho en (Balikoglu & Akkurt, 2009) las pruebas se realizaron por inmersión de 15mm x 15mm x 115mm del espécimen refractario en una fundición de Frita a temperaturas entre 1404 y 1504 °C. De acuerdo a los estudios realizados, la temperatura y la duración de la prueba fueron los efectos más importantes, incrementando la temperatura y la duración de la exposición, condujo a un incremento de la corrosión, medida por la pérdida de área de sección transversal de la muestra refractaria corroída. Un análisis postmortem microestructural se le hizo a las muestras, donde se encontró precipitaciones de cristales de mullita y alúmina. Como fueron identificados por el análisis, los cristales de mullita tenían forma de aguja en su morfología, mientras que los cristales de alúmina eran generalmente cúbicos. Adicionalmente, los experimentos se realizaron por rotación de especímenes a 50 rpm. Debido a la reducción de espesor de la capa límite, la corrosión fue más pronunciada en la fase de unión que a través del relleno de granos grandes de mullita y andalucita. (Balikoglu & Akkurt, 2009)

También se han desarrollado técnicas para la evaluación de la permeabilidad del aire de cerámicos refractarios densos. El desarrollo de la alta calidad de los materiales cerámicos depende de la evaluación fiable de sus propiedades estructurales, mecánicas, térmicas y

dinámica de fluidos. Sin embargo, particularmente en el caso de materiales densos, la evaluación experimental de los parámetros de permeabilidad del aire implica mucho trabajo y mediciones fiables de alta precisión y los valores de caudal a una tasa extremadamente baja. El objetivo del estudio realizado en (Innocentini, Rizzi Jr., Nascimento, & Pandolfelli, 2003) fue optimizar la rutina analítica de una nueva y prometedora técnica, cuyas principales ventajas son su fácil operación y la adquisición de datos electrónicamente. Las pruebas llevadas a cabo en un alto contenido de alúmina mostraron que las constantes de permeabilidad K1 y K2, tienen fiabilidad solo cuando el conjunto de datos original es obtenido en intervalos de presión de 0.2 bar. También se observó que cuanto más amplio es el rango de caída de presión utilizado para fines de ajuste, más fiable será el resultado de los valores de K1 y K2, a pesar de la permeabilidad constante obtenida por diferentes técnicas, se compararon mejor en similares rangos de caída de presión. (Innocentini, Rizzi Jr., Nascimento, & Pandolfelli, 2003)

Otro tipo de investigaciones se han llevado a cabo en el ámbito del cuidado del ambiente como lo es el reciclado de residuos de lavado de carbón para la fabricación de arcilla base de ladrillos cerámicos refractarios. Residuos de carbón lavado se reciclan para la producción de ladrillos cerámicos mediante la mezcla con una cantidad igual de arcilla. La mezcla puede ser almacenada y extruida por medios convencionales. Después de la extrusión y corte, los elementos se secan en un secador y se cuecen en un horno. Los productos producidos de este modo son indistinguibles de los productos convencionales, excepto que sus propiedades de aislamiento son mejoradas. (Sidrak, 2002)

Otros estudios de los materiales cerámicos refractarios también se han hecho en el campo de la medicina, como lo es la evaluación de riesgo de cáncer por las fibras de cerámica refractaria, analizadas desde el límite de exposición profesional. Las fibras de cerámica refractaria (FCR) se utiliza en el aislamiento térmico donde la temperatura sea superior a 350°C, los materiales de asbesto son comúnmente utilizados para estos propósitos. Las fibras de cerámicas refractarias se clasifican como cancerígenos clase 2 por la IARC. Se han revisado los datos que clasifican las fibras cerámicas refractarias y la información sobre los efectos potenciales para la salud obtenidos experimentalmente y los estudios epidemiológicos.

En la inhalación crónica de los estudios en animales, la exposición a las fibras cerámicas refractarias, producen un aumento en la incidencia de mesoteliomas en hámster y cáncer de pulmón en ratas. Los estudios de poblaciones de trabajadores con trabajo de exposición a las fibras cerámicas refractarias han mostrado una asociación entre la exposición y la formación de placas pleurales, el aumento de la prevalencia de síntomas respiratorios, disminución de la función pulmonar y la irritación.

El comité AFSSET-OEL considera que el potencial carcinogénico de las fibras cerámicas refractarias está vinculado a un mecanismo genotóxico con un modo de acción sin umbral. Un modelo que supone la relación lineal entre la dosis y la respuesta (cáncer de pulmón) se ha utilizado para establecer el límite de exposición ocupacional. El comité

AFSSET-OEL indicó que un exceso de riesgo de cáncer está asociado con una concentración de 0.02 fibras/cm³ respirables, basado en 40 años de exposición ocupacional. El enfoque del modelo lineal en este análisis de relación exposición-respuesta usando los datos tomados de animales, se tienen en cuenta las diferencias posibles en la dosimetría (es el cálculo de la dosis absorbida en tejidos y materia) y la carga del pulmón entre ratas y humanos. (El Yamani & Modelon)

En el campo de la medicina también se ha hecho una evaluación de parámetros inflamatorios, citotóxicos, genotóxicos y hallazgos histológicos tras la exposición a la amosita, fibras cerámicas refractarias y humo de cigarrillos. Las fibras cerámicas refractarias se utilizan como un tipo de sustituto de asbesto. Algunos cerámicos refractarios son duraderos y respirables, pueden presentar un potencial peligro para la salud por inhalación, el objetivo del estudio fue, buscar y comparar los efectos de la exposición subcrónica a la amosita (AMO) (es una variedad fibrosa de la grunerita que es un mineral del grupo de los silicatos), las fibras cerámicas refractarias (RCF) y el humo de cigarrillo (CS) y su exposición combinada AMO+RCF+CS, por sus parámetros inflamatorios, citotóxicos y genotóxicos en un lavado bronco alveolar y por histología pulmonar, para encontrar si fumar amplifica el posible efecto negativo de las fibras cerámicas refractarias.

Después de seis meses de exposición, los animales fueron desangrados y analizados. Se hizo un recuento de células bronco alveolares, recuento de macrófagos alveolares, recuento diferencial de células (% de macrófagos alveolares, polimorfonucleares y linfocitos), % de macrófagos alveolares inmaduros, células binucleadas, viabilidad y actividad fagocítica de macrófagos alveolares, frecuencia de micro núcleos, ensayo cometa e histología del tejido pulmonar.

Los resultados muestran que no hay grandes diferencias entre la exposición a la amosita y las fibras cerámicas refractarias y sus efectos combinados con el humo de cigarrillo en parámetros inflamatorios y citotóxicos bajo condiciones experimentales. De acuerdo con los hallazgos histológicos hay diferencias de la lesión del tejido pulmonar (fibrosis) en la exposición entre la amosita (grado 8) y la exposición a las fibras cerámicas refractarias (grado 5) y no hay ningún efecto de fibrosis (grado 0) después de la exposición al humo de cigarrillo. (Hurbankova, y otros, 2009)

Se ha investigado la influencia de la introducción de circonia en el comportamiento frente al choque térmico de dos hormigones aluminosos de ultra bajo cemento. Se compararon dos vías de introducción de circonia: circonia electro fundida (HZ) y granos provenientes de la reutilización de bloques electro fundidos del tipo AZS (HAZS) empleados como piso de hornos de fusión de vidrio. Los hormigones refractarios aluminosos de ultra bajo cemento (ULCC) se diferencian de los convencionales en su contenido de cemento aluminoso lo cual, además de requerir menor cantidad de agua para su preparación, les imparte propiedades sobresalientes tanto físico-mecánicas como químicas. La incorporación de granos de circonia (ZrO₂) en matrices cerámicas tiene el objetivo de

mejorar sus propiedades termo mecánicas, resistencia al ataque químico y choque térmico.

Dado que existen varias vías de incorporación de circonia, el principal objetivo en (Rendtorff, Hipendinger, Scian, & Aglietti) es el de comparar dos vías de introducción de la mencionada fase: una mediante la incorporación de granos de circonia electro fundida y otra mediante la incorporación de granos provenientes de la reutilización de bloques electro fundidos del tipo AZS empleados como piso de hornos de fusión de vidrio. Asimismo se elaboró un hormigón sin agregado de circonia (HA) para poder ponderar los efectos de la introducción de la circonia por las vías mencionadas. No existe un ensayo simple y universal para estudiar el comportamiento frente al choque térmico de materiales cerámicos y que además sea extrapolable a las diferentes condiciones de trabajo del material, dimensiones, geometría y ciclos de temperatura. En cualquier ensayo planteado los resultados estarán fuertemente ligados al tamaño, la geometría y ciclos térmicos aplicados. Sin embargo algunas experiencias son simples y tienen valor comparativo. En la práctica la resistencia al choque térmico del material se puede evaluar a través del cambio de alguna característica física o propiedad de la pieza ensayada. Una medida sería el intervalo de temperatura ΔT que produce un cierto grado de rotura determinado, ya sea aparición de fisuras o colapso total.

El choque térmico se puede ensayar en calentamiento o en enfriamiento, aunque generalmente la resistencia se evalúa en enfriamiento. Un método consiste en calentar las probetas a alta temperatura y enfriarlas rápidamente hasta temperatura ambiente (método de quenching) por inmersión en agua, alcohol, aceites, etc. Finalmente se determina la resistencia mecánica (residual) de la probeta, el módulo de Young (E), etc. Los métodos de medición del módulo E tradicionales implican procedimientos complicados, son difíciles y generalmente destructivos.

En (Rendtorff, Hipendinger, Scian, & Aglietti) se utilizó la técnica de excitación por impulsos para determinar el módulo de elasticidad dinámico, basado en el análisis del comportamiento vibratorio del cuerpo. Un cuerpo momentáneamente deformado por un impulso exterior, tenderá inmediatamente a recuperar su estado inicial, por ello vibrará alrededor de su posición neutra. A través de un sensor piezo-eléctrico se puede seleccionar la componente fundamental, basándose en el fenómeno de la amortiguación selectiva y con un algoritmo que tiene en cuenta la masa y las dimensiones de la probeta se calculan las constantes elásticas. De acuerdo a (Rendtorff, Hipendinger, Scian, & Aglietti) se encontró que la incorporación de zirconio como circonia electro fundida fue más eficiente para la mejora de los comportamientos abordados.

La tabla 9 obtenida en (Rendtorff, Hipendinger, Scian, & Aglietti) muestra algunas propiedades de los hormigones descritos en el artículo. Para la siguiente tabla se describen algunos parámetros que no se han descrito antes. MOR (módulo de rotura a temperatura ambiente), Hot MOR (módulo de rotura a 1350°C), E (módulo de elasticidad), α (coeficiente de expansión térmica), Kic (tenacidad a la fractura), YNBT(energía de

iniciación de la fractura), R (aproximación termoelástica), R''' (aproximación en términos de balance energético) y Rst (teoría unificada de Hasselman), estos tres últimos parámetros son parámetros teóricos para la estabilidad de grietas.

Tabla 9. Propiedades mecánicas de los hormigones.

Propiedades	HA	HAZS	HZ
MOR (Mpa)	66	44	33
Hot MOR (Mpa)	1,4	3,4	5,5
E 1000°C (Gpa)	83	75	76
E 1400°C (Gpa)	123	115	69
α ($\times 10^{-6}$ °CE ⁻¹)	8,6	8,2	8,3
KIC (MPa m ^{1/2})	2,47	2,68	1,79
YNBT (J m ⁻²)	2,48E-05	3,12E-05	2,32E-05
R	43,68	32,66	40,34
R'''	40,34	84,86	90,52
Rst	1,65	2,01	2,21

Con respecto a la obtención de materias primas se ha estudiado el comportamiento de una de estas como la espinela, obtenida a través de una magnesita de la vereda San Pedro de la Sierra en la costa norte de Colombia, para la obtención de un aluminato de magnesio por prensado y posterior sinterización de una mezcla de la magnesita y una alúmina suministrada por Martinswerk (Alemania) y comparar algunas de las propiedades con las de una espinela obtenida a partir de óxido de magnesio reactivo analítico.

Los ladrillos refractarios que contienen espinela, la cual es obtenida por reacción de una mezcla de óxido de magnesio y alúmina, tienen una aplicación muy amplia en la formulación de refractarios básicos o de alta alúmina, especialmente donde se trata de mejorar la resistencia al impacto, la erosión por metales, el choque térmico y la resistencia a la corrosión por escorias. Dichos materiales son exigentes en sus características micro estructurales, debido a que en condiciones de operación los refractarios están expuestos durante largos periodos a altas temperaturas, al contacto con escorias altamente reactivas y a la erosión causada por las turbulencias del metal.

Una de las principales ventajas de la presencia de espinela es la reducción de la penetración de escorias y por consiguiente de la corrosión o el deterioro del refractario. La escoria, cuyos componentes mayoritarios son hierro, calcio y silicio, al estar en contacto con el refractario forma una interfase refractario-escoria donde se llevan a cabo diversas reacciones. A nivel industrial se usan espinelas obtenidas a partir de materias primas sintéticas de alta pureza, lo cual reduce su aplicación debido al alto costo. Por lo anterior resultó de interés evaluar el comportamiento de una magnesita natural en la obtención de material de espinela. Según (Pachón, Delgado, Peña, & Segura, 2001) después del

estudio realizado, se puede asegurar que la magnesita natural de la costa norte de Colombia, es apropiada para la obtención de materiales de espinela, con buenas propiedades físicas y composición de fases. (Pachón, Delgado, Peña, & Segura, 2001)

Las propiedades mecánicas de los refractarios se tratan de mejorar cada vez más, debido a esto se hacen investigaciones sobre cómo mejorar este aspecto. En (Musante, Martorello, & Galliano) se lleva a cabo el estudio del comportamiento Tension-Deformación de refractarios de magnesia-grafito (MgO-C) pre-tratados térmicamente. El uso de materiales refractarios de MgO-C como revestimiento de trabajo en recipientes siderúrgicos en contacto con acero y escorias líquidas es hoy una alternativa ampliamente consolidada.

Estos materiales combinan una adecuada capacidad de soportar a la vez altas temperaturas, erosión, tensiones térmicas importantes y ambientes corrosivos. En particular, su comportamiento mecánico resulta fundamental para minimizar el riesgo de fisuración de ladrillos, desgaste de juntas y desestabilización de estructuras en operación. Esto determina en muchos casos la vida útil de los distintos equipos en los que son utilizados como revestimiento, tales como convertidores LD, cucharas de refinamiento secundario y hornos. En todos estos casos la evaluación precisa de las propiedades mecánicas de los materiales en condiciones operativas tiene una importancia crítica, ya sea para una adecuada comparación y selección de los materiales a utilizar, como para optimizar modelos numéricos que permitan estimar adecuadamente las condiciones de los equipos involucrados en operación. La determinación de las propiedades mecánicas en laboratorio no es tarea sencilla ya que los ensayos deben ser realizados en condiciones controladas de atmósfera y en el rango de temperaturas de servicio.

En (Musante, Martorello, & Galliano) se evalúa mecánicamente un material MgO-C pre-tratado térmicamente mediante curvas tensión-deformación. Como referencia, también se ensaya el material original, sin tratamiento. En (Musante, Martorello, & Galliano) se utilizaron muestras de un refractario comercial de MgO-C sometidas a tratamiento térmico bajo condiciones reductoras que incluyeron un calentamiento a 25°C/min, una temperatura final de 1000°C (TT1) y 1300°C (TT3) y un enfriamiento natural dentro del horno.

Se caracterizaron tres tipos de muestras (original, TT1 y TT3) por medio de varias técnicas de análisis. El análisis mineralógico se llevó a cabo por difracción de rayos X usando radiación Cu K α , a 40 kV y 30 mA, con filtro de Ni. El análisis termogravimétrico se realizó en flujo de aire hasta 1400°C (10°C/min), sobre muestras en polvo (< malla 70). La densidad global (ρ_b) y la porosidad aparente (π_a) se determinaron sobre la base de la norma DIN EN 993-1(DIN 51056), empleando kerosene como fluido.

Las curvas tensión-deformación se determinaron en compresión sobre probetas cilíndricas (28 mm de diámetro y 50 mm de altura) obtenidas por corte a partir de los

ladrillos y mecanizado de las superficies planas. En el caso de los materiales pre-tratados, se eliminó la capa decarburizada previo al corte de los cilindros.

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo según protocolos internos, con una máquina universal de ensayos mecánicos servohidráulica (INSTRON modelo 8501) y un horno eléctrico acoplado (elementos calefactores de MoSi₂). La deformación de la probeta se determinó mediante un extensómetro axial capacitivo para alta temperatura. Los ensayos mecánicos se realizaron en argón, con una velocidad de desplazamiento de 0,1 mm/min hasta la rotura de la probeta y se empleó una velocidad de calentamiento de 5°C/min hasta la temperatura del ensayo.

A partir de las curvas tensión (σ) - deformación (ϵ) se determinó: la resistencia a la fractura (σ_F), tomada como el máximo valor de esfuerzo; la deformación de fractura (ϵ_F), correspondiente al valor de σ_F ; la tensión de fluencia (σ_Y), correspondiente a la tensión donde la relación σ - ϵ se desvía de la respuesta lineal; y la relación porcentual σ_Y/σ_F , considerada como una medida del grado de desviación de la respuesta lineal.

De acuerdo a lo evaluado en (Musante, Martorello, & Galliano) se concluye que, las curvas de tensión-deformación del material original de MgO-C analizado, varían fuertemente con la temperatura del ensayo entre T ambiente y 1300°C, mientras que las curvas de las muestras pre-tratadas térmicamente se ven poco afectadas por la temperatura del ensayo. Al pre-tratar térmicamente a las muestras durante un tiempo prolongado a 1000°C y 1300°C, la resistencia mecánica a temperatura ambiente se reduce significativamente y el comportamiento se desvía de la linealidad. La variación de las curvas tensión-deformación y de los parámetros asociados son atribuidos mayormente a cambios micro estructurales en el refractario que determinan fuertes variaciones en la porosidad abierta. (Musante, Martorello, & Galliano)

Debido a las condiciones cada vez más severas a la cuales son sometidos los materiales refractarios y a su incidencia en los costos de producción de la industria que los utiliza, la tendencia es hacia el consumo creciente de refractarios de alto contenido de alúmina, de los cuales hacen parte los compuestos de mullita. En (Ribero, Restrepo, Paucar, & García, Disminución de la temperatura en la síntesis de un material cerámico altamente refractario (mullita) a partir de hidroxihidroxigeles, 2007), se planteó obtener mullita mediante la ruta química de hidroxihidroxigeles, buscando un contacto íntimo entre las partículas de sílice y alúmina.

Es bien conocido que los refractarios silicoaluminosos constituyen el 70% de los materiales refractarios utilizados en la industria. Debido a las condiciones cada vez más severas a las cuales son sometidos y a su incidencia en los costos de producción de la industria que los utiliza, la tendencia es hacia el consumo creciente de refractarios de alto contenido de alúmina, los cuales, por su menor costo, son fabricados en su mayor parte, a base de bauxita natural calcinada.

La importancia de la formación de mullita en los productos refractarios, responde fundamentalmente a: Bajo presiones ordinarias, normales en condiciones de cocción y utilización, la mullita es el único compuesto de alúmina y sílice estable a altas temperaturas; esto implica que los silicatos de aluminio silimanita, andalucita y cianita, se transforman en mullita durante la cocción y el uso (respectivamente a 1545°C, 1390°C y 1370°C). La mullita confiere interesantes propiedades a los productos que la contienen, tales como: estabilidad química, resistencia mecánica, baja dilatación a altas temperaturas, resistencia al choque térmico que se atribuye a la forma de agujas entrecruzadas que adopta la mullita, resistencia a la abrasión mecánica y a la erosión por la llama, resistencia al ataque de las escorias y metales fundidos y a la acción corrosiva de los gases.

Aunque los métodos más usuales de preparación de mullita se han basado en la descomposición térmica de la caolinita (o de materiales similares) y en la fusión a una temperatura aproximada de 1850°C de mezclas de Al₂O₃ puro y SiO₂ puro (usualmente con exceso de Al₂O₃), se han desarrollado nuevas tecnologías para la obtención de este material como por ejemplo el método sol-gel, la síntesis hidrotermal, la pirolisis, el CVD, la combustión de polvos cerámicos y la síntesis a partir de hidroxihidrogeles.

El desarrollo de nuevas tecnologías de síntesis ha permitido producir mullita de alta pureza y homogeneidad, ubicándola en un lugar de privilegio para aplicaciones técnicas de alta temperatura requeridas por las nuevas cerámicas avanzadas. Se conoce sobre la producción de mullita por estas nuevas tecnologías de procesamiento, en los cuales la cristalización del material en sistemas coloidales, se logra en tiempos bastante largos; por ejemplo, se reporta la obtención de Mullita cristalina a 1500 °C durante 96 horas.

La ruta química a partir de hidroxihidrogeles parece atenuar algunas de las desventajas de los anteriores procesos (sol-gel por ejemplo), tales como, el alto costo de las materias primas y los largos tiempos de procesamiento. Además, ofrece ventajas para la obtención de materiales, entre las que se encuentran la homogeneidad, el alto grado de pureza, la baja temperatura de preparación y las propiedades especiales en el material obtenido. En (Ribero, Restrepo, Paucar, & García, Disminución de la temperatura en la síntesis de un material cerámico altamente refractario (mullita) a partir de hidroxihidrogeles, 2007) se utiliza este procedimiento, buscando optimizar las etapas más importantes y así lograr la disminución de las temperaturas de procesamiento.

La ruta química de los hidroxihidrogeles implica la evolución de la mezcla de base hacia redes inorgánicas tridimensionales, a partir de precursores que forman soluciones coloidales o moleculares y logrando su posterior polimerización para formar una red inorgánica, la cual se estabiliza y madura con la adición de un agente gelificante a temperatura ambiente. Posteriormente se requiere el secado y la densificación del gel por medio de tratamientos térmicos adecuados para cada caso. Existen numerosos factores que inciden en el proceso, reflejados en el producto final, tales como el tipo de precursores, el pH, la temperatura y el tiempo del proceso.

Como bases para el estudio y realización por esta vía se emplean los principios de la química de coloides con el fin de generar partículas de tamaños muy finos en un medio acuoso. En la investigación realizada en (Ribero, Restrepo, Paucar, & García, Disminucion de la temperatura en la síntesis de un material ceramico altamente refractario (mullita) a partir de hidroxihidrogeles, 2007) se utilizaron para los ensayos las siguientes sustancias:

- Sílice coloidal, SiO₂ 99.8%; Área superficial de 200 m²/gr.
- Gel de hidróxido de aluminio; 9.5% de Al₂O₃.
- Aditivos: Antiespumante, dispersante y floculante.

Los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones ambientales de temperatura y presión. Se evaluó la cristalinidad mediante difracción de rayos X (DRX) y análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM), obteniendo mullita cristalina a temperaturas considerablemente bajas (1300°C) y menos tiempos de procesamiento (10h). Se verificó la refractariedad del material mediante cono pirométrico equivalente (CPE) obteniendo un valor mayor de temperatura (>1820°C). Finalmente se realizó un análisis químico para comprobar los compuestos presentes y verificar la relación estequiométrica. (Ribero, Restrepo, Paucar, & García, Disminucion de la temperatura en la síntesis de un material ceramico altamente refractario (mullita) a partir de hidroxihidrogeles, 2007)

CONCLUSIONES

Se logró realizar el estudio de la evolución de los materiales refractarios desde un punto de vista tecnológico y de mercado en algunos de sus temas principales como son materias primas, técnicas de fabricación, propiedades, investigación y aplicaciones, realizando una revisión bibliográfica y profundización de los temas.

Se pudo conocer el estado de la evolución tecnológica de los cerámicos refractarios en la industria colombiana a través de la investigación y la observación de procesos productivos en algunas de las empresas del sector.

Se consiguió realizar una base de datos de algunas de las empresas más representativas del sector de los cerámicos refractarios, además de desarrollar un cuestionario para las empresas del sector para conocer más de cerca su estado de evolución tecnológica y de mercado en el campo de los refractarios.

No se logró obtener información de las empresas a través del cuestionario desarrollado para conocer el estado de la evolución tecnológica y de mercado en el sector de los cerámicos refractarios.

Con la realización de este trabajo se logró identificar una gran oportunidad para la investigación de materiales refractarios en la industria colombiana, para alcanzar una mejora tecnológica y fabricación de nuevos productos que ayuden al crecimiento comercial de este sector industrial.

A través de la realización de este trabajo se logró aplicar conocimientos obtenidos durante la carrera, además de que hubo una ampliación de conocimientos gracias a la investigación y se fortaleció una de las áreas de conocimiento de la ingeniería como lo es la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Ziyan, H. (2003). Convective heat transfer from different brick arrangements in tunnel kilns. *Elsevier*, 21.
- Balikoglu, F., & Akkurt, S. (2009). Isothermal corrosion testing of frit furnace refractories. *Elsevier*, 9.
- Blanco Alvarez, F. (s.f.). *Web de Francisco Blanco Alvarez*. Recuperado el 10 de Abril de 2013, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Refractarios.Lecccion2.Propriedades.de.los.REFRACTARIOS.pdf>
- Blanco Alvarez, F. (s.f.). *Web de Francisco Blanco Alvarez*. Recuperado el 10 de 05 de 2013, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Refractarios.Lecccion3.FabricacionProductosREFRACTARIOS.pdf>
- Blanco Alvarez, F. (s.f.). *Web de Francisco Blanco Alvarez*. Recuperado el 22 de Junio de 2013, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Lecccion1.HornosIndustriales.2006.pdf>
- CDIGITAL. (s.f.). Recuperado el 22 de Junio de 2013, de http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020148613/1020148613_02.pdf
- Djangang, C., Elimbi, A., Melo, U., Lecomte, G., Nkoumbou, C., Soro, J., . . . Njopwouo, D. (2007). Refractory ceramics from clays of Mayouom and Mvan in Cameroon. *Elsevier*, 9.
- El Yamani, M., & Modelon, H. (s.f.). Cancer risk assessment for refractory ceramic fibres from AFSSSET occupational exposure limit (OEL) committee. *Elsevier*, 2.
- Engman, U. (1995). Erosion testing of refractories - a new testing procedure. *Elsevier*, 9.
- Facultad de Ingenieria Universidad de Buenos Aires. (2 de 12 de 2008). *Facultad de ingenieria universidad de buenos aires*. Recuperado el 10 de 5 de 2013, de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19_Apunte%20Refractarios.pdf
- Gokce, A., Gurcan, C., Ozgen, S., & Aydin, S. (2006). The effect of antioxidants on the oxidation behaviour of magnesia–carbon refractory bricks. *Elsevier*, 8.

- Grasset-Bourdel, R., Alzina, A., Huger, M., Gruber, D., Harmuth, H., & Chotard, T. (2011). Influence of thermal damage occurrence at microstructural scale on the thermomechanical behaviour of magnesia–spinel refractories. *Elsevier*, 11.
- Gross, S. (2007). Refractarios. *Seminario de hornos*. San Sebastián.
- Guerrero, V. (2008). *Centro de desarrollo tecnológico sustentable*. Recuperado el 27 de Marzo de 2011, de <http://www.cds.espol.edu.ec/documentos/Ceramicos%20y%20refractarios.pdf>
- Harmuth, H., Rieder, K., Krobath, M., & Tschegg, E. (1996). Investigation of the nonlinear fracture behaviour of ordinary ceramic refractory materials. *Elsevier*, 9.
- Hashemi, B., Nemati, Z., & Faghihi-Sani, M. (2005). Effects of resin and graphite content on density and oxidation behavior of MgO-C refractory bricks. *Elsevier*, 7.
- Hurbankova, M., Cerna, S., Beno, M., Barancokova, M., Valachovicova, M., Wimmerova, S., . . . Tatrai, E. (2009). Evaluation of inflammatory, cytotoxic, genotoxic BAL parameters and histological findings after exposure to amosite, refractory ceramic fibres and cigarette smoke. *Elsevier*, 1.
- Innocentini, M., Rizzi Jr., A., Nascimento, L., & Pandolfelli, V. (2003). The pressure–decay technique for air permeability evaluation of dense refractory ceramics. *Elsevier*, 6.
- Itescam. (s.f.). *Instituto Tecnológico Superior de Calkini en el Estado de Campeche*. Recuperado el 22 de Junio de 2013, de <http://www.itescam.edu.mx/principal/sylabus/fpdb/recursos/r73613.PDF>
- Lanin, A., & Deryavko, I. (1999). Influence of residual stresses on thermal stress resistance of refractory ceramic. *Elsevier*, 5.
- Lee, W., Jayaseelan, D., & Zhang, S. (2008). Solid–liquid interactions: The key to microstructural evolution in ceramics. *Elsevier*, 9.
- Levy, D., Artioli, G., Gualtieri, A., Quartieri, S., & Valle, M. (1998). Chromium crystal chemistry mullite-spinel refractory ceramics. *Elsevier*, 10.
- Lopez, M. E. (2012). Modulo 15 Refractarios. Medellín.
- Mesa Rueda, J. L. (2012). *Pagina personal de Jose Luis Mesa Rueda*. Recuperado el 10 de Abril de 2013, de Pagina personal de Jose Luis Mesa Rueda: http://joseluismesarueda.com/documents/TEMA_7_001.pdf
- Musante, L., Martorello, L., & Galliano, P. (s.f.). *Comportamiento tension-deformacion de refractarios de MgO-C pre-tratados termicamente*. Mar del Plata, Argentina.

- Ni, W. a., & Kuangchan Zonghe Livong, F. (1999). Refractories/Ceramics (properties, production, applications). Manufacture of cordierite-mullite refractory bricks by using coal gangue magnesite as major raw materials. *Elsevier*, 2.
- Norton, F. (1975). *Ceramica Fina. Tecnología y aplicaciones*. Barcelona, España: Ediciones Omega S.A.
- Ouedraogo, E., Roosefid, M., Prompt, N., & Deteuf, C. (2011). Refractory concretes uniaxial compression behaviour under high temperature testing conditions. *Elsevier*, 12.
- Pachón, M., Delgado, E., Peña, P., & Segura, E. (2001). Mineral de magnesita colombiana en la obtención de refractarios de espinela. *Revista academica colombiana de ciencias*, XXV(96), 403-409.
- Parthasarathy, T., Kerans, R., Chellapilla, S., & Roy, A. (2006). Analysis of ceramics toughened by non-conventional fiber reinforcement. *Elsevier*, 12.
- Quaranta, N. E. (1998). Refractories/Ceramics (properties, production, applications). Industrial ashes use in ceramics materials. *Elsevier*, 2.
- Rabah, M., & Ewais, E. (2008). Multi-impregnating pitch-bonded Egyptian dolomite refractory brick for application in ladle furnaces. *Elsevier*, 7.
- Rendtorff, N. M., Hipedinger, N. E., Scian, A. N., & Aglietti, E. F. (s.f.). *Comportamiento frente al choque térmico de dos hormigones aluminosos ULCC con incorporación de zirconia*. La Plata, Argentina.
- Ribero, D., Restrepo, R., Paucar, C., & García, C. (2007). Disminucion de la temperatura en la síntesis de un material ceramico altamente refractario (mullita) a partir de hidroxihidrogeles. *DYNA*, 74(153), 5.
- Ribero, D., Restrepo, R., Paucar, C., & García, C. (2008). Highly refractory mullite obtained through the route of hydroxyhydrogels. *Elsevier*, 5.
- Sani, E., Mercatelli, L., Francini, F., Sans, J. L., & Sciti, D. (2011). Ultra-refractory ceramics for high-temperature solar absorbers. *Elsevier*, 4.
- Sidrak, F. (2002). Recycling of coal washing refuse for the fabrication of clay-based refractory ceramic bricks. *Elsevier*, 1.
- Sutcu, M., & Akkurt, S. (2010). Utilization of recycled paper processing residues and clay of different sources for the production of porous anorthite ceramics. *Elsevier*, 9.

ANEXO 1

LISTADO E INFORMACIÓN EMPRESARIAL

Empresa	Teléfono	Ubicación
Senco Colombia	551 48 51	Guarne-Antioquia
Loceria Colombiana S.A	378 84 00	Caldas-Antioquia
Electroporcelana Gamma S.A	305 80 00	Sabaneta-Antioquia
Sumicol	305 82 00	Sabaneta-Antioquia
Colceramica La Estrella	378 79 00	La Estrella-Antioquia
Colceramica Girardota	454 77 00	Girardota-Antioquia
Colceramica Madrid	828 90 00	Madrid-Cundinamarca
Colceramica Sopo	878 90 00	Sopo-Cundinamarca
Alfagres	331 15 15	Bogotá-Cundinamarca
Cerámica Italia	582 98 00	Cúcuta-Santander
Ladrillera SantaFé	319 03 30	Bogotá-Cundinamarca
Euroceramica	551 21 55	Guarne-Antioquia
Erecos	444 26 90	Medellín-Antioquia
Ladrillera San Cayetano	889 52 20	Cali-Valle del Cauca
Reframetal S.A	313 30 50	Medellín-Antioquia
Refractarios Industriales S.A	338 68 67	Caldas-Antioquia
Ladrillera San Cristóbal	427 01 45	Itagüí-Antioquia
Cerámicas Industriales de Colombia Ltda.	218 85 95	Bogotá-Cundinamarca
Refractarios del Caribe	665 63 29	Cartagena-Bolívar
Sudamin S.A.S	622 77 31	Bogotá-Cundinamarca
Tirs Ltda.	644 59 96	Bucaramanga-Santander
Refractarios Magnesita Colombia S.A	772 48 48	Sogamoso-Boyacá
Cerámicas Industriales Facar S.A	770 36 69	Sogamoso-Boyacá
Ambala S.A	847 80 75	Amaga-Antioquia
Ladrilleros Asociados S.A	238 75 59	Medellín-Antioquia
Cerámicas Arauca Ltda.	885 33 76	Arauca-Arauca
Green Century Company S.A.S	334 83 64	Cali-Valle del Cauca
Refrastrabe S.A	255 92 39	Buga-Valle del Cauca

ANEXO 2

FORMATO ENCUESTA TÉCNICA

Formato Encuesta Técnica				
1. Información General				
Nombre Empresa				
Ubicación (Ciudad-Departamento)				
Dirección				
Teléfono		Fax		Nit
Tipo de empresa				
Certificación de calidad				
Correo Electrónico				
Producto Producido				
2. Materias Primas				
Nombre	Procedencia	Consumo mensual		
Tipo de ligante o aglomerante usado durante la mezcla de la pasta				
3. Propiedades				
Material refractario	Si		No	
Clasificación del Refractario.				
Ácido		Básico		Neutro
Propiedades más sobresalientes del material producido.				
Dimensiones del material producido.				
Peso		Densidad		
Composición química del producto.				
Punto de fusión del material				

4. Técnicas de Fabricación					
Tipo de molino para trituración y molienda					
Tamaño final del grano para la producción					
Tipo de mezcladores para la preparación de la masa a moldear.					
Tipo de moldeado utilizado.					
Prensado mecánico		Extrusión		Moldeado a mano	
Proceso de secado		Si		No	
Temperatura de secado					
Temperatura de cocción					
Tiempo de cocción					
Velocidad de calentamiento					
Velocidad de enfriamiento					
Tipos de hornos utilizados.					
Cantidad de hornos utilizados					
Tipo de combustible utilizado por el horno					
5. Aplicaciones					
Aplicaciones en las que se utiliza el producto.					
6. Investigación					
Posee la empresa departamento de investigación para la mejora de las aplicaciones, materias primas, propiedades y/u otro proceso productivo?					
Se han hecho mejoras en las técnicas de fabricación o el proceso productivo?. Cuáles?					
Hace cuánto tiempo se utilizan las mismas técnicas de fabricación para el proceso productivo?					
Se han hecho mejoras para que el proceso productivo sea más amigable con el ambiente?. Cuáles?					
Se hace investigación para la mejora y prevención de fallas dentro del proceso productivo como fracturas u otro tipo de defectos en los materiales?					
Se ha investigado sobre la obtención de materias primas a partir de otros procesos que sean más amigables con el ambiente y/o más económicos?					
7. Normas					
Bajo que normas se realizan los productos y se realizan los ensayos a los materiales					

8. Calidad			
Existe laboratorio de control de calidad	Si		No
Cuáles son los equipos utilizados en el control de calidad			
Tipos de ensayos que se le realizan al material			
9. Otros			
Número de trabajadores			
Área total que ocupa la empresa			
Cantidad producida anualmente			
Producto de exportación	Si		No
Porcentaje de automatización en la fabricación del producto			
Tiempo que demora el proceso productivo			
Nombre de quien llenó la encuesta			
Cargo			

ANEXO 3

CARTA EJEMPLO DE PRESENTACIÓN A EMPRESAS



Medellín, 28 Noviembre de 2013

Señor

CARLOS ZAPATA

Jefe Planta de Pisos y Paredes

Colcerámica Girardota

Girardota - Antioquia

Asunto: Realización de encuesta técnica

Cordial saludo

A través de un trabajo de grado dentro del programa de Ingeniería Mecánica, se desea conocer la historia, trayectoria y situación actual del área de cerámicos refractarios en Colombia. Dicho trabajo de grado se titula "Desarrollo técnico comercial del sector del ladrillo refractario en Colombia durante los últimos 30 años", el cual será realizado por el estudiante Juan Diego Pineda y dirigido por el Ph. D. Luis Javier Cruz Riaño. Dentro de las actividades de dicho trabajo de grado se destaca la realización de una encuesta técnica a las principales empresas colombianas del sector que permitirá recoger una información básica y fundamental sobre la situación tecnológica de los refractarios en el país. En ese orden de ideas le solicito el favor de diligenciar el formato de encuesta adjunto y devolverlo por esta vía a mi dirección electrónica o, en su defecto, a luis.cruz@upb.edu.co

De antemano le agradecemos su colaboración y apoyo que será de vital importancia para llevar a feliz término este trabajo de grado y a sentar las bases para que desde la universidad tratemos de montar proyectos y realizar actividades conjuntas con las empresas de este importante sector industrial.

Atentamente,

Ph. D. **LUIS JAVIER CRUZ RIAÑO**
Director Grupo de Investigaciones sobre Nuevos Materiales
Universidad Pontificia Bolivariana

CIRCULAR 1 # 73 – 76 BLOQUE 22 B GRUPO DE INVESTIGACIONES SOBRE NUEVOS MATERIALES
(574) 354 45 32 (574) 448 83 88 EXT 13286 - 13287 MEDELLÍN COLOMBIA

ANEXO 4

RESPUESTA A LA ENCUESTA TÉCNICA POR PARTE DE ALGUNAS EMPRESAS

De: Sandra Maria Henao Quintero [mailto:shenaog@corona.com.co]

Enviado el: lunes, 09 de diciembre de 2013 03:43 p.m.

Para: Soraida Sanchez Correa

Asunto: RE: SOLICITUD

Buenas tardes Soraida

Te envié el número telefónico 4442690 de la Empresa Erecos, son los únicos productores de ladrillos en Corona. (es una planta recién comprada por corona especializada en la fabricación de ladrillos refractarios).

Disculpa la tardanza en la respuesta, llame y desafortunadamente la persona encargada no se encuentra te invito a que llames haber cómo te pueden ayudar y me cuentas.

Saludos,

Sandra Maria Henao Quintero

Asistente de Gerencia

Corona-Colceramica

Tel 3787900 Ext 62950

Cel 312 444 01 82

<http://www.corona.com.co>

De: Carlos Eugenio Zapata Isaza [mailto:CeZapata@corona.com.co]
Enviado el: viernes, 29 de noviembre de 2013 12:43 p.m.
Para: Soraida Sanchez Correa
CC: Carlos Eugenio Zapata Isaza
Asunto: RE: SOLICITUD

Buenos días.

Lamento mucho no poder ayudar con esta información, pues la compañía en ese aspecto es muy reservada pues estamos en un sector industrial muy competido.

Espero lo entiendan.

Un saludo.

CZ

De: Luis Felipe Saldarriaga Nieto [mailto:felipe.saldarriaga@erecos.com]
Enviado el: jueves, 28 de noviembre de 2013 04:44 p.m.
Para: Soraida Sanchez Correa
Asunto: RE: SOLICITUD

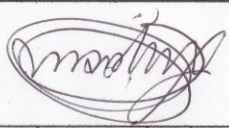
Buenas tardes Soraida:

Considero que esta información debe ser suministrada por alguna persona dentro de nuestra organización más cercana a los detalles técnicos del proceso de producción. Enviaré internamente este correo a otras dos personas que conocen mejor las respuestas a la encuesta del estudiante. Saludos cordiales y muchas gracias por su comprensión,

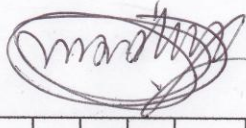
Felipe Saldarriaga
ERECOS - Jefe de Planeación y Despachos
felipe.saldarriaga@erecos.com
Tel: (57 4) 444 2690 ext 118 - Fax: 312 3366
Móvil: (57) 300 325 9537 - Skype: felipesalda
Carrera 51 # 6 SUR - 95, Medellín, Colombia
Visite nuestro sitio WEB: www.erecos.com

ANEXO 5

DIARIO DE CAMPO


DIARIO DE CAMPO						
ACTIVIDAD ASIGNADA	ACTIVIDAD REALIZADA	FECHA INICIO	FECHA FINAL	HORAS INVERTIDAS	HORAS TOTALES	APROBADO
Reunión con el director para la preparación de la carta de prorroga	Se diligenció y se entregó la carta de prorroga	21/02/2012	22/02/2012	2	73	
Reunión con el director para definir revisión bibliográfica y recomendaciones para estructurar bases de datos	Se consultó bibliografía necesaria para la realización del proyecto y se construyó una base de datos con esta bibliografía	09/03/2012	01/10/2013	400	473	
Reunión con el director para definir aspectos fundamentales de los refractarios cerámicos y definición de los horarios de reunión, sábados de 10-11 am cada 15 días	Se definió los aspectos fundamentales de los materiales cerámicos refractarios para redactar los capítulos necesarios que van a estar contenidos en el trabajo de grado	22/06/2012	23/07/2013	100	573	
Definir nuevo plazo de prorroga para la terminación del trabajo de grado	Se redactó carta de prorroga para terminar el proyecto	24/01/2013	25/01/2013	1	574	
Reunión para revisión de los capítulos y propuesta de mejoras, programar reuniones semanales para continuar	Se revisaron los capítulos y se realizaron mejoras a los capítulos de técnicas de fabricación y aplicaciones	18/06/2013	23/07/2013	20	594	
Reunión con el director para entrega de capítulo de aplicaciones y demás capítulos teóricos para revisión	Se realizó entrega de los capítulos para la revisión por parte del director	23/07/2013	23/07/2013	1	595	

DIARIO DE CAMPO

ACTIVIDAD ASIGNADA	ACTIVIDAD REALIZADA	FECHA INICIO	FECHA FINAL	HORAS INVERTIDAS	HORAS TOTALES	APROBADO
Planteamiento del proyecto	Se planteo el tema del proyecto a desarrollar	16/02/2011	16/02/2011	1	1	
Planteamiento de objetivos	Se plantearon los objetivos generales y específicos	24/02/2011	24/02/2011	1	2	
Aclaracion de dudas para la realizacion del anteproyecto	Se aclararon dudas para la realizacion del anteproyecto	03/03/2011	03/03/2011	1	3	
Asignacion de busqueda bibliografica para el desarrollo del anteproyecto	Se busco bibliografia necesaria para la realizacion del anteproyecto	14/03/2011	06/04/2011	60	63	
Asesoría para hacer correcciones propuestas en el anteproyecto	Se realizaron las correcciones propuestas en el anteproyecto	17/03/2011	17/03/2011	2	65	
Asesoría para hacer correcciones propuestas en el anteproyecto y aclaracion de dudas	Se realizaron las correcciones propuestas en el anteproyecto y se aclararon dudas al respecto	24/03/2011	24/03/2011	3	68	
Reunión con el director para el desarrollo de la justificación, los alcances y la metodología para el proyecto	Se desarrollo y se actualizó el documento del anteproyecto con la justificación, alcances y la metodología para el proyecto	04/04/2011	05/04/2011	3	71	



DIARIO DE CAMPO

ACTIVIDAD ASIGNADA	ACTIVIDAD REALIZADA	FECHA INICIO	FECHA FINAL	HORAS INVERTIDAS	HORAS TOTALES	APROBADO
Revisión primer inventario de empresas. Recomendaciones para empezar a estructurar las encuestas técnicas que se realizarán	Se revisa un primer listado de empresas y se analizan algunas preguntas que se incluirán en la encuesta técnica realizada a las empresas	01/10/2013	01/10/2013	1	596	
Lluvia de ideas sobre los aspectos que debe contener el formato de encuesta técnico, quedando pendiente la elaboración de borrador de formato de encuesta técnico	Se realiza una lluvia de ideas sobre los aspectos que debe contener el formato de encuesta técnica, se comienza con la realización de la encuesta técnica	22/10/2013	07/11/2013	10	606	
Revisión del formato para la realización de encuestas, definición de fecha para reunión semanal y asignación de tareas para la próxima reunión	Se revisó el formato de encuesta técnica y se sugirieron algunas preguntas que debe contener el formato de encuesta técnica	07/11/2013	22/11/2013	6	612	
Revisión de empresas a ser encuestadas y elaboración de borrador de carta de presentación a las empresas encuestadas, se deja como tarea la elaboración en su forma final de la carta. Proxima reunión lunes 3:30 pm	Se revisó el borrador de la carta de presentación a las empresas, se hicieron correcciones y se redactó en su forma final la carta de presentación	22/11/2013	25/11/2013	2	614	
Corrección de carta de presentación de las encuestas. Reunión con la secretaria Soraida Sanchez con el fin de que se responsabilice, desde la universidad, del envío de las encuestas directamente a los empresarios	Se realizó las correcciones necesarias a la carta de presentación y se mandó la carta a la secretaria Soraida Sanchez junto con los datos de los contactos en las empresas para que ella se encargue de enviarla a las empresas	25/11/2013	28/12/2013	6	620	
Revisión de la documentación que servirá de base para la preparación del documento final.	Se revisó la documentación y la información obtenida hasta el momento y se procedió a la construcción del documento final del trabajo de grado	04/02/2014	07/02/2014	20	640	
				Total Horas	640	

ANEXO 6

ANTEPROYECTO

**PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO
DESARROLLO TÉCNICO-COMERCIAL DEL SECTOR DEL LADRILLO REFRACTARIO
EN COLOMBIA DURANTE LOS ÚLTIMOS 30 AÑOS.**

Estudiante: Juan Diego Pineda **Cédula:** 15373693
Teléfono(s): 272 87 85 – 314 612 85 32 **Id:** 18618
E-mail: Saito78@hotmail.com **Programa:** Ingeniería Mecánica

Director: Ph. D. Luis Javier Cruz Riaño **Cédula:** 71637503
Teléfono(s): 448 83 88+1 ext. 13287
E-mail : luis.cruz@upb.edu.co **Empresa:** UPB

Asesor o Grupo de Investigación: GINUMA
Teléfono(s): 448 83 88 **Empresa:** UPB
E-mail: grupo.ginuma@upb.edu.co

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECANICA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ABRIL 6 DE 2011
MEDELLÍN**

1. Glosario.

Refractarios Ácidos: Contienen cantidades importantes de SiO₂ (sílice) que reacciona con refractarios básicos a altas temperaturas, por ejemplo refractarios basados en SiO₂ (sílice), en Al₂O₃ (alúmina) y en arcillas.

Refractarios Básicos: Refractarios que reacciona con refractarios ácidos a altas temperaturas por ejemplo MgO (magnesia), dolomita (CaCO₃, MgCO₃) y cromita.

Refractarios Neutros: Refractarios que no reacciona con refractarios ácidos ni con básicos a altas temperaturas por ejemplo Carbón y mullita.

Refractarios Especiales: Incluye materiales Refractarios de alto coste: ZrO₂ (circonia), SiC (Carburo de silicio), Si₃N₄ (nitruro de silicio).

Morteros refractarios: El mortero o cemento refractario se utiliza como material de agarre, revestimiento de paredes, y para tomar las juntas entre hiladas de ladrillo refractario.

Ladrillo refractario: Ladrillo usado para soportar temperaturas altas y cambios de temperatura bruscos; se los emplea en chimeneas y hornos por su alta resistencia.

Abrasión: Se denomina abrasión a la acción mecánica de rozamiento y desgaste que provoca la erosión de un material o tejido.

Molienda: Se refiere a la pulverización y a la dispersión del material sólido. Pueden ser granos de cereal, uva, aceitunas, etc. en productos de alimentación. Aunque también pueden ser piedras o cualquier otro material sólido.

Calcinar: La calcinación es el proceso de calentar una sustancia a temperatura elevada, pero por debajo de su entalpía o punto de fusión, para provocar la descomposición térmica o un cambio de estado en su constitución física o química. El proceso, que suele llevarse a cabo en largos hornos cilíndricos, tiene a menudo el efecto de volver frágiles las sustancias.

Resquebrajamiento: Producir una grieta superficial o poco profunda en algunos cuerpos duros, sin romperlos.

Vitrificación: La vitrificación es el proceso de conversión de un material en un sólido amorfo similar al vidrio, carente de toda estructura cristalina. Esto se consigue por medio de calentamiento o enfriamiento muy rápido o mediante la mezcla con un aditivo.

2. Modalidad.

Asistencia de investigación.

Tipo		%
Teórico	Búsqueda	60
	Desarrollo	20
Aplicado	De campo	20
Total		100

3. Tema del proyecto.

3.1 Descripción del tema.

Identificar las diferentes materias primas para la elaboración de productos refractarios como los ladrillos refractarios, cuál ha sido la evolución de las materias primas para la creación de estos, como ha sido la evolución de las propiedades, que avances tecnológicos han surgido para la elaboración de estos productos, como se ha comportado el mercado de los ladrillos refractarios durante los últimos 30 años y cuál ha sido la evolución de las aplicaciones para los ladrillos refractarios. Toda esta información será recopilada en una base de datos que además contenga información sobre las empresas más representativas en Colombia en la producción de ladrillos refractarios.

3.2 Áreas a trabajar.

Área	%
Cerámicos y compuestos	80
Selección de materiales	20
Total	100

4. Marco teórico y estado del arte.

Un material refractario es aquel capaz de resistir las condiciones del medio en el que está inmerso sin alteraciones importantes en sus propiedades físico-químicas, durante un período económicamente rentable. Las condiciones del medio no incluyen únicamente el efecto de la temperatura, sino también la resistencia al ataque por fundidos, al choque térmico, y en general, todas aquellas sollicitaciones a las que vaya a estar sometido el material en servicio.

Los refractarios se dividen en cuatro grupos: ácidos, básicos, neutros y especiales con base en su comportamiento químico.

Refractarios Ácidos: Incluyen las arcilla de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. La sílice pura a veces se utiliza para contener metal derretido.

Refractarios Básicos: Varios refractarios se basan en el MgO (magnesita o periclasa). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad, buena resistencia al ataque por los entornos que a menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Típicamente, los refractarios básicos son más costosos que los refractarios ácidos.

Refractarios Neutros: Normalmente incluyen la cromita y la magnesita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.

Refractarios Especiales: El carbono, el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando operan en atmósfera no oxidante. Estos materiales refractarios incluyen la circonia (ZrO_2), el zircón ($ZrO_2 \cdot SiO_2$) y una diversidad de nitruros] carburos y boruros.

El material refractario posee diferentes presentaciones, Cementos, morteros y ladrillos.

El término ladrillo refractario hace referencia a aquellos elementos que pueden soportar satisfactoriamente el calor sin sufrir deterioros en su forma, así como resquebrajamientos, es de entenderse, que esta propiedad está vinculada a las cerámicas aunque las mismas tampoco pueden soportar la temperatura de manera infinita. Los ladrillos como tales tienen sus caras lisas, lo que disminuye la adherencia con el mortero, resiste bien las altas temperaturas y la abrasión, es buen aislante térmico y es relativamente caro. Actualmente el precio de un ladrillo refractario equivale aproximadamente al precio de diez ladrillos comunes. Existen dos tipos básicos, los densos y los porosos que es un refractario aislante. Los densos se comportan mejor mecánicamente, pero transmiten muy bien el calor, con lo que este se pierde, mientras que el aislante no transmite nada de este calor al exterior con lo que se ahorra combustible.

La aplicación de estos elementos, está muy vinculada a hornos, siendo en la industria del acero la que usualmente demanda más de estos elementos ya que se los utiliza como recubrimiento para impedir que el metal fundido deteriore los crisoles.

El proceso de fabricación suele iniciarse con la molienda de los componentes, posteriormente se los humedece, moldea y se los cuece hasta calcinarlos, a temperaturas que varían entre los 1300 y 1600 C posteriormente se enfría el ladrillo de manera lenta para evitar resquebrajamientos, es importante anotar, que el proceso debe manejarse con cuidado para evitar la vitrificación del sílice contenido ya que esto fragiliza al ladrillo, sin embargo en algunos casos se procura cierta vitrificación para garantizar también un cierto grado de impermeabilidad, se lo puede encontrar en diferentes geometrías y tamaños pero lo usual es de 24 x 11.5 x 7.1 cm. Los ladrillos adoptan un color según el proceso de fabricación pueden ser amarronados o pardo blancuzcos.

El efecto de los antioxidantes en el comportamiento a la oxidación de ladrillos refractarios magnesia-carbono.

La oxidación del carbono es el principal problema en refractarios magnesia-carbono. Los efectos de varios antioxidantes, Al, Si, SiC y B4C en la resistencia a la oxidación de los ladrillos de magnesia-carbono se investigaron en temperaturas de 1300 C y 1500 C. Las pérdidas de % en peso de carbono de los ladrillos son calculados y las áreas oxidadas de

los ladrillos fueron examinados por XRD, SEM y EDS. El carburo de boro (B₄C) resultó ser el antioxidante más eficaz en ambas temperaturas. El compuesto Magnesio-borato (Mg₃B₂O₆) que está presente se determinó por estudios de caracterización de las muestras de B₄C. El Magnesio-borato, que se encuentra en estado líquido por encima de 1360 C, tuvo un excelente efecto sobre la resistencia a la oxidación de los ladrillos llenando los poros abiertos y formando una capa protectora en la superficie. Forsterita (Mg₂SiO₄) y espinela (MgAl₂O₄) proporcionan efectos similares en los ejemplares con agregado de Si y Al respectivamente a ambas temperaturas. El agregado de carburo de silicio (SiC) tenía fases similares con el agregado de Si, pero el SiC fue el antioxidante menos efectivo a ambas temperaturas.

5. Objetivos.

5.1 General

Analizar desde un punto de vista tecnológico y de mercado la evolución del sector de los cerámicos refractarios en los últimos 30 años.

5.2 Específicos

Analizar la evolución de las diferentes materias primas para fabricar productos a base de cerámicos refractarios.

Identificar los diferentes sistemas tecnológicos que se han empleado en Colombia en el sector de los cerámicos refractarios.

Analizar la evolución de las propiedades y comportamiento de los productos a base de cerámicos refractarios.

Analizar la evolución del mercado de los productos a base de cerámicos refractarios en Colombia.

Elaborar un directorio de las empresas más representativas del sector cementero en Colombia.

Analizar cómo han evolucionado las aplicaciones del sector de los cerámicos refractarios en Colombia.

6. Alcance.

Con el presente trabajo de grado se pretende realizar un estudio que permita definir la evolución que ha tenido el sector de los cerámicos refractarios en sus diferentes tópicos fundamentales: materias primas, sistemas productivos y propiedades, comportamientos y aplicaciones.

Como consecuencia de ello mediante la interacción con las empresas más representativas del sector se elaborara un directorio técnico de las empresas colombianas más representativas de este sector industrial que sirva de base para futuros contactos, para el montaje de proyectos de asesoría, transferencia e investigación.

7. Metodología.

El trabajo de grado se dividirá en las fases que se describen someramente a continuación:

Fase 1.

Revisión bibliográfica y profundización temática general:

Mediante una revisión en fuentes bibliográficas actualizadas, dentro de las que se destacan, artículos de revista, paginas virtuales, se hará un estudio de los temas fundamentales del ladrillo refractario dentro de los que se destacan: materias primas, sistemas de producción, propiedades y comportamiento y aplicaciones.

Fase 2.

Normalización y ensayos:

Se analizarán detalladamente las diferentes normas y procedimientos de ensayo que permiten evaluar y definir las especificaciones técnicas que deben cumplir los ladrillos refractarios que se producen en Colombia.

Fase 3.

Exploración e inventario de las empresas colombianas dedicadas a la producción de ladrillo refractario:

A través de una serie de visitas y de encuestas se recogerá la información técnico comercial de las principales empresas colombianas que producen el ladrillo refractario.

Fase 4.

Desarrollo y evolución de las materias primas empleadas en ladrillos refractarios.

Fase 5.

Desarrollo y evolución de sistemas productivos empleados en el ladrillo refractario.

Fase 6.

Desarrollo y evolución de propiedades y aplicaciones.

8. Justificación y beneficios.

El tema fundamental del trabajo investigativo del grupo GINUMA son los materiales compuestos. Dichos materiales se diferencian de los demás por el hecho de que estos son reforzados. El elemento reforzante de los materiales compuestos generalmente es un material cerámico. Por tal motivo los materiales cerámicos se convierten en un tema estratégico del grupo GINUMA.

Nueva línea de investigación sobre cerámicos avanzados:

Como consecuencia de lo anterior desde hace unos 4 años se viene estructurando dentro del GINUMA esta nueva línea de trabajo que cubre tanto los cerámicos tradicionales como los nuevos materiales cerámicos. Dentro de las estrategias definidas para la consolidación de esta nueva línea de investigación se cuenta con la reestructuración y ejecución de trabajos de grado en los temas fundamentales en los que se pueden dividir los materiales cerámicos con el fin de realizar un diagnóstico del estado actual de diferentes sectores industriales que permitan conocer con más profundidad los sistemas

tecnológicos, los principales problemas que existen y hacer un acercamiento a las empresas y empresarios más representativos con miras a definir el montaje de proyectos de investigación que poco a poco ayuden a consolidar esta nueva línea de trabajo.

Es indudable que la participación de los estudiantes de pregrado es fundamental para el desarrollo de estas investigaciones preliminares que le brindaran al estudiante la posibilidad de hacer sus primeros pasos de investigación, de aplicar los conocimientos adquiridos durante su carrera y, porque no, de introducirse en el montaje de proyectos de investigación aplicada, en este caso específico, en el tema de ladrillos refractarios.

9. Presupuesto.

Recurso	Participación (miles de pesos)			Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	Externo	Si	No
Bibliografía		500			X
Papelería	300			X	
Telecomunicaciones	100	100		X	
Transporte	80			X	
Asistencia a eventos		100			X
Trabajo estudiante		10560			X
Trabajo director		3360			X
Otros		100			X
SUBTOTAL	480	14720			
Imprevistos (10%)	48	1472			
TOTAL	528	16192			
GRAN TOTAL		16720			

10. Cronograma.

Año 2011.

Actividad	Feb.	Mar.	Abr.	May.
Búsqueda bibliográfica	X	X	X	X
Entrega anteproyecto	X	X	X	X
Reunión con el director	X	X	X	X

Año 2012

Actividad	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.
Búsqueda bibliográfica	X	X	X	X	X
Redacción				X	X
Reunión con el director	X	X	X	X	X

Año 2013

Actividad	Ene.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Búsqueda bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	
Redacción	X	X	X	X	X	X	X	X
Visitas empresariales					X	X	X	
Reunión con el director	X	X	X	X	X	X	X	X
Elaboración de directorio y encuesta técnica						X	X	X

Año 2014

Actividad	Ene.	Feb.
Redacción	X	X
Reunión con el director	X	X

11. Bibliografía.

Ladrillos refractarios. 8 de agosto de 2008. Recuperado el 26 de marzo de 2011, del sitio Web de escritura digital:

<http://www.articuloz.com/negocios-articulos/ladrillos-refractarios-505541.html>

Ladrillos. Recuperado el 26 de marzo de 2011, del sitio Web de escritura digital:

<http://es.wikipedia.org/wiki/Ladrillo>

Ladrillos refractarios. Recuperado el 26 de marzo de 2011, del sitio Web de escritura digital: http://www.construmatica.com/construpedia/Ladrillo_Refractario

The effect of antioxidants on the oxidation behaviour of magnesia–carbon refractory bricks. 28 de Noviembre de 2006. Recuperado el 26 de marzo de 2011, del sitio Web de escritura digital:

http://www.sciencedirect.com.bibliobd.upb.edu.co:2048/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TWH-4MFJTK0-2-

[Y&_cdi=5563&_user=8743942&_pii=S0272884206003087&_origin=search&_zone=rslist_item&_coverDate=03%2F31%2F2008&_sk=999659997&_wchp=dGLzVlz-zSkWb&_md5=5a2e2ec81e769e32a3462cc2b49752da&_ie=/sdarticle.pdf](http://www.sciencedirect.com.bibliobd.upb.edu.co:2048/science?_ob=MIimg&_imagekey=B6TWH-4MFJTK0-2-Y&_cdi=5563&_user=8743942&_pii=S0272884206003087&_origin=search&_zone=rslist_item&_coverDate=03%2F31%2F2008&_sk=999659997&_wchp=dGLzVlz-zSkWb&_md5=5a2e2ec81e769e32a3462cc2b49752da&_ie=/sdarticle.pdf). A.S. Gokce, C. Gurcan, S. Ozgen, S. Aydin

ANEXO 7

CERÁMICOS REFRACTARIOS

Juan Diego Pineda Quintero

Saito78@hotmail.com

Resumen: El artículo contiene un resumen sobre las generalidades de los materiales refractarios en Colombia, se describen aspectos como los tipos de materias primas utilizados para la fabricación de productos refractarios, técnicas de fabricación, los productos más característicos y las empresas más representativas del sector además de que se da una breve descripción de la comercialización de estos productos hacia el exterior, mostrando los lugares hacia donde se exporta y el valor de estas exportaciones. *Copyright © 2014 UPB.*

Abstract: The article contains a general summary of the refractory materials in Colombia, aspects such as the types of materials used for the manufacture of refractory products, manufacturing techniques, the most characteristic products and the most representative companies in the sector are described in addition to is a brief description of the marketing of these products to the exterior, showing the places where it's exported and the value of these exports.

Keywords: Refractarios, porcelana, lojería, azulejos, porosidad, escorias, fundente.

1. INTRODUCCIÓN

Los Cerámicos Refractarios son materiales utilizados para aislamientos debido a sus propiedades como las bajas conductividades térmicas gracias a sus fuertes enlaces iónicos o covalentes, lo que les convierte en buenos aislantes térmicos, además presentan puntos de fusión elevados y son generalmente inertes, incluso en caliente, a la acción de medios agresivos, estos productos generalmente se utilizan en las industrias metalúrgicas, químicas, eléctricas y del vidrio.

Dentro del desarrollo de estos productos en Colombia hay que mencionar las empresas más representativas del sector, el sector cerámico en Colombia está altamente concentrado; más del 80% de la producción pertenece a cuatro empresas: Colcerámica S.A. (Grupo Corona), Cerámica Italia (10% del mercado de pisos en el país), Alfagrés S.A. (nacional) y Eurocerámica (nacional).

Aparte de los Cerámicos Refractarios, existen otros tipos de productos fabricados en Colombia que utilizan las mismas materias primas. Dentro de estos

productos, los más característicos debido a que se fabrican en mayor cantidad porque son los que más se consumen y se comercializan en el exterior, están la porcelana sanitaria, lojería y otras cerámicas, baldosas y azulejos, y porcelana de uso industrial y de uso eléctrico.

2. MATERIAS PRIMAS

La mayoría de los refractarios industriales se preparan a partir de mezclas de compuestos cerámicos. Los materiales puros, como la magnesia o la alúmina resultan demasiado caros y difíciles de conformar, a pesar de sus excelentes propiedades refractarias. Según su composición los materiales preparados tendrán diferentes propiedades que les harán más adecuados para unas u otras aplicaciones. Pero también la densidad y porosidad del material procesado es de gran importancia. Así, los materiales más densos y con baja porosidad tienen buena resistencia mecánica y al impedir la penetración de líquidos y gases, resisten muy bien a la corrosión y erosión. Pero por el contrario, al disminuir la porosidad también disminuye su capacidad de aislamiento térmico. Por tanto, es necesario mantener un equilibrio entre ambas propiedades.

Los refractarios cerámicos industriales habitualmente utilizados en la industria se clasifican de acuerdo a su composición en refractarios ácidos, básicos, neutros y especiales. Dentro de los primeros se distingue entre refractarios de sílice, arcilla y los de alta alúmina, según el contenido en este último componente, como se describe en el documento de José Luis Mesa Rueda.

Los refractarios ácidos se emplean para fundir metales. Los refractarios de sílice, tienen alta resistencia y capacidad

estructural a temperaturas elevadas, se utilizan en los techos arqueados de los hornos de la producción de acero y vidrio y reactores químicos que trabajan a temperaturas de más de 1650°C.

Los refractarios básicos están formados básicamente por periclasa o magnesia y cal, aunque también pueden presentar pequeños porcentajes de cromo y hierro. Tienen altas densidades, altas temperaturas de fusión, estos refractarios son resistentes a escorias que contienen altas concentraciones de MgO y CaO que se producen en la fabricación de aceros. Son más costosos que los refractarios ácidos y se utilizan habitualmente en acerías que afinan el acero con oxígeno.

Los refractarios neutros se pueden emplear para dividir los refractarios ácidos de los básicos y así evitar el ataque. Están formados por óxido de cromo y el óxido de cromo-magnesia.

Los refractarios especiales son refractarios que se utilizan en aplicaciones refractarias especiales. Muchos de ellos son de alta pureza y poca porosidad. El carbono o el grafito, es utilizado en muchas aplicaciones refractarias, particularmente en procesos donde no hay oxígeno. Dentro de este grupo también se encuentran los refractarios de alúmina, circonita, circon y diversos nitruros, carburos y boruros.

Los feldespatos se emplean en la industria de la cerámica como fundente para formar una fase vítrea en las pastas, a fin de promover la vitrificación y la traslucidez. También sirven como aportación de álcalis y alúmina en vidriados y en vidrios. Su utilidad radica en su bajo coste y en que son una de las pocas fuentes de compuestos alcalinos insolubles en agua, según se explica en el libro de Norton de Cerámica Fina.

La mullita es un mineral raramente encontrado en la naturaleza y es formado bajo condiciones especiales de presión y temperatura, como se explica en el documento Chromium crystal chemistry mullite-spinel refractory ceramics, en la industria de los aluminosilicatos, dicho elemento constituye el 70% de los materiales refractarios usados. La importancia de la formación de mullita en los productos refractarios, responde fundamentalmente al hecho de que la mullita, es el único compuesto estable de alúmina y sílice a altas temperaturas y una atmosfera de presión (1 atm), otros aluminosilicatos como la silimanita, la andalucita y la cianita (minerales del grupo de los silicatos de aluminio polimórficos) se convierten en mullita a temperaturas de 1545°C, 1390°C y 1370°C respectivamente. La mullita confiere propiedades interesantes a los materiales que lo contienen, como estabilidad química, resistencia mecánica, baja expansión térmica a altas temperaturas y resistencia al choque térmico.

3. TÉCNICAS DE FABRICACIÓN

Se han implementado principios y técnicas de trabajo de la cerámica fina para fabricar productos altamente refractarios, en los que las materias refractarias una vez molidas con la máxima finura y después de una preparación en húmedo, se moldean por medio de aglomerado químico, extrusión o también por prensado isostático.

Los refractarios de acuerdo al documento de Francisco Blanco Álvarez se clasifican según su proceso de fabricación en dos tipos: Ladrillos y especialidades.

En las especialidades se recopila a todos los materiales refractarios que no tienen forma definida, existen distintos tipos.

Según la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, los ciclos que componen el proceso de fabricación de materiales refractarios son los siguientes:

- **Materia prima:** En general las materias primas de que parte el proceso de fabricación de materiales refractarios son de origen natural y proceden directamente de mina. Cuando se utilizan, en todo o en parte, materias de origen primario (naturales), es necesario realizar una serie de operaciones previas con el objeto de obtener una materia de calidad adecuada, que permita obtener un producto refractario cocido con las propiedades deseadas. Por ello y una vez extraída la materia prima natural de la mina o cantera, se procede a su lavado, con objeto de eliminar materias solubles que puedan actuar como posibles fundentes y por tanto disminuirán las propiedades refractarias del producto a fabricar.

- **Trituración y molienda:** En esta etapa no solo se busca la reducción del tamaño de los granos de las materias primas, sino obtener un conjunto de partículas que posean la distribución granulométrica necesaria para su posterior tratamiento.

- **Clasificación:** Una vez efectuada la reducción del tamaño de la partícula, se procede a separarlas en función de los distintos diámetros obtenidos.

- **Mezcla u homogeneización:** Posteriormente se procede al dosaje de los componentes, que después de su oportuno mezclado, formarán al pastón destinado al prensado.

- **Preparación del pastón:** Una vez obtenidas las cantidades necesarias de los distintos intervalos granulométricos y con el objeto de conseguir el máximo empaquetamiento de los granos, es

necesario someterlos a un intenso amasado, operación que se realiza en un mezclador.

- Moldeado: Una vez obtenida la mezcla ya homogeneizada, se la somete al moldeado, según alguno de los siguientes procedimientos:

a) Prensado mecánico: El prensado tiene por objeto la compactación de la mezcla dentro de un molde rígido aplicando la presión en una sola dirección por medio de un embolo, o un pistón o un punzón rígido. Es un procedimiento de elevada capacidad de producción y fácil de automatizar. El prensado además de permitir la conformación de las piezas, disminuye considerablemente la porosidad, quedando está en algunos casos por debajo del 20 %.

b) Extrusión: Esta técnica de conformado se emplea en la fabricación de productos de sección constante. Básicamente el proceso de extrusión consiste en forzar el paso, mediante la aplicación de una presión a la pasta con una consistencia plástica (Elevada viscosidad) a través de una matriz. Se obtiene un producto lineal con una sección transversal controlada, que luego se corta a la longitud requerida por el producto a obtener. Es un método de conformado continuo muy efectivo y eficiente, que usa un equipamiento simple.

La extrusión se usa en el conformado de materiales compuestos y la extrusión en caliente puede usarse para la obtención de electrodos de grafito. Las presiones que se alcanzan en la industria varían desde los 4 MPa para productos de porcelana hasta los 15 MPa para algunos materiales plastificados con productos orgánicos.

c) Moldeado a mano: Se utiliza este procedimiento si la pieza es muy grande (más de 100mm de lado), o si la pieza es

muy complicada. También cuando las cantidades requeridas no justifican la fabricación de la matriz metálica, la cual generalmente es muy costosa.

- Secado: El secado tiene por objeto eliminar el agua libre, no combinada, contenida en la pasta cruda e incorporada durante la preparación de las materias primas.

- Cocción: La cocción es sin duda la etapa más delicada del proceso de fabricación ya que condiciona las propiedades más importantes y específicas del producto final.

4. COMERCIAL

Dado que no fue posible conseguir una información específica sobre la comercialización de los refractarios cerámicos, en el presente apartado se hace una descripción del movimiento comercial de los principales productos cerámicos en el país.

A diferencia de lo que sucede con los demás sectores pertenecientes a los minerales no metálicos (cemento y vidrio), el sector de la cerámica incorpora mayor porcentaje de materias primas importadas: resinas, pigmentos y lacas que no se producen actualmente en el país.

Siete eslabones componen la cadena de la cerámica en el país, según el documento del departamento nacional de planeación, estos eslabones se pueden observar en la tabla 1: arcillas plásticas y fundentes, cerámica de arcilla común cocida, porcelana sanitaria, locería y otras cerámicas, baldosas y azulejos, y porcelana de uso industrial y de uso eléctrico.

La balanza comercial de la cadena de la cerámica presentó, para el período 2001-2003, un superávit promedio anual de

US\$36 millones. Las exportaciones de la cadena, durante los tres años, fueron en promedio US\$77 millones, mientras que

las importaciones alcanzaron en promedio los US\$41 millones.

Tabla 1. Comercio internacional de productos cerámicos en Colombia.

Comercio internacional				
Eslabón	Exportaciones		Importaciones	
	Valor (US\$ miles)	Participación (%)	Valor (US\$ miles)	Participación (%)
Arcillas plásticas	143	0,19	2028	4,99
Fundentes	261	0,34	1172	2,89
Cerámica de arcilla común cocida	992	1,29	1102	2,71
Porcelana sanitaria	25996	33,91	5051	12,44
Locería y otras cerámicas	11090	14,47	7736	19,06
Baldosas y azulejos	32718	42,68	21412	52,75
Porcelana de uso industrial y eléctrico	5456	7,12	2092	5,15
Total cadena	76657	100	40592	100

Tabla 2. Exportación de productos cerámicos en Colombia.

Exportaciones y principales destinos						
Eslabón	Exportaciones totales (US\$ miles)	Destinos (participación %)				
		Estados unidos	Venezuela	Ecuador	México	Otros
Arcillas plásticas	143	1,26	45,29	24,06	0	29,39
Fundentes	261	0	22,44	0,41	0	77,16
Cerámica de arcilla común cocida	992	37	1,6	10,7	0,9	49,8
Porcelana sanitaria	25996	60,37	8,79	5,49	0	25,35
Locería y otras cerámicas	11090	21,89	5,99	1,69	34,22	36,21
Baldosas y azulejos	32718	23,34	25,08	20,65	4,57	26,36
Porcelana de uso industrial y eléctrico	5456	42,37	23,93	6,15	9,93	17,62
Total cadena	76657	37,1	16,44	11,54	7,62	27,3

Como puede verse en la tabla 2, más de 70% de las exportaciones totales de la cadena durante el período se concentró en cuatro países de destino: Estados Unidos (37%), Venezuela (16%), Ecuador (12%), y México (8%).

Tres de los cinco eslabones de la cadena concentraron más del 90% de las exportaciones de cerámica, durante el período de referencia. Baldosas y azulejos fue el primero en exportaciones,

con US\$33 millones, que equivalen a 43% de las exportaciones de la cadena. En segundo lugar estuvo el eslabón porcelana sanitaria, con 34% de las exportaciones; y en tercero, el eslabón de locería y otras cerámicas, con 14% de las exportaciones de la cadena.

Desde la otra vía de los flujos comerciales, las importaciones, resulta importante destacar la participación de las importaciones del eslabón baldosas y

azulejos; que con US\$21 millones representó 53% de las importaciones totales de la cadena, durante los tres

años analizados como se puede observar en la tabla 3.

Tabla 3. Importación de productos cerámicos en Colombia.

Importaciones y principales proveedores						
Eslabón	Importaciones totales (US\$ miles)	Origen (participación %)				
		Estados unidos	China	España	Ecuador	Otros
Arcillas plásticas	2028	69,5	0,3	5,2	0	25
Fundentes	1172	25,9	0,5	21,6	0	52
Cerámica de arcilla común cocida	1102	3,4	71,4	2	0,4	22,8
Porcelana sanitaria	5051	2,8	2,4	0,2	62,8	31,8
Locería y otras cerámicas	7736	4,1	70,7	0,3	2,7	22,2
Baldosas y azulejos	21412	13,7	2,9	31,1	5	47,3
Porcelana de uso industrial y eléctrico	2092	24,8	4,5	0,6	0	70,1
Total cadena	40592	13,9	17,5	17,5	11	40,1

Las políticas recientes orientadas a estimular la construcción, tales como nuevas líneas de crédito para financiación y subsidios para la vivienda de interés social, las exenciones de impuesto a los bancos para las rentas del crédito hipotecario, hacen posible prever un buen comportamiento de las ventas del sector.

Los pisos de cerámica presentan una alta demanda en los Estados Unidos, situación que unida a las ventajas del Atpdea (Andean Trade Promotion and Drug Eradication Act), permitirá hacia el futuro seguir consolidando las exportaciones hacia ese país.

Tabla 4. Importaciones y principales proveedores de cerámica en Estados Unidos.

Importaciones y principales proveedores						
Eslabón	Importaciones totales (US\$ millones)	Origen (participación %)				
		China	Italia	México	España	Otros
Arcillas plásticas	7	4,16	0,37	2,38	5,14	87,95
Fundentes	110	38,8	0	6,32	0,38	54,49
Cerámica de arcilla común cocida	330	41,51	9,91	11,28	0,58	36,73
Porcelana sanitaria	386	11,25	1,28	47,6	0,08	39,79
Locería y otras cerámicas	1765	48,62	4,95	1,88	2,63	41,93
Baldosas y azulejos	1592	2,01	41,78	10,73	16,08	29,4
Porcelana de uso industrial y eléctrico	170	5,07	0,57	5,65	0,3	88,4
Total cadena	4358	25,73	18,15	10,13	7,02	38,98

La competitividad y experiencia del sector cerámico en los mercados internacionales es fuerte y lo favorece en el libre comercio. Con un TLC, el sector podría expandir su alcance geográfico pues hay

buenos precedentes. La calidad de su producción le ha permitido hacer maquila para empresas extranjeras.

Desde hace varios años, Locería de Colombia lo hace para marcas estadounidenses y europeas. Y recientemente, Cerámica Italia ganó un contrato para maquilar 20.000 metros cuadrados de pisos cerámicos bajo la marca de la estadounidense Florm, aunque con el sello "hecho en Colombia". Por otro lado, Corona aspira a crecer sus ventas externas 20% en los próximos cinco años, sobre todo a Estados Unidos.

Los cuatro principales proveedores de artículos de la cadena de la cerámica en Estados Unidos representan más de 60% de las importaciones y son, en su orden: China, Italia, México y España, como lo muestra la tabla 4.

La participación de los productos colombianos de cerámica en el mercado estadounidense es bastante reducida; las ventas colombianas apenas representan el 1% de las importaciones, siendo apenas comparable con las de Chile (0,33%) y las del llamado CA5 (Conformado por Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua) (0,54%).

Durante el período de análisis, 77% de las exportaciones colombianas de la cadena se concentraron en dos eslabones: baldosas y azulejos, y locería y otras cerámicas.

5. CONCLUSIONES

Se identificaron las empresas más representativas del sector de los cerámicos refractarios en las cuales se concentra en mayor porcentaje la fabricación de estos productos.

Se dio un breve resumen sobre materias primas y técnicas de fabricación utilizados para la producción de los elementos cerámicos más representativos en Colombia.

Se mostró algunos aspectos sobre la comercialización de los productos cerámicos refractarios en Colombia, dando a conocer aspectos como el valor de las exportaciones y los lugares hacia donde se exporta.

REFERENCIAS

- Web de Francisco Blanco Alvarez (F. Blanco Alvarez). En línea, [<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Refractarios.Lecion3.FabricacionProductosREFRACTARIOS.pdf>], consultado en 2013-10-05.
- Facultad de ingeniería universidad de buenos aires (F. d. I. U. d. B. Aires). En línea, [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19_Apunte%20Refractarios.pdf], consultado en 2013-10-05.
- Página personal de Jose Luis Mesa Rueda (J. L. Mesa Rueda). En línea, [http://joseluismesarueda.com/documentos/TEMA_7_001.pdf], consultado en 2013-04-10.
- F. Norton. *Cerámica Fina. Tecnología y aplicaciones*. Barcelona: Ediciones Omega S.A., 1975, pp. 78-90.
- D. Levy, G. Artioli, A. Gualtieri, S. Quartieri y M. Valle. *Chromium crystal chemistry mullite-spinel refractory ceramics*. Elsevier, p. 10, 1998.
- Departamento nacional de planeación. En línea, [<https://www.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/DDE/Ceramica.pdf>], consultado en 2014-04-08.