

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



TESIS

**“ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE REFRACTARIOS EN UN
REACTOR DE REDUCCIÓN DIRECTA DE MINERAL DE HIERRO”**

POR

ING. CINTYA PATRICIA VIZCAYA CEPEDA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

NOVIEMBRE, 2013

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



TESIS

**“ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE REFRACTARIOS EN UN
REACTOR DE REDUCCIÓN DIRECTA DE MINERAL DE HIERRO”**

POR

ING. CINTYA PATRICIA VIZCAYA CEPEDA

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, NOVIEMBRE, 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis, recomendamos que la tesis “**Análisis de la degradación de refractarios en un reactor de reducción directa de mineral de hierro**” realizada por la Ing. Cintya Patricia Vizcaya Cepeda sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales.

El Comité de Tesis

Asesor

Dra. Ana María Guzmán Hernández

Coasesor

Dr. Alan Castillo

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

DEDICATORIA

A Dios por nunca soltarme de su mano, mis papás y mi hermano por ser el motor de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi reconocimiento y mi gratitud a las siguientes personas por su extraordinario apoyo y sus contribuciones que sin duda alguna el resultado de esta tesis no hubiera sido el mismo sin el apoyo de ustedes, les agradezco hacer posible este escalón más en mi vida:

Dios por nunca soltarme de su mano, porque a pesar de la tempestad siempre está conmigo, por ser mi guía día con día, por llenarme de tantas bendiciones.

Mario Vizcaya García, Irma Yolanda Cepeda Rios, Papy gracias por enseñarme a mantener ese coraje, por recordarme lo mucho que valgo y lo lejos que puedo llegar siempre y cuando me lo proponga, Monriks gracias por creer en mí, por motivarme cada que creía que no podía más, por recordarme conservar la actitud ante cualquier circunstancia, saben que los amo que son lo mejor que Dios me regaló.

Mario Alberto Vizcaya Cepeda, Hermanito gracias por ser un gran ejemplo en mi vida, por darme tanto, sé perfectamente todo lo que arriesgaste por mí, te amo mucho y más porque junto con **Alicia** me dieron la motivación más hermosa de mi vida **Daniela**, las quiero con todo mi corazón.

Fernando Gutiérrez Garza, eres ese complemento de mi vida que me ayuda a ser mejor persona y profesional, gracias por apoyarme en esta etapa de mi vida, y sobre todo por amarme tanto así como yo lo siento por ti.

Mi familia, Mis abues (mis angelitos), mis tías, mis tíos, Jorge, Noé, Said.

A la FIME por ayudarme a forjar la estructura de vida profesional, **AL CONACYT** por darme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado, así como al **CIIDIT** por el apoyo para realizar nuestras pruebas.

Muy en especial a la **Dra. Ana María Guzmán** por cada una de sus asesorías pero sobre todo por ser una gran amiga, consejera, por convertirse en una persona muy especial en mi vida, **Jesús Oviedo** sin su buen sentido del humor nunca hubiera acabado las pruebas, agradezco su apoyo día a día los aprecio mucho.

A esas personas que marcaron mi vida, que siempre me acompañaron en la Universidad, compañeros y profesores: **Lizangela** sabes me llevo a una gran amiga, **Hazael** siempre te llevare en el corazón fuiste un gran apoyo, **Cecy** mi vecina favorita, **Rene**(Chikitin),Mi **Podriz** como roca, **Dr. Juárez** por ese buen karma , **Dr. Pérez** usted fue el culpable que iniciara este proyecto, gracias, **Joaquín, Edgar, Dr. Tushar, Dr. Alan Castillo, Dr. Covarrubias** esa pasión por hacer las cosas nunca se me va olvidar, un gran maestro.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.....	6
2.1 Concretos refractarios silico-aluminosos con cemento de aluminatos de calcio	6
2.2 Refractarios silico-aluminosos con sílica coloidal	9
2.2.1 Fases típicas en los refractarios silico-aluminosos con silica coloidal.....	13
CAPÍTULO 3. MARCO TEORICO.....	15
3.1 Concretos Refractarios.....	16
3.2 Reactor (Horno de Reducción Directa).....	19
3.3 Concreto base sílice coloidal.....	20
3.4 Proceso de hidratación.....	22
3.5 Secado y curado.....	25
3.6 Quemado.....	26
3.7 Agregados.....	27
3.8 Aditivos.....	28

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
4.1 Materias primas	30
4.2 Caracterización de los refractarios.....	31
4.2.1 Análisis granulométrico.....	31
4.2.2 Análisis químico.....	33
4.3 Obtención de probetas.....	33
4.3.1 Especificación del tamaño de probetas.....	33
4.3.2 Preparación u obtención de probetas.....	33
4.4 Porosidad y densidad.....	35
4.5 Microscopio Óptica.....	36
4.6 Microscopia Electrónica de Barrido.....	37
4.7 Difracción de Rayos X.....	37
4.8 Resistencia a la compresión en frío.....	38
4.9 Modulo de ruptura en frío.....	39
4.10 Prueba de penetración y ataque.....	40
CAPÍTULO 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	42
5.1 Análisis granulométrico.....	42
5.2 Análisis químico.....	44
5.3 Prueba de trabajabilidad.....	45

5.4 Secado y quemado.....	46
5.5 Porosidad y Densidad.....	49
5.6 Microscopía óptica	52
5.7 Microscopía Electrónica de Barrido SEM.....	53
5.8 DRX.....	59
5.9 Resistencia a la compresión en frío.....	66
5.10 Modulo de ruptura en frío.....	68
5.11 Ataque químico.....	70
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES.....	77
REFERENCIAS.....	79
ÍNDICE DE TABLAS.....	87
ÍNDICE DE FIGURAS.....	88
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	91
INDICE DE GRAFICAS.....	92
APENDICE.....	93

RESUMEN

Los concretos son mezclas de materiales previamente molidos y cribados, con agentes químicos y agua que reaccionan para dar una fuerte liga a temperatura ambiente. Tradicionalmente, los concretos refractarios se fabrican con cementos de aluminatos de calcio como ligante, sin embargo las curvas de secado implican largos tiempos, lo cual incrementa el proceso de producción durante su utilización en hornos industriales. Lo anterior ha promovido el desarrollo de concretos refractarios ligados con silica coloidal que señalan procesos de secado más sencillos.

En base a lo anterior, el presente estudio se enfoca en el análisis de la degradación de 3 materiales refractarios aislantes para aplicación en hornos de reducción directa en donde la temperatura máxima de trabajo oscila entre los 1000 y 1100°C. Los sistemas evaluados corresponden a dos concretos refractarios aislantes uno con liga cemento de aluminato de calcio (Muestra A) y otro con liga silica coloidal (Muestra B), así como un ladrillo refractario aislante (Muestra C).

Los resultados obtenidos señalan mejores propiedades mecánicas del concreto base silica coloidal respecto al concreto base cemento de aluminato de calcio.

CAPITULO I

INTRODUCCION

Sin duda alguna a lo largo de nuestras vidas hemos admirado grandes construcciones arquitectónicas, obras o simplemente procesos industriales donde vemos que frecuente están conformados de diferentes materiales y entra la duda de cuál es la diferencia entre un cemento y un concreto y más aún si agregamos el término de concretos refractarios.

Podemos definir el cemento como un aglomerante que fragua y se endurece por sí mismo o se une con otros materiales. La aplicación más conocida de los cementos se encuentra en construcción, se caracterizan como hidráulicos o no hidráulicos y sobre todo para la producción de morteros y concretos.

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen después de combinarse con el agua. La mayor parte de la construcción se realiza con cementos hidráulicos base cemento Portland, el cual consiste de silicatos de calcio (por lo menos 2/3 en peso), así como cementos no hidráulicos los cuales incluyen el uso de materiales no hidráulico tales como emplastos de cal y yeso. ^[1,2]

Los concretos son la mezcla de cemento, grava y arena, en donde el cemento funciona como ligante para la unión de los diferentes tipos de agregados.

La definición de concreto refractario los considera como materiales que poseen la característica clave de la refractariedad, es decir, son difíciles de fundir. Los cerámicos refractarios son sustancias inorgánicas, individuales o polifásicas que se encuentran en la naturaleza, los cuales son procesados a alta temperatura, empleados siempre en procesos que implican el tratamiento o exposición a temperaturas elevadas, por ejemplo, la fundición de metales, la sinterización de la cerámica, la fusión del vidrio, el procesamiento de hidrocarburos y productos químicos, entre otros.

La selección de los materiales refractarios varía ampliamente dependiendo de las aplicaciones del proceso, así como sus temperaturas y la composición química de los materiales que se procesan. Esta incluye la composición de las atmósferas que se desarrollan durante el procesamiento.^[3]

Los concretos refractarios han evolucionado tecnológicamente al requerirse mayor rendimiento en las diferentes áreas de aplicación de la industria o cuando se buscan técnicas y métodos de instalación con mayor eficiencia. La mayor parte de concretos refractarios se basan en cementos de aluminatos de calcio, aunque algunas aplicaciones requieren el uso de otros materiales, tales como óxido de magnesio.

Sin embargo existen concretos de alta tecnología como son los concretos de bajo cemento (BC), ultrabajo cemento (UBC) y sin cemento (SC) que requieren el uso de técnicas de instalación especial como el mezclado intenso, vibrado, bombeado y esreado para su máximo aprovechamiento, estos concretos presentan características de quemado rápido (con fibras orgánicas para evitar el riesgo de explosiones por acumulación de vapor).

En ocasiones es necesaria la incorporación de fibras metálicas o de carbón para reforzar el concreto refractario y evitar el disgregamiento a temperaturas superiores a 800°C. Así como estos concretos de alta tecnología también se han modificado algunos otros factores para obtener mejores propiedades en los concretos refractarios ^[6,7].

Durante el desarrollo de los concretos refractarios es importante mencionar el uso de sílica coloidal para la elaboración de concretos, con lo que se espera que tengan mejores propiedades mecánicas que los elaborados con CAC, debido a que durante la etapa de secado, los grupos hidroxilo en la superficie de las partículas generan enlaces de siloxano (Si-O-Si), lo que resulta en una red tridimensional de partículas de SiO₂. La estructura resultante es altamente permeable y permite que la composición se seque fácilmente, reduciendo las grietas y desprendimientos explosivos aparte que este también nos beneficiaría en el ahorro de la energía ^[5].

Dentro los concretos refractarios en cuanto a la clasificación del peso podemos definirlos en 3: Concretos densos, concretos semi-aislantes así como también en los aislantes esto depende de la densidad y porosidad que tenga cada uno, es decir un aislante tiene una densidad baja pero una alta porosidad a diferencia de los concretos densos.

En el presente trabajo se evaluaron tres sistemas diferentes de materiales refractarios aislantes: un concreto silico-aluminoso base sílica coloidal (Material B) considerado cero cemento y de alta tecnología, el ya mencionado como concreto convencional CAC (Material A) y otro material en forma de ladrillo más rico en Al₂O₃ y con una mayor porosidad (Material C).

Por lo mencionado anteriormente, el objetivo de este trabajo es realizar el análisis comparativo de la degradación de refractarios aislantes utilizados en reactores de reducción directa.

CAPITULO II

ANTECEDENTES

2.1 Concretos Refractarios Silico- Aluminos con cemento de Aluminatos de Calcio.

Los concretos refractarios son formulaciones complejas, que requieren materias primas de alta calidad y un control de diferentes tamaños de agregados, aditivos y aglutinantes. Básicamente, los concretos refractarios son producidos por la mezcla de cemento de aluminato de calcio (CAC), ciertas materias primas finas, agregados, aditivos y agua.

Después de mezclar las materias primas sólidas (cemento, agregados y partículas finas), se añade agua, provocando el fenómeno de hidratación, y formando una estructura rígida en el concreto fresco, que indirectamente influirá en las propiedades moldeables después de la cocción. Varias fases se pueden formar durante la hidratación, de composición química y mineralógica distintas. El material formado tiene diferentes cantidades relativas que dependen de varios factores, por ejemplo la temperatura, el curado, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (C / A), la

cantidad de agua, y la presencia de impurezas tanto en la solución de aluminato como en la superficie de los agregados y otras materias primas ^[10-11].

Después del curado, un material refractario moldeable es sometido a tratamiento a alta temperatura que, en función de la temperatura alcanzada, provoca alteraciones de las fases durante el curado de los concretos refractarios, así como la variación de su composición química. El comportamiento reológico de un colable varía, particularmente con respecto al agua. Estas variaciones conducen a cambios microestructurales que pueden mejorar o reducir la resistencia mecánica del refractario, y conducen a variaciones en su densidad, distribución de poros, y el tamaño de poro.

Cuando los concretos refractarios o pastas que contienen CAC son tratados con calor, se someten a modificaciones microestructurales que conducen a un cambio en su comportamiento mecánico.

La investigación ha demostrado ^[5] que cuando estos materiales se calientan entre 200 y 300 ° C, su resistencia mecánica se reduce en relación con el material que sólo se cura, lo que contribuye a un aumento de la porosidad causada por la pérdida de agua de hidratación ^[5].

Los cementos aluminosos (sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) de alta pureza están compuestos químicamente de CaO y de Al_2O_3 y mineralógicamente de aluminatos de calcio ($12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO}\cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$). Algunos cementos de menor pureza incluyen cantidades relativamente altas de SiO_2 , Fe_2O_3 , y de SO_3 , formando silicatos de calcio tales como la Gehlenita ($2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) y la Anortita ($\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$) y algunos calcio aluminatos de hierro o sulfato, alterando el comportamiento reológico de los cementos y concretos.

También se ha logrado entender mejor los efectos de la carbonatación de los hidratos de calcio y alúmina por la absorción del monóxido de carbono del aire. De las fases mineralógicas de aluminato de calcio se conoce que mientras más CaO esté presente en el cemento la reactividad de éste con el agua es

mayor, así se tiene que la fase $C_{12}A_7$ se regula en cantidad para a la vez controlar el tiempo de fraguado del cemento/concreto.

La ausencia de $C_{12}A_7$, causa tiempo de fraguado cortos y en cantidades excesivas puede causar un fraguado espontáneo. La fase CA es la fase mineralógica base de los cementos de aluminatos de calcio y su reactividad con el agua establece el comportamiento reológico de estos cementos. La fase CA_2 está presente en los cementos de alta pureza de muy bajo nivel de impurezas de sílice, óxidos de hierro y de titanio y presenta baja reactividad con el agua [6-7].

Los concretos refractarios se componen de fracciones de partículas finas a muy gruesas. La fracción fina está constituida principalmente de materias primas y cemento de aluminato de calcio, que se hidrata, formando enlaces químicos que endurecen el concreto durante el proceso de curado.

Por otro lado, la energía de fractura se puede definir como el trabajo por unidad de área de la fractura proyectada necesaria para propagar una grieta estable, y está representado por la suma de energías distintas consumidos durante el proceso de propagación de grietas. El valor de γ_{wof} se puede determinar a partir de la curva de carga-desplazamiento obtenido de pruebas estables de propagación de grietas y de la siguiente ecuación [6-8].

$$(Ecuacion2.1) \quad \gamma_{wof} = 1/2A \int P_M d\delta$$

Donde A es el área proyectada de la superficie de fractura, PM es la carga vertical aplicada por la máquina de ensayo, y δ es el desplazamiento del accionador de la máquina. El valor de la integral en la ecuación (2.1), se determina por el área total bajo la correspondiente curva de carga-desplazamiento.

2.2 Refractarios Silico-Aluminosos a Base de Silica Coloidal

Las razones para el creciente mercado de los refractarios monolíticos, a expensas de los ladrillos tradicionales, son su fácil producción, instalación barata y productos similares de rendimiento en forma. Un avance significativo en la tecnología de monolíticos es la corriente de alimentación de los agregados y aditivos dispersantes, así como en las técnicas de colocación.

El cemento de aluminato de calcio es el aglutinante hidráulico más usado en la formulación de concretos refractarios. Sin embargo, cantidades superiores a CAC 2-3% en peso de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-SiO}_2$ pueden inducir la formación de líquido a temperaturas más bajas. Otras preocupaciones importantes para los concretos de alto contenido CAC son las etapas de curado y deshidratación, que deben ser realizadas con cuidado con el fin de reducir un desprendimiento explosivo.

Con respecto a todos estos inconvenientes de los aglutinantes hidráulicos, en un estudio se menciona la aplicación de una suspensión coloidal nanoestructurada como un aglutinante para composiciones moldeables de refractarios. Por otro lado, las Silices Coloidales en forma de sol son estables a base de suspensiones de agua, que contienen hasta 50% en peso de partículas esféricas nanométricas de sílice amorfa.

Estos materiales han sido ampliamente utilizados en las formulaciones de recubrimientos, catalizadores, papeles y tratamientos anti-suelo, así como aglutinantes de alta temperatura para el aislamiento fibroso y piezas moldeadas de inversión ^[5]. Aunque la aplicación de sílice coloidal como un sistema de unión refractario ha sido conocido durante mucho tiempo en la industria de materiales refractarios, poca investigación sistemática que ha encontrado en la literatura abierta.

Grandes esfuerzos se han llevado a cabo con el fin de reemplazar el cemento de aluminato de calcio por otros tipos de aglutinantes en concretos refractarios.

Contenidos de CAC mayores que 2-3% en peso puede implicar dificultades para la etapa de secado y la refractariedad del sistema cuando está presente la microsílíce.

En el trabajo de M.R. Ismael y colaboradores ^[5,18] se aplica una suspensión coloidal nanoestructurada como un aglutinante para la composición de concreto refractario. La sílice coloidal son suspensiones estables a base de agua que, cuando se combinan con partículas moldeables, proporciona, entre otras ventajas, una mayor velocidad de secado y sinterización para el producto.

En el trabajo que realizaron, el rendimiento del CAC, HA y CS como agentes aglutinantes en concretos refractarios se compararon y analizaron, los resultados mostraron que el uso de sílice coloidal en la composición de material refractario moldeable puede ser ventajoso en comparación con el cemento refractario y la alúmina hidratable, los valores de resistencia mecánica como una función del tiempo de curado para el sistema CS mostró una menor sensibilidad a las condiciones de curado, el mecanismo de gelificación de la composición de sílice coloidal contenía una alta permeabilidad, y ayudaba a evitar el desprendimiento. El proceso de secado se vió favorecido debido a la pérdida de agua que se produjo durante el curado en aire. Aunque la sílice coloidal es un sistema nanométrico, los resultados obtenidos mostraron que su contribución al empaquetamiento era baja.

Por lo tanto, valores superiores de resistencia mecánica se podría lograr con una adecuada distribución de tamaño de partículas, lo que daría lugar a una menor porosidad y por consiguiente una mayor calidad en el producto final.

Cuando se combina con otras partículas sólidas, la sílice coloidal puede ser unida entre sí en cadenas ramificadas, en un proceso conocido como gelación, que puede ser inducida por la eliminación de agua. Durante la etapa de secado, los grupos hidroxilo (Si-OH) sobre la superficie de las partículas de generar enlaces de siloxano (Si-O-Si), lo que resulta en una red tridimensional.

La gelificación también puede ser inducida por los cambios de pH, y una sal de adición de agua o disolvente orgánico miscible, llamados agentes gelificantes. Con la selección apropiada de estos agentes o la variación de pH, el coloide se gelifica alrededor de las partículas sólidas que proporcionan esfuerzo mecánico al sistema después del secado. La estructura resultante es altamente permeable y permite que la composición se seque fácilmente, reduciendo las grietas y desprendimientos explosivos. Durante la sinterización, su superficie puede inducir la formación de mullita en sistema a base de alúmina, lo que mejora la resistencia química y las propiedades de resistencia en caliente^[2].

Como el uso de sílice coloidal en concretos refractarios puede reducir los problemas presentados por los aglomerantes hidráulicos actuales.

Los resultados obtenidos por otros investigadores ^[5,8,17,17 y 18] ya estudiados en algunos otros artículos y publicaciones de revistas reconocidas muestran que el uso de sílice coloidal en composiciones refractarios moldeables puede ser ventajoso en comparación con el uso de cemento refractario y la alúmina hidratable.

El mecanismo de gelificación de la sílice coloidal contiene una estructura que nos beneficia para tener una alta permeabilidad, ayuda a obtener una eliminación más rápida del agua sin perjudicar el espécimen y beneficiándolo a no permitir el fácil desprendimiento. El proceso de secado se vio favorecido debido a la pérdida de agua que se produjo durante el curado en aire abierto.

Un gel es un sistema coloidal donde la fase continua es sólida y la dispersa es líquida. Los geles presentan una densidad similar a los líquidos, sin embargo su estructura se asemeja más a la de un sólido. El ejemplo más común de gel es la gelatina comestible.

Las partículas de tamaño nanométrico de sílice coloidal también mejoran la reactividad de los sistemas, el aumento de la sinterización, promoviendo la formación de mullita. Sin embargo, el nivel de porosidad desarrollado era demasiado alto. Aunque la sílice coloidal es un sistema nanométrico, los

resultados obtenidos mostraron que su contribución al empaquetamiento era baja^[5].

Por lo tanto, valores superiores de resistencia mecánica se podrían lograr con una adecuada distribución de tamaño de partículas, lo que daría lugar a una menor porosidad.

Las rutas de producción de la sílice coloidal pueden conducir a soles con distinta concentración de sólidos, el tamaño y forma de partículas así como el pH ^[15].

Las partículas de sílice coloidal pueden ser unidas entre sí mediante diferentes mecanismos de ajuste, como gelificante y la coagulación, proporcionando una resistencia inicial cuando se aplica a sistemas de cerámica ^[18].

En cuanto a la gelificación, la interacción de las partículas de sílice provoca la unión siloxano (Si-O-Si) y la acumulación de una red tridimensional. En cuanto a la coagulación, un aditivo (normalmente electrolitos) une las partículas que causan apretadas matas. Ambos mecanismos de fijación están influenciados por el cambio de pH, el tamaño de partícula y su concentración, la presencia de electrolitos y líquidos orgánicos, y la temperatura ^[15]. Además de su efecto aglutinante, sílice coloidal también se informa como un dispersante para polvos cerámicos^[15-17].

A pesar de las ventajas relativas de procesamiento refractario moldeable y propiedades presentes en la literatura con el uso de sílice coloidal como un aglutinante ^[12], una mayor comprensión de su mecanismo de consolidación y la interacción con otros sistemas de cerámica todavía se requiere.

2.2.1 Fases Típicas de los Refractarios Silico-Aluminosos a Base de Sílice Coloidal.

En un estudio ya elaborado se mostró que se obtenía baja contracción en refractarios que contenían alta alúmina y el mezclado era con sílice coloidal.

Las fases formadas durante la hidratación o tratamiento térmico fueron estudiados por Difracción de rayos X y Espectroscopia de Infrarrojo y las fases principales de hidratos eran $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-10\text{H}$ (hidratación a 20°C) y $3\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-6\text{H}_2\text{O}$ más $2\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-8\text{H}_2\text{O}$ (hidratación a 50°C). $12\text{CaO}-7\text{Al}_2\text{O}_3$ fue la primera fase que cristalizó durante los tratamientos térmicos. A $T > 1000^\circ\text{C}$, $12\text{CaO}-7\text{Al}_2\text{O}_3$ reacciona con la sílice para formar anortita ($\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$) y gehlenita ($2\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{SO}_2$).

Parte de la sílice coloidal se combina con calcio y alúmina para formar cristobalita, que se estabiliza en su forma Beta. Los fenómenos de cristalización son benéficos para reducir la contracción.

La densificación y, por tanto, la contracción, son limitadas por los fenómenos asociados con la recristalización de sílice para cristobalita.

Las fases hidratadas se encuentran por lo general con el siguiente desarrollo:

20°C : CAH_{10} es el hidrato cristalizado principal y CA se consume más rápido que CA_2 , que no puede convertir a CAH_{10} .

50°C : C_2AH_8 se forma primero, y luego rápidamente se convierte en C_3AH_6 y gibbsita AH_3 . La reacción entre sílice y cemento conduce a la formación de C_2ASH_8 (Stratlingite)

Stratlingite se considera que tiene una influencia beneficiosa sobre la resistencia mecánica. Es una de las razones por las que muchos estudios han sido dedicados a la incorporación de sílice coloidal en el HAC (Cemento de Alta Alúmina) para el fabricación de materiales refractarios moldeables. ^[8]

CAPITULO III

MARCO TEORICO

Los concretos son mezclas de materiales previamente molidos y cribados, con agentes químicos y agua que reaccionan para dar una fuerte liga a temperatura ambiente. Pueden ser instalados por vaciado, vibrado o por medio de proyección neumática. Se emplean fundamentalmente en construcciones monolíticas y también para fabricar refractarios moldeados que se colocarán en verde en los hornos; para formar paredes monolíticas uniformes y reparar el material desgastado. Algunas de sus ventajas más importantes son el fraguado hidráulico, la moldeabilidad y la facilidad de aplicación. Existe una gran variedad de concretos que depende de la aplicación como por ejemplo los concretos portland, concretos refractarios, concretos para uso de construcciones como puentes, concretos que soportan la humedad generalmente utilizados en centros acuáticos etc. ^[22]

3.1 Concretos Refractarios

Concretos Refractarios son materiales con microestructuras complejas que consisten en una población de partículas muy gruesas llamadas agregados (en el orden de milímetros de tamaño) y una fracción fina (que puede ser tan fina como de tamaño nanométrico), llamada la matriz, que interconecta la partículas más gruesas del material. La fracción fina promueve la formación de un enlace químico a baja temperatura (a través de la formación de hidratos, que son responsables de la rigidez del material) y la formación del enlace o liga cerámica a alta temperatura (deshidratación, seguido de sinterización de las partículas). Los refractarios se aplican con frecuencia en los procesos que implican altas temperaturas y ambientes agresivos sujetos a choques térmicos y corrosión, como en la producción de metales, vidrios, cementos y derivados de aceite^[6].

Inicialmente, se utilizaron materiales refractarios en forma de ladrillos de revestimiento del horno. En 1914, una nueva forma de revestimiento se presentó comercialmente, lo que lleva a la aparición de los llamados monolitos por la que una masa fluida de agregado refractario se colocó dentro del horno, formando una pared entera sin costuras, que hizo que la aplicación de estos materiales más eficiente. Estos materiales son los llamados concretos refractarios.

Los concretos refractarios se clasifican de acuerdo a su composición química, a su peso, a la cantidad de óxido de calcio que contiene y a su forma, los detalles se presentan a continuación:

	Denominación	Cantidad de CaO (%)	Cantidad Tipica de Cemento(%)	
• Por de	Convencional	> 2-5	>8.0	su contenido CaO:
	Bajo Cemento	1.0 a 2.5	5 a 8	

A continuación se muestra una tabla de la clasificación de los Concretos Refractarios en cuando al contenido de CaO, en nuestro estudio manejamos los concretos de cero cemento que son los que utilizan como ligante la silica coloidal y los otros dos materiales que entran en la denominación de convencionales.(Ver tabla 1y2).

Tabla 1. Clasificación de concretos en función del contenido de CaO

Ultrabajo	.2 a 1.0	1 a 5
Cemento		
Cero Cemento	< 0.2	<1.0

Tabla 2. Clasificación de Concretos Refractarios en cuanto a su Porosidad.

Clasificación	% de Porosidad
Densos	< 22%
Semi-aislantes	40 - 50%
Aislantes-ligeros	> 60%

En este estudio se analizaron semi-aislantes (Material A y B) y un producto formado aislante- ligero (Material C).

- **Por su forma**

En este rubro se consideran productos conformados o **productos formados** en la forma final en la cual serán usados (hay ladrillos o formas especiales de varias dimensiones y formatos), **productos no conformados** (son hechos por vaciado, apisonados, cementos, morteros, pastas, plásticos) estos generalmente consisten de mezclas pulverizadas listas para ser usadas, vendidas en bolsas por lo que requieren de forma antes de ser usados, y por

ultimo pueden ser productos semirígidos que forman parte de una categoría de productos conformados separadamente, los cuales pueden ser deformados durante el proceso: en general se refiere a cerámicos basados en materiales a base de fibras vendidas en la forma de placas o panales.

- **Por su composición mineralógica**

La clasificación de los concretos refractarios puede ser difícil debido a que existe una amplia variedad en el mercado, pueden ser clasificados de diversas maneras dependiendo de su composición química o mineralógica como ya se mencionaba a principio de este capítulo. Una clasificación adecuada deberá incluir tanta información como sea posible. En la tabla 3 se puede apreciar la clasificación de los concretos refractarios dependiente su composición mineralógica^[10,27y28].

Tabla 3. Clasificación de Concretos Refractarios en cuanto a su porosidad.

Clasificación	% aproximados
Aluminosos	30- 40% Al ₂ O ₃
Alta alúmina	>56-50% Al ₂ O ₃
Silico-aluminosos	10-30% Al ₂ O ₃ >85%SiO ₂
Bajo contenido de Hierro	< 1.5% Fe ₂ O ₃
Silicosos	>85% SiO ₂

3.2 Reactor (Horno de Reducción Directa)

El proceso de HYL de reducción directa es conocido mundialmente, en este se alimenta al reactor con pellets de mineral de hierro que se transforman en hierro esponja al quitarles el oxígeno mediante un gas reductor. El gas reductor se produce al reaccionar el gas natural con vapor de agua en el reformador. Los equipos principales de este reactor son: reformador, calentador, enfriadores, absorbidora de CO₂, compresores y reactor.

El reactor consiste en un recipiente de acero recubierto con material refractario que van a estar en contacto con el mineral de hierro o con el hierro metálico según sea su posición en el reactor^[26]. A continuación se muestra una imagen esquemática de los componentes del horno de reducción directa típico (Figura 1), se puede apreciar en la parte de arriba una sección oscura que es el contorno del reductor es ahí la parte donde aplicaremos nuestros concretos refractarios estudiados, cabe mencionar que nuestros materiales son aislantes es decir irán después de los concretos más densos que son los que están directamente en la cara de trabajo, nuestros materiales estarán en contacto con el recubrimiento metálico (de acero) del reactor de reducción directa.

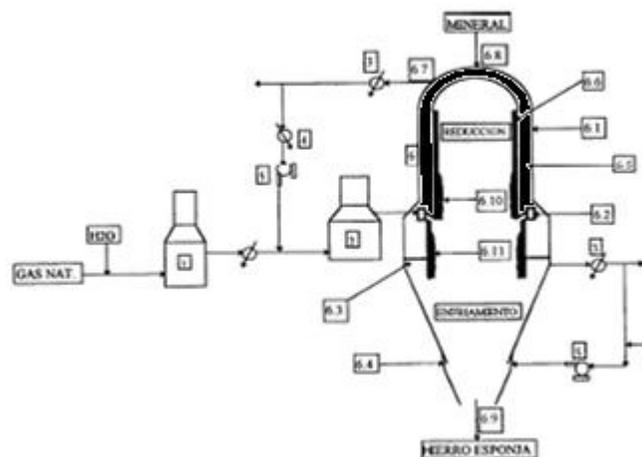


Figura 1. Esquema del reactor de reducción directa. Las partes principales son: (1) reformador, (2) calentador, (3) condensador de agua, (4) absorbidora de CO₂, (5) compresor, (6.1) cuerpo

de reactor, (6.2) entrada de gas, (6.3) salida de gas de enfriamiento, (6.4) entrada de gas de enfriamiento, (6.5) aislante, (6.6) capa de ladrillo en contacto con hierro esponja, (6.7) salida del gas reductor, (6.8) entrada del mineral y (6.9) salida del hierro esponja.

3.3 Concreto a base de Sílice coloidal

Las sílices coloidales son suspensiones estables a base de agua que, cuando se combinan con partículas moldeables, proporcionan algunas ventajas una de ellas muy favorable para nuestro proceso es la de una mayor velocidad de secado y sinterización para el producto.

La sílice coloidal en forma de sol es estable a base de suspensiones de agua, que contienen hasta 50% en peso de partículas esféricas nanométricas de sílice amorfa (8-15 nm de diámetro). Estos materiales han sido ampliamente utilizados en las formulaciones de recubrimientos, catalizadores, papeles y tratamientos en el suelo así como aglutinantes de alta temperatura para el aislamiento fibroso y piezas moldeadas de inversión.

Cuando se combina con otras partículas sólidas, la sílice coloidal puede ser unida entre sí en cadenas ramificadas, en un proceso conocido como gelación, que puede ser la eliminación de agua. Durante la etapa de secado, los grupos hidroxilo en la superficie de las partículas generan enlaces de siloxano (Si-O-Si), lo que resulta en una red tridimensional de partículas de SiO₂.

La gelación también se puede inducir por cambios de pH y la adición de disolventes orgánicos, nombrados como agentes gelificantes. Con la selección apropiada de estos agentes o la variación de pH, el coloide se gelifica alrededor de las partículas sólidas y proporcionan resistencia mecánica al sistema esto se lleva a cabo después del secado. La estructura resultante es altamente

permeable y permite que la composición se seque fácilmente, reduciendo las grietas y desprendimientos explosivos. Durante la sinterización, el área superficial puede inducir la formación de mullita en el sistema a base de alúmina que promueve la resistencia química y las propiedades de resistencia en caliente. ^[5]

En la literatura encontramos que tiene muy buenas propiedades con estos materiales y un ahorro de energía considerable dado a su tiempo reducción en el secado.

3.4 Proceso de Hidratación

El proceso típico de hidratación se caracteriza por factores como la trabajabilidad ^[21], la determinación del tiempo de fraguado (Aguja de Vicat) y el desarrollo de propiedades mecánicas.

Las propiedades reológicas de la pasta de cemento influyen fuertemente en la manejabilidad del concreto. Se sabe que los primeros procesos de hidratación alteran la composición de fase y la microestructura de las pastas de cemento, estos procesos pueden afectar el comportamiento de fluidez y el ajuste de la pasta de cemento. ^[19]

El tipo de cemento y su proporción en la mezcla seca determina la cantidad de agua que es necesario agregar para lograr la consistencia, fluidez y tiempo de fraguado de la mezcla.

La hidratación comienza tan pronto como el cemento entra en contacto con el agua, Inicialmente con su adicción, ocurre una disolución rápida de las fases anhidras y se forma una solución saturada de iones, específicamente Ca^{2+} y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, a continuación se originan productos de hidratación amorfos como geles de hidróxido de aluminio y CAH_{10} ($\text{CaAl}_2\text{O}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$) que forman una capa hidroxílica de $\text{Ca}(\text{Al}(\text{OH})_4)_2$ que recubre la superficie de las partículas del CA anhidro. En una segunda fase, denominada de nucleación, la velocidad global de la reacción aumenta. Los hidratos CAH_{10} , C_2AH_8 ($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_7\cdot\text{H}_2\text{O}$), C_3AH_6 ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{OH})_{12}$) y AH_3 $\text{Al}(\text{OH})_3$ amorfos, nuclean y cristalizan a través de un mecanismo de disolución-cristalización que depende del grado de supersaturación de la solución, de la temperatura y del tiempo de reacción.

Durante este proceso la capa de hidratos amorfos formados en la superficie del cemento anhidro crece lentamente alcanzando un tamaño crítico a partir del cual se rompe por acción del agua ocluida en su interior. El inicio de la tercera fase se da con la ruptura de la capa hidroxílica y la precipitación masiva de los hidratos cristalinos formados en la superficie de las partículas del cemento, con un segundo desprendimiento de calor, seguido de una disminución drástica de la velocidad de reacción. (Ver figura 2)

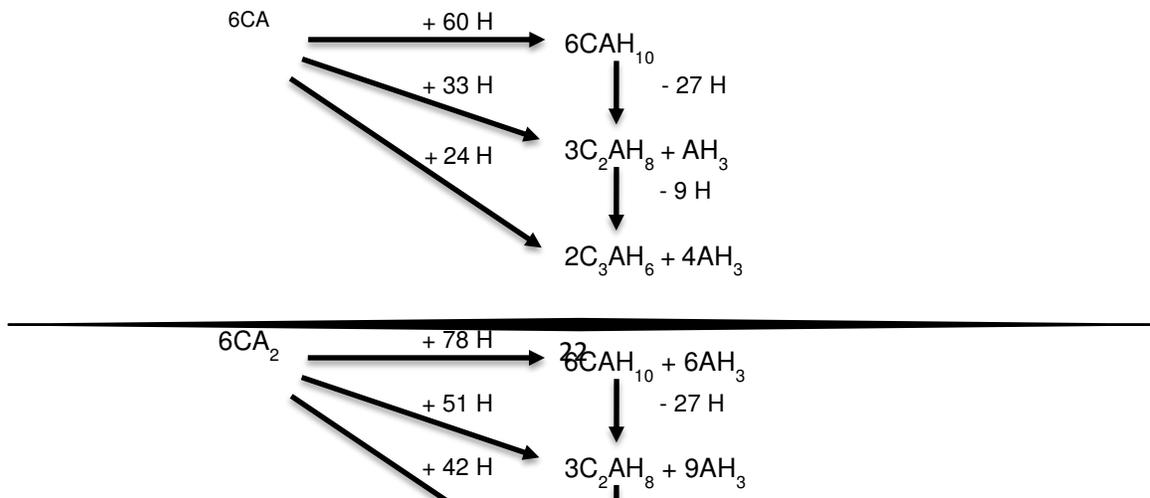


Figura 2. Proceso de reacción de los aluminatos de calcio

Hidratación del Monoaluminato de calcio - CaAl_2O_4 (CA). En contacto con agua a temperaturas menores a 20°C , se hidrata lentamente formando una mezcla de CAH_{10} hexagonal, un gel de composición AH_x , AH_3 cristalino, pequeñas cantidades de C_2AH_8 y CA anhidro. A temperaturas de hidratación superiores a 25°C el hidrato CAH_{10} se transforma en C_2AH_8 hexagonal, que por envejecimiento después de 24 h pasa a la forma estable C_3AH_6 cúbica.

Si la hidratación del monoaluminato cálcico, ocurre a temperaturas superiores a 30°C , los principales productos de hidratación formados son C_3AH_6 cúbico y pequeñas cantidades de geles de hidróxido de aluminio, hidróxido de aluminio cristalino (gibbsita) y C_2AH_8 hexagonal en pequeñas cantidades que al transcurrir el tiempo, o aumentar la temperatura, se disuelve y recristaliza en forma de C_3AH_6 cúbico^[29,30]. A temperaturas superiores a 50°C el fenómeno de

conversión se acelera convirtiendo totalmente la pasta de cemento en C_3AH_6 cúbico y AH_3 después de 24 h ^[31].

Hidratación del Dialuminato de calcio - $CaAl_4O_7$ (CA_2). El CA_2 puro, reacciona lentamente con agua, a temperaturas menores de 21°C, formando CAH_{10} , AH_3 (gibbsita cristalina) y gel de hidróxido de aluminio, con pequeñas cantidades de C_2AH_8 .

Los productos de hidratación del CA_2 son los mismos que los del CA , y también sufren el fenómeno de conversión en función del tiempo y de la temperatura, transformándose los hidratos hexagonales inicialmente formados, en C_3AH_6 cúbico, y una mayor cantidad de AH_3 . En presencia de CA puro, el CA_2 se hidrata a una velocidad moderada ^[29,32].

Hidratación del Heptaluminato Dodecalcico - $Ca_{12}Al_{14}O_{33}$ ($C_{12}A_7$). Este compuesto se hidrata más rápidamente que el CA y CA_2 . A temperaturas menores de 21°C, su principal producto de reacción es una mezcla de gel, hidróxidos de aluminio, CAH_{10} y C_2AH_8 que en función del tiempo y de la temperatura se convierten en C_3AH_6 cúbico, mientras que, el hidróxido de aluminio amorfo cristaliza en forma de AH_3 . Debido a la elevada proporción de calcio presente en su fórmula ($CaO/Al_2O_3 = 0,95$) este aluminato de calcio forma menor cantidad de gel de hidróxido de aluminio y gibbsita cristalina que los otros aluminatos de calcio.

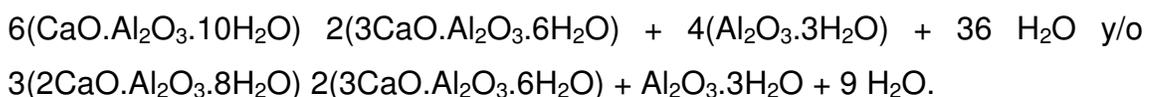
3.5 Secado y Curado

La estabilización de los hidratos de calcio y alúmina se logra exponiendo el cemento/concreto a 110°C, durante el proceso de secado ocurre la eliminación del agua mecánica y del agua producto de la conversión, en estas condiciones el concreto se puede almacenar por tiempo indefinido sin que sufra deterioro alguno.

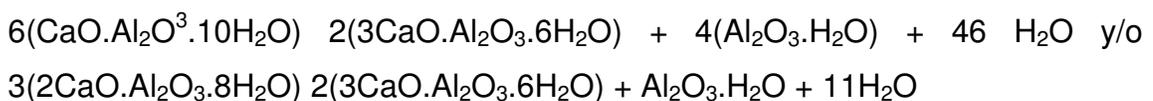
En ocasiones, los hidratos de aluminatos de calcio se encuentran en forma de gel antes de cristalizar creando condiciones de muy baja porosidad y permeabilidad de tal forma que los concretos adquieren la susceptibilidad a la explosión por presión de vapor generada durante el calentamiento del concreto.

La velocidad de conversión de hidratos altos CAH_{10} en hidratos bajos C_2AH_8 y C_3AH_6 depende de la cantidad de agua adicionada, del pH del agua, del tamaño de las partículas, del área superficial, de la composición química y mineralógica del cemento, de la relación CaO/Al_2O_3 , de la temperatura ambiente y de la velocidad de calentamiento durante el secado.

Las reacciones durante el secado son: ^[6]



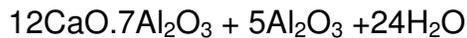
Si el concreto está sometido a presiones altas de vapor y a T entre 150°C y 350°C se efectúan las siguientes reacciones:



La presencia de C_3AH_6 y AH (bohemia) es favorable para el desarrollo de resistencia mecánica del concreto.

3.6 Quemado

Las reacciones que se efectúan durante el proceso de quemado son:



C_3AH_6 y AH_3 se descomponen completamente por encima de $350^\circ C$ y la AH hasta los $700^\circ C$, mientras que $C_{12}A_7$ y Al_2O_3 son muy reactivas y forman CA, $12CaO \cdot 7Al_2O_3 + 5Al_2O_3 \rightarrow 12(CaO \cdot Al_2O_3)$

En matrices ricas en alúmina se forma también CA_2 a T superiores a $1000^\circ C$ y hexa-aluminato de calcio sobre los $1400^\circ C$.



La tecnología del manejo correcto de los concretos tiene que ver con el entendimiento de las diferentes etapas de pérdida de agua resultado de las conversiones de las fases hidratadas y sus cambios volumétricos.

La formación de $C_{12}A_7$ ocasiona que la resistencia mecánica del concreto disminuya a temperaturas de quemado superiores a $800^\circ C$. La resistencia mecánica alcanza su mínimo a temperaturas cercanas a $1200^\circ C$ ocasionado por la formación excesiva de dialuminato de calcio (CA_2).

3.7 Agregados

Los agregados se pueden definir como un material inerte que se presta a ser ligado por una matriz para conformar una masa aglomerada cuya función principal es mejorar las propiedades y dar resistencia al concreto.

Los agregados son materiales calcinados (bauxitas, mullita de 45, 60 y 70% alúmina, cianitas, etc.), sinterizados a altas temperaturas (alúmina tabular, mullita, espinel alúmina-magnesio, magnesitas, zirconia, etc.) o electrofundidos, de tal forma que con ellos se construye la estructura sólida de los concretos ^[23].

Algunas de las características que nos puede afectar o beneficiar el tipo de agregados en el concreto son en la granulometría, densidad, textura superficial, reactividad con los álcalis, módulo de elasticidad, resistencia a la abrasión, resistencia mecánica etc.

Los agregados comprenden cerca de tres cuartas partes del volumen de una mezcla de concreto, de manera que su mineralogía, tamaño máximo, gradación, forma y textura superficial tienen influencia sobre las propiedades ingenieriles y arquitectónicas del concreto. La composición, forma y tamaño influyen sobre la resistencia y calidad del concreto. Su influencia viene determinada indirectamente por la cantidad de agua que es necesario añadir a la mezcla para obtener la docilidad y compactación necesarias, la forma determina cómo se va a agrupar, qué densidad tendrá y cómo se moverá dentro de la mezcla.

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte ^[23]. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras, Para obtener un concreto óptimo se debe buscar una estructura de agregados con la forma y secuencia de tamaños adecuados, para que se acomoden lo más

densamente posible (logrando la más alta compacidad), combinándose esta estructura con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos entre las partículas pétreas.

3.8 Aditivos

Los aditivos^[33] los podemos definir como productos capaces de disolverse en agua, que se adicionan durante el mezclado en porcentajes no mayores del 5% de la masa de cemento, con el propósito de producir una modificación en el comportamiento del concreto en su estado fresco y/o en su desempeño en condiciones de trabajo. Esta definición excluye, por ejemplo, a las fibras metálicas, las puzolanas y otros. El uso de aditivos con CAC es una práctica común al igual que con CP para modificar propiedades específicas como tiempo de fraguado, reología y propiedades mecánicas. Como bien mencionamos que los aditivos ayudan para mejorar propiedades en los diferentes procesos de elaboración el concreto, es decir en el concreto en estado fresco ayuda a incrementar la trabajabilidad sin aumento de agua o reducir el contenido de agua con similar trabajabilidad, retardar o acelerar el fraguado, reducir o prevenir el asentamiento, modificar los valores de exudación, reducir la segregación y mejorar la actitud al bombeo. En el concreto endurecido nos da ganancia de resistencia temprana, incremento en la resistencia, mejorar en la durabilidad frente a exposición severa, disminución en la permeabilidad, ayuda a controlar la expansión por la reacción álcali-agregado, incremento en la adherencia con las barras de acero de refuerzo etc.

CAPITULO IV

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

4.1 Materias primas

- a) Concreto refractario ligero o aislante base cemento de Aluminato de Calcio (Material A)**

- b) Concreto refractario o aislante base Silica Coloidal (**Material B**)
- c) Ladrillo refractario aislante (**Material C**)
- d) Agua
- e) Silica Coloidal

4.2 Caracterización de los concretos refractarios

4.2.1 Análisis granulométrico^[34]

El objetivo principal que persigue este ensayo es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra. El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de muestra dada. Obviamente, para obtener un resultado significativo la muestra debe ser estadísticamente representativa de la masa de la muestra.

Como no es físicamente posible determinar el tamaño real de cada partícula independiente, la práctica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño. Para lograr esto se obtiene la cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la anterior, la cantidad retenida en cada tamiz se relaciona con el total de la muestra para determinar la distribución de las partículas. Es evidente que el material retenido de esta forma en cualquier tamiz consiste en partículas de muchos tamaños los cuales son menores al tamaño de la malla del tamiz en el cual la muestra fue retenida.

El proceso de tamizado no provee información sobre la forma de los granos de la muestra, solamente da información sobre los granos que pueden pasar, o qué orientación adecuada pasa, a través de una malla de abertura rectangular de un cierto tamaño.

La información obtenida del análisis granulométrico se presenta en forma de curva. Para poder visualizar más fácilmente la distribución de los tamaños de granos presentes. Los procedimientos patrones utilizan el porcentaje que pasa como la ordenada en la escala natural de la curva de distribución granulométrica ^[35].

Este análisis granulométrico se realizó a los 2 concretos refractarios a estudiar, para determinar la distribución granulométrica de cada material, la cual nos dará información sobre el comportamiento reológico cuando se agregue el agua de mezclado.

Se pesó una cantidad del material, la cual era representativa de la muestra, una cantidad de 350 grs de cada material y posteriormente se colocó sobre el tamiz con un diámetro más grande, así el material va pasando a mallas con diámetro más pequeño, las mallas que se utilizaron fueron ASTM 8, 16, 30, 50, 100, 200, 325 y -325, las cuales se colocaron en el Ro-tap y se dejaron vibrar durante 10 minutos (figura 3), posterior a ello se pesó la cantidad de materia que quedó en cada malla para así poder observar la tendencia de la distribución granulométrica.

Cabe mencionar que toda esta prueba se hizo bajo el estándar ASTM C92-95M ^[35].



Figura 3. Ro-tap con cascada de mallas

4.2.2 Análisis químico

El análisis químico se realizó mediante la técnica de absorción atómica, el cual fue corroborado mediante el análisis por EDS al momento de realizar la microscopia electrónica de barrido.

4. 3 Obtención de probetas

4.3.1 Especificaciones del tamaño de las probetas

El tamaño de las probetas fue de acuerdo a la norma ASTM ^[36] donde expone que las medidas de las probetas debe ser de 2x2x2 pulgadas.

4.3.2. Preparación u obtención de probetas

a) **Trabajabilidad:** Esta prueba tiene como finalidad determinar la facilidad con la que una muestra puede mezclarse, manejarse, transportarse y vaciarse en su posición final con una pérdida mínima de homogeneidad. Una mezcla puede considerarse trabajable en algunas condiciones y no serlo en otras, por ejemplo, el concreto que tiene trabajabilidad satisfactoria para la losa de un pavimento sería difícil de vaciar en una columna fuertemente reforzada, por tratarse de un concreto seco y de un tamaño máximo de agregado que no se deslizaría con facilidad a través del refuerzo de la columna lo que ocasionaría la formación de grietas. Con una buena trabajabilidad el material no se expondrá y evitaremos defectos futuros de nuestros especímenes, esta prueba la determinamos con la ya conocida “ball in hand” o “prueba del mono”^[21] (ve figura 4) que nos ayuda a determinar el porcentaje óptimo para obtener una buena mezcla y por ende una buena trabajabilidad.



Figura 4. Muestra la prueba realizada del ball in hand del material A

b) **Mezclado:** Se le da un minuto de homogenizado a el concreto , posterior a ello se vierte el agua o silica coloidal y se deja mezclar por 5 minutos para el concreto el ligero B, y 2 minutos para el ligero A En el mezclado

se realizó en una mezcladora Model: B20, shaftspeed 108/195/355 RPM.Power:1.1 KW.

- c) **Vibrado:** Ayuda a tener una mejor compactación y a la eliminación de burbujas de aire atrapado, este se llevó a cabo por 1 minuto aproximadamente. De ahí se vació a los moldes previamente preparados y lubricados con vaselina para evitar que se peguen al momento de desmoldar, se cubren con un plástico esto para evitar la pérdida de humedad y se dejan a temperatura ambiente por 24 horas para el periodo de fraguado y curado, cabe mencionar que el vibrado se realizó para los materiales A y B. La máquina de vibrado que se utilizó fue CONTROLS. Model: 55-C0160 Hz, Power suplí:200 W, 110 V, 60 Hz
- d) **Desmolde:** Finalmente se desmoldan las piezas, se pesan en una balanza analítica y se miden con el vernier para los cálculos de la densidad en verde.
- e) **Secado y quemado:** Se llevó a cabo en un horno Lindberg/Blue en cuanto a el ligero A se dejó secar a una temperatura de 110°C con una velocidad de 5°C/min y un quemado a 815 y 1050°C durante 1 hora, para el ligero B se dejó para el curado durante 16 hrs (con la capa de plástico) se quitó y se dejó a la intemperie durante 6 hrs mas, se seco durante 12 hrs con un rampa de 5°C/min y un posterior quemado de 5 hrs a 815°C y 1hr a 1050°C.

4.4 Porosidad y Densidad

Esta prueba se llevó a cabo mediante el Método del agua hirviente^[37] como se muestra en la figura 5, se analizaron 5 probetas de cada temperatura y se

determinó el porcentaje de porosidad mediante la ecuación 4.4.1 así como la densidad o densidad específica determinada con la ecuación 4.4.2 :

$$\text{Porosidad aparente} = \frac{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Seco}}{\text{Volumen}} \times 100 \quad \text{ecuación 4.4.1}$$

Volumen

Donde el volumen es = peso saturado – peso suspendido

$$\text{GEA} = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco} - \text{Peso Suspendido}} \quad \text{ecuación 4.4.2}$$



Figura 5 .Prueba de porosidad, en base a la norma los especímenes no pueden tocarse y debe existir cierta separación entre ellos como lo muestra la imagen.

4.5 Microscopia Óptica

Se prepararon muestras representativas de los diferentes materiales, los cuales se montaron en resina epóxica, se pulieron y se analizaron las muestras a las diferentes temperaturas de 110, 815 y 1050°C para ver evaluar su microestructura después del proceso de sinterización en un microscopio marca NikonJapan 460745, Line 100/120V 50-60Hz, Lampara 12V.

4.6 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las muestras preparadas petrográficamente fueron recubiertas con grafito para ser observadas en microscopio electrónico de barrido, con el objetivo de observar la microestructura, agregados y comportamientos de las fases, de los dos concretos refractarios en sus diferentes temperaturas, así como del ladrillo refractario, a su vez se les realizó un análisis de EDS para valorar sus composiciones químicas esto en un equipo Nova Nano SEM 200.

4.7 DRX

El fenómeno de la difracción de Rayos X consiste básicamente en un proceso de interferencias constructivas de ondas de rayos X que se produce en determinadas direcciones de espacio. Significa que las ondas tienen que estar en fase, lo que ocurre cuando su diferencia de trayectoria es cero o un múltiplo entero de longitudes de onda. La DRX tiene como finalidad la identificación de

fases cristalinas de una muestra, por lo que los concretos fabricados se caracterizaron a las 3 temperaturas de estudio (110, 815 y 1050°C). Este estudio se llevó a cabo en un D8 Advance Bruker con lámpara de cobre, se manejó una alfa de 1.54. Se utilizó el método de polvos^[41].

4.8 Resistencia a la compresión en frío (CCS)

La determinación de la resistencia a la compresión permite obtener información acerca del grado de cohesión interna del material, en verde o calcinado para evaluar la capacidad estructural del refractario, y así estimar su comportamiento durante la instalación y en servicio^[42]. Esta determinación se realizó bajo la norma ASTM^[38] con una velocidad de 520 N/seg en una Máquina Controls modelo Q0701/A.Power Suplí 50W, 110/230V, 50/60Hz. (figura 6)



Figura 6. Prueba de compresión en frío

4.9 Módulo de Ruptura en Frío

La prueba de módulo de ruptura nos ayuda a determinar la carga máxima que puede soportar un refractario. Dicha prueba se hizo con la norma ASTM^[38] en una máquina Tinius Olsen en ladrillos completos y en un equipo Shimadzu en barras de 6x1x1 in de concretos.

La ecuación 4.9.1 se utilizó para el cálculo del módulo de ruptura

$$MOR = \frac{3 \times F \times L}{b \times h^2}$$

ecuación 4.9.1

Donde:

F = La carga aplicada

L = Distancia entre los apoyos

b = Ancho de la probeta

h = Espesor de la probeta

La distancia entre los apoyo que se utilizó fue de 100 mm y una velocidad de 25mm/min de desplazamiento como se muestra en la figura 7.



Figura 7 .Prueba de módulo de ruptura

4.10 Prueba de penetración y Ataque

Se realizó esta prueba a los materiales A y B, se atacaron con hierro esponja y mineral de hierro simulando lo daños que pueda suscitarse en el horno de reducción directa ^[39y42]. Se analizaron especímenes cúbicos (25x25x25mm) se les taladró una cavidad central de 12.5mm de diámetro por 43.75mm de profundidad con una broca de tungsteno en una máquina Wilton 15" 12 speed, speed range 250-3100 R.P.M . En esta cavidad se introdujeron 20 gramos de hierro esponja o mineral de hierro (como se puede apreciar en la figura 8) y el conjunto se calentó a 1050°C en un horno de resistencia eléctricas con un tiempo de estancia de 4 horas. Después del enfriamiento se secciono la pieza diagonalmente y se determinó cualitativamente las áreas de escorificación o penetración donde se tomó el siguiente criterio (Norma ASTM C621):

Adherencia nula = Pastilla totalmente suelta

Adherencia moderada = Pastilla débilmente adherida

Adherencia fuerte = Pastilla prácticamente fusionada al espécimen.

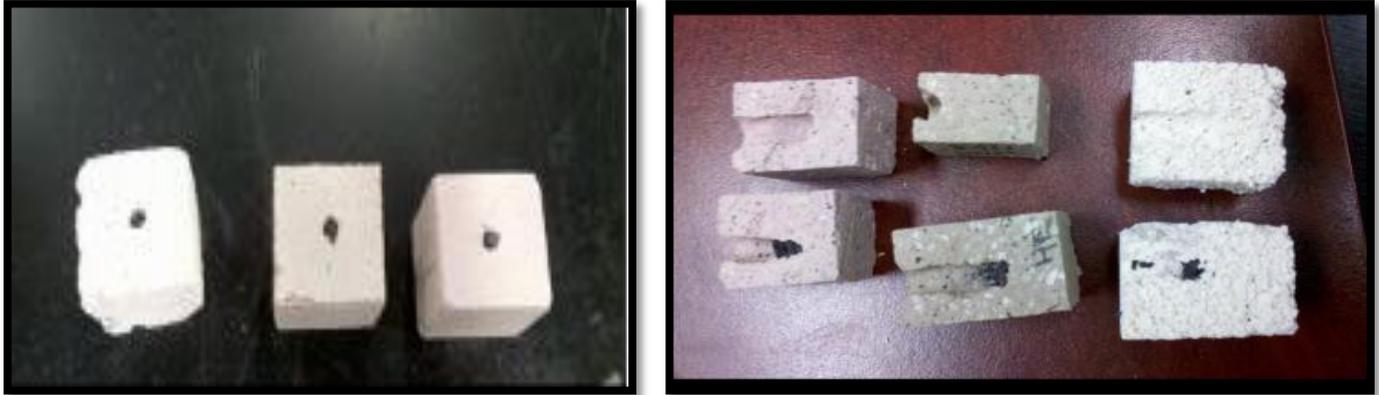


Figura 8 .Prueba de ataque químico

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis granulométrico

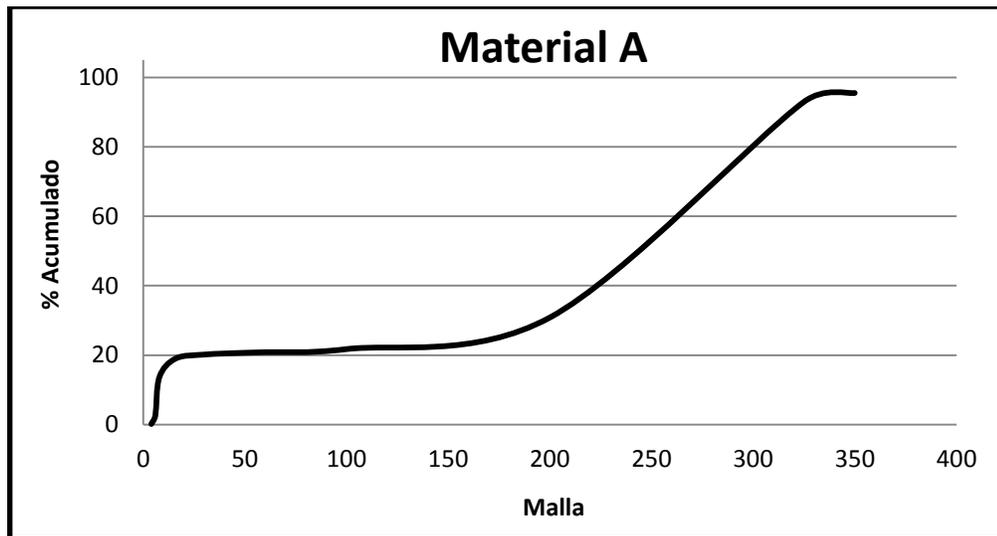
En cuanto al análisis granulométrico ^[7] cabe mencionar que solo se realizó para el material A, ya que no se tuvo muestra suficiente del material B y el material C es un producto conformado.

En la gráfica 1 se puede observar que el material presenta una granulometría que tiende a ser más fina, lo cual se ve reflejado en alto porcentaje de humedad requerido para su preparación, dicha granulometría es típica de los concretos refractarios aislantes^[27]

Para el uso del producto se tienen algunos modelos granulométricos que permiten calcular el nivel de empaquetamiento deseable con porosidad y

permeabilidad establecida, a pesar de la diferencia entre la forma y tamaño de las partículas empleadas en el modelo y las reales se ha logrado la producción de concretos refractarios muy cercanas a las calculadas.

En la granulometría el factor de empaquetamiento es muy importante ya que si se contempla una granulometría con una distribución aproximada de 30-50-20 (en gruesos, medios y finos respectivamente) mejores serán las propiedades del material de acuerdo a lo reportado por Marcel Dekker^[27], ya que el factor de empaquetamiento entre más grande sea es menos probable que las grietas internas se propaguen rápidamente en el material, si la tendencia es hacia mayor porcentaje de granos más grandes se tendrían muchos espacios intrínsecos y en el momento de la sinterización quedarían pequeños huecos que a su vez provocarían bajas propiedades mecánicas en el material ^[25,43,44].



Grafica 1. Grafica representativa del tamaño y distribución de los agregados.

5.2 Análisis Químico

Los resultados obtenidos por medio del análisis químico se presentan en la tabla 4 en donde se puede observar que aunque los tres materiales se pueden considerar como refractarios silico-aluminosos el ladrillo es más rico en alúmina (Material C), además de que los dos concretos base cemento de aluminato de calcio (Material A) y base silica coloidal (Material B) presentan una composición semejante lo cual valida el presente estudio referente al análisis comparativo de los concretos.

Tabla 4. Porcentaje de elementos, prueba realizada por medio del análisis químico

Compuesto	% Material A	% Material B	%Material C
SiO₂	55.58	56.7	42.40
Al₂O₃	32.38	39.1	53.14
MgO	0.096	1.0	-
TiO₂	0.473	0.6	-
CaO	0.482	0.2	-
Na₂O	0.739	-	0.10
Fe₂O₃	0.752	0.7	0.44
K₂O	0.729	-	1.15
ZrO2	0.033	-	-
Alcalis	-	1.7	-

5.3 Prueba de trabajabilidad

Como ya se había mencionado la prueba de trabajabilidad se realizó de acuerdo a la norma ya conocida “ball in hand” o “prueba del mono”^[5], para lo cual se mezcló el material con su correspondiente cantidad de agua o silica según el caso, se tomó una pequeña muestra con la cual se hizo un esfuerzo de compresión, al momento de doblar la mano se dejó por 2 segundos, se retiró la fuerza y se observó el comportamiento, esto nos ayudó a corroborar que se fuera a trabajar con el porcentaje adecuado de líquido para la mezcla, ya que si se excede de este porcentaje óptimo la mezcla quedará muy líquida lo cual puede implicar problemas al momento de que sea instalado en un horno, por otro lado, si el porcentaje de agua o silica es muy bajo se tendrá una mezcla muy seca que también tendrá problemas al momento de instalarse dando en ambos casos propiedades mecánicas bajas. Una vez que se obtuvo una mezcla trabajable se procedió a la preparación de los especímenes con la cantidad de agua o silica determinada en cada caso. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5 en donde se puede observar que se trata de porcentajes altos debido a que son materiales de granulometría fina por su aplicación como materiales aislantes, sin embargo se observa también una diferencia significativa en el porcentaje de humedad debido al ligante de cada concreto (CAC o SC respectivamente).

Tabla 5. Porcentajes óptimos de agua o silica para obtener una buena trabajabilidad

Material	Rangos de % de agua	% de agua a utilizar
Ligero A	50	50
Ligero B	30-35	30

5.4 Secado y Quemado

La estancia y el tiempo que se dejó para el secado y quemado fue como se aprecia en la siguiente Figura 10 y 11, como bien se mencionó en capítulos anteriores (páginas 33 y 34), las temperaturas de quemado que se utilizaron fueron 815 y 1050°C, esta última temperatura ya que el horno de reducción directa donde se pretende que trabajen estos materiales oscila entre los 1000 y 1200°C.

Durante la etapa de quemado tenemos la sinterización de nuestro material, ocurren las reacciones químicas necesarias, como bien mencionábamos también cabe la importancia del factor de empaquetamiento, en esta etapa es muy importante ya que es donde la pieza figura la calidad de sus propiedades mecánicas y resistencias. ^[10]

Los cambios que tienen lugar durante el proceso de sinterización son:

- (1).- Reducción de la energía interna del sistema de partículas inicial. Este tiende hacia un estado de equilibrio que le confiere una estabilidad de forma y dimensiones.
- (2).- Disminución de un modo importante de la porosidad inicial (cambios en la forma, tamaño y distribución de los poros) (Figura 9).
- (3).- Crecimiento de grano (cristal), con posibles recristalizaciones (cambios en el tamaño y la forma de los granos (cristales)).
- (4).- Cristalización o vitrificación parcial.
- (5).- Difusión en estado sólido, líquido o gaseoso
- (6).- Cambios de fase.
- (7).- Variación de las propiedades físicas (resistencia mecánica, conductividad térmica, traslucencia, etc).

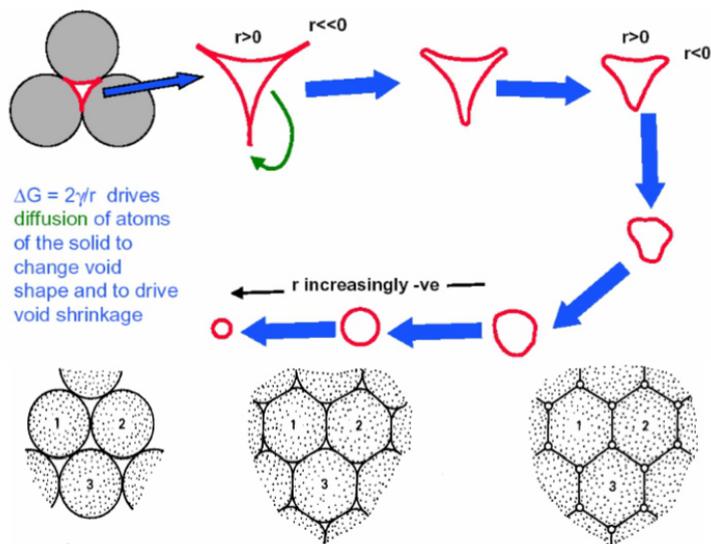


Fig. 9 Cambios en la forma y tamaño de los poros durante el proceso de sinterización

En la cocción de los productos cerámicos, paralelamente a las reacciones químico-físicas que en ella se desarrollan, que dan lugar a la formación de nuevas fases cristalinas y vítreas, tiene lugar una serie de cambios microestructurales de la pieza. El cambio en la forma y tamaño de los poros es uno de los más importantes, ya que gran parte de las propiedades físicas del producto cocido son dependientes de este parámetro (resistencia mecánica, resistencia al choque térmico, resistencia a las heladas, expansión por humedad, etc.).

Para aumentar el valor de algunas de las propiedades, es deseable eliminar tanta porosidad como sea posible, lo que se consigue durante el tratamiento térmico, mediante la transferencia de materia de unas partes a otras del compacto poroso y mediante la disminución de volumen ^[52-53]

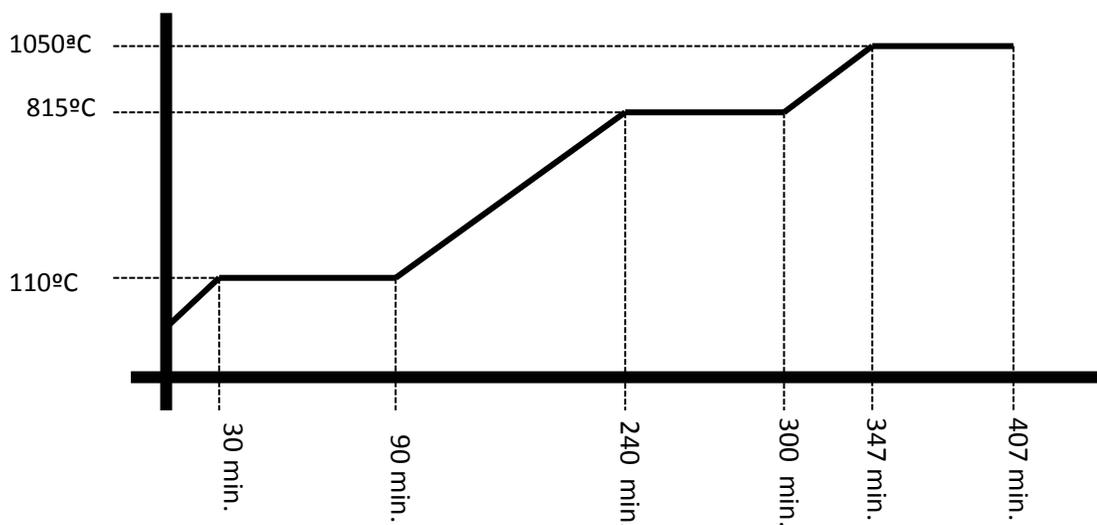


Figura 10. Rampas de Secado y Calentamiento para el Material A (5°C por minuto con un secado de 1hr y quemado (815 y 1050°C))

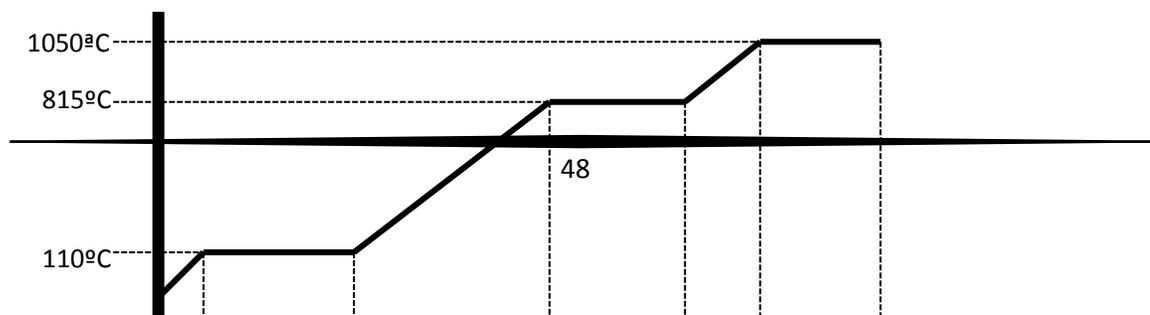
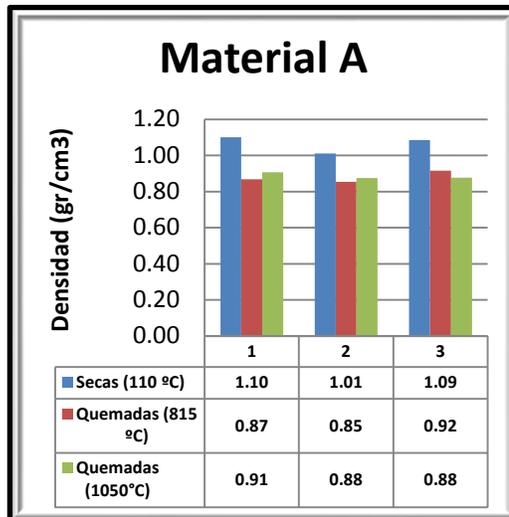


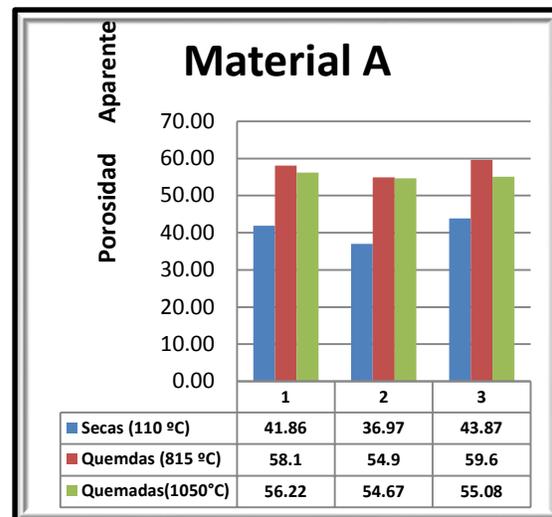
Figura 11. Rampas de Secado y Calentamiento para el Material B (Con un secado de 12 hrs., 5 horas de quemado a 815°C y 1hr a 1050°C, a 5 grados/min.)

5.5 Porosidad y Densidad

En las gráficas 2 y 3 se presentan los resultados de porosidad y densidad para el Material A en donde se puede observar que la porosidad tiende a aumentar a medida que incrementa la temperatura, lo cual puede corroborarse con los valores de densidad obtenidos que a medida que aumenta la temperatura tiende a disminuir. Este comportamiento puede ser atribuido a las transformaciones del cambio de hidratos de aluminatos de calcio en concretos refractarios tradicionales, el cual se refiere a la conversión de hidratos altos (CAH_{10}) a hidratos bajos (CAH_8 y/o CAH_6) ^[45-46].



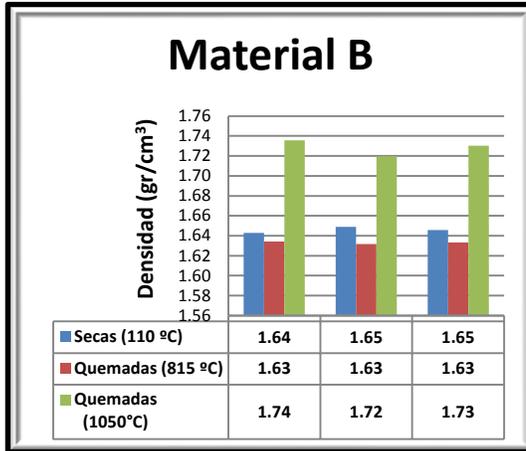
Gráfica 2. Densidad del Material A



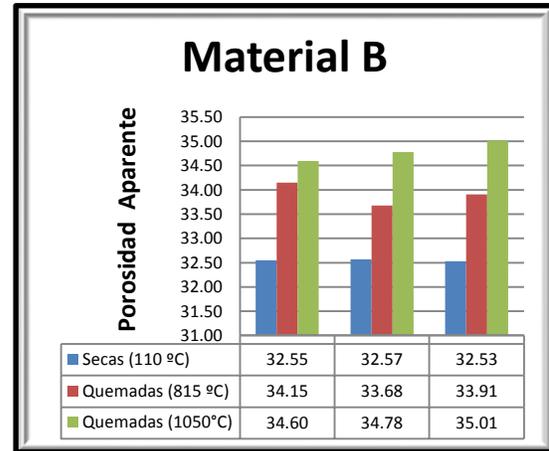
Gráfica 3. Porosidad aparente del Material A

En la Gráfica 4 se presentan los resultados obtenidos de densidad en las probetas tratadas a cada temperatura, en donde se puede observar que los valores más altos se obtienen en muestras quemadas a más alta temperatura, sin embargo los valores obtenidos en muestras quemadas a 815°C disminuyen, comportamiento semejante al observado en concretos refractarios elaborados con cementos de aluminatos de calcio debido a la conversión de los hidratos a estas temperaturas [6]. En el caso de los concretos evaluados que son elaborados con silica coloidal este comportamiento puede ser atribuido a que durante la etapa de secado, los grupos hidroxilo en la superficie de las partículas generan enlaces de siloxano (Si-O-Si), lo que resulta en una red tridimensional de partículas de SiO₂. La estructura resultante es altamente permeable y permite que la composición se seque fácilmente, reduciendo las grietas y desprendimientos explosivos [5].

La tendencia observada en densidades puede ser corroborada por el incremento en porosidad de estas probetas (Gráfica 5), comportamiento que es semejante al observado en concretos refractarios elaborados cementos de aluminatos de calcio [7].

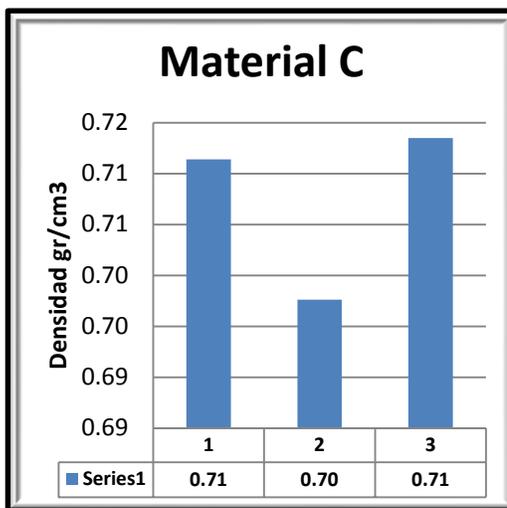


Gráfica 4. Densidad del Material B

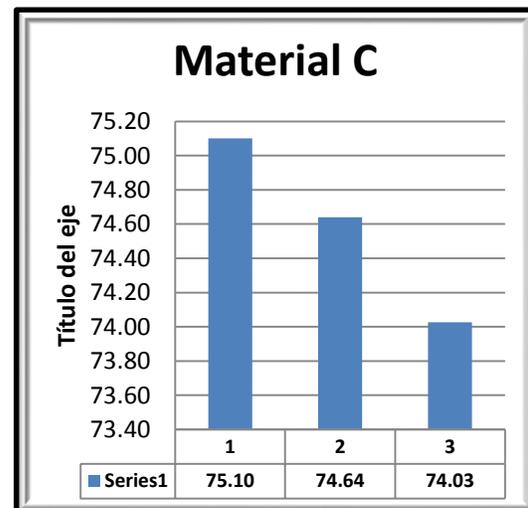


Gráfica 5. Porosidad aparente del Material B

En las gráficas 6 y 7 se presentan los resultados de densidad y porosidad del Material C, en donde puede observarse que los valores de porosidad son altos debido a que estos materiales se encuentran dentro de la clasificación de ladrillos aislantes [47-48].



Gráfica 6. Densidad del Material C



Gráfica 7. Porosidad aparente del Material C

5.6 Microscopia Óptica

En la figura 12 (en los números 4,5 y 6) se presentan las imágenes obtenidas en microscopio óptico para Material B (concreto aislante base silica coloidal), en donde se observa una microestructura con baja porosidad así como una distribución granulométrica heterogénea en comparación con lo observado en concretos aislantes base aluminatos de calcio en donde tanto microestructura como distribución granulométrica son más homogéneas (figuras 1,2 y 3).

En lo que se refiere al Material C se puede observar un microestructura más homogénea con una muy alta porosidad (figura 12.7)

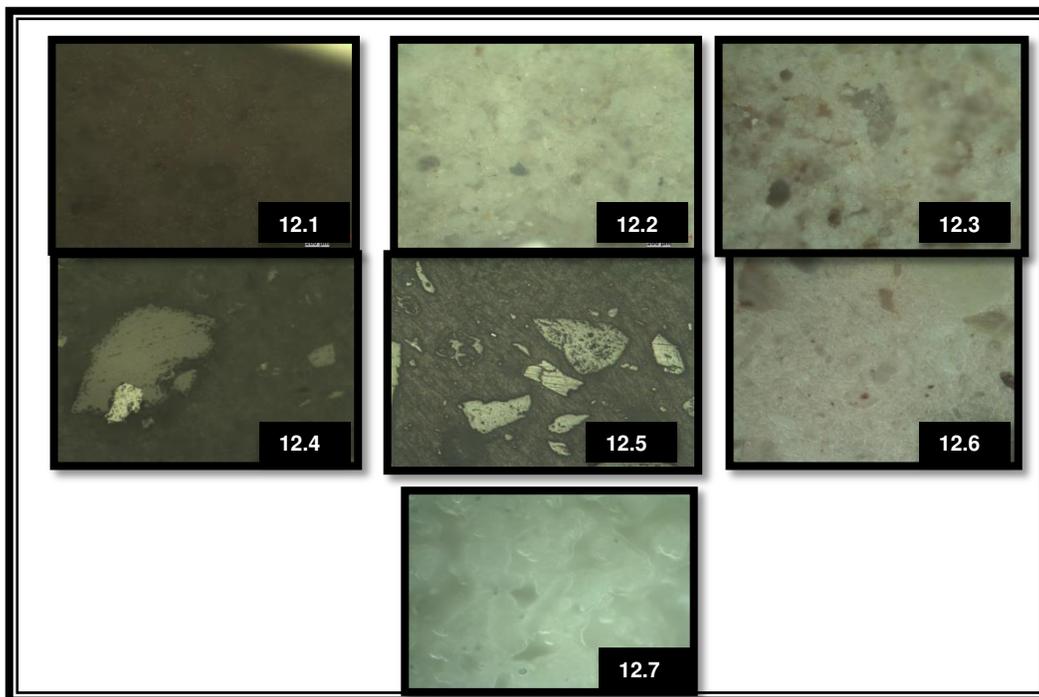


Figura 12: Material A 12.1)a 110°C 12.2)a 815°C y 12.3) 1050°C por otro lado Material B 12.4)110°C 12.5)a 815°C , 12.6) 1050 °C y 12.7) Material C todos a una escala de 100x

5.7 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

En la figura 13 se presenta la microestructura del Material A podemos apreciar una matriz más homogénea a diferencia del que estamos comparando con Material B en cuanto a sus granos podemos notar que en su mayoría son granos más finos, lo cual corrobora los resultados obtenidos del análisis granulométrico, se puede observar alta porosidad con lo que se le puede atribuir un factor de empaquetamiento bajo lo cual favorece que estos materiales se comporten como buenos aislantes.

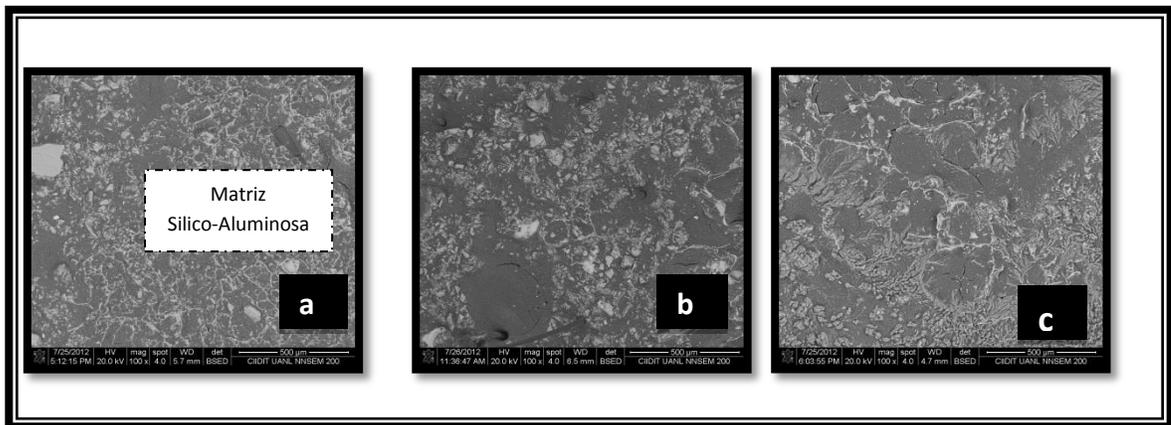


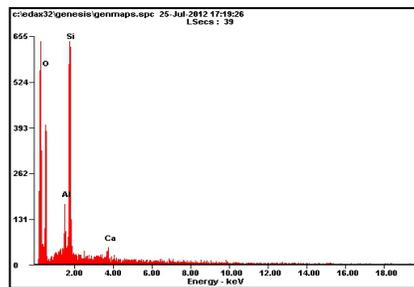
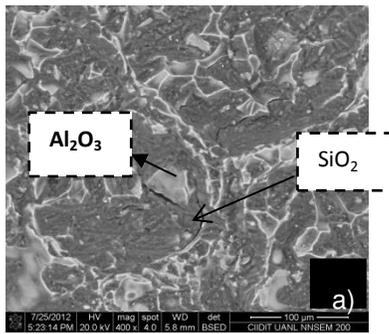
Figura 13: Material A a) 110°C b) 815°C y c) 1050 °C todos con un magnificación de 100x

En la figura 14 se presentan las micrográficas obtenidas para el Material A seco a 110°C y quemado a 815 y 1050°C respectivamente. En la muestra a 110°C se observa una matriz Silico-aluminosa siendo ésta más rica en sílice (alrededor de 40.33%) según lo encontrado por EDS, en donde también se puede detectar la presencia de óxido de calcio atribuida al cemento contenido en el producto (Fig. 13a). La imagen 13b corresponde al mismo material A pero a la

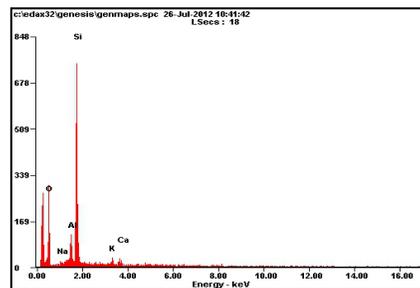
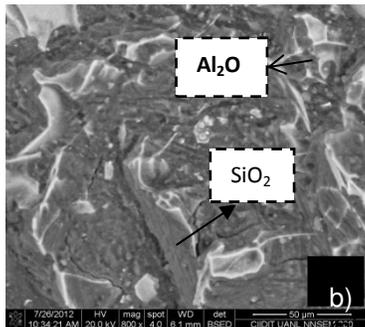
temperatura de 815°C donde aún la matriz sigue siendo rica en sílice motivo por cual podemos apreciar unos pequeños desprendimientos que pueden ser

atribuidos al desprendimiento de granos de cuarzo o desprendimiento de partículas asociado a cambios volumétricos por transiciones de fase de la sílice^[42,49-51]

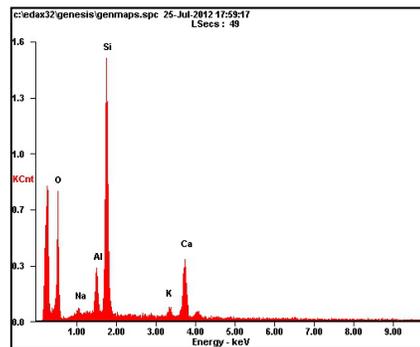
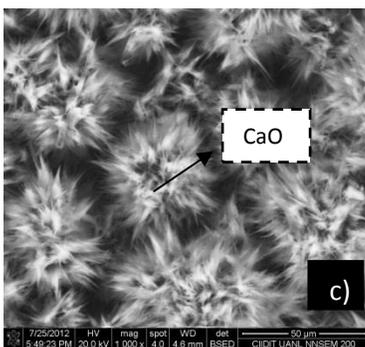
Finalmente, en la figura 13C correspondiente a la temperatura de 1050°C se observa una matriz silico-aluminosa con la presencia de impurezas como óxidos de Sodio y Potasio en bajas proporciones, 1.66% y 1.43% respectivamente, lo más destacable en esta temperatura fue la presencia de pequeñas “espinas” que son ricas en óxido de calcio el cual está presente en las materias primas y que, conforme se fue dando la sinterización fue creando este tipo de espiguitas.



Element	Wt%	At%
OK	53.24	66.73
AlK	05.21	03.87
SiK	40.33	28.79
CaK	01.22	00.61
Matrix	Correction	ZAF



Element	Wt%	At%
OK	44.43	58.65
NaK	01.40	01.29
AlK	08.63	06.75
SiK	41.30	31.06
KK	00.86	00.46
CaK	03.39	01.78
Matrix	Correction	ZAF



Element	Wt%	At%
OK	49.76	64.42
NaK	01.66	01.50
AlK	06.39	04.90
SiK	33.32	24.57
KK	01.43	00.76
CaK	07.43	03.84
Matrix	Correction	ZAF

Figura 14. Microestructura y análisis químico (EDS) de cada probeta del Material A: a) 110°C, b) 815°C y c) 1050°C

La microestructura del Material B se presenta en la figura 15 en donde puede observarse una matriz heterogénea con la presencia de agregados gruesos en mayor proporción que lo observado en concretos aislantes convencionales (base cementos de aluminatos de calcio). El análisis por EDS de muestra general señala una composición principalmente de sílice-alúmina y la presencia de óxidos de calcio, magnesio, titanio, sodio y potasio probablemente provenientes de las materias primas, en pequeñas proporciones. También se puede observar la presencia de granos grandes oscuros agrietados de composición SiO_2 e identificados como cuarzo, los cuales se pueden apreciar en las probetas tanto secas como quemadas.

Por otro lado, es importante mencionar que no se observa una porosidad alta como la esperada para un concreto aislante y corroborado con los resultados de porosidad obtenidos para este material.

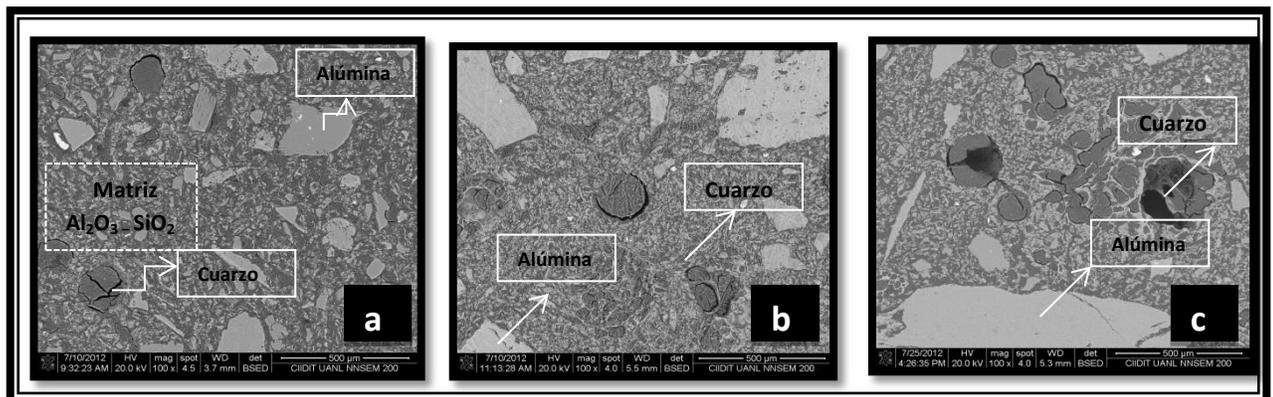


Figura 15: Micrografías a 100x para el Material B a) 110°C b) 815°C y c) 1050 °C

En la figura 16 se presenta con más detalle la microestructura del material B a las diferentes temperaturas encontrándose grandes variaciones en cuanto al tamaño de sus partículas con una distribución heterogénea, una matriz silico-aluminosa siendo más destacable la sílice como cuarzo como puede observarse en la parte superior izquierda, también encontramos partículas claras de composición alúmina (zona inferior izquierda) podemos apreciar una microestructura totalmente heterogénea con la presencia de algunas impurezas como óxidos de Potasio y Titanio, predominando la misma matriz compuesta de sílice y alúmina, por otro lado es importante mencionar que se detecta la presencia de la fase cuarzo lo cual no es tan recomendable ya que esta fase fragiliza y por lo tanto reduce las propiedades del material.

La figura 16c corresponde a la muestra evaluada a una temperatura de 1050°C, donde ya se aprecia una matriz un tanto más homogénea a diferencia de las dos temperaturas anteriores, aunque se siguen observando partículas de mayor tamaño correspondientes a la fase cuarzo, por EDS se detecta también la presencia de impurezas de óxidos de titanio, calcio y potasio. Se encuentra una matriz formada principalmente por sílice (42.49%) y alúmina (18.96%) y complementando esta información con los resultados de la difracción de rayos X podemos comentar que en esta temperatura tenemos un fase muy favorable

que es la mullita, ya que esta nos ayuda a tener muy buenas propiedades mecánicas.

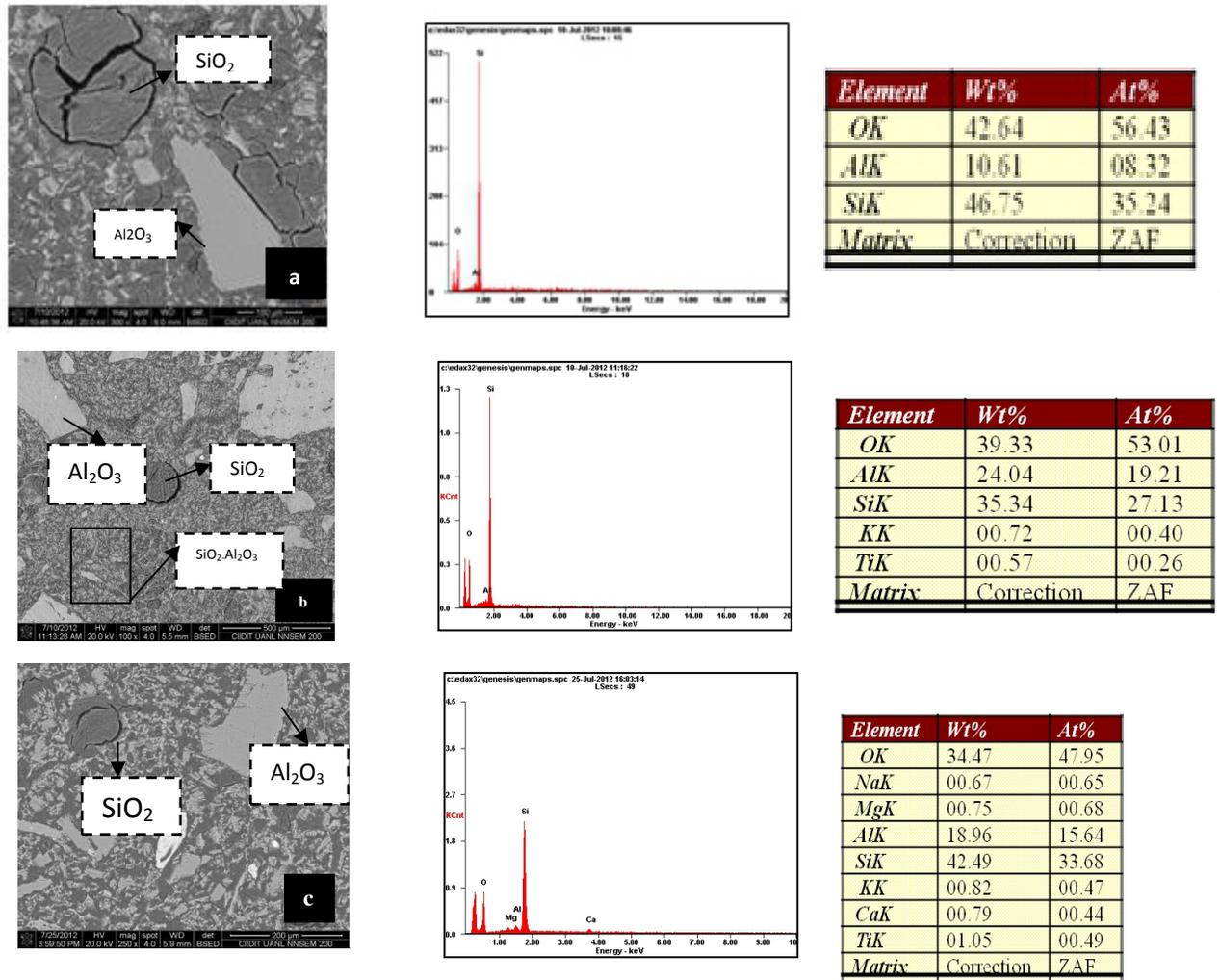


Figura 16. Microestructura y EDS de cada probeta a diferentes temperaturas a) 110°C, b) 815°C y c) 1050°C MATERIAL B

5.8 DRX

En las Figuras 17-19 se muestran los difractogramas correspondientes al Material A seco y quemado a las diferentes temperaturas, en los cuales se puede detectar la sílice como cuarzo de acuerdo a la tarjeta 00-046-1045, cuyas reflexiones características están señaladas en color azul ■,

Seco (ángulo 2θ , intensidad) en orden decreciente de intensidades **(26.640,1500), (20.860,240), (50.139, 195)** **Figura 17,18 y 19**

Las correspondientes al color verde ■ son las reflexiones características que pertenecen a la Kyanita de acuerdo a lo señalado en la tarjeta 00-003-1164. **Seco (ángulo 2θ , intensidad)** en orden decreciente de intensidades **(27.858,74.7), (47.046,74.7), (70.178,74.7)** **Figura 17**

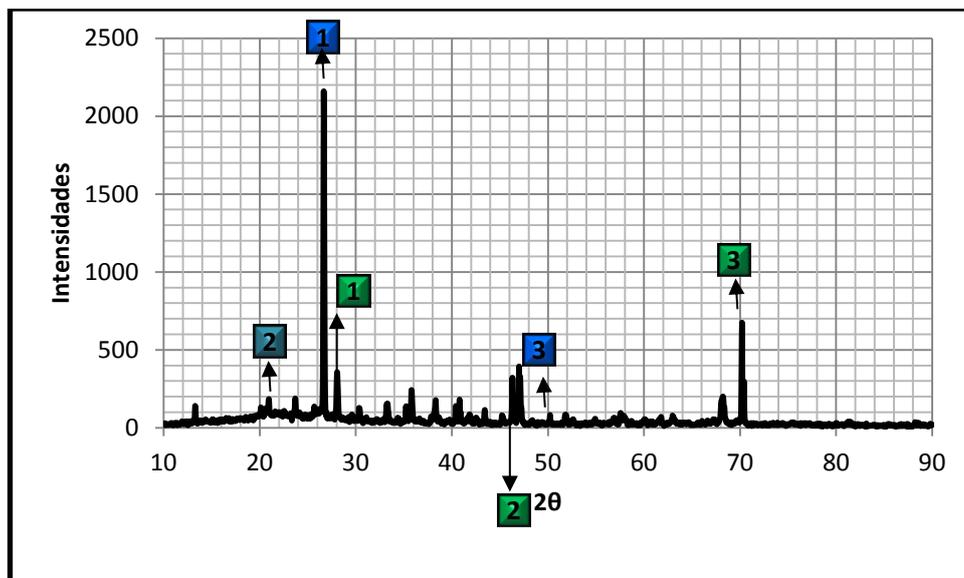


Figura 17: Difractograma correspondiente a la muestra de Material A a 110°C

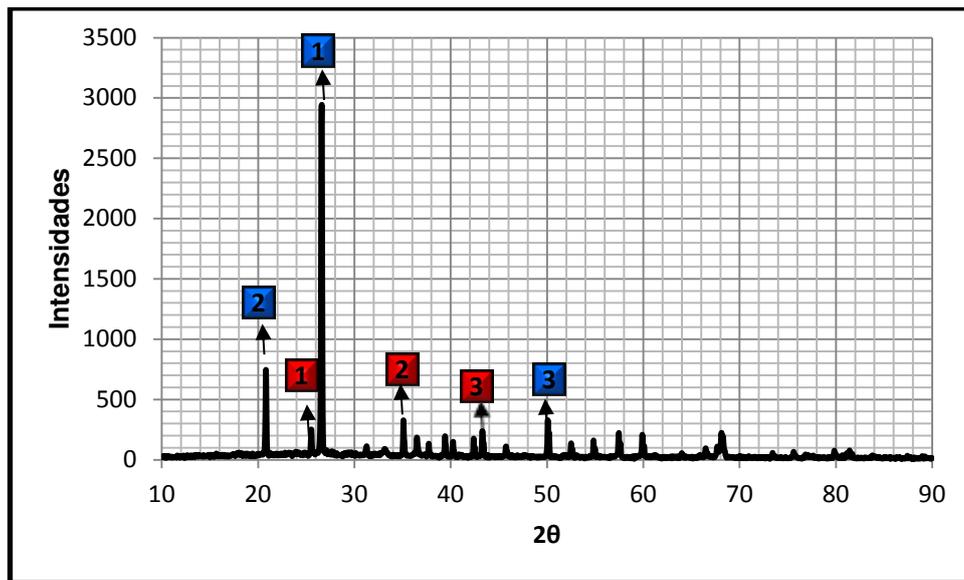


Figura 18: Diffractograma del Material A a una temperatura de 810°C

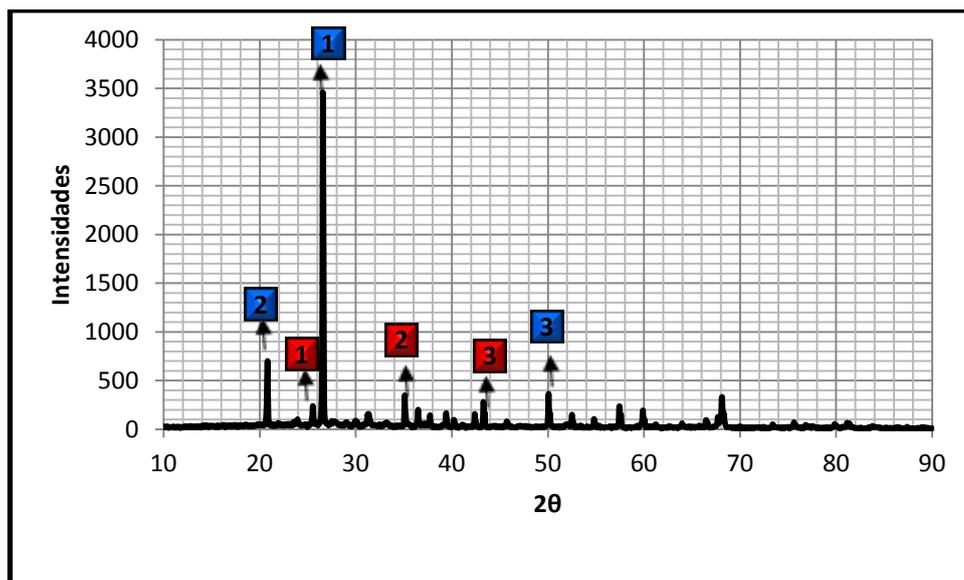


Figura 19: Diffractograma del Material A a una temperatura de 1050°C

En la Figura 20 se presentan comparativamente los difractogramas correspondientes a las tres diferentes temperaturas, en donde se pueden observar las reflexiones hkl correspondientes la presencia de cuarzo y kyanita (como se mencionó anteriormente), con una disminución del porcentaje de cuarzo a medida que incrementa la temperatura, así como podemos apreciar la presencia de la fase mullita cuyas reflexiones características se presentan en los ángulos 2θ 16.3, 25.9, 26.3

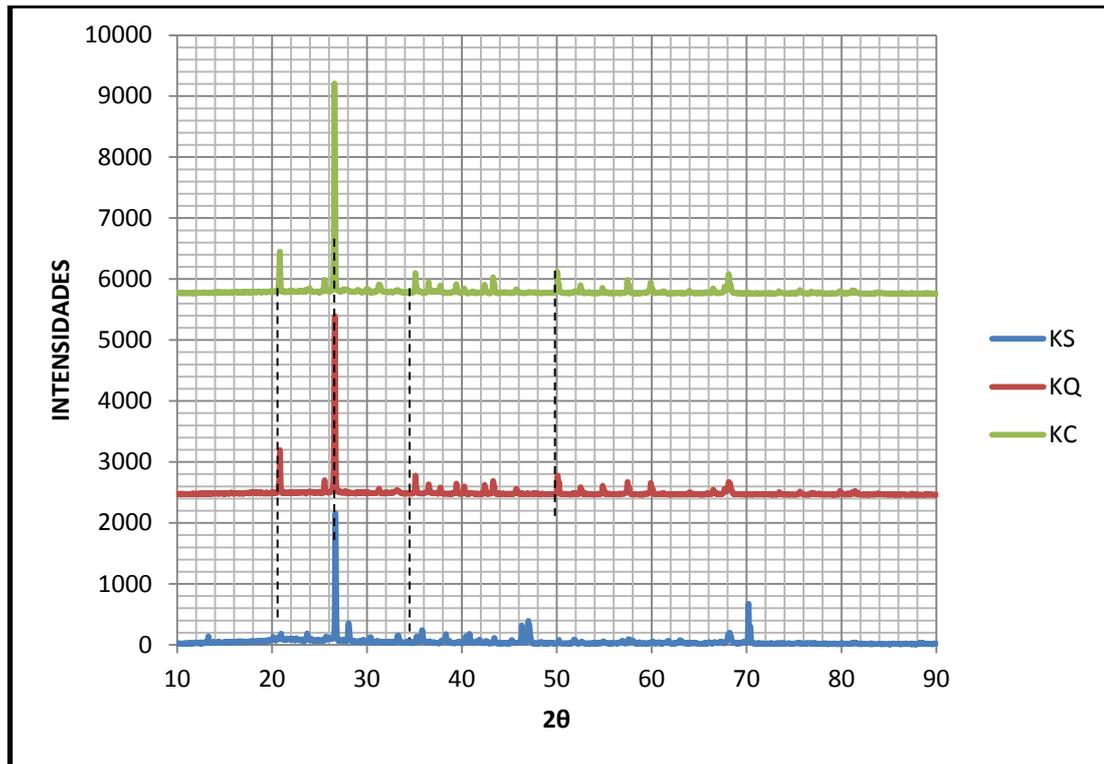


Figura 20: Empalme de difractoros del Material A de las 3 temperaturas

En las Figuras 21-23 se muestra los difractogramas correspondientes al Material B, en las reflexiones marcadas con el color rojo encontramos que son características del ■ Oxido de Silicio como cuarzo ubicada con la tarjeta 00-077-1060, las 3 reflexiones principales de cada temperatura son de: (ángulo 2θ , intensidad)

(26.625,2986), (20.846,637), (50.115,332) Figura 21,22 y 23

Una de las fases que también es parte de nuestro material fue la alúmina como Corindón (tarjeta 01-076-7774) representada con el color rosa ■ donde sus reflexiones primordiales dieron:

(35.130,247), (43.328,238), (57.465,224) Figura 22

Y por ultimo encontramos la fase Aluminato de Calcio localizado en la tarjeta 00-032-0150 representada con el color amarillo ■ con las reflexiones de:

(69.181,3.27), (46.209,1.40), (20.513,.467) Figura 22 y 23

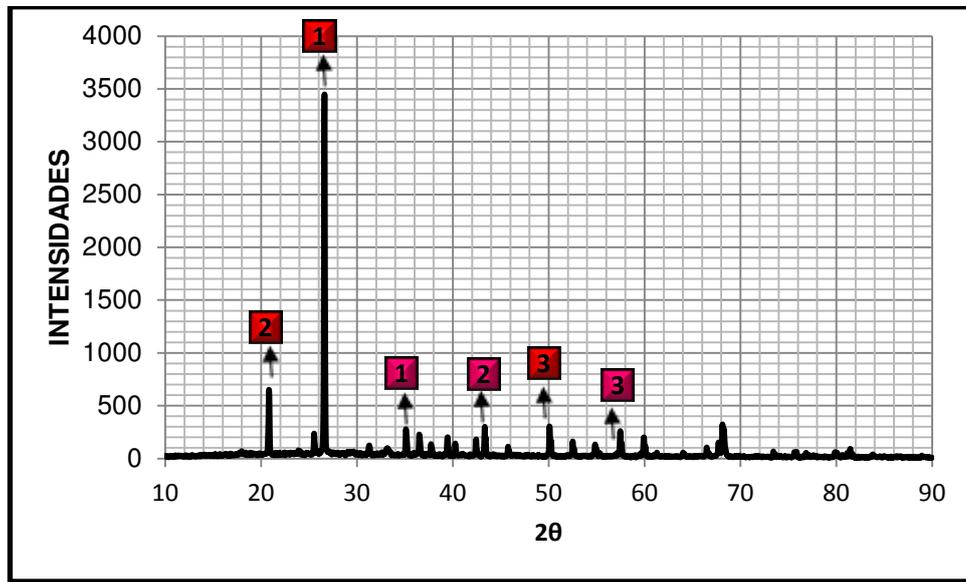


Figura 21: Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 110°C

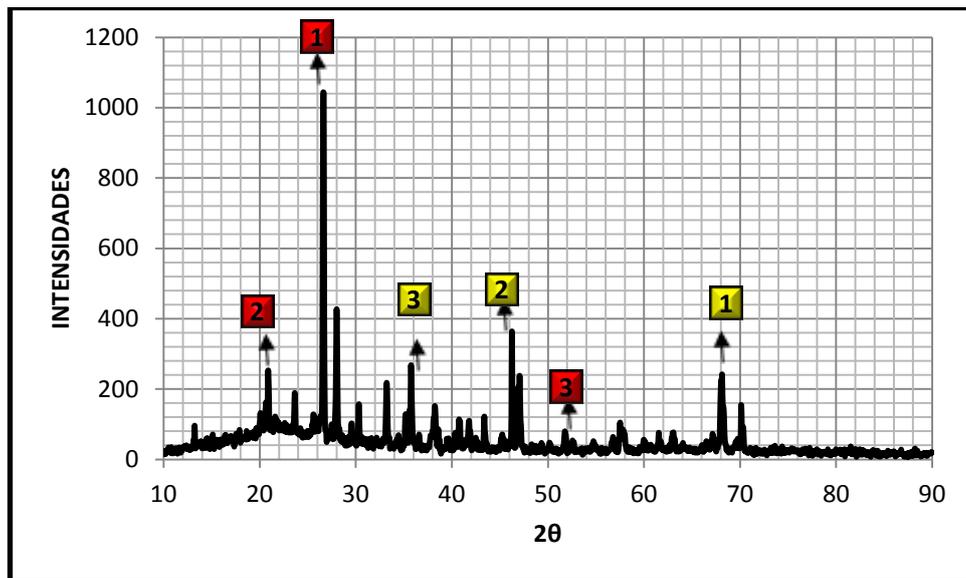


Figura 22: Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 810°C

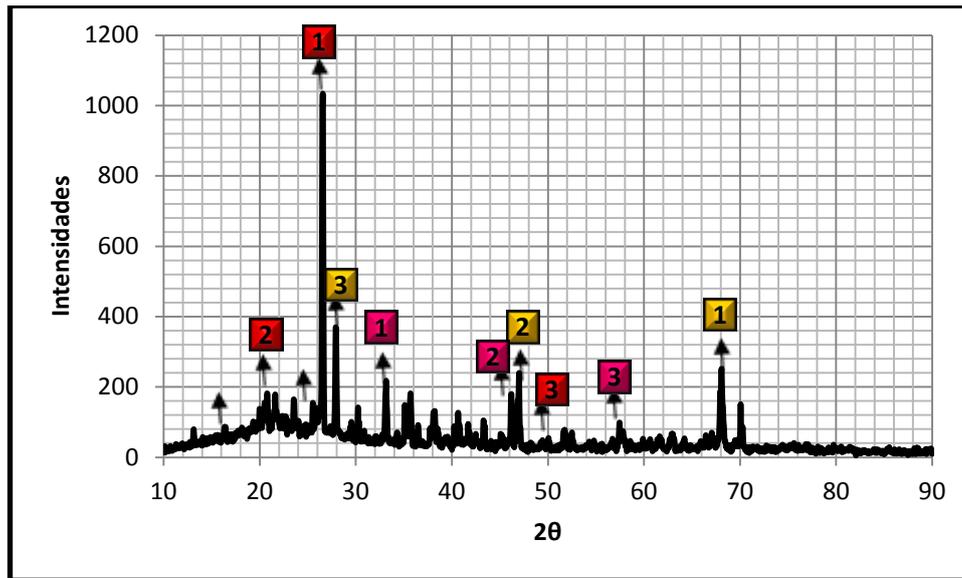


Figura 23: Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 1050°C

En la figura representada en como la No. 24 podemos observar el comparativo de los difractogramas correspondientes al material B en sus tres temperaturas (110, 815 y 1050°C) donde lo que destaca es en la etapa de 110°C (figura 21) tenemos reflexiones intensas de Oxido de silicio como cuarzo, alúmina como corindón, trazas de gehlenite, así como aluminato de calcio, tanto como en la figura 22 y 23 podemos observar la presencia del aluminato de Calcio.

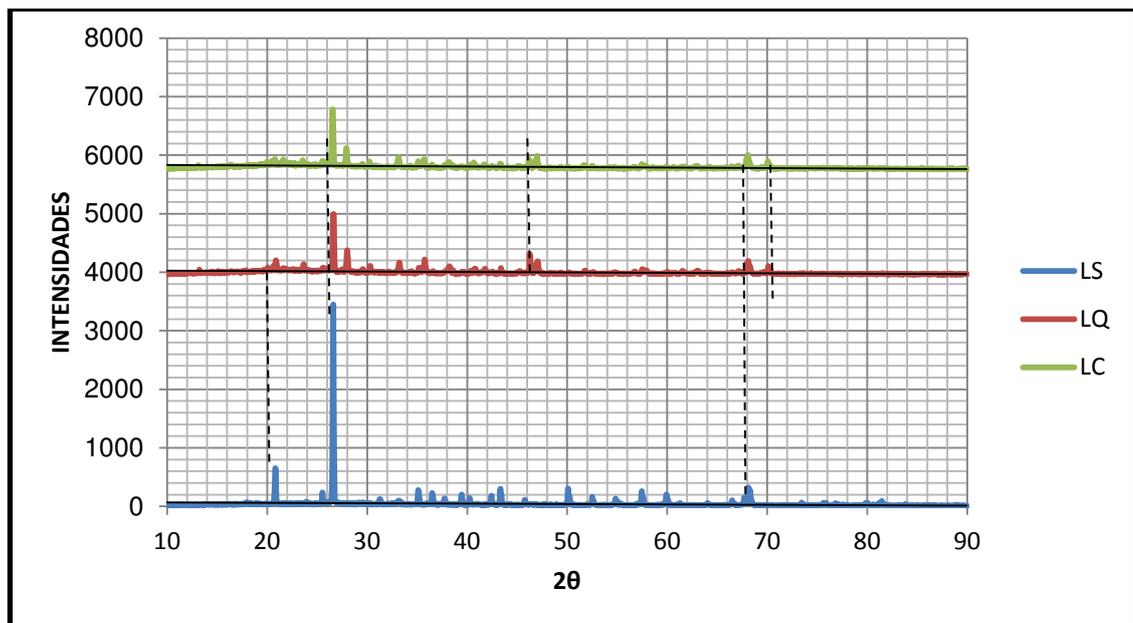


Figura 24: Empalme de difractos del Material B de las 3 temperaturas

La siguiente figura No. 25 representa el comportamiento del material C conformado, donde sus componentes característicos fueron los siguientes:

Con el color rojo identificamos la fase óxido de aluminio ■ ubicada con la tarjeta 01-076-8057, las 3 reflexiones principales de cada temperatura se presentan a continuación como (**ángulo 2θ , intensidad**):

(40.668,1.69) (17.880,1.85) (25.391,.384) Figura 25

Otra de las fases que se detectaron fue óxido de silicio como cristobalita (tarjeta 01-074-93-78 representada con el color azul ■ cuya reflexión característica se encuentra en el ángulo 2θ : 21.604 con una intensidad de 747 cps.

(25.564,68.6) (36.275,9.69) Figura 25

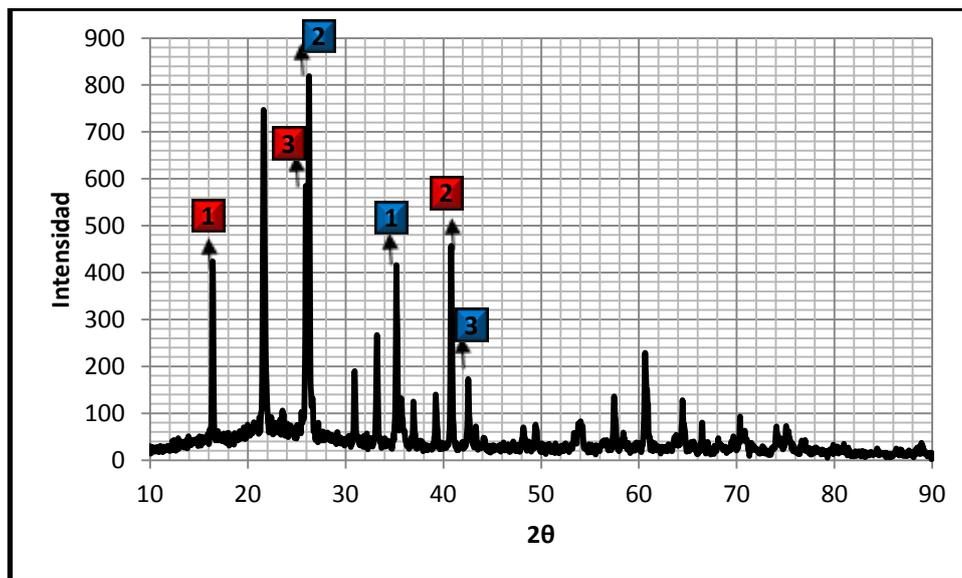


Figura 25: Comportamiento del difracto del ladrillo

De las principales fases que encontramos para nuestros tres materiales las características que más podemos destacar son las siguientes: óxido de silicio como cuarzo o cristobalita dependiendo de la temperatura de

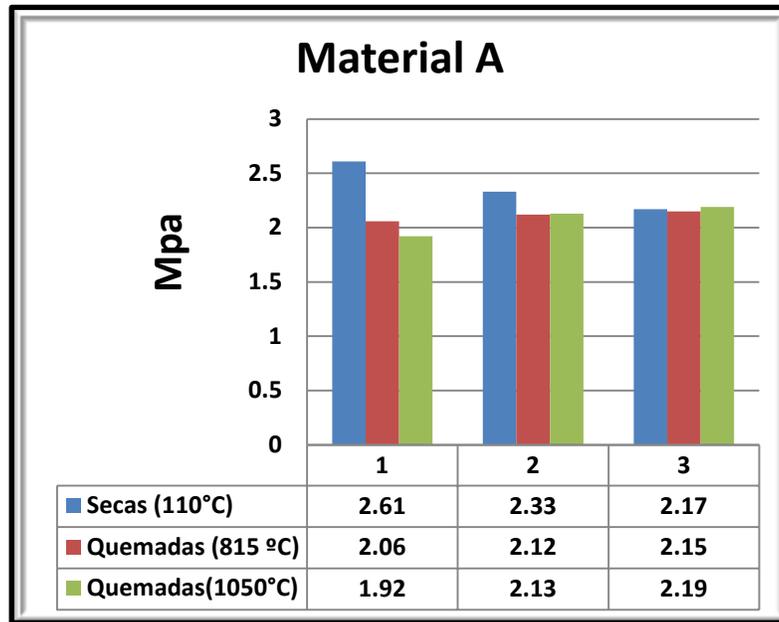
sinterización del refractario, alúmina como corindón, mullita, kyanita, aluminatos de calcio y trazas de gehlenita.

5.9 Resistencia a la compresión en Frío (CCS)

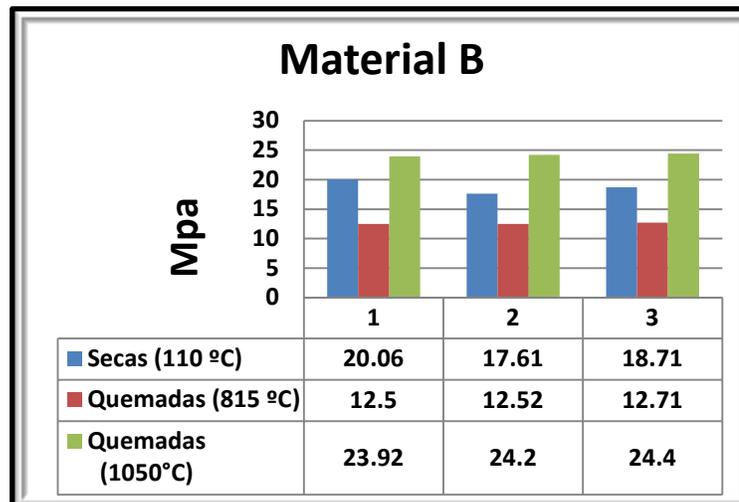
En cuanto a la resistencia a la compresión se puede apreciar para el material A que ésta disminuye conforme la temperatura incrementa, esta tendencia se atribuye al incremento en porosidad asociado al incremento en temperatura de sinterización (Gráfica 9).

En lo que se refiere al Material B (Gráfica 10) la variación en los resultados en mayor, a 815°C disminuye de una manera significativa la compresión en frío y para los 1050°C tenemos una recuperación de resistencia de 20.06 pasa a 12.5 (en la temperatura de 815°C) y finaliza con 23.92 MPa (en los 1050°C) , este comportamiento se puede explicar con ayuda del análisis por SEM donde pudimos ver que a 815°C teníamos una fase un poco alta de cuarzo, que bien comentamos que esta fase nos debilitaba las propiedades del material, en 1050°C sigue presente esta fase pero en una menor proporción y cabe destacar que con la técnica de DRX confirmamos a esta temperatura un cantidad considerable de la fase mullita que esta nos proporciona resistencia y por ello tenemos mejores resultados para la prueba de compresión en los 1050°C.

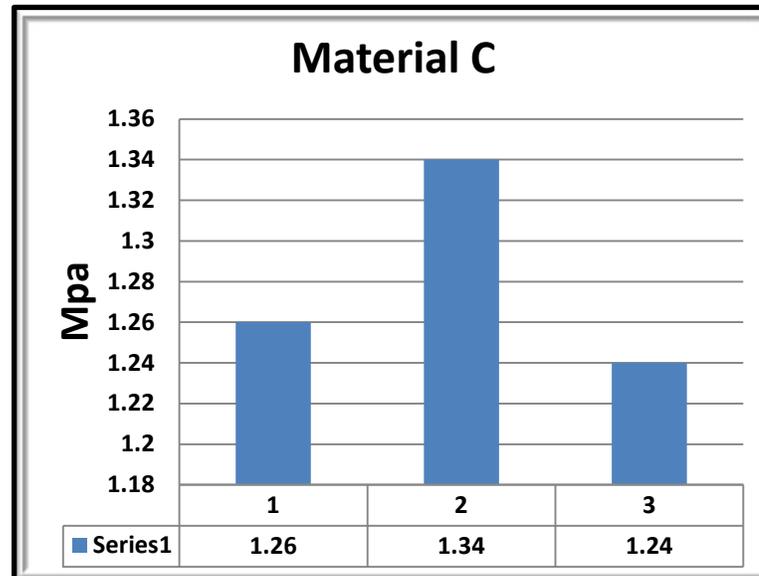
En la Gráfica 11 tenemos la tendencia del producto conformado (material C) en donde podemos notar una baja resistencia a la compresión, lo cual puede ser atribuido a los altos valores de porosidad presentados por estos materiales aislantes (mayores al 70%).



Gráfica 8. Resultados de resistencia a la compresión del Material A



Gráfica 9. Resultados de resistencias a la compresión del Material B

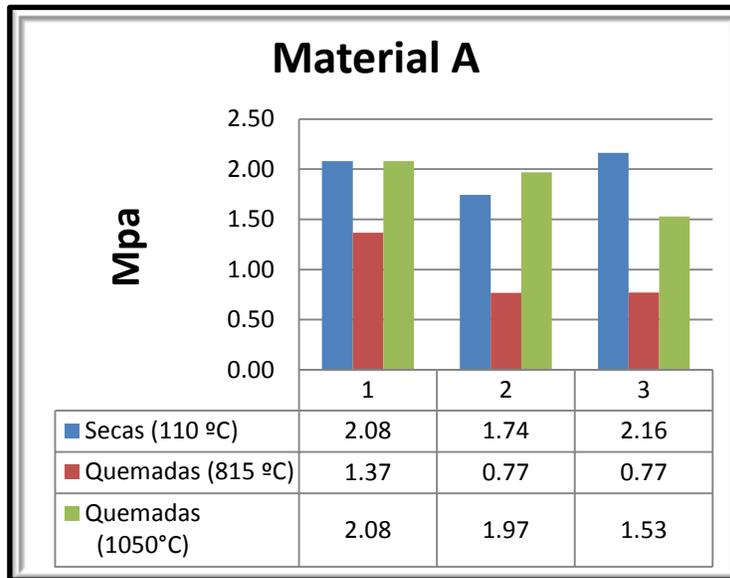


Gráfica 10. Resultados de resistencias a la compresión del Material C

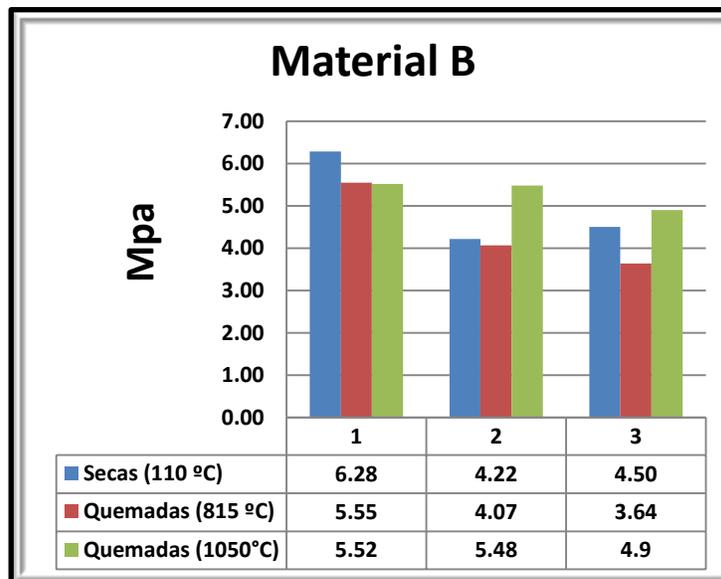
5.10 Módulo de Ruptura en Frío

En lo que respecta al módulo de ruptura en frío mostrado en las Gráficas 12 -14 podemos observar a que a diferencia de la resistencia en frío, los valores son menores, esto se debe a que estos productos no están diseñados para trabajar en flexión sino en compresión como la mayoría de los materiales cerámicos^[42,49-51], el cual es el caso de la aplicación para los materiales evaluados, horno de reducción directa.

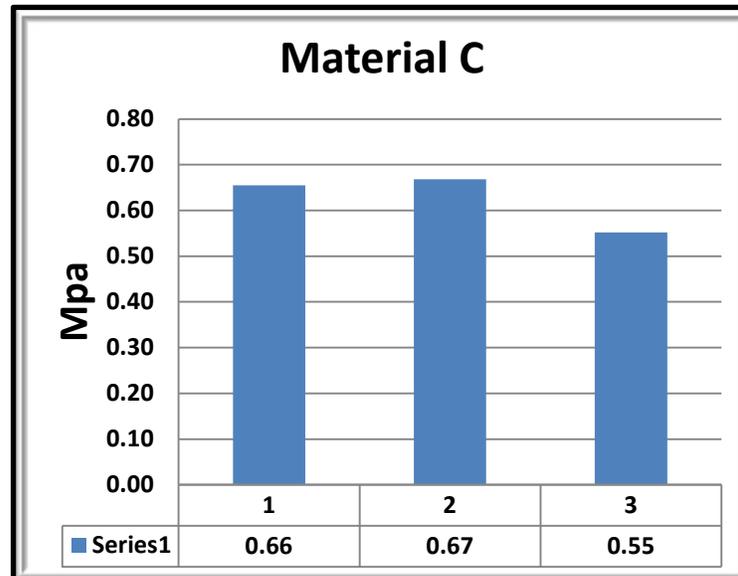
En la gráfica 12 correspondiente al Material A podemos observar que a 815°C disminuye un poco el valor y a los 1050°C retoman sus valores, para el Material B (gráfica 13) de 110°C a 1050°C disminuyen los valores. Para el Material C (gráfica 14) tenemos una tendencia uniforme, es decir los resultados de los 3 especímenes que hicimos oscilan entre los 0.55 a 0.66 MPa.



Gráfica 11. Resultados de módulos de ruptura del Material A



Gráfica 12. Resultados de módulos de ruptura del Material B

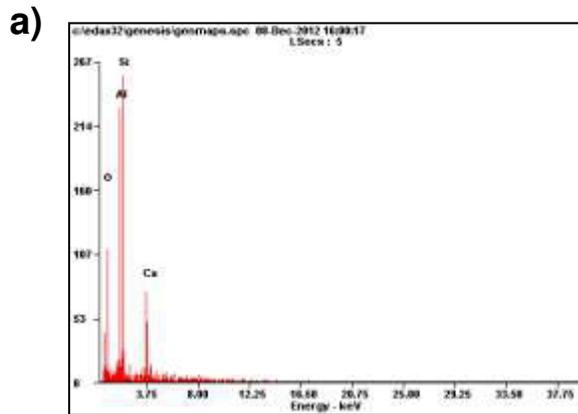


Gráfica 13. Resultados de módulos de ruptura del Material C

5.11 Ataque Químico

En las figuras 28, 29 y 30 se puede observar que el material no logró ser atacado por el hierro esponja, y podemos apreciarlo ya que en las composiciones no tenemos la presencia de elementos característicos de este material (hierro esponja) a pesar que físicamente existía una aparente penetración hacia el material.

Cara fría del Material A atacado con Hierro Esponja



Element	Wt%	At%
OK	41.49	56.84
NaK	01.47	01.40
AlK	17.66	14.34
SiK	24.28	18.95
SK	01.34	00.91
KK	01.94	01.09
CaK	11.82	06.46
Matrix	Correction	ZAF

b)

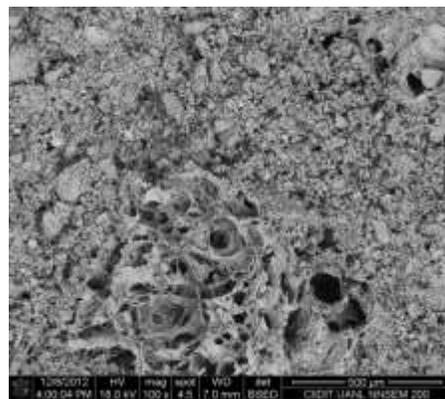
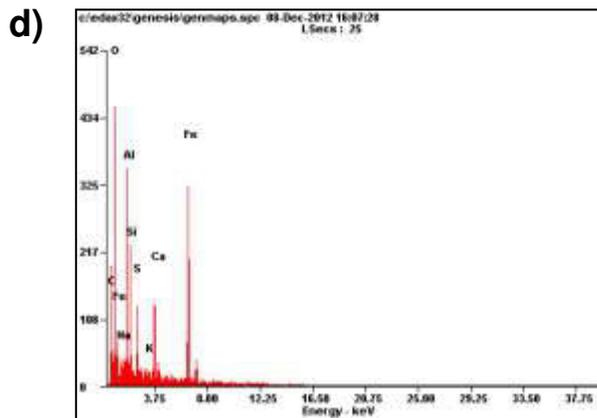


Figura 26 a) gráfica del material A b) composición química y c) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja.

Cara Intermedia del Material A atacado con Hierro Esponja



e)

Element	Wt%	At%
OK	34.28	52.10
NaK	01.43	01.51
AlK	19.05	17.17
SiK	17.32	15.00
SK	00.82	00.62
KK	00.74	00.46
CaK	09.78	05.94
FeK	16.57	07.22
Matrix	Correction	ZAF

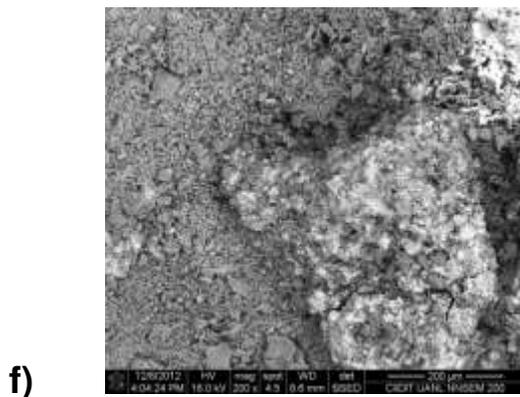
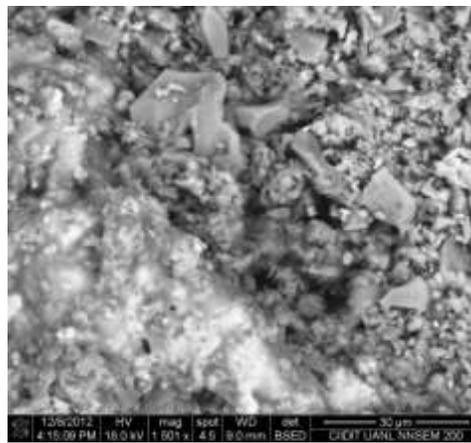
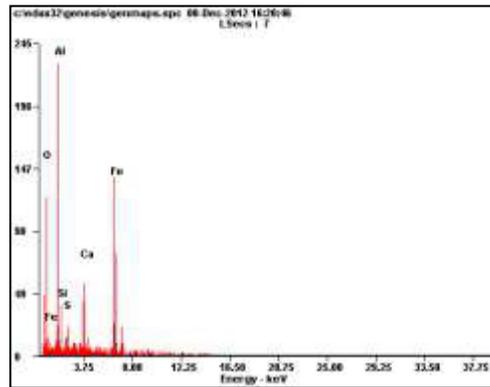


Figura 27 d) gráfica del material A e) composición química y f) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja. PARTE INTERMEDIA

Cara Caliente del Material A atacado con Hierro Esponja

h)

g)



i)

Figura 28 g) gráfica del material A h) composición química y i) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja. CARA CALIENTE

En las figuras 31-33 tenemos el análisis del ataque con el mineral de hierro que al igual forma que con el hierro esponja podemos apreciar que el ataque tuvo lo que se considera como una penetración NULA.

Cara fría del Material A atacado con Mineral de Hierro

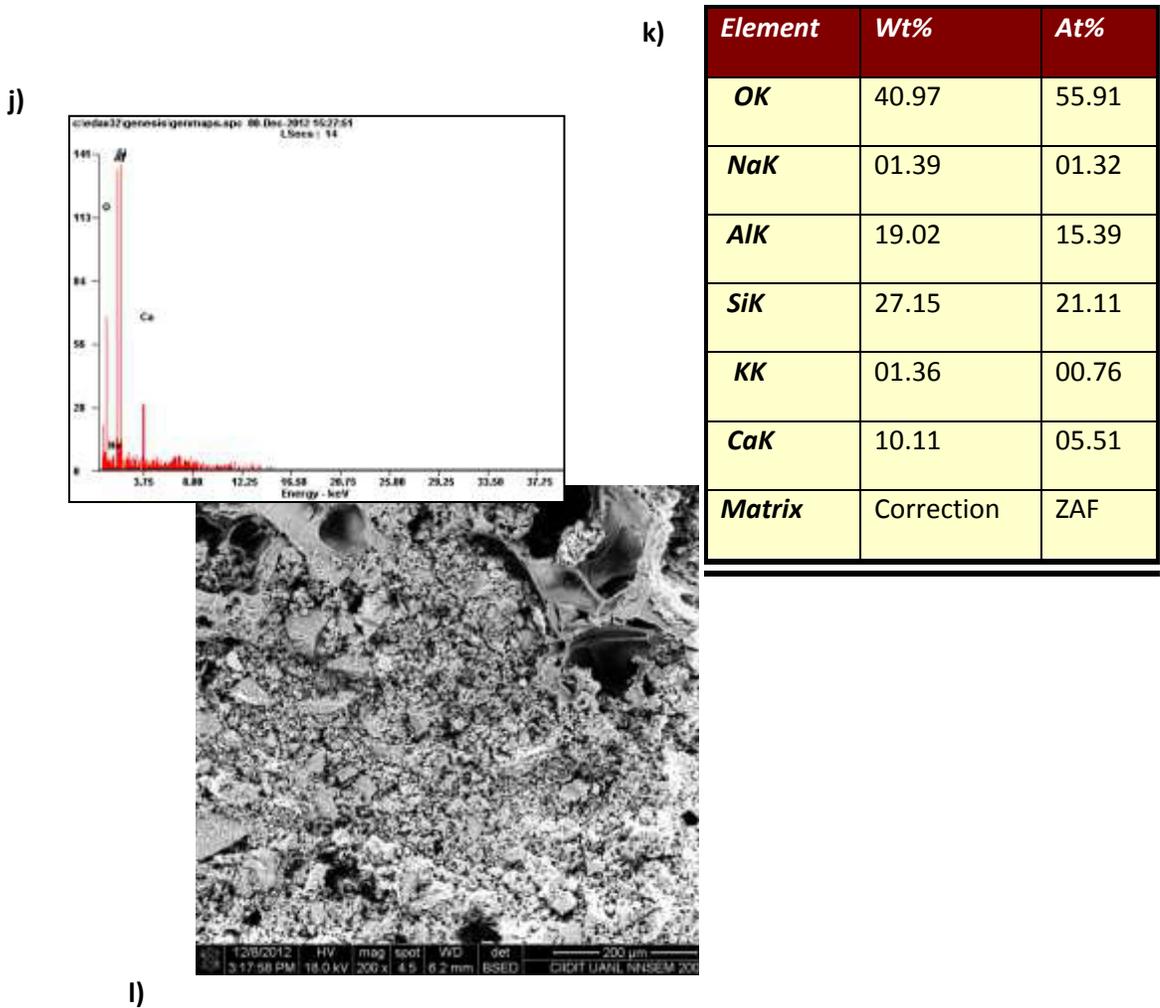
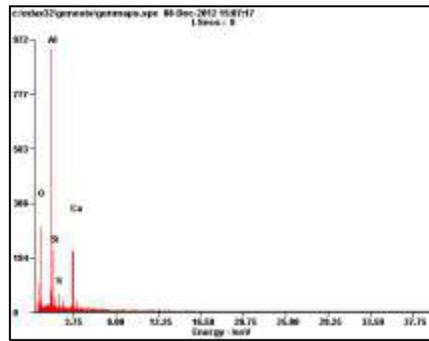


Figura 29 i) gráfica del material A k) composición química y l) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA FRÍA

Cara intermedia del Material A atacado con Mineral de Hierro

m)



n)

Element	Wt%	At%
OK	38.63	53.32
NaK	02.16	02.07
AlK	16.82	13.76
SiK	31.63	24.87
KK	03.13	01.77
CaK	07.64	04.21
Matrix	Correction	ZAF

ñ)

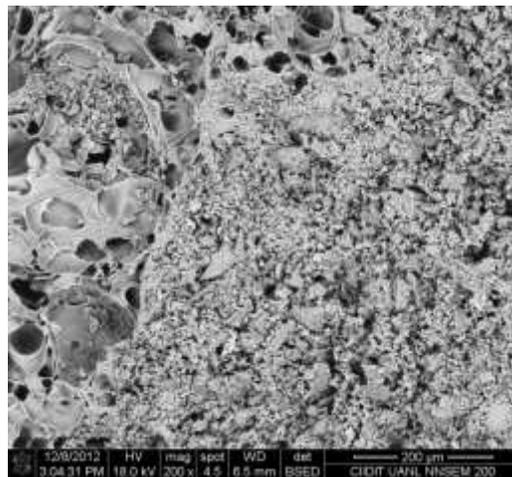
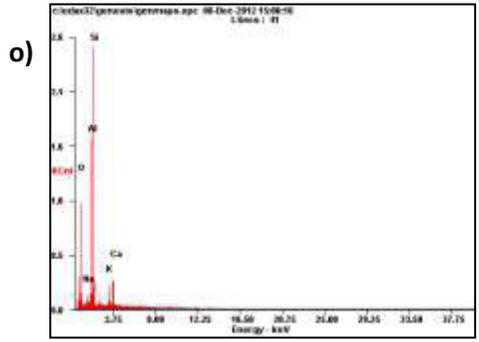


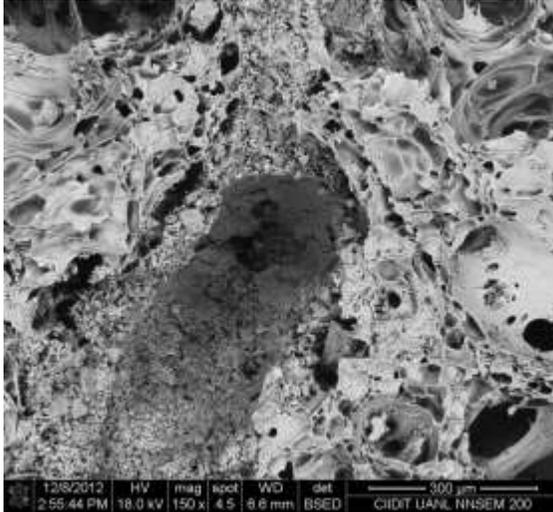
Figura 30 m) gráfica del material A n) composición química y ñ) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA INTERMEDIA

Cara caliente Material A atacado con Mineral de Hierro



p)

<i>Element</i>	<i>Wt%</i>	<i>At%</i>
<i>OK</i>	37.04	51.22
<i>NaK</i>	03.28	03.15
<i>AlK</i>	09.13	07.49
<i>SiK</i>	43.09	33.95
<i>KK</i>	05.65	03.20
<i>CaK</i>	01.81	01.00
<i>Matrix</i>	Correction	ZAF



q)

Figura 31 o) gráfica del material A p) composición química y q) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA CALIENTE

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

En conclusión los concretos que mostraron una mayor resistencia a la compresión fueron los concretos base silica coloidal , esto en comparación al ligado con cementos de aluminatos de calcio esto se lo atribuimos a su granulometría ya que los concretos a base de silica coloidal presentaron una granulometría más gruesa y una inconsistencia en la distribución de sus agregados a lo que le ayuda a tener una menor porosidad y por ende una mayor resistencia a la compresión que el material con liga de aluminatos de calcio, cabe destacar que en el análisis del ladrillo obtuvimos compresiones muy bajas y bien presume de una alta porosidad.

Lo anterior se ve sustentado con la prueba de ataque químico en donde en el material con liga de silica coloidal no se observa alteración en presencia de materiales fundidos, es decir presenta una penetración NULA.

Podemos definir que en general los concretos a base silica coloidal mostraron un mejor comportamiento en cuanto a las pruebas que les realizamos, sin embargo para el uso del horno de reducción directa podríamos deducir que esta sobrado en cuanto a sus beneficios para el uso que le queremos dar, probablemente resista más temperatura y sus propiedades están por encima de lo que requiere el horno, así como su costo es muy superior haciendo comparación con los base aluminato de calcio, el uso y propiedades que nos mostró estos últimos (Material A) son óptimos para la aplicación en este horno de reducción directa.

Por esto último las recomendaciones que propongo es evaluar a temperaturas mayores a 1050°C los concretos de liga silica coloidal para poder observar el comportamiento en cuanto a sus propiedades mecánicas, así como diseñar formulaciones con diferentes tipos de silica coloidal de menor costo para hacer este producto competitivo en cuando a los convencionales base aluminatos de calcio.

REFERENCIAS

1. A. Souri, F.K. Nia, H. Sarpoolaky, "Improving Thermo-Mechanical Properties of Tabular Alumina Castables Via Using Nano Structured Colloidal Silica", *Nanomaterials Applications and Properties*, 2 (2), 254-259, 2011.
2. M. Velez "Concrete and Cement" Chapter 8 , 135-150 *CERAMIC AND GLASS MATERIALS* 2008.
3. K. H. Jürgen Buschow, Robert W. Cahn, Merton C. Flemings, Bernard Ilshne, Edward J. Kramer, Subhash Mahajan, and Patrick Veysi ere "Encyclopedia of Materials: Science and Technology" , ISBN: 978-0-08-043152-9 , October 2011.
4. Norma ASTM C109: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars cube specimens.
5. M.R. Ismael, R.D dos Anjos, R. Salomao and V.C Pandolfelli, "Colloidal Silica as a Nanostructured Binder for Refractory Castables", *Refractories Applications and News*, 11 (4), 16-20, 2006.
6. Mendoza Bedolla, J.L., "Evoluci n tecnol gica de concretos refractarios. Parte 1-Sistema CaO-Al₂O₃-SiO₂", *Infoceram* 14 (1), 2003.

7. Hewlett, P., "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", Elsevier Science & Technology books, Fourth edition, 2004.
8. 8N. RICHARD, N. LEQUEUX and I. BOCH , "Low-shrinkage refractories bonded with high-alumina cement mixed with colloidal silica" JOURNAL DE PHYSIQUE IV Colloque C7, supplement au Journal de Physique 111, Volume 3, novembre 1993.
9. S. Ribeiro, J.A. Rodrigues "The influence of microstructure on the maximum load and fracture energy of refractory castables" Ceramics International, Volume 36, Issue 1, Pages 263–274, January 2010.
10. W.E. Lee, W. Vieira, S. Zhang, K. Ghanbari Ahari, H. Sarpoolaky, C. Parr "Castable refractory concretes" Int. Mater. Rev46., pp. 145–167, (2001).
11. J.M. Auvray, C. Gault, M. Huger, "Evolution of elastic properties and microstructural changes versus temperature in bonding phases of alumina and alumina-magnesia refractory castable" J. Am. Ceram. Soc.x, pp. 3489–3496, , 27 (2007).
12. J.A. Rodrigues, V.C. Pandolfelli "Thermal treatment temperature and its influence on the thermal shock parameters of refractory castables", Interceram, 51 (3) , pp. 186–189, (2002).
13. D.R. Larson, J.A. Coppola, D.P.H. Hasselman, R.C. Bradt "Fracture toughness and spalling behavior of high- Al_2O_3 refractories" J. Am. Ceram. Soc., 57 (10), pp. 417–421, (1974).

14. Y.C. Ko, "Influence of the total fines content on the thermal shock damage resistance of Al₂O₃-spinel castables" *Ceram. Int.*, 27, pp. 501–507, (2001).
15. R.K. Iler, "The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerisation, Colloid and Surface Properties and Biochemistry" John Wiley & Sons, US (1979).
16. S. Banerjee, "Monolithic Refractories: a Comprehensive Handbook" World Scientific/The American Ceramic Society (1988).
17. X. Zhu et al.. "Dispersion properties of alumina powders in silica sol" *J. Eur. Ceram. Soc.*, 21 (16), pp. 2885–2897, 2001.
18. R.D. dos Anjos, M.R. Ismael, I.R. de Oliveira, V.C. Pandolfelli "Workability and setting parameters evaluation of colloidal silica bonded refractory suspensions" *Ceramics International*, Volume 34, Issue 1, Pages 165–171 January 2008.
19. C. Rößler, A. Eberhardt, H. Kučerová, B. Möser, "Influence of hydration on the fluidity of normal Portland cement pastes" *Cement and Concrete Research* 38 (2008) 897–906.
20. Norma ASTM C-401 "Clasificación de concretos refractarios".
21. N.E. Bunt, "Advanced Techniques for Measuring Rheology of Cement-Based Refractories", 73 (3), 1994 .

- 22.** J. Jairo Giraldo, R. Vladimir Pérez, ,” Concreto Bajo el microscopio: Petrografía, “ Ciencia aplicada al estudio del concreto y sus materias primas” .
- 23.** L. Chan Yam, R. Solís Carcaño, E. I. Moreno ” Influencia de los Agregados Pétreos en las Características del Concreto” , Chan J., *et. al.* / Ingeniería 7-2 (2003) 39-46.
- 24.** Norma ASTM C- 260 “Aditivos Incluidores de Aire”.
- 25.7** Norma ASTM C 1017 “Aditivos Autocompactantes”.
- 26.** U. Ortiz, J. Aguilar, J. Berrún, R. Viramontes ”Formación de Capas de Hierro en Reactores de Reducción Directa” PARTE I, Ingenierías, IV(11), 2001 .
- 27.** Charles A. Schacht. “Refractories handbook,” Marcel Dekker, Inc. (2004).
- 28.** C. Parr, Ch. Whörmeyer, “The Advantages of Calcium Aluminate Cement as a Castable Bonding System”, Kerneos, Technical Paper.
- 29.** Yu. E. Pivinskii, “New Refractory Concretes” [in Russian], Izd. BelGTASM, Belgorod (1996).
- 30.** X. Cong y R. J. Kirkpatrick. “Hydration of Calcium Aluminate Cements: A Solid State ^{27}Al NMR Study”. J. Am. Ceram. Soc. 76 [2] 409-416 (1993).
- 31.** A. Rittel, W. Gessner y D. Muller, “On The Hydration of CA at Various Temperatures”. Brit. Ceram. Trans. J. 84 25-28 (1985).

- 32.** H. G. Midgley y K. Pettifer. "Electron Optical Study of Hydrated High Alumina Cements Paste". Trans. Brit. Ceram. Soc. 71 55-58 (1972).
- 33.** "Los aditivos para concretos en 6 pasos", cnci@cnci.org.za Cement & Concrete Institute, Midrand, 1997(2001) .
- 34.** http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/davila_n_jr/capitulo6.pdf.
- 35.** Norma ASTM C 92- 95 "Standard Test Methods for Sieve Analysis of Refractory Materials" .
- 36.** Norma ASTM C109 "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars cube specimens".
- 37.** Norma ASTM C 830-79 "Apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of burned refractory brick and shapes by vacuum pressure".
- 38.** Norma ASTM C 133-97 "Standard Test Methods for Cold Crushing Strength and Modulus of Rupture of Refractories" .
- 39.** Norma DIN 1969 " Ataque Químico".
- 40.** Henryk Matusiewicz, "Atom trapping and in situ preconcentration techniques for flame atomic absorption spectrometry" Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy Volume 52, Issue 12, Pages 1711–1736, 10 October 1997.

- 41.**V. Ravichandran, "Powder and Glazing Incidence: X-Ray Diffraction Techniques: Some Application in Research and Industry" University of Madras, Chennai, India, (2005).
- 42.**Ian Knizek, "Los Parámetros de Refractarios Moldeables y Prefabricados", Editorial Hersa, S.A. (1989).
- 43.**M.D.M. Innocentini, R. G. Pileggi, A. R. Stuart, V. C. Pandonfelli, "How PDS Affect Permeability of Refractory Castables". Amer. Ceram. Soc. Bull, 31-36 (2001).
- 44.**R.G. Pileggi, V.C. Pandonfelli, "Rheology and Particle-Size Distribution of Pumpable Refractory Castable", Part I, 80 (5) 31-36 (2001).
- 45.**L.P Krietz, R. E. Fisher, J. G Beetz, A.M Seram Soc. Bull, 69 (10), 1690-1693, (1990).
- 46.**J.P Khiel, V. Jost, B. A. Clavaud, US Pat. 4 111, 711, Septiembre, (1978).
- 47.**I. V. Grigor'ev and M. A. Rabinovich, "Machine for cutting and grinding insulating brick" No. 7, pp. 22–23, July, 1969.
- 48.**I. V. Grigor'ev and M. A. Rabinovich fe", Volumen 10, 7-8 (1969) .
- 49.**Stephen D. Campbell, "A comparative strength study of metal ceramic and all-ceramic esthetic materials: Modulus of rupture", The Journal of Prosthetic Dentistry, Volume 62, Issue 4, Pages 476–479, October 1989.

- 50.**Mark Knight, Neil Thomson, “ Undreground Infraestructur Research: Municipal, Industrial and Enviromental Aplications”, Sweets & Zeitlinger, 2001.
- 51.**Neil McKenzie, Kep Coughlan, Hamish Cresswell, “Soil Physical Measurment and Interpretation for Land Evaluation”, CSIRO PUBLISHING, 2002.
- 52.**William D. Calliester, Jr. “Introduccion a la Ingenieria de los Materiales 1” Editoria REVERTE Barcelona ESPAÑA, Julio 2007 pags. 450-456.
- 53.**Revista: Lorenzo J. Viviana “El hombre y sus materiales desde su origen en las ciencia hasta sus aplicaciones en los mercados” , SINTERIZADO Revista No 6 , 07.2010.
- 54.**Barnes, H.L., (1967). Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Primera Edición, Hubert.
- 55.**L. Barnes (editor), Holt, Rinehart and Winston Inc. Publication. Burnham, C.W. y Ohmoto, H. (1980). Late-Stage Processes of Felsic Magmatism. Mining Geology Special Issue, No. 8, 1-11.
- 56.**J. PUIG MONTRAVETA F. SANCHEZ PIREZ Cementos Molins, S. A, “Los cementos alumlnosos y sus aplicaciones refractarias” Paginas: 19-24 ENERO-FEBRERO 1974.
- 57.**Restrepo Gutierrez Juan Camilo, Restrepo Baena Oscar Jaime, Tobon Jorge Ivan, “Efectos de la adicion de metacaolin en el cemento portland” Dyna, Nov. 2006 vol. 73 # 150 Universidad Nacional de Colombia, Medellin Colombia, pp. 131-141.

58. Servando Chinchón Yepes, Miguel Ángel Sanjuan Barbudo, “El cemento de aluminato de calcio y sus prefabricados” Universidad de Alicante, 05/05/2008 pp. 13-16.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de concretos en función del contenido de CaO.....17

Tabla 2. Clasificación de concretos refractarios en cuanto a su porosidad....17

Tabla 3. Clasificación de Concretos Refractarios en cuanto a su porosidad...19

Tabla 4. Porcentaje de elementos, prueba realizada por medio del análisis químico.....44

Tabla5. Porcentajes óptimos de agua o silica para obtener una buena trabajabilidad.....46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del reactor de reducción directa.....	20
Figura 2. Proceso de reacción de los aluminatos de calcio.....	23
Figura 3. Ro-tap con cascada de mallas.....	32
Figura 4. Muestra la prueba realizada del ball in hand del material A.....	34
Figura 5 .Prueba de porosidad.....	36
Figura 6. Prueba de compresión en frío.....	38
Figura 7 .Prueba de módulo de ruptura	40
Figura 8 .Prueba de ataque químico.....	41
Fig. 9 Cambios en la forma y tamaño de los poros durante el proceso de sinterización.....	47
Figura 10. Rampas de Secado y Calentamiento para el Material A	48
Figura 11. Rampas de Secado y Calentamiento para el Material B.....	49
Figura 12. Imágenes de Microscopia Optica.....	52
Figura 13: Imágenes de SEM.....	53
Figura 14. Microestructura y análisis químico (EDS).....	55
Figura 15: Microestructura Material B.....	56
Figura 16. Microestructura y EDS Material B.....	58

Figura 17. Difractograma correspondiente a la muestra de Material A a 110°C.....	59
Figura 18. Difractograma del Material A a una temperatura de 810°.....	60
Figura 19. Difractograma del Material A a una temperatura de 1050°C.....	60
Figura 20. Empalme de difractos del Material A de las 3 temperaturas	61
Figura 21. Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 110°C.....	62
Figura 22. Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 810°C.....	62
Figura 23. Comportamiento del difracto del Material B a una temperatura de 1050°C.....	63
Figura 24. Empalme de difractos del Material B de las 3 temperaturas	63
Figura 25. Comportamiento del difracto del ladrillo.....	64
Figura 26 .a) gráfica del material A b) composición química y c) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja.....	71
Figura 27 .d) gráfica del material A e) composición química y f) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja. PARTE INTERMEDIA	72
Figura 28 .g) gráfica del material A h) composición química y i) imagen (SEM) del ataque con hierro esponja. CARA CALIENTE	73
Figura 29. i) gráfica del material A j) composición química y k) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA FRIA.....	74
Figura 30. m) gráfica del material A n) composición química y ñ) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA INTERMEDIA.....	75

Figura 31 .o) gráfica del material A p) composición química y q) imagen (SEM) del ataque con mineral de hierro. CARA CALIENTE.....76

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1 <u>Valor de γ_{wof}</u>	8
Ecuación 4.4.1 <u>Porosidad aparente</u>	35
Ecuación 4.4.2 <u>Densidad Especifica</u>	35
Ecuación 4.9.1 <u>Modulo de ruptura</u>	39

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Grafica 1. Grafica representativa del tamaño y distribución de los agregados.....	43
Gráfica 2. Densidad del Material A.....	50
Gráfica 3. Porosidad aparente del Material A.....	50
Gráfica 4. Densidad del Material B.....	51
Gráfica 5. Porosidad aparente del Material B.....	51
Gráfica 6. Densidad del Material C	51
Gráfica 7. Porosidad aparente del Material C.....	51
Gráfica 8. Resultados de resistencia a la compresión del Material A.....	67
Gráfica 9. Resultados de resistencias a la compresión del Material B.....	67
Gráfica 10. Resultados de resistencias a la compresión del Material C.....	68
Gráfica 11. Resultados de módulos de ruptura del Material A.....	69
Gráfica 12. Resultados de módulos de ruptura del Material B.....	69
Gráfica 13. Resultados de módulos de ruptura del Material C.....	70

APENDICE

Agregado – Material inerte que ayuda a ligar a la matriz para configurar una masa aglomerada.

Agua capilar – Se lleva a cabo en la superficie por las fuerzas activas.

Aguja de Vicat - Aparato o aguja de construcción, varilla cilíndrica de hierro utilizada para controlar el tiempo de fraguado del cemento.

AH – $(Al_2O_3 \cdot H_2O)$

AH₃ – $(Al_2O_3 \cdot 3H_2O)$

Al₂O₃ – Alúmina.

Anortita – $(CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2)$

ASTM – American Society for Testing Materials.

Ball in hand – Prueba para determinar la trabajabilidad.

BC- Bajo cemento.

Briqueta – Bloque solido combustible, para generar calor utilizados en estufas, hornos etc.

CA – Monoaluminato de Calcio.

CA₂ – Dialuminato de Calcio.

CaO – Oxido de Calcio.

CAC – Cemento de Aluminato de Calcio.

C/A – Oxido de Calcio/ Alúmina.

CAH₁₀ – $(CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O)$

C₂AH₈ – $(2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O)$

C₃AH₆ – (3CaO.Al₂O₃.6H₂O)

C₁₂A₇ – (12CaO.7Al₂O₃)

Cemento aluminoso – Tipo de cemento que cuya fabricación se emplea caliza y bauxita, calentándose hasta los 1600°C, enfriándose rápidamente pasando por un proceso de molido.

Concretos aislantes – Arcillas calcinadas y ligadas a agregados livianos como perlitas y dolomitas.

Concretos densos – Son mezclas de arcillas calcinadas, bauxitas de determinada granulometría, ligantes y plastificantes que permiten un fraguado hidráulico.

Dolomita – CaMg(CO₃)₂

Emplastos – Masa blanda de una sustancia mezclada con agua, son piezas pequeñas.

Enlaces siloxanos – (Si-O-Si)

Estringita – Fase que influye en la resistencia mecánica.

Grupos Hidroxilo - (Si-OH)

Gehlinita – (2CaO.Al₂O₃.SiO₂)

HAC- Cemento de alta alúmina.

Hidratación – Secuencia de reacciones químicas, liberación de calor.

K₂O – Oxido de Potasio.

Ladrillos refractarios o bloques – Tienen caras lisas, son buenos aislantes

Material A – Concreto Silico- Aluminoso.

Material B – Concreto Cero Cemento

Material C – Ladrillo

Na₂O – Oxido de Sodio.

Precipitación – Reacción química en la cual se produce un sólido a partir de un líquido.

Rot-tap – Equipo que produce un movimiento circular y de golpeteo que se da en el cribado a mano. Usado conjuntamente con el juego de cribas U.S. Sieve Series, este sistema asegura un análisis uniforme y consistente de partículas.

SC – Sin cemento.

Segregación – Separación de granos finos y gruesos.

SiO₂ . Al₂O₃ – Mullita.

SiO₂ – Oxido de Silicio.

Sílice Coloidal - Es una solución coloidal de alta hidratación molecular de partículas de sílice dispersas en agua, la medida de sus partículas que oscila entre las 10 y 20 milimicras, el área específica de superficie es muy amplia. Al ser las partículas de Sílica sol transparente no afectan al color de los objetos.

UBS – Ultrabajo cemento.

ZrO₂ - Oxido de Zirconio.