



## **UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL  
CONCRETO REFRACTARIO Y LA FIBRA  
DE CERAMICA REFRACTARIA EN  
CALDERA PIROTUBULAR CYMSA DE 20  
HP DEL TIPO HORIZONTAL, EN LA  
EMPRESA FRUTIKA C.A BEJUMA-  
CARABOBO.**

**Autor:**  
Alexis Henríquez  
C.I: 24.647.665

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 871



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA INGENIERIA MECÁNICA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO REFRACTARIO Y LA  
FIBRA DE CERAMICA REFRACTARIA EN CALDERA PIROTUBULAR  
CYMSA DE 20 HP DEL TIPO HORIZONTAL, EN LA EMPRESA FRUTIKA  
C.A BEJUMA-CARABOBO.**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
**INGENIERO MECÁNICO**

**Autor:**  
Alexis Henríquez  
C.I: 24.647.665  
**Tutora: Ing.** Alicia De Pizzella

San Diego, noviembre del 2018







**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA INGENIERIA MECÁNICA**

**ACEPTACIÓN DEL TUTOR**

Quien suscribe, Ingeniero Alicia de Pizzella portador de la cédula de identidad N° 4598880 en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por el ciudadano Alexis Henríquez; portador de la cédula de identidad N°24.647.665. titulado **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO REFRACTARIO Y LA FIBRA DE CERAMICA REFRACTARIA EN CALDERA PIROTUBULAR CYMSA DE 20 HP DEL TIPO HORIZONTAL, EN LA EMPRESA FRUTIKA C.A BEJUMA-CARABOBO** presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, en el mes de noviembre del Año Dos Mil Dieciocho

---

Ing. Alicia de Pizzella

C.I.: 4598880



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

San Diego, noviembre de 2018

### **ACTA DE REVISIÓN METODOLÓGICA DEL TRABAJO DE GRADO**

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado:  
**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO REFRACTARIO Y LA FIBRA DE CERAMICA REFRACTARIA EN CALDERA PIROTUBULAR CYMSA DE 20 HP DEL TIPO HORIZONTAL, EN LA EMPRESA FRUTIKA C.A BEJUMA-CARABOBO**, ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Ing. Alicia de Pizzella

Tutor Académico

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Fecha

Ing. Alicia de Pizzella

Tutor Metodológico

\_\_\_\_\_

Firma

\_\_\_\_\_

Fecha

## ÍNDICE

	pp.
<b>CONTENIDO</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	5
1.4 Justificación de la Investigación.....	5
1.5 Alcance y Limitaciones.....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Bases Teóricas.....	10
2.2.1 Las calderas o generadores de vapor .....	10
2.2.1.1 Tipos de Calderas.....	11
2.2.1.2 Calderas pirotubulares.....	12
2.2.1.3 Estructura de las calderas pirotubulares.....	13
2.2.1.4 Funcionamiento de las calderas pirotubulares.....	14
2.2.1.5 Aplicaciones y tendencias de las calderas pirotubulares.....	15
2.2.2 Material refractario.....	15
2.2.3 Refractarios básicos.....	16
2.2.4 Concreto Refractario .....	17
2.2.4.1 Tipos de concretos refractarios.....	18
2.2.4.2 Uso de los concretos refractarios en la Industria.....	19
2.2.5 Mineralogía.....	26
2.2.6 Cerámica Refractaria.....	26
2.2.6.1 Características y usos de las fibras de cerámicas .....	29
2.2.6.2 propiedades físicas de las fibras cerámicas refractarias.....	30
2.2.6.3 Composición y propiedades química de las fibras cerámicas.....	30
2.2.6.4 Ventajas de las fibras cerámicas refractarias.....	30
2.2.6.5 Aplicaciones de las fibras cerámicas.....	31
2.3 Definición de términos básicos.....	32

### **III MARCO METODOLÓGICO**

3.1 Tipo de investigación.....	37
3.2 Diseño de la investigación.....	38
3.3 Nivel de la investigación.....	38
3.4 Población y muestra.....	39
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	39
3.6 Fases Metodológicas.....	41

### **IV RECURSOS**

4.1 Recursos Humanos.....	43
4.2 Recursos Institucionales.....	43

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

#### **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>TABLA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>pp.</b>
1	Propiedades principales de los materiales refractarios.....	16
2	Tipos de concretos refractarios según su composición de CaO.....	19
3	Principales componentes químicos de los cementos aluminosos.....	21
4	Datos técnicos fibra cerámica refractaria.....	32
5	Manta de Alúmina-Sílice-Zirconio, Cambios de Fase.....	53
6	Manta de Alúmina-Sílice-Zirconio, Cambios de Fase.....	54
7	Velocidades máximas para flujo laminar.....	57
8	Propiedades físicas concreto ULTRA 40.....	63
9	Propiedades físicas concreto ULTRA 80.....	64
10	Propiedades físicas concreto ULTRA 50.....	66
11	Propiedades físicas manta kaowool 2300.....	67
12	Análisis químico manta kaowool 2300.....	67
13	Propiedades físicas manta C.....	68
14	Análisis químico manta C.....	68
15	Conductividad térmica manta C.....	68
16	Propiedades físicas Manta CM (Lana Mineral con Malla).....	69
17	Análisis químico Manta CM (Lana Mineral con Malla).....	69
18	Conductividad térmica Manta CM (Lana Mineral con Malla).....	69
19	Comparativo de las propiedades y características entre el concreto refractario y la Fibra cerámica refractaria.....	70

## INDICE DE FIGURAS

<b>TABLA</b>	<b>CONTENIDO</b>	<b>pp.</b>
1	Caldera pirotubular .....	12
2	Caldera pirotubular y sus componentes.....	14
3	Diagrama de fases CaO - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>2</sub> (C-A- S).....	26
4	Filamentos de Fibra Cerámica Refractaria.....	28
5	Gráfica de la resistencia mecánica a la compresión del concreto refractario con diferentes % de ácido cítrico.....	45
6	Gráfica de densidad y % porosidad aparente del diseño de experimentos.....	47
7	Transferencia de calor en F.C.R .....	50
8	Modos principales de Transferencia de Calor.....	51
9	Encogimiento a Largo Plazo F.C.R .....	55
10	Cristalización Inducida Por Tensión.....	56
11	Matriz FODA del concreto refractario y la fibra cerámica refractaria.....	71



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO REFRACTARIO Y LA  
FIBRA DE CERAMICA REFRACTARIA EN CALDERAS  
PIROTUBULARES**

**Autor:** Alexis Henríquez

**Tutor:** Ing. Alicia de Pizzella

**Fecha:** noviembre 2018

**RESUMEN**

La producción de vapor y la generación de energía son partes muy importantes en los procesos industriales y requieren la máxima fiabilidad de las calderas en planta. Una parte integral de las calderas es su revestimiento refractario. La confiabilidad de un refractario para su particular aplicación está determinada por su resistencia al ataque químico, así como su resistencia mecánica y térmica en el proceso de operación. Sin embargo, uno de los principales problemas que se presentan en las calderas es el rendimiento de concreto refractarios que se utilizan como recubrimiento debido a que éstos se van deteriorando al estar en contacto directo con llamas a altas temperaturas y agua. También es importante destacar que el único refractario presente en las calderas piro tubulares no es el concreto, sino que también, están recubiertas por una manta de fibra de cerámica la cual es altamente versátil. Es por ello que la presente investigación **ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO REFRACTARIO Y LA FIBRA DE CERAMICA REFRACTARIA EN CALDERA PIROTUBULAR CYMSA DE 20 HP DEL TIPO HORIZONTAL, EN LA EMPRESA FRUTIKA C.A BEJUMA-CARABOBO**, consiste en analizar una serie de bibliografías, basadas en ensayos previos que se le realizaron al concreto refractario y a la fibra de cerámica refractaria, específicamente en ensayos de resistencia a altas temperaturas. La investigación será de tipo documental

**Descriptor:** Análisis comparativo, confiabilidad, refractarios.

## INTRODUCCIÓN.

La producción de vapor y la generación de energía son partes muy importantes en los procesos industriales y requieren la máxima fiabilidad de las calderas en planta. Una parte integral de las calderas es su revestimiento refractario. La confiabilidad de un refractario para su particular aplicación está determinada por su resistencia al ataque químico, así como su resistencia mecánica y térmica en el proceso de operación. Esto ha provocado la necesidad de desarrollar e innovar nuevos productos que puedan prevalecer durante más tiempo en condiciones muy adversas a las cuales son sometidos los materiales refractarios.

El diseño de la caldera se complica en la zona aislada llamada cámara muerta, debido a que por un lado se requiere de la salida de tubos desde esta zona de la caldera, pero por otro lado, se necesita sellar los espacios libres para proteger los componentes en el interior de las cámaras. Dentro de las calderas en su mayoría se consiguen tres cámaras aisladas, de las cuales dos presentan revestimientos de refractarios para proteger los componentes internos.

Según Vidal Moya y Madrigal Monzón, (2015): Los generadores de vapor pirotubulares instalados en las industrias y empresas de servicios, con el fin de brindar vapor a los procesos térmicos, trabajan en la mayoría de los casos, bajo regímenes de carga fluctuantes o variables, acrecentados cuando por deterioro dejan de trabajar algunos de los equipos o instalaciones consumidoras, esto hace que disminuya de forma considerable, la demanda de vapor y el factor de carga, lo cual hace que el trabajo del quemador sea con constantes arranques y paradas.

Se tiene conocimiento que uno de los principales problemas que se presentan en las calderas es el rendimiento de concreto refractarios que se utilizan como recubrimiento debido a que éstos se van deteriorando al estar en contacto directo con llamas a altas temperaturas y agua. El uso de aditivos químicos tales como los denominados plastificantes, reductores de agua, retardantes y acelerantes es necesario para regular la trabajabilidad, la fluidez, el tiempo de fraguado y la resistencia mecánica del refractario. La combinación correcta de estos factores permite crear productos que pueden instalarse por métodos más sofisticados comparados con el método de colado normal.

También es importante destacar que el único refractario presente en las calderas piro tubulares no es el concreto, sino que también, están recubiertas por una manta de fibra de cerámica la cual es altamente versátil. Estas son livianas con una baja conductividad térmica y una excelente resistencia al choque térmico, lo cual las hace muy fáciles de manejar tanto en el proceso de colocación, como, en el de mantenimiento. Así mismo estas fibras de cerámica poseen excelente resistencia a los ataques químicos, exceptuando los ácidos fluorhídricos, fosfórico y los álcalis fuertes. Es importante recalcar que las mantas de fibras de cerámicas no se ven afectadas por el aceite o por el agua, manteniendo sus propiedades físicas y mecánicas justo en el momento de que se complete su secado.

De tal manera el siguiente trabajo de investigación consiste en analizar una serie de bibliografías, basadas en ensayos previos que se le realizaron al concreto refractario y a la fibra de cerámica refractaria, específicamente en ensayos de resistencia a altas temperaturas. Para esto, se tomó en cuenta una serie de factores y variables, lo cual permitió recopilar los resultados de cada uno de los estudios seleccionados, luego con la información suministrada se realizó un diagrama Causa-Efecto, o también llamado usualmente Diagrama de Ishikawa, lo cual permite obtener a priori, una validez de contenido de los aspectos teóricos de la investigación en el caso estudio que se plantea.

Finalmente, para llevar a cabo la comparación de los resultados de cada estudio realizado. De tal forma, la presente investigación se encuentra estructurada de la siguiente manera:

- Capítulo I: El Problema, Planteamiento del problema, formulación del problema, objetivo general, objetivos específicos, justificación del problema, alcance y limitaciones.
- Capítulo II: Marco Teórico, Antecedentes de la investigación, bases teóricas, bases legales y definición de términos.
- Capítulo III: Marco Metodológico, Tipo de Investigación, diseño de la investigación, nivel de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y fases metodológicas.
- Capítulo IV: Recursos

# **CAPÍTULO I**

## **EL PROBLEMA**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

Según (Hernández, Fernández, Baptista; 2.006) plantear un problema es: “Afinar y Estructurar formalmente la idea de la Investigación”.

Basado en los estudios realizados por Kosmatka y Panarese, (1992) acerca del concreto, aproximadamente un 80% del peso del concreto u hormigón está compuesto por partículas de origen pétreo, de diferentes tamaños, material denominado usualmente como agregados, áridos o inertes. Por esa razón las características de esos materiales son decisivas para la calidad de la mezcla de concreto. La calidad de los agregados depende de las condiciones geológicas de la roca madre y, también, de los procesos extractivos. Es, por lo tanto, a las empresas productoras (canteras, areneras, saques) a quienes corresponde el primer control en el proceso de la calidad de los agregados. Con la elaboración de un diagrama Causa y Efecto del Dr. Kouru Ishikawa se consiguieron diferentes aspectos causantes de las fallas, en la utilización de concreto refractario en calderas piro tubulares, tales como son los errores de concentración de cemento y aditivos en la mezcla del concreto, personal no capacitado para la realización de la mezcla, mal diseño de anclajes de sujeción, tiempo de secado entre otros aspectos.

Mientras que la fibra de cerámica refractaria (FCR) es una fibra vítrea sintética (SVF por siglas en inglés) primero descubierta en 1942 y comercializada completamente en los años 60. Es un aislante relativamente económico de energía, es ligero con una muy baja conductividad térmica, capacidad baja en el almacenamiento de calor y una excelente resistencia al choque térmico. La FCR es un material refractario capaz de trabajar a muy alta

pertinentes en torno al factor materiales y ver cuáles son las discrepancias que hay entre estos dos materiales.

## **1.2 Formulación del Problema**

Basadas en las premisas antes mencionadas surge la siguiente interrogante:

¿Qué importancia tendrá analizar el comportamiento del concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en calderas pirotubulares?

## **1.3 Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un análisis comparativo entre el concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en caldera pirotubular CYMSA de 20 HP del tipo horizontal, en la empresa Frutika C.A Bejuma- Carabobo, con el fin de establecer parámetros para mejorar la eficiencia y durabilidad en estas calderas.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la importancia del comportamiento del concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en calderas piro tubulares
- Identificar las zonas críticas de los materiales refractarios en la caldera pirotubular.
- Realizar un análisis comparativo de las variables que determinan la eficiencia y durabilidad entre los concretos refractarios y las fibras refractarias en las calderas piro tubulares.

## **1.4 Justificación**

El vapor se utiliza en casi todas las industrias; los generadores de vapor, calderas recuperadoras de calor son vitales para las plantas de potencia y de proceso. Es por ello que las calderas forman una parte esencial de cualquier planta industrial. Se considera necesario realizar un análisis comparativo específicamente en la calorimetría isométrica y resistencia a la abrasión tanto del concreto refractario así como también de la fibra de cerámica refractaria , ya que de esta manera se evaluará el comportamiento de cada uno de ellos en la constitución de materiales aislantes y refractarios presentes en las calderas pirotubulares, por esto es de vital importancia conocer la confiabilidad, adecuada utilización, aplicación y mantenimiento del concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria.

Igualmente, el presente trabajo se justifica académicamente porque sigue las líneas de investigación de la Universidad José Antonio Páez en el área de Ingeniería Mecánica,

especialmente en la rama de transferencia de calor, la cual se encarga del diseño y el cálculo de los elementos de los intercambiadores de calor y sistemas de aislamiento en la industria. Por otro lado, se justificó teóricamente ya que su estudio estuvo basado por teóricos y especialistas en el tema.

Según Ferman, y Levin, (1990) La función más importante de una teoría es explicar; decir el por qué, cómo y cuándo ocurre un fenómeno. Permite sistematizar y dar un orden al conocimiento o fenómeno que se está estudiando, ya que muchas veces el mismo se encuentra disperso y desorganizado.

Igualmente se justifica metodológicamente por ser una investigación documental con un diseño bibliográfico, según Sampieri y otros (1998) señalan que: La metodología para toda investigación es de importancia fundamental. Para ello se deberá planear una metodología o procedimiento ordenado que se seguirá para establecer lo significativo de los hechos y fenómenos hacia los cuales está encaminado el significado de la investigación. Científicamente, la metodología es un procedimiento general para lograr de una manera precisa el objetivo de la investigación.

### **1.5 Alcance y Limitaciones**

El área de investigación estará limitada a la comparación de estudios previos, en los cuales se llevará a cabo un monitoreo de la resistencia térmica, ensayo de resistencia a la compresión y propiedades de resistencia a la abrasión tanto del concreto refractario, así como también de la fibra de cerámica refractaria. Una vez obtenido los resultados de la investigación se recomienda el método más conveniente en cuanto a confiabilidad estructural se refiere, así como también se realiza un plan de mantenimiento preventivo orientado en el área de refractarios en calderas pirotubulares.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

Según Méndez (2005) define el marco teórico como: “la motivación de carácter teórico, es la inquietud que surge en el investigador por profundizar en uno o varios enfoques teóricos que tratan el problema que se explica, a partir de los cuales espera avanzar en el conocimiento planteado, o para encontrar nuevas explicaciones que modifique o complementen el conocimiento inicial” (p. 104). En este capítulo se presentará antecedentes de trabajos anteriores, las bases teóricas, aspectos legales y definición términos básicos.

#### 2.1 Antecedentes

Los antecedentes de la investigación tienen como objetivo exponer los estudios previos realizados con el propósito de sustentar el tema de investigación. Al respecto, Arias (2006) expresa: “los antecedentes reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones” (p. 48).

Laura Imelda García Ortiz (2013) en su tesis de grado **titulada “Estudio y obtención de un concreto refractario bajo cemento con alta resistencia térmica”** para optar por el doctorado en ingeniería de materiales, cuyo objetivo general era obtener un concreto refractario bajo cemento con alta resistencia térmica, así como determinar las mejores distribuciones granulométricas, cantidad de aditivos, y porcentaje de cemento aluminoso, para que posea buenas propiedades mecánicas, térmicas y buen comportamiento químico, brinda una orientación a nivel conceptual de lo que es el concreto refractario y sus distintas composiciones.

Las conclusiones a las que llegaron fueron que los concretos refractarios obtenidos con un 0.2% de ácido cítrico poseen una mayor densidad, menor porosidad y una mayor resistencia mecánica a la compresión, comparado con los resultados del 0.3% de ácido cítrico. Así como los concretos refractarios con 1.5% de CaO mostraron una mayor densidad cuando fueron sinterizados a 1500°C, por encima del 2.0% y 2.5%, sin embargo, se esperaba que su porosidad aparente fuera mínima, cosa que no sucedió así mostrando el valor máximo comparado con los de 2.0 y 2.5% CaO. Y en la respuesta a la resistencia mecánica a la compresión los de 2.5% CaO mostraron los mejores resultados. En cuanto al ataque corrosivo con escoria de horno de arco eléctrico, los tres tipos de concretos refractarios (1.5, 2.0 y 2.5%

CaO) sufrieron una pequeña penetración, sin embargo, el concreto más dañado con la escoria es el que posee 1.5% CaO.

La relación del antecedente anteriormente expuesto con la investigación es el estudio de las propiedades del concreto refractario bajo en cemento con alta resistencia térmica y su comportamiento, de igual manera el análisis de las propiedades del concreto convencional para establecer una comparación con las fibras de cerámicas refractarias para así determinar cual resulta menos costosa y eficiente.

Así mismo, Corona García (2007) elaboro un trabajo de grado titulado **“Análisis en el proceso de la elaboración de tablas refractarias de grupo industrial Morgan, S.A de C.V”** para obtener el título de ingeniero industrial de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. La presente investigación tuvo como objetivo analizar el proceso de tablas refractarias en el grupo industrial Morgan para así dar solución al problema con los desperdicios de tablas refractarias en dicha empresa obteniendo como conclusión que se observó que en el porcentaje de materia prima para la mezcla hay mayor exceso agregado de fibra, provocando que queden huecas y rugosas, disminuyendo así la calidad. De este trabajo antes mencionado se tomó una orientación metológica y documental respecto información teórica del concreto y fibra de cerámicas refractarias. La mayor diferencia de este trabajo respecto al nuestro radica en el área de utilización de los refractarios, así como también en el tipo de investigación.

A su vez, Fernández y Marín (2010) estudiaron las propiedades termo mecánicas de concretos refractarios ligados por silica coloidal en su trabajo de grado titulado **“Análisis del comportamiento de refractarios de aluminatos de calcio”**. Se sabe que los cementos de aluminatos de calcio (CAC) son los ligantes hidráulicos más utilizados en concretos refractarios, sin embargo, la presencia de CaO en su composición puede limitar su uso a elevadas temperaturas en los sistemas  $Al_2O_3-SiO_2$  y  $Al_2O_3-MgO$ . Es por ello que se están buscando alternativas importantes en el uso del CAC, entre las cuales destaca el uso de silica coloidal, la cual proporciona de entre otras ventajas, mayor velocidad de secado y reactividad en el sistema. Con los resultados obtenidos encontraron que a una baja temperatura 250-750°C con composiciones conteniendo Silica coloidal, se forman complejos con el agua, y presentan valores superiores de resistencia mecánica comparando con los que solo contenían

CAC. Estos sistemas presentan un importante progreso en desarrollo de resistencia mecánica con la temperatura (750-1500°C), que puede estar asociado con la formación de mullita. Así como también encontraron que aproximadamente a 1300°C se lleva a cabo la formación de una fase meta estable  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , la cual tiene influencia sobre las propiedades. Se concluye que es de vital importancia disminuir el porcentaje de CAC en los concretos refractarios para así poder aumentar su resistencia térmica, y si es posible obtener un concreto con buenas propiedades térmicas y que el ligante sea en este caso la sílice coloidal.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Las calderas o generadores de vapor**

Una caldera puede describirse como un generador de vapor o como según el código ASME, “la combinación de equipos para producir o recuperar calor, junto con aparatos para transferir el calor disponible a un fluido”

- Son equipos cuyo objetivo es:
- Generar agua caliente para calefacción y uso general.
- Generar vapor para industrias.
- Accionar turbinas de equipos mecánicos.
- Suministrar calor para procesos industriales.
- Producción de energía eléctrica mediante turbinas a vapor.

La generación de vapor de agua se produce mediante la transferencia de calor del proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera hacia el agua, elevando de esta manera su temperatura, presión y convirtiéndola en vapor. Funcionan mediante la transferencia de calor, producido generalmente al quemarse un combustible, el que se le entrega al agua contenida o que circula dentro de un recipiente metálico. En toda caldera se distinguen dos zonas importantes:

- a. Zona de liberación de calor u hogar o cámara de combustión: Es el lugar donde se quema el combustible. Puede ser interior o exterior con respecto al recipiente metálico.

Interior: El hogar se encuentra dentro del recipiente metálico o rodeado de paredes refrigeradas por agua.

Exterior: Hogar construido fuera del recipiente metálico. Está parcialmente rodeado o sin paredes refrigeradas por agua. La transferencia de calor en esta zona se realiza principalmente por radiación (llama - agua).

- b. Zona de tubos: Es la zona donde los productos de la combustión (gases o humos) transfieren calor al agua principalmente por convección (gases - agua). Está constituida por tubos dentro de los cuales pueden circular los humos o el agua.

### **2.2.1.1 Tipos de Calderas**

Existen varias formas de clasificación de caldera, entre estas se puede señalar las siguientes:

Según su movilidad:

Fija o estacionaria.

Móvil o portátil.

Según la presión de trabajo:

Baja presión: 0 a 2,5 kg/cm

Media presión: 2,5 a 10 kg/cm

Alta presión: 10 a 220 kg/cm

Supercríticas: más de 200 kg/cm

Según su generación:

De agua caliente.

De vapor saturado o recalentado.

Según el ingreso de agua a la caldera:

Circulación natural: el agua se mueve por efecto térmico.

Circulación forzada: el agua circular mediante el impulso de una bomba.

Según la circulación del agua y de los gases en la zona de tubos:

Pirotubulares o de tubos de humo.

Acuotubulares o de tubos de agua.

### 2.2.1.2 Calderas pirotubulares

Las calderas pirotubulares aparecen en la industria hace ya más de un siglo, y su evolución ha ido en paralelo al desarrollo técnico. Las primeras consistían en simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados, a los cuales se insertaban las tuberías de suministro de agua y extracción de vapor, el calentamiento se efectuaba externamente mediante la quema de carbón o leña situados debajo de estos. Los requerimientos industriales de mayores parámetros de presión y temperatura condicionados por el desarrollo técnico traen como consecuencia la necesidad de incrementar el área de transferencia de calor y utilizar materiales de construcción más resistentes. El aumento de las superficies de transferencia se logra introduciendo tubos de pequeños diámetros inmersos en la masa de agua, a través de los cuales circulan los gases calientes provenientes de la combustión, transfieren a su paso el calor, lo que aumenta la eficiencia del equipo. (ver figura 1)



Figura.1 Caldera pirotubular.

Fuente: Guía Básica Calderas Industriales. Juan Uceda Martínez Viessmann S.L (2012)

Los generadores de vapor pirotubulares se diferencian unos de otros, entre otros aspectos, por el número de pases de los gases en el sentido longitudinal, en este caso se

clasifican como de dos pasos (el hogar y un pase por los tubos de humos), de tres pasos (el hogar y dos pases por los tubos de humos), y de cuatro pasos (el hogar y tres pases por los tubos de humos). A medida que aumenta el número de tubos de humos, así como la cantidad de pases, aumenta el intercambio de calor, lo cual disminuye la temperatura de los gases a la salida del generador de vapor, y por consiguiente, se incrementa el rendimiento. No obstante, tiene la desventaja de que aumenta la caída de presión por el lado de los gases, y se encarece por esta razón la instalación (Mingot, 1988).

Las calderas pirotubulares se adaptan al consumo de cualquier tipo de combustible, tanto sólido, líquido, como gaseoso, funcionan con bajas pérdidas por incombustión mecánica y química. No obstante, el trabajo con combustible sólido dificulta su automatización.

En las calderas de vapor pirotubulares los gases, producto de la combustión, circulan por el interior de los tubos, y en la mayoría de los casos la propia combustión se produce dentro de un tubo de mayor diámetro, de ahí su nombre (tubos de fuego), los cuales se encuentran sumergidos en la masa de agua. Todo el conjunto se encuentra rodeado por una envoltura o casco exterior rígido. El volumen que ocupa el vapor oscila entre 12 y 14 % del volumen total, criterio que siguen las empresas constructoras para el diseño y fabricación. Hoy se fabrican calderas que alcanzan capacidades de hasta 30 t/h de producción de vapor, con presiones de hasta 3 MPa, y poseen una amplia difusión en este intervalo de trabajo dada una serie de ventajas que presentan.

### **2.2.1.3 La estructura de las calderas pirotubulares**

La estructura de las calderas pirotubulares están compuestas por:

Hogar o tubo central: Cámara o lugar donde ocurre la quema del combustible con la consiguiente liberación de calor.

Tubos de humos o fuses: Conjunto de tubos de mucho menor tamaño, por los que circulan los gases de la combustión luego de abandonar el hogar.

Placas: Limitan en ambos extremos el volumen de la cámara de la caldera.

Casco o carcasa: Constituye la envoltura exterior o cuerpo de acero. Cámara de agua: parte del volumen que ocupa el agua en su interior. Cámara de vapor: parte del volumen que ocupa el vapor producido. Además de estas partes que

conforman su estructura, necesita de otros agregados como son: quemador, bombas de combustible, bombas de agua y ventilador. (ver figura 2)

- |                                  |                             |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 EVALUACIÓN DE HUMOS            | 10 PURGA Y VACIADO          |
| 2 VÁLVULAS DE SEGURIDAD          | 11 MANÓMETRO12              |
| 3 SALIDA AUXILIAR DE VAPOR       | 12 ALIMENTACIÓN DE AGUA     |
| 4 SALIDA PRINCIPAL DE VAPOR      | 13 BOMBAS ALIMENTACIÓN AGUA |
| 5 SEGURIDAD DE NIVEL             | 14 TRANSMISOR DE PRESIÓN    |
| 6 REGULADOR Y SEGURIDAD DE NIVEL | 15 PRESÓSTATO DE SEGURIDAD  |
| 7 ENTRADA HOMBRE                 | 16 PRESÓSTATO DE REGULACIÓN |
| 8 INDICADORES DE NIVEL           | 17 EQUIPO DE COMBUSTIÓN     |
| 9 MANÓMETRO                      |                             |

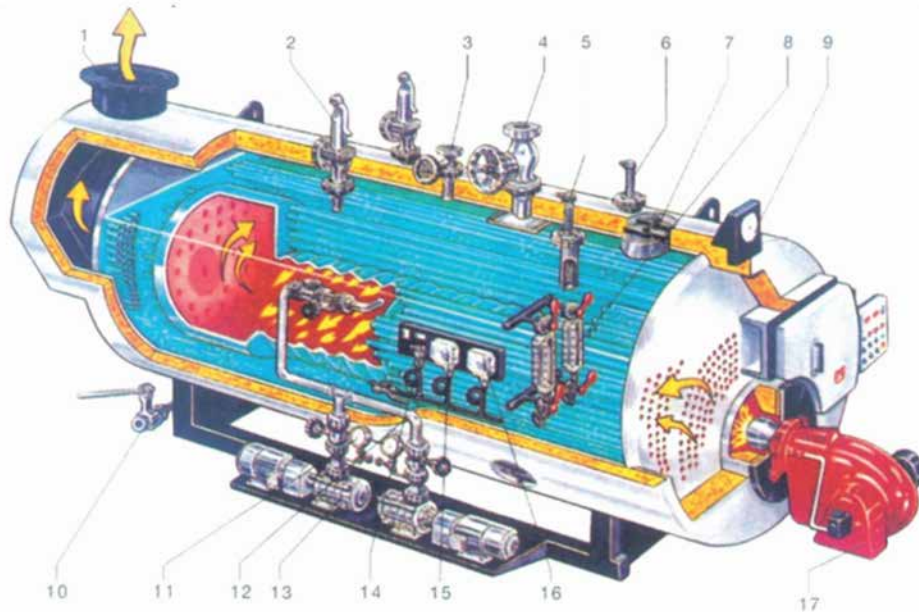


Figura.2 Caldera pirotubular y sus componentes.

Fuente: Función y pérdidas de en calderas pirotubulares. Margarita Josefa Lapido Rodríguez David, Armando Vidal Moya José y Alejandro Madrigal Monzón. 2015

#### 2.2.1.4 Funcionamiento de las calderas pirotubulares

En el hogar de la caldera se produce la combustión del combustible, se forman una gran cantidad de gases calientes, estos gases comienzan a circular a través de las superficies de transferencia, compuestas por una considerable cantidad de tubos de pequeño diámetro llamados fuses. Desde el hogar y en su paso a través de estos tubos, los gases van cediendo el calor al agua que se encuentra en el exterior, pero contenida dentro de la carcasa, hasta salir con relativa baja temperatura y bajo contenido energético. Por su parte el calor absorbido

por el agua es empleado en producir vapor en la cantidad y con los parámetros de temperatura y presión que demanda el proceso.

#### **2.2.1.5 Aplicaciones y tendencias de las calderas pirotubulares**

Las calderas pirotubulares tienen un amplio uso, se destacan en los sistemas de calefacción y producción de vapor requerido en los procesos industriales, donde la demanda de vapor es relativamente reducida, debido a las diversas características propias de estas calderas, como son:

Su diseño simple y compacto.

Las facilidades de montaje, instalación y operación.

El bajo costo inicial.

Su aceptable eficiencia en su rango de operación.

El corto período de tiempo para el suministro y puesta en marcha.

Su gran volumen de almacenamiento de agua.

Permite compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones de la demanda de vapor.

#### **2.2.2 Material refractario**

Los materiales refractarios se aplican generalmente a temperaturas materiales que refractarios suelen ser usados normalmente para materiales procesos no de altas superiores a 600°. En cuanto a su volumen de estabilidad a la corrosión y desgaste de materiales deben tener una buena química térmica, y resistencia mecánica.

Con el fin de cumplir estos requisitos y de lograr una vida útil larga, los materiales refractarios deben tener la estabilidad de volumen mucho más allá de su temperatura servicio. En consecuencia, se utiliza su estabilidad de volumen como criterio para la clasificación, ya que la estabilidad de volumen depende de la temperatura. A menudo el nombre de un material refractario se basa en las materias primas utilizadas o de sus componentes. Además, los términos básicos y ácidos se utilizan a menudo. Estos son tomados de sector de la química, en lo que respecta a los productos componentes químicos basados en los correspondientes ácidos o bases. Esta caracterización puede ser útil porque las atmósferas horno pueden reaccionar de una manera ácida o básica. En refractarios de estos será una

referencia a sus consecuencias, la resistencia química de un material refractario debe ser evaluada. (ver tabla 1).

Tabla 1 Propiedades principales de los materiales refractarios.

Nombre Común	Sílice	Alúmina	Magnesia
<b>Composición Primaria</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>
Punto de fusión	1723	2050	2800
Energía libre a 1450°C, KJ/mol	-594	-758	-732
Conductividad térmica (k) W/mK, 0-1200°C	1.7	2.6	4.0
Coefficiente de expansión ( $\alpha \times 10E-6$ )°C 0-1200°C	12.2	8.2	13.8
Resistencia al choque térmico ( $R=\sigma k/E\alpha$ )	715	480	345
Densidad $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.65	3.98	3.58
Costo relativo	1	5	2.5-10

Fuente: Prolongación de vida útil del revestimiento de refractario en un horno de inducción. F. Ochoa 2006.

### 2.2.3 Refractarios básicos

Los refractarios básicos poseen una alta resistencia al ataque químico de agentes alcalinos y sulfuros, baja resistencia a los agentes ácidos, alta resistencia a ciclos de temperatura y alta resistencia a los efectos de óxido-reducción. Desde el punto de vista de composición, el gran volumen de productos refractarios básicos se distribuye en una de las siguientes cinco áreas.

Productos basados en magnesita calcinada a muerte ó magnesia.

Productos basados en magnesita calcinada a muerte ó magnesia en combinación con materiales conteniendo cromo como la cromita.

Magnesita calcinada a muerte o magnesia en combinación con espinela.

Magnesita calcinada a muerte o magnesia en combinación con carbón.

Productos dolomíticos, solos o combinados con magnesia y/o carbón.

Los refractarios basados en magnesio son usados en una gran variedad de aplicaciones por las siguientes razones:

Ausencia de transiciones polimórficas que podrían dañar el producto

Resistencia al ataque químico de óxido de hierro, álcalis y fundentes básicos

Alta disponibilidad de la materia prima para la producción de refractarios.

Ventajas y desventajas de los refractarios según su forma:

Antes de hablar de las propiedades específicas de los materiales refractarios, es importante señalar que cada forma refractaria tiene asociadas ventajas y desventajas.

a) Ladrillos y formas especiales

Ventajas: resistencia óptima, alta densidad, baja porosidad y no necesita tratamiento de curado.

Desventajas: dificultad para las juntas, costos de elaboración, instalación (costo y tiempo), disponibilidad, dimensiones variables, posibles defectos internos.

b) Concretos refractarios (Castables)

Ventajas: rápida instalación, bajos costos de elaboración, disponibilidad, baja permeabilidad, posible adición de fibra,

Desventajas: propiedades relacionadas con la cantidad de agua, baja resistencia en caliente, se requiere forma.

a) Apisonables

Ventajas: alta densidad, disponibilidad, posible adición de fibra.

Desventajas; laminaciones, necesita tratamiento de curado, densidad variable, requiere forma (resistentes y complejas).

b) Proyectables

Ventajas: rápida instalación (en caliente o frío), sin juntas, disponibilidad, colocación mecanizada, posible adición de fibra.

Desventajas: densidad variable, requiere habilidad de instalación, se necesita más material y necesita tratamiento de curado.

c) Plásticos

Ventajas: alta densidad, sin juntas, construcción con anclado, posible adición de fibras.

Desventajas: baja resistencia en caliente, tiempo de instalación, posible laminación, vida útil limitada.

d) Fibra cerámica

Ventajas: sin juntas, sin problemas de choque térmico, instalación innovadora, ligeros.

Desventajas: permeabilidad, baja resistencia a la abrasión, baja resistencia mecánica.

#### **2.2.4 Concreto Refractario**

Los concretos refractarios por definición son aquellos materiales capaces de soportar elevadas temperaturas. Están expuestos a diferentes grados de esfuerzo y tensión mecánica, esfuerzo térmico, corrosión/erosión de sólidos, líquidos y gases y abrasión mecánica a varias temperaturas y su principal característica es que deben soportar altas temperaturas sin corroerse o debilitarse por el entorno al cual están sometidos. Diferentes refractarios se han diseñado y manufacturado de forma que las propiedades de estos materiales sean apropiadas para sus diversas aplicaciones. Los materiales refractarios son de vital importancia para el desarrollo industrial que se ha visto en aumento, ya que se utilizan en todos los hornos industriales para refinerías de petróleo, industria química, industria siderúrgica y metalúrgica, industria cementera, ladrilleras e industria del vidrio, entre otras.

Los concretos refractarios son materiales cerámicos obtenidos por la mezcla de agregados refractarios, con una distribución granulométrica balanceada y un cemento refractario normalmente a base de aluminato de calcio, pudiendo también tener otros aditivos. Los refractarios pesados se fabrican a partir de compuestos que incluyen los elementos silicio, aluminio, magnesio, calcio, cromo y Zirconio. En su mayor parte, los óxidos de estos elementos se utilizan por separado o combinados, en el caso del carbón elemental se puede utilizar en aplicaciones en las que no se oxida en exceso y el carburo de silicio también se utiliza ampliamente como material refractario.

##### **2.2.4.1 Tipos de concretos refractarios**

Puesto que los concretos refractarios son un grupo muy amplio y diverso de materiales, se clasifican de varias maneras. La primera división de concretos es basada en la química. Esta división separa los concretos refractarios basados en alúmina y agregados de aluminosilicatos de los concretos basados sobre los óxidos refractarios básicos como la magnesita y dolomita. Esta división es fundamental debido a que diferentes sistemas ligantes son utilizados en cada categoría. Además, el campo de aplicación de productos de concretos básicos es más limitado que los productos basados en alúmina y aluminosilicatos. La mayoría de los productos de concretos básicos se utilizan en áreas donde existen las condiciones de escorias básicas como en varias de acero, cobre, plomo entre otros.

Tabla 2 Tipos de concretos refractarios según su composición de CaO.

Tipos	% de CaO
Concretos convencionales	> 2,5
Concretos de bajo cemento	$\geq 1$ y $\leq 2,5$
Concretos de ultra bajo cemento	$\geq 0,2$ y $< 1$
Concretos sin cemento	< 0,2

Fuente: Concretos refractarios de bajo cemento para calderas pirotubulares. José Rodríguez.

El tonelaje vendido de concretos refractarios básicos. Concretos refractarios base alúmina o aluminosilicatos pueden ser clasificados en muchas formas. La sociedad americana para pruebas y materiales (ASTM) clasifica los concretos refractarios base alúmina y aluminosilicatos. En la tabla 2 se muestra una clasificación de los concretos refractarios en base a su química, densidad, contenido de cemento y características de instalación.

#### 2.2.4.2 Uso de los concretos refractarios en la Industria

El uso de los concretos refractarios en la Industria es de vital importancia, en los Estados Unidos la industria del hierro y del acero consume aproximadamente 70% de la producción global de refractarios, mientras que la industria del cemento y cal consume cerca del 7%, la industria de los cerámicos y del vidrio una cantidad entre 9 y 10% y la industria petrolera aproximadamente del 4%. En 1998 una revisión para determinar y encontrar las necesidades de las industrias manufactureras fue llevada a cabo por

(ORNL) de Estados Unidos, encontrando a la industria del aluminio, industria de sustancias químicas y productos petroquímicos, productos forestales, vidrio, bastidores metálicos y acero, así como también la industria de soporte de tratamientos térmicos y temples.

De esta revisión, un alto número de áreas críticas son identificadas, donde las mejores podrían conducir a un sustancial ahorro económico y de energía. Adicionalmente, la práctica general de la mayor parte de las industrias, deben escoger tipos de combustibles y fuentes basadas principalmente sobre el costo y la disponibilidad. Esto, en muchos casos, conduce a variaciones en la calidad de combustible y la pureza que directamente afectará el funcionamiento de los materiales refractarios usados en los hornos respectivos. Esto se debe considerar para escoger los materiales del horno y evaluar la eficiencia de energía.

### **Cemento de Aluminatos de Calcio.**

Está constituido de cal y alúmina, que forman los principales componentes de la referida materia prima. El cemento de aluminatos de calcio es considerado de un desarrollo reciente, aunque sus características hidráulicas hubiesen sido descubiertas en 1847 por y después estudiadas por otros investigadores como entre otros. El desarrollo del cemento aluminoso se inicia con la búsqueda de un cemento resistente a la corrosión por presencia de sulfatos, ya que el cemento Portland no lo cumple. En 1908 surge la patente para la fabricación de cemento aluminoso con el nombre de Cemento que en francés quiere decir cemento fundido. La norma francesa NF P 15-315 (abril de 1991) define al cemento aluminoso con las siguientes palabras: 14 "El cemento aluminoso es un ligante hidráulico, el cual es producto de una molienda y calentamiento hasta el punto de fusión de una mezcla de principalmente alúmina, cal, óxidos férricos y sílice, dosificados de manera que aseguren que el cemento resultante contenga por lo menos 30% de masa de alúmina

La relación alúmina/cal es determinada de tal manera que el componente mineralógico principal sigue siendo el aluminato monocálcico; este valor generalmente varía entre 0.85 y 1.4." El aluminato monocálcico es el componente más importante del cemento aluminoso,



La fusión completa de la caliza y la bauxita no es esencial para la formación de aluminato cálcico; se han registrado varias patentes relativas a procesos, en los que las materias primas, pulverizadas y mezcladas, se mantienen durante algunas horas a temperaturas inferiores al punto de fusión, o sea unos 900 - 1200 °C. En estas condiciones, las reacciones en el estado sólido pueden ocurrir sin una sinterización o clinkerización visible; en general este método es demasiado lento o incompleto y necesita materias primas molidas muy finamente. Se ha sugerido también la clinkerización de materiales pulverizados a altas temperaturas en hornos rotatorios, pero surgen dificultades si el contenido de óxido férrico de la bauxita es superior a unos 5% aproximadamente, ya que el intervalo de temperatura en la fusión incipiente y completa se vuelve muy corto, formándose con facilidad anillos de clinker. Las primeras patentes proponían diversos artificios encaminados a soslayar estas dificultades, por ejemplo, 17 mediante el empleo de combustibles que diesen una llama de menor temperatura, o mediante la combustión previa en una antecámara del horno; pero no existe un método para fabricar cemento aluminoso a partir de bauxita roja, en el que se practique la clinkerización de los materiales en un horno rotatorio. Usualmente se fabrica un tipo de cemento aluminoso preparando briquetas de bauxita y caliza, finamente pulverizadas, y calcinándolas en un horno a una temperatura como máximo de 1250 °C. El producto fritado se muele después hasta la finura propia del cemento

### **Fusión simple de bauxita roja y caliza:**

En este tipo de proceso de fabricación, las materias primas se funden completamente a 1500 - 1600 °C en condiciones oxidantes o sólo ligeramente reductoras. El clinker resultante contiene todos los constituyentes no volátiles de la bauxita y la caliza. Como combustible se emplea generalmente carbón pulverizado o fuel oil, aunque se han empleado también hornos eléctricos, allí donde la energía eléctrica es relativamente barata. El óxido férrico presente en la bauxita roja se reduce parcialmente a óxido ferroso, cuando se emplea carbón como combustible, resultando entonces un clinker de color muy oscuro. Variando la relación férrico/ferroso pueden producirse tonos diferentes entre amarillo parduzco y negro, sin que sean afectadas las propiedades cementantes del producto. Mayormente los procesos de fabricación por fusión simple son realizados en hornos rotatorios, en hornos reverbero y en hornos eléctricos. A En hornos rotatorios: En los Estados Unidos, el cemento aluminoso se

prepara por fusión de bauxita y calizas secas y pulverizadas, en un horno rotatorio calentado con carbón pulverizado, que se parece sustancialmente a los hornos empleados para el cemento Portland. El producto fundido sale a través de orificios practicados en la camisa del horno, próximos al extremo de combustión; después se le somete a un granulado con agua, antes de ser molido a la finura propia del cemento

### **Propiedades de Cemento de Aluminatos de Calcio**

Los cementos de aluminatos de calcio confieren a los concretos refractarios propiedades especiales, las cuales tienen su explicación en el predominio de los hidratos de cal, principalmente el aluminato monocálcico. La selección de un adecuado agregado también es de gran influencia para la buena performance refractaria o aislante del concreto. Estos concretos refractarios se caracterizan por su estructura densa altamente uniforme con baja porosidad. El bajo contenido de cal y su estructura densa otorga las altas resistencias a través de un gran rango de temperaturas, excelentes propiedades termo-mecánicas y la resistencia a la corrosión frente a los ataques por líquidos y escorias fundidos. Entre las principales propiedades se pueden destacar:

Alta refractariedad

Elevada resistencia mecánica Resistencia a los choques e impactos.

Resistencia a los cambios de temperatura Resistencia al desgaste Resistencia a la corrosión.

Endurecimiento rápido.

Puesta en servicio en corto tiempo.

En la industria refractaria, los concretos deben resistir igualmente bien a los choques térmicos, así como a los ataques químicos y a la violencia de los esfuerzos mecánicos. Los concretos refractarios, gracias a sus propiedades particulares, les es posible hacer frente con flexibilidad a los diversos requerimientos que se producen, sean estos de naturaleza térmica, química y mecánica. Por tanto, se detallará las propiedades en función a las siguientes resistencias:

Resistencia a los choques térmicos

Resistencia a los ataques químicos Resistencia a los esfuerzos mecánicos

Resistencia a los choques térmicos.

### **Resistencia a los choques térmicos**

En el proceso de cocido de los materiales refractarios, éstos son sometidos a un ciclo de calentamiento y enfriamiento. Los materiales refractarios pesados, generalmente se cuecen en una sola vez, mientras que los productos más finos exigen, casi siempre una doble cocción. Sea cual fuera la manera de cómo funciona un horno, de forma continua o de forma intermitente, los intervalos de temperatura que corresponden a modificaciones en la estructura (paso del caolín a metacaolín o transformación cristalina reversible del cuarzo) deben transcurrir lentamente, principalmente cuando van acompañados de un cambio de volumen. En esta etapa de cocido, los materiales experimentan frecuentes choques térmicos cuyos efectos pueden ser más notorios en los hornos intermitentes.

La variedad de los aglomerantes aluminosos de refractariedad creciente desde el cemento aluminoso con 40% de alúmina hasta el de 80% de alúmina y de los agregados disponibles permite la elaboración del concreto que mejor se adapte a los requerimientos térmicos de hasta 1900 - 2000 °C .La cohesión del concreto refractario bajo los efectos de la temperatura queda asegurada a través de un proceso de reacción en tres etapas: Evolución por separado de cada uno de los componentes. Esta fase tiene lugar durante el endurecimiento y el inicio del calentamiento. Reacción entre las partículas de mayor actividad.

### **Resistencia a los ataques químicos.**

En determinados hornos cerámicos, en los que se practican tratamientos especiales, los ataques químicos pueden ser muy peligrosos. Principalmente en procesos de cocción en atmósfera reductora, procesos de salado del gres y en procesos con presencia de vapores ácidos. Cualquiera que sea el tipo de agresión química, una vez que se hayan elegido convenientemente el aglomerante y los agregados, es recomendable que se prepare un concreto que sea lo más compacto posible, cuidando que la curva granulométrica sea la

adecuada y vibrándolo. Los riesgos de agresión quedan por otra parte considerablemente reducidos con la propia tecnología que se emplea en la construcción del concreto, la cual permite obtener revestimientos monolíticos y suprime los puntos débiles y permeables, como son las juntas. En particular en cerámica, se encuentran con bastante frecuencia dos tipos de agresión específica y excepcionalmente una tercera forma de corrosión, las cuales son:

Agresión por el monóxido de carbono (CO)

Agresión por los vapores ácidos.

Agresión por el monóxido de carbono (CO): Los concretos refractarios pueden resistir a la desagregación causada por el monóxido de carbono (CO), a condición de que se utilicen aglomerantes y agregados exentos de fierro metálico o de óxidos de fierro en estado libre. Ensayos efectuados, tanto por la transnacional Lafarge como por laboratorios estatales en Francia, han revelado que los cementos aluminosos con porcentajes de alúmina entre 50% y 80%, resisten particularmente bien a esta agresión por parte del monóxido de carbono. En efecto, estos aglomerantes no contienen en sus composiciones químicas ni fierro libre ni óxidos de fierro libre.

Agresión por los vapores ácidos: La combustión del azufre contenido en los combustibles pueden dar lugar, en presencia de humedad, a la formación de ácido sulfúrico, el cual puede condensarse en las paredes si la temperatura del horno desciende por debajo del punto de rocío. Los aglomerantes aluminosos, no son ciertamente antiácidos, pero resisten a la acción de los ácidos cuyo pH este comprendido entre 4 y 5 según sean las condiciones en que tenga lugar el contacto. Naturalmente, serán contraindicados para aquellos ácidos cuyas concentraciones sean bastante elevadas, fenómeno que, por otra parte, es extraño en los hornos para cerámica.

### **Resistencia a los esfuerzos mecánicos.**

Los distintos esfuerzos mecánicos que deben soportar los revestimientos refractarios no deben comprometer su solidez en caliente. El material de construcción refractario queda sometido no tan solo a su propio peso, sino que igualmente lo está a otras cargas (debidas a los muros de ladrillos laterales y a la bóveda) y además queda sujeto a las influencias

térmicas. Las fuerzas perturbadoras provienen de orígenes diversos: Compresiones elevadas Choques mecánicos y abrasión Fatigas termodilatométricas.

El comportamiento mecánico es consecuencia de los enlaces hidráulicos o cristalinos con la acción del calor. Después del endurecimiento y hasta 600 °C, aproximadamente, la cohesión de un concreto refractario se debe a los enlaces hidráulicos. Estos son proporcionados por los aluminatos de calcio hidratados y la bohemita o alúmina hidratada. Bajo el efecto de la temperatura se ayuda a la partida de los radicales hidroxilos acompañada de una disminución de las resistencias mecánicas.

### 2.2.5 Mineralogía

Como los cementos aluminosos son formados por la reacción química de los compuestos de calcio, aluminio y silicio, para un mejor detalle de la formación de las fases mineralógicas podemos usar la notación cementera, que es diferente a la notación química, y es representada de la siguiente forma: C = CaO (Oxido de Calcio); A = AhO3 (Oxido de Aluminio); S = SiO2 (Oxido de Silicio) En la figura 3 se muestra el diagrama de fases ternario para estos óxidos, dentro del cual se encuentran las fases formadas por los cementos de aluminatos de calcio. Como referencia se ubica el campo de fases de los cementos Portland.

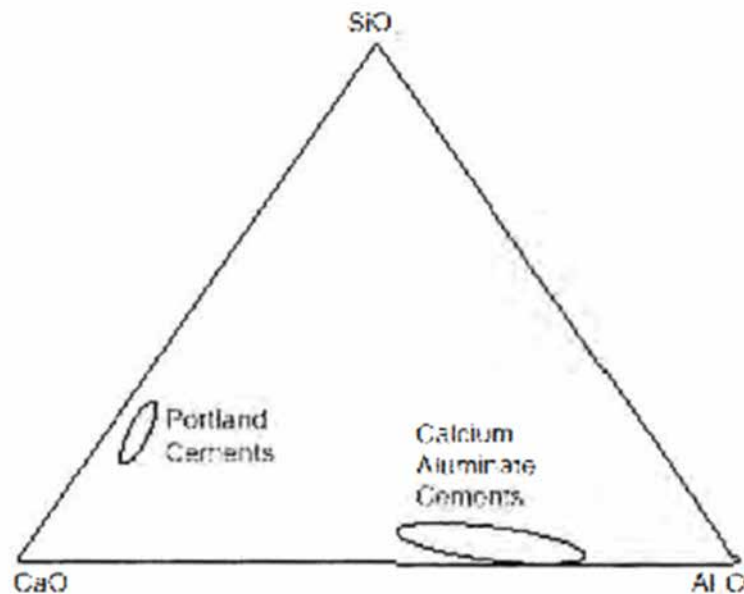


Figura 3 Diagrama de fases CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> (C-A-S).

Fuente: Cementos Aluminosos G. I. Morillo Zavaleta 2002.

## 2.2.6 Fibras Cerámicas

Fibra Cerámica Refractaria (FCR) es una fibra vítrea sintética (SVF por sus siglas en inglés) primero descubierta en 1942 y comercializada completamente en los años 60 tempranos. Es un aislamiento económico de energía; es ligero con conductividad termal baja, capacidad baja del almacenaje del calor y resistencia excelente del choque termal. La FCR es un material refractario, capaz de servir con muy alta temperatura, substituyendo el ladrillo y refractarios duros en usos hasta 2800 ° F. Los productos de Fibra Cerámica Refractaria son materiales importantes para los hornos industriales, los calentadores petroquímicos y los reactores y para las unidades de la contención del calor en el producto químico, fertilizante, acero, metales calor-que tratan, no ferrosos, cristal, de cerámica, fundición, cemento y las industrias Forjadoras. Otras aplicaciones están en la protección contra los incendios, convertidores catalíticos automotores, protectores de calor, bolsas de aire, espacio aéreo y usos de la defensa. Las fibras vítreas sintéticas son un grupo de materiales inorgánicos fibrosos que contienen aluminio o silicatos de calcio y trazas de óxidos y metales. Las fibras vítreas sintéticas se fabrican a partir de roca, escoria, arcilla o vidrio. A diferencia de las fibras de materiales naturales, tales como el asbesto, las fibras vítreas sintéticas no poseen una estructura molecular cristalina.

La orientación al azar de las moléculas en las fibras vítreas sintéticas da lugar a una estructura amorfa. Las fibras vítreas sintéticas se catalogan en dos grupos: filamentos y lanas. Los filamentos consisten de filamentos continuos de vidrio, mientras que las lanas se subdividen en lanas de vidrio, lanas de roca, lanas de escoria, fibras refractarias de cerámica y otros tipos de fibras de origen más reciente.

Las fibras vítreas sintéticas se usan principalmente como aislantes contra el calor y contra ruidos, para reforzar otros materiales y como materiales de filtración. Las lanas de vidrio son usadas ampliamente como materiales de aislamiento en casas y edificios. En años recientes, la producción y uso de las fibras vítreas sintéticas ha aumentado debido a que estos materiales frecuentemente se usan en lugar del asbesto. Una fibra es simplemente una partícula alargada y fina. Por definición, una fibra es una partícula de al menos 5 micrómetros de longitud (1 micrómetro es igual a 1/1,000,000 parte de 1 metro y se representa con la

notación  $\mu\text{m}$ ) y, además, la longitud de la partícula debe ser al menos 3 ó 5 veces mayor que su diámetro.

El diámetro de la partícula es una característica importante ya que las partículas de diámetro pequeño pueden permanecer suspendidas en el aire con más facilidad que las partículas más gruesas. Esto, a su vez, puede permitir que las fibras finas sean inhaladas al respirar depositándose en las partes profundas del pulmón. Solamente las fibras muy finas, aquellas con diámetro menor de  $3 \mu\text{m}$ , pueden alcanzar las partes más profundas del sistema respiratorio de los seres humanos luego de ser inhaladas. Las fibras más gruesas se depositan en las superficies revestidas de tejido mucoso de la parte superior del tracto respiratorio, las cuales incluyen la nariz y la boca. La Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que las fibras respirables son aquellas partículas con longitudes mayores de  $5 \mu\text{m}$ , diámetros menores de  $3 \mu\text{m}$  y proporciones de longitud: diámetro que sean mayores o iguales que 3:1.

Las fibras pueden tener diámetros relativamente grandes o pequeños, dependiendo de la manera en que las fibras son fabricadas. En general, la lana de vidrio, la lana de roca, la lana de escoria y las fibras refractarias de cerámica tienen los diámetros más pequeños mientras que las fibras de vidrio de filamento continuo tienen los diámetros más grandes. Como miembro del grupo del SVF de productos artificiales, al igual que las lanas de cristal y mineral fibroso, es un material amorfo del aluminio-silicato. Como el otro SVFs, Fibra Cerámica Refractaria se produce bajo condiciones altamente controladas, usando un proceso de fibrilización del derretimiento. Una variedad de formas del producto puede ser manufacturada, incluyendo bultos, las mantas, las formas vacío-formadas, los módulos, los papeles y los cementos.

Fibra Cerámica Refractaria representa la porción más pequeña de la industria del SVF, explicando menos el 2% de la producción mundial total. Global, Fibra Cerámica Refractaria desempeña un papel importante de la conservación controlando temperaturas altas y reduciendo el consumo del combustible fósil a la energía de ahorro y protege el ambiente. Los filamentos o fibras continuas, son fibras de diámetro muy uniforme, adecuados para tejidos. Las fibras cortas que proceden de los filamentos quedan excluidas en principio como fibras respirables debido al grosor de su diámetro.(ver figura 4)

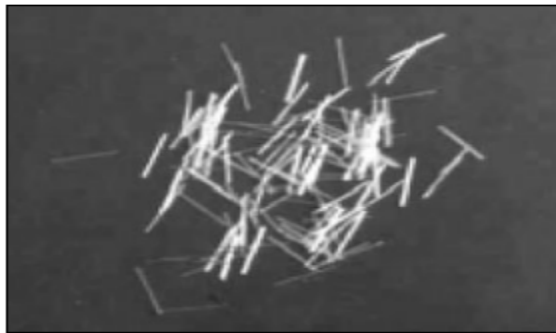


Figura 4 Filamentos de Fibra Cerámica Refractaria.

Fuente: Análisis del proceso en la elaboración de tablas refractarias de grupo Industrial Morgan. J.A Corona García 2017

#### **2.2.6.1 Características y usos de las fibras de cerámica refractarias comerciales.**

1. La fibra cerámica refractaria comercial fue comercializada completamente en los años 60 tempranos, substituyendo en gran parte refractarios aisladores tradicionales (los ladrillos y los concretos) en el equipo de proceso de alta temperatura, debido a los ahorros de la energía grandes producidos por su conductividad termal baja y masa termal baja.
2. Las características químicas y físicas de fibra cerámica refractarias comerciales proporciona características excelentes y los ahorros de la energía del aislamiento termal para las temperaturas hasta sobre 1400°C (2550°F).
3. Las Fibras manufacturadas tiene diámetros el variar a lo largo de su longitud del  $\mu\text{m}$  10, y longitudes a partir del 10 a 100 milímetros. Además, según lo fabricado, los productos de FCR contienen 20 - el 50% en peso de las partículas de cristal.

4. Las fibras respirables aerotransportadas de la fibra cerámica refractarias comerciales encontradas en ajustes ocupacionales tienen dimensiones perceptiblemente diferentes de fibras manufacturadas de fibra cerámica refractarias comerciales y de fibras aerotransportadas del asbesto. La fibra cerámica refractaria comercial aerotransportada tiene diámetros del medio geométrico en la gama 0.5 a las longitudes del  $\mu\text{m}$  1.5 y del medio geométrico del  $\mu\text{m}$  10 a 50. 5. Las fibras respirables aerotransportadas del asbesto tienen  $\mu\text{m}$  de los diámetros.
5. La fibra cerámica refractaria comercial se refiere a veces incorrectamente como “substitutos del asbesto.” El asbesto - un término de uso general describe un grupo de fibras naturales, teniendo una amplia gama características físicas y químicas. Es solamente capaz de tener una temperatura máxima de uso de  $850^{\circ}\text{C}$  ( $1550^{\circ}\text{F}$ ), y fue utilizado sobre todo en la construcción de Hornos y productos térmicos, ahora substituyeron a las fibras alternativas y los materiales no fibrosos.
6. Las fibras cerámicas refractarias comerciales y las fibras del asbesto tienen características químicas y físicas muy diversas. Las fibras del asbesto están más cercanas en la composición a las fibras de las lanas de cristal de una temperatura más baja que a fibras de cerámica refractarias comerciales.
7. Las fibras de cerámica refractarias comerciales es materiales frágiles que tienen fuerzas extensibles mucho más bajas que fibras del asbesto; La rotura de fibras de cerámica refractarias comerciales es más transversal que longitudinalmente en fibras más finas. Todas las fibras vítreas sintéticas (SVFs) son más solubles en pH neutral (e.g. líquido del pulmón) que todas las fibras del asbesto, y fibras de cerámica refractarias comerciales no son ningún menos soluble que muchas el otro SVFs.

#### **2.2.6.2 propiedades físicas de las fibras cerámicas refractarias**

Color .....	Blanco
Densidad (kg/m) .....	64-192
Espesor .....	3-51
Temperatura Máxima de Uso ( $^{\circ}\text{C}$ ).....	1100
Uso Límite .....	1260
Punto de Fusión ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	1760

Largo de Fibras (cm, medio) .....10-25

### **2.2.6.3 Composición y propiedades química de las fibras cerámicas refractarias**

Alúmina ( $Al_2O_3$ ) ..... 47

Sílice ( $SiO_2$  Otros .....trazos

Los productos de fibra cerámica poseen excelente resistencia a los ataques químicos, exceptuando los ácidos fluorhídrico y fosfórico y los álcalis fuertes (ej.  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ). La manta no es afectada por el aceite o el agua. Sus propiedades térmicas y físicas son restauradas al secarse.

### **2.2.6.4 Ventajas de las fibras cerámicas refractarias**

Disponibles para entrega inmediata con diversas combinaciones de dimensiones y densidades.

Baja conductividad térmica y energía térmica almacenada.

Elevada resistencia a los choques térmicos y ataques químicos.

Buenas características acústicas y de protección contra-fuego.

Alta flexibilidad, facilitando cortes e instalación. La manta es producida a partir de sílice y alúmina de alto grado de pureza.

Resultando fibras refractarias totalmente inorgánicas, densificadas y entrelazadas para garantizar buena resistencia mecánica al manipuleo durante la instalación.

### **2.2.6.5 Aplicaciones de las fibras cerámicas**

Aislamiento para el ducto de aire de alta temperatura

Barreras contra fuego para líquidos peligrosos

Empaquetaduras para la puerta del horno

Mechas para calentadores

Herramientas de protección para las altas temperaturas del calefactor

Aislamiento y sellado de la puerta de calderas

Mantas para la reducción de presión

Envolturas de rollo para calderas (hornos) de recocido

Empaquetaduras Tadpole para el calentador

Aislamiento eléctrico

Aislamiento de la barandilla  
Cortinas para el control del calor y gases  
Cortinas y mantas de unión  
Aislamiento térmico para la caja de válvulas  
Difusores de radiación infrarrojo  
Separadores para las zonas de calor de las calderas  
Empaquetaduras para la brida  
Sello para altas temperaturas  
Moldes de barra  
Sello tuckstone para calderas para vidrio  
Aislante para la corriente de calderas  
Aislamiento de la sección hidráulica  
Protector para el cinturón de transporte  
Protector de la brida en la industria vidriera

La tabla de fibra cerámica es un refractario de bajo peso en presentación de tabla, este producto se procesa con fibras de aluminasilica para aplicaciones de soporte temperatura 1650°C , esta tabla resiste velocidades de gas mayores que la colchoneta de fibra de vidrio, es ideal para quemadores, boiler, hornos, y ductos entre otros, dado a su baja conductividad térmica y bajo almacenamiento de calor, es ideal para lugares donde se requieran mantenimientos cortos de tiempo y existan ciclos térmicos altos.

Se utiliza en diversas industrias; Fabricación de Aluminio, Refuerzo en hornos, Liberador de stress en maquinaria, Tratamiento de calor en líneas de producción, Hornos de Crudo, Hornos de Generación de energía, Aislamiento en Juntas de Expansión, entre otras aplicaciones. (ver tabla 4)

Tabla 4 Datos técnicos fibra cerámica refractaria.

Datos técnicos fibra cerámica		
Temperatura máxima recomendada	1260° C (2300 °F)	
Limite de uso máximo °C (°F) diferentes tipos.	LTS	1000 °C (1832 °F)
	RTS	1260 °C (2300 °F)
	HPS	1315 °C (2400 °F)
	HTZ	1425 °C (2600 °F)
	HTA	1482 °C (2700 °F)
Densidad (Lbs/ft3)	4, 6, 8 y 10 (en cada tipo)	
Punto de fusión	1732° C (3150 °F)	

Fuente: Clima real C.A (2018) <http://www.climareal.com/prod/prod.php?i=2>

### 2.3 Definición de términos básicos

**Caldera:** Según la ITC-MIE-AP01, caldera es todo aparato de presión donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor. La caldera es un caso particular en el que se eleva a altas temperaturas un set de intercambiadores de calor, en la cual se produce un cambio de fase. Además, es recipiente de presión, por lo cual es construida en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas.

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

**Combustión:** Es el conjunto de procesos físico-químicos en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

**Eficiencia térmica:** La eficiencia térmica es el indicador más importante del trabajo de un generador de vapor, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo

(Borroto Nordelo, 2000). Se expresa la eficiencia de la caldera en porcentaje o por término de evaporación, que indica la proporción de vapor generado por unidad de combustible quemado en el horno

**Transferencia de calor:** Proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden ocurrir al mismo tiempo, puede suceder que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

**Choque térmico:** El choque térmico es el nombre dado a las grietas como consecuencia de los cambios bruscos de temperatura. Objetos de vidrio y cerámica, son particularmente vulnerables a esta forma de fracaso, debido a su baja tenacidad, baja conductividad térmica, y altos coeficientes de expansión térmica. Sin embargo, se utilizan en muchas aplicaciones de alta temperatura debido a su alto punto de fusión.

### **Resistencia Mecánica en Frío**

Aunque este valor, normalmente expresado como Resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup>, no puede asumirse para prever su exacto comportamiento en condiciones de operación, resulta de gran utilidad, como un punto de partida, para asumir en forma aproximada el mismo y, además, como factor de control de calidad que podría resultar indicativo de variaciones en las condiciones de fabricación, que provocarían cambios en su trabajo, en el momento de utilizarlos. Se exige normalmente: 350-500 kg/cm<sup>2</sup> para ladrillos de Alta alúmina (Ácidos). 500-700 kg/cm<sup>2</sup> para ladrillos de Dolomita o Magnesita (Básicos). Para su determinación se emplea la Norma ASTM C-133.

### **Poder Refractario**

Representa el comportamiento del material a altas temperaturas, y se expresa como una cifra con carácter abstracto deducida de un ensayo realizado en condiciones pre-establecidas. En Europa, se utiliza la medida de  $\frac{kg}{cm^2}$  y, en América, la medida correspondiente a la norma ASTM C-24 (Cono Pirométrico Equivalente). En la zona de clinkerización se emplea el cono N.º 36. La estabilidad frente a la carga térmica bajo presión, se mide por la temperatura a la que el material refractario comience a reblandecerse bajo una presión de 2

kg/cm<sup>2</sup>. El refractario debe adoptar, a determinadas temperaturas, cierto grado de plasticidad; por ello es conveniente que este valor se ubique unos 150° C por encima de la temperatura de clinkerización. 18 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Vol. 35, n.º 199, julio/agosto/septiembre 1985 © Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia 3.0 España (by-nc)

### **Dilatación Térmica**

Tiene gran importancia conocer los coeficientes de dilatación de los refractarios y de los materiales que sean empleados con ellos en el colocado, así como de la chapa metálica que se protege, a la temperatura de trabajo en cada caso. La alta temperatura que soporta la cara interior del ladrillo, en la zona crítica, produce esfuerzos que provocan el “  
o desconchamiento de la cara superior; la resistencia del ladrillo al “  
se controla e incluso se halla normalizada (ASTM C-122). Durante el diseño del colocado debe preverse la dilatación radial y longitudinal del ladrillo, existiendo todas las técnicas y elementos necesarios para lograr las condiciones que mejor se adapten a las de operación.

### **Resistencia Química**

La agresividad del material, los gases o las cenizas del combustible se presentan en condiciones muy variadas, y el refractario en cada zona debe presentar la suficiente inercia química, o resistencia a ser atacado por las condiciones agresivas existentes. La presencia de fase líquida favorece la acción agresiva de carácter químico, por lo cual este aspecto requiere especial atención en las zonas calientes del Homo. En esta zona, sin embargo, resulta necesaria la formación de costra y, para ello, la parcial reacción del refractario con el material del proceso. La investigación realizada por los fabricantes para adaptar el ladrillo a las exigentes condiciones requeridas permite ofrecer ladrillos de calidades muy convenientes, siendo de imprescindible importancia el contacto y asesoría técnica de los proveedores, para sacar el máximo provecho a los ladrillos adquiridos. Para efecto de la resistencia a los volátiles agresivos, que se presentan, juegan importante papel la porosidad y permeabilidad de los materiales.

### **Conductividad Térmica**

Las pérdidas de calor por radiación en el sistema representan aproximadamente el 10 % del consumo en kcal/kg de 44linker, por lo cual la capacidad de aislamiento representa un permanente objetivo de control y mejoramiento mediante mejores diseños y sistemas. El coeficiente de conductividad térmica (X) de los ladrillos silicoaluminosos, a 20° C, es 1,00 kcal/m-h-°C y a 1.000° C 1,30 kcal/m-h-°C. En el caso de los ladrillos de magnesita y dolomita (básicos) sucede, al contrario: a 20° C 5,0 kcal/m-h-°C y a 1.000° C 3,0 kcal/m-h-°C. La chapa del Horno tiene un  $X = 40 \text{ kcal/m}^* \text{ h-}^\circ\text{C}$ . La conductividad y gradiente de temperatura al exterior, en conjunción con las características fisicoquímicas del material y la temperatura en el interior del Horno, juegan un papel decisivo en la formación y conservación de la costra protectora. Debe procurarse un equilibrio entre las condiciones óptimas para preservar la costra y evitar pérdidas de calor al exterior.

### **Resistencia a la Abrasión**

Al igual que con los cementos, en el campo de materiales refractarios el criterio de calidad es MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Vol. 35, n.º 199, julio/agosto/septiembre 1985 19 © Consejo Superior de Investigaciones Científicas Licencia 3.0 España (by-nc) <http://materconstrucc.revistas.csic.es> relativo y el más apropiado para cada caso será el que mejor responda y se ajuste a las exigencias particulares requeridas. En los materiales que se emplean en el proceso de clinkerización, frecuentemente se comete el error de considerar sólo el factor temperatura y juzgar la calidad del refractario en función de su contenido en Alúmina. Considerando los ladrillos silicoaluminosos, la resistencia a la abrasión disminuirá con el incremento del porcentaje de Alúmina, y aumentará su resistencia a mayores temperaturas.

### **Porosidad y Permeabilidad**

El tamaño, forma y cantidad de poros en los materiales refractarios revisten gran importancia en sus características; con menor porosidad o mayor compacidad, se logra mayor resistencia al ataque químico y a la abrasión, así como más altas resistencias a compresión. La conductividad térmica también disminuye con la porosidad. Una mayor porosidad influirá ventajosamente en la resistencia al “spalling” o “desconchamiento” ya referido. La

permeabilidad tiene gran importancia para la presencia de gases o fase líquida de características muy agresivas.

### **Resistencia al Choque Térmico.**

En la operación del Horno, el objetivo ideal se orienta hacia la máxima conductividad en condiciones normalizadas, pero, con frecuencia variable según el caso, se producen interrupciones

### **Normas ASTM; Características y propiedades requeridas en un refractario**

Conocer las, principales características de los materiales refractarios, que se utilizan o se podrían utilizar en la planta, resulta imprescindible para lograr un buen trabajo de la misma; planificar, prever y explicar el comportamiento del refractario proporciona un factor de control de grandes posibilidades para asegurar y mejorar rendimientos; en la contraparte, el desconocimiento de este campo provoca serios riesgos y pérdidas de producción al asumir causas equivocadas a los problemas que se presentan.

### **Normas COVENIN 2217-84 Generadores de vapor instalación**

Esta norma establece los requisitos mínimos para la instalación de generadores de vapor, sus accesorios y dispositivos auxiliares.

### **Normas COVENIN 2218-84 Generadores de vapor en servicio (Inspección)**

Esta norma establece el procedimiento, condiciones y criterios para la inspección de generadores de vapor en servicio. Tales como; conceptos generales, obligaciones de inspector y usuarios, preparación de la inspección.

### **Normas COVENIN 2262-91 Generadores de vapor reparación y alteraciones**

Esta norma establece las reparaciones y alteraciones en vasos de presión de generadores de vapor. Para evaluar la magnitud de la falla se deberá, aplicar un examen no destructivo, tales como líquidos penetrantes y/o radiografías o cualquier otro método idóneo para cumplir con efectividad.

## CAPÍTULO III

### MARCO METODOLÓGICO

La metodología incluye el tipo o tipos de investigación, métodos y pasos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación, Según Galán (2011), es el "cómo se realizará el metodología que permitirá desarrollar el presente Trabajo Especial de Grado. Se muestran aspectos como el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que fueron utilizados para llevar a cabo el estudio en torno al análisis comparativo entre el concreto convencional con el concreto con arcillas expansivas en la construcción en el estado Carabobo.

#### 3.1 Tipo de Investigación

Según (Ramírez, T; 1.999) las investigaciones se pueden clasificar según su:

- a) Tipo: En atención a alguna característica del trabajo.
- b) Nivel: Según el alcance que quiere lograrse con la misma.

Según el tipo de investigación se emplea una Investigación Documental *Según* (Ramírez, T; 1.999) "...investigación cuyo objetivo es el *análisis de diferentes fenómenos (históricos, psicológicos, etc.) de la realidad a través de la indagación rigurosa* utilizando técnicas muy precisas; de la documentación existente que aporte información atinente al fenómeno que se estudia..."

#### *Según el Nivel:*

**I. Exploratorias:** Según (Ramírez, T; 1.999) "...cuando su propósito es *indagar acerca de una realidad poco estudiada...*" El investigador debe realizar una exploración previa sobre el tópico o aquellas comunidades muy poco estudiadas.

**II. Descriptivo:** Según (Ramírez, T; 1.999) "... son aquellos estudios *cuyos objetivos es la descripción con mayor precisión, de las características de un determinado individuo, situaciones o grupos*, con o sin especificación de hipótesis iniciales acerca de la naturaleza de tales características..."

Otra modalidad de los estudios descriptivos, según (Ramírez, T; 1.999) “...son aquellos cuyo *alcance se extiende hasta la determinación de la frecuencia con la que algo ocurre* o con la que algo se halla asociado o relacionado con otro factor...”.

**III. Explicativo:** Según (Ramírez, T; 1.999) “...son aquellos *estudios cuyo objetivo* están concentrados en la *comprobación de hipótesis de relación causal* entre variables...”

### **3.2 Diseño de Investigación**

Así mismo Fidias G. Arias (2004); la investigación documental se ha establecido que datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales:

Es por ello que el diseño del presente trabajo es de tipo documental, puesto que se basa en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales impresas, audiovisuales o electrónicas, con el fin de nuevos aportes en conocimientos.

### **3.3 Nivel de la investigación**

Tamayo y Tamayo (2001) señalan que “este lleva implícito una estructura a seguir en la investigación, sobre la cual se ha de ejercer los controles necesarios a fin de encontrar resultados confiables y determinar así mismo su relación con las interrogantes surgidas de los supuestos e hipótesis y del problema”.

Ahora bien, al hablar específicamente de la investigación descriptiva, el hecho de describir, en términos metodológicos consiste en indicar todas las características del fenómeno que se estudia, por cuanto implica por parte de los investigadores en este caso, la capacidad y disposición de evaluar y exponer, en forma detallada, las características del objeto de estudio, ya que evidencia el nivel cognitivo y operativo de conceptos y categorías relacionadas con el tema.

### 3.4 Población y muestra

Según Arias (2006), la población “es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación, quedando delimitada por el problema y objetivos del estudio” (p. 81).

En referencia a lo expuesto, en esta investigación la población corresponderá a la comparación del comportamiento del concreto refractario con la fibra de cerámica refractaria.

Por otro lado, Arias (2006), define la muestra como “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (p. 46). Para la presente investigación se utilizará el muestreo seleccionado de la calorimetría y ensayo a compresión tanto del concreto refractario como de la fibra de cerámica refractaria.

### 3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos, según Arias (2011), “son las distintas formas o maneras de obtener la información” (p. 45). Son ejemplos de técnicas documentales la observación documental, análisis documental, las cuales permiten indagar, interpretar, presentar datos e informaciones sobre un tema determinado de cualquier ciencia, utilizando para ello, una metodología de análisis, teniendo como finalidad obtener resultados que pudiesen ser base para el desarrollo de la creación científica. Las técnicas a utilizar son:

**Observación documental:** para Arias (ob. cit) “es una técnica que permite la recopilación de información para enunciar las teorías que sustentan el estudio de los fenómenos y procesos” (p. 46), incluye el uso de instrumentos definidos según la fuente documental a que hace referencia.

**Análisis documental:** de acuerdo con Arias (ob.cit), se basa en la “realización de una exploración de documentos para el acopio de la información necesaria y que, según el criterio establecido de indagación pudiera servir para el desarrollo de la investigación y en consecuencia para el logro de los objetivos planteados” (p. 47). Por ello se estudiaron una serie de documentos que permitieron extraer ideas y comentarios de los diferentes autores e instituciones que tratan el tema sobre el análisis del concreto refractario con la fibra de cerámicas refractarias en calderas pirotubulares.

**Paráfrasis:** quién según Flores (2012), “consiste en reproducir la idea de un autor expresándola con otras palabras” (p. 4). En este trabajo la paráfrasis se utilizó para contrastar y comparar las ideas del autor citado con respecto a las opiniones interpretativas de los investigadores.

**El fichaje:** según Flores (ob. cit), “es una técnica empleada por los investigadores, para recolectar y almacenar información” (p. 4), es decir, para tomar nota de libros o medios impresos y digitales sobre aspectos importantes relacionados con el análisis comparativo entre el concreto refractario con la fibra de cerámica refractaria en calderas pirotubulares.

**Subrayado:** para Arias (ob.cit), “es identificar las ideas fundamentales de un texto, es el primer paso para poder crear resúmenes y esquemas que más adelante permiten entender y memorizar el tema en cuestión” (p. 56). Para este trabajo de investigación se tomó en consideración los siguientes pasos para aplicar el subrayado: Subrayar los libros adquiridos por los investigadores, subrayar ideas, hechos y conceptos planteados por autores para tener una mayor comprensión de las ideas primarias y secundarias.

Los instrumentos de recolección de información para una investigación documental, según Arias (ob. cit) “son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información” (p. 49). Ejemplo: citas o fuentes de información, fichas, subrayado.

**Citas o fuentes de información:** para esta investigación se utilizaron diccionarios, libros de texto, artículos publicados en prensa escrita e Internet, boletines informativos publicados en revista electrónica, monografías publicadas en Internet, libros de texto. Todas estas fuentes y citas consultadas, mostraron información en torno al análisis del tema seleccionado.

**Fichas:** una parte muy importante de la investigación documental lo constituyen los diferentes tipos de fichas, las variantes están en función del tipo de material y de la fuente de la que se extrae la información. Es de ahí donde se toma su información. Entre las fichas empleadas para este trabajo se encuentran: Ficha bibliográfica (libros) sobre estudios del concreto convencional con las arcillas expansivas, ficha hemerográficas (artículo de periódico el Nacional, Últimas Noticias, Economía y Negocios), ficha de información electrónica (información extraída de los medios electrónicos).

A medida que se vayan consultando los libros o cualquier otra fuente para dar fundamento a la investigación, Arias (ob.cit), recomienda “ir haciendo el registro de los datos correspondientes de la teoría consultada” (p. 49). La ventaja del fichaje para este trabajo, es el ordenamiento de la información recolectada, la cual ha permitido anotar nombres de autores, temas, títulos, año, páginas, entre otros elementos de carácter bibliográfico.

**Meta-análisis:** es un método de revisión sistemática, el cual permite realizar una evaluación y combina estadísticamente los resultados de investigaciones previas sobre el mismo tema.

### **3.6 Fases metodológicas**

Para llevar a cabo la investigación, se cumplirá con tres fases metodológicas, de acuerdo con los objetivos específicos planteados:

**Fase I: Analizar la importancia del comportamiento el concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en calderas pirotubulares.**

Obteniendo una serie de estudios y lecturas de diferentes autores, se realiza un análisis que permite conocer el comportamiento de ambos materiales y la realización de diferentes ensayos que permiten conocer cada una de las propiedades de los materiales. Con esta información se determinan los factores y variables que le dan validez de contenido al trabajo de investigación y con ello el planteamiento de los siguientes objetivos a estudiar para llevar a cabo la solución de esta problemática en particular, con lo anteriormente expuesto, quedan cumplido los trabajos y tareas necesarios de la fase “I” a fin de obtener cumplir con el objetivo específico número “I”

- **Fase II Identificar las zonas críticas de los materiales refractarios en la caldera pirotubular.**

Mediante la recolección de información se realiza un estudio de comparación de problemas observados anteriormente en este tipo de calderas para así determinar las posibles zonas de fallas de los materiales refractarios y con ello cumplir con los trabajos y tareas necesarios de la fase “II” a fin de obtener cumplir con el objetivo específico número “II”.

**FASE III: Realizar un análisis comparativo de las variables que determinan la eficiencia y durabilidad entre los concretos refractarios y las fibras refractarias en las calderas piro tubulares.**

Se realiza una estrategia para solución de problemas enfocado en el estudio de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de una empresa, persona o situación caso estudio que amerite un análisis, para así en nuestro caso ser utilizado en la comparación entre el concreto refractario y las fibras de cerámicas refractarias con la finalidad de determinar los factores que determinan la eficiencia y vida útil de los materiales refractarios en las calderas pirotubulares. , para así cumplir con los trabajos y tareas necesarios de la fase “III” a fin de obtener cumplir con el objetivo específico número “III”

## **CAPÍTULO IV**

### **RECURSOS**

De acuerdo al problema a resolver, los objetivos a alcanzar, la metodología a utilizar y las técnicas o recursos a emplearse; en este capítulo se expresan los recursos necesarios para el cumplimiento de este proyecto, así como el tiempo necesario para el desarrollo y ejecución de la investigación.

#### **4.1 Recursos materiales**

- Computadora HP 15, con procesador AMD E-450 APU de 1.6 Hz, con 6 GB de memoria RAM y una tarjeta gráfica Advanced Micro Devices de 1526 MB de memoria de video, con plataforma Windows 10 Home de 64 bits.

- Impresora EPSON L-210
- Hojas tamaño carta

#### **4.2 Recursos Humanos**

- Henríquez Alexis (Autor)
- Ing. De Pizzella Alicia (Tutor metodológico y tutor académico)
- Ing. Pocaterra Alejandro (Asesoría)

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

Este capítulo se enfocó en desarrollar cada uno de los objetivos planteados dentro de la investigación dirigida al análisis comparativo del concreto refractario con la fibra de cerámica refractaria en caldera pirotubular. Con los resultados obtenidos, se llevó a cabo un estudio correspondiente a la durabilidad de cada uno de los materiales, así mismo se realizaron una serie de recomendaciones que puedan ser tomadas en cuenta para posteriores investigaciones.

**4.1 Analizar el comportamiento del concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en calderas pirotubulares.**

#### 4.1.1 Comportamiento del Cemento Refractario

Para el desarrollo de este objetivo se consideraron los ensayos realizados por García (2013) para el estudio del comportamiento del concreto refractario donde se conocieron las principales características de este material, el mismo se realizó bajo el ASME norma PTF-15. Según las normas el hogar o cámara de combustión se conforman de planchas planas, las mismas que son curvadas o roladas en frío para luego ser soldadas. La cámara de combustión debe confeccionarse con una adecuada tolerancia de redondez a fin de poderse unir satisfactoriamente con las placas – espejos. Así mismo, recomienda como una forma práctica, que la desviación diametral de esta parte no debe exceder a una vez el espesor de ella, pero siempre se debe considerar la holgura necesaria para el posterior trabajo de soldadura, garantizando una buena unión.

##### 4.1.1.1 Presión máxima de trabajo

Para el estudio del comportamiento del cemento refractario se calculó la presión a la que está sometido la carcasa o el hogar de la caldera y se comparó con el ensayo (García 2013). Según código ASME sección I PFT-9 el mínimo espesor para placas portatubos en caldera pirotubulares está limitada por su diámetro de acuerdo a la siguiente a la tabla 6.

**Tabla 6** Código ASME espesor mínimo

DIÁMETRO DE LA PLACA (PULG)	ESPESOR MÍNIMO (PULG)
Hasta 36	1 / 4
De 36 a 45	5 / 6
De 54 a 72	3 / 8
Mas de 72	1 / 2

Para la caldera de la empresa se midió el espesor de la placa, el cual fue  $t = 1 / 4$  pulg y un diámetro  $D_0 = 10$  pulg. Luego se verificó el valor de la relación

$$t / D = 0,025$$

Para el caso de una carcasa lisa, el código ASME norma PFT-15 establece los espesores de la carcasa en función de la presión admisible y el diámetro externo. Cuando el espesor de la carcasa es mayor o igual a 0,023 veces el diámetro de la misma se usa la siguiente ecuación

$$P = 17300 - 275 \quad \text{Psi}$$

Donde P es la presión de trabajo máxima admisible o de diseño (Psi)

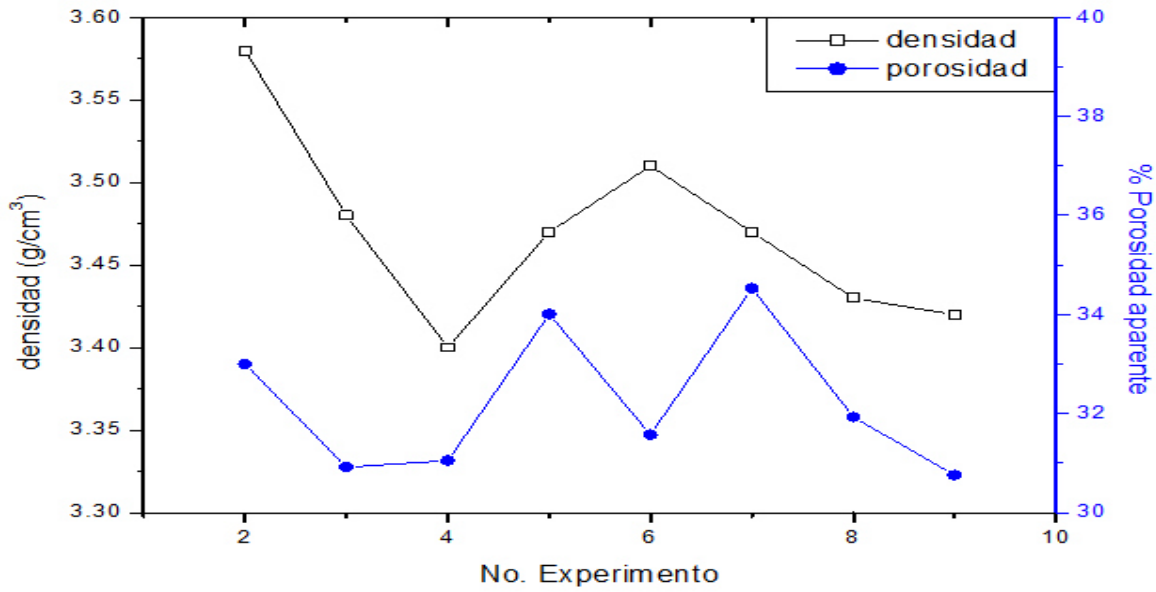
t: espesor de la carcasa del hogar

D<sub>o</sub> : diámetro exterior de la carcasa

Con los valores anteriores se calculó la presión **P = 157,5 Psi o P = 1,08Mpa**

#### **4.1.1.2 Densidad y %porosidad aparente**

El tamaño, forma y cantidad de poros en concretos refractarios revisten gran importancia en sus características; con menor porosidad o mayor compacidad, se logra mayor resistencia al ataque químico y a la abrasión, así como más altas resistencias a compresión. La conductividad térmica también disminuye con la porosidad. Una mayor porosidad influirá ventajosamente en la resistencia al "spalling" o "desconchamiento" ya referido. La permeabilidad tiene gran importancia para la presencia de gases o fase líquida de características muy agresivas. En el ensayo (García 2013) se determinó la densidad del concreto refractario mediante el método de agua hirviendo. En la figura 5 se muestran los resultados de densidad y % Porosidad aparente del diseño de experimentos



**Figura 5** densidad y % Porosidad aparente

#### 4.1.1.3 Resistencia Mecánica en Frío

Este valor, normalmente expresado como Resistencia a la compresión en kg/cm<sup>2</sup>, no puede asumirse para prever su exacto comportamiento en condiciones de operación, resulta de gran utilidad, como un punto de partida, para asumir en forma aproximada el mismo y, además, como factor de control de calidad que podría resultar indicativo de variaciones en las condiciones de fabricación, que provocarían cambios en su trabajo, en el momento de utilizarlos. Para su determinación se emplea la Norma ASTM C-133.

Se exige normalmente:

350-500 kg/cm<sup>2</sup> para concreto de Alta alúmina (Ácidos).

500-700 kg/cm<sup>2</sup> para concreto de Dolomita o Magnesita (Básicos).

#### 4.1.1.4 Resistencia mecánica a la compresión

Posterior al análisis de densidad y % porosidad aparente, (García 2013) se llevó a cabo la determinación del comportamiento de las probetas en resistencia mecánica a la compresión. Las probetas ensayadas se elaboraron de acuerdo a las medidas señaladas en la norma ASTM C10941, las cuales deber ser de 50mm, se determinó la resistencia mecánica a la compresión a probetas a las siguientes temperaturas 120°C, 540°C, 815°C, 1050°C, 1260°C y 1370°C.(ver figura 6)

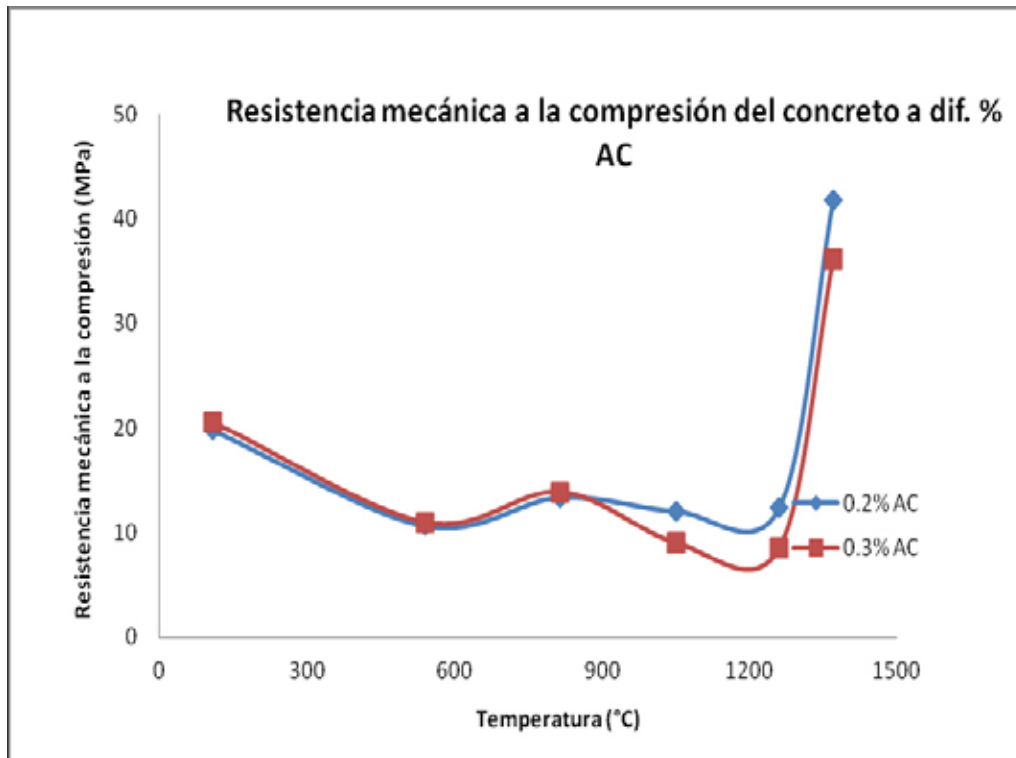


Figura 6 Gráfica de la resistencia mecánica a la compresión del concreto refractario con diferentes % de ácido cítrico.

Fuente: “Estudio y obtención de un concreto refractario bajo cemento con alta resistencia térmica. Laura Imelda García Ortiz (2013)

#### 4.1.1.5 Poder Refractario

El poder refractario representa el comportamiento del material a altas temperaturas, y se expresa como una cifra con carácter abstracto deducida de un ensayo realizado en condiciones pre-establecidas. En Europa, se utiliza la medida de cono Seger y, en América, la medida correspondiente a la norma ASTM C-24 (Cono Pirométrico Equivalente). En la zona de clinkerización se emplea el cono Seger N.º 36. La estabilidad frente a la carga térmica bajo presión, (García 2013) se midió por la temperatura a la que el material refractario comenzó a reblandecerse bajo una presión de 2 kg/ . El refractario debe adoptar, a determinadas temperaturas, cierto grado de plasticidad; por ello demostró que es conveniente que este valor se ubique unos 150° C por encima de la temperatura de clinkerización.

#### **4.1.1.6 Dilatación Térmica**

Es de gran importancia conocer los coeficientes de dilatación de los refractarios y de los materiales que son empleados en el colocado, así como de la chapa metálica que se protege, a la temperatura de trabajo en cada caso. La alta temperatura que soporta el concreto, en la zona crítica, produce esfuerzos que provocan el "spalling" o desconchamiento de la cara superior; la resistencia del concreto al "spalling" se controla e incluso se halla normalizada (ASTM C-122). Durante el diseño del colocado debe preverse la dilatación radial del concreto, existiendo todas las técnicas y elementos necesarios para lograr las condiciones que mejor se adapten a las de operación.

#### **4.1.1.7 Resistencia Química**

La agresividad del material, los gases o las cenizas del combustible se presentan en condiciones muy variadas, y el concreto refractario en cada zona debe presentar la suficiente inercia química, o resistencia a ser atacado por las condiciones agresivas existentes. La presencia de fase líquida favorece la acción agresiva de carácter químico, por lo cual este aspecto requiere especial atención en las zonas calientes del Homo. En esta zona, sin embargo, resulta necesaria la formación de costra y, para ello, la parcial reacción del refractario con el material del proceso.

La investigación realizada por los fabricantes para adaptar el concreto a las exigentes condiciones requeridas permite ofrecer concretos de calidades muy convenientes, siendo de imprescindible importancia el contacto y asesoría técnica de los proveedores, para sacar el máximo provecho al concreto refractario. Para efecto de la resistencia a los volátiles agresivos, que se presentan, juegan importante papel la porosidad y permeabilidad de los materiales.

#### **4.1.1.8 Conductividad Térmica**

Es la medida de la cantidad de calor que fluye a través de una unidad de área en un tiempo definido, con un gradiente de temperatura conocido en toda la zona. El valor de "k" es un indicador del flujo de calor característico de los refractarios: cuanto mayor sea el valor de "k", mayor será el potencial de flujo de calor (mejor conductor); cuando menor sea el valor de "k", menor será el flujo de calor (mejor aislante). La conductividad térmica de los refractarios es afectada por una variedad de factores, por ejemplo:

- Composición química y mineralógica

- Temperatura
- Porosidad
- Grado de sinterización
- Atmósfera del horno

#### **4.1.1.9 Resistencia a la Abrasión**

El criterio de calidad es relativo y el más apropiado para cada caso será el que mejor responda y se ajuste a las exigencias particulares requeridas. En los materiales que se emplean en el proceso de clinkerización, frecuentemente se comete el error de considerar sólo el factor temperatura y juzgar la calidad del refractario en función de su contenido en Alúmina. Considerando los concretos silicoaluminosos, la resistencia a la abrasión disminuirá con el incremento del porcentaje de Alúmina, y aumentará su resistencia a mayores temperaturas.

Los concretos refractarios se usan en puertas, colectores, cabezales, paredes, baffles y en general en todas aquellas zonas de la caldera en que sea difícil el uso de ladrillos refractarios de formato estándar o para evitar la fabricación de formas especiales son escasas y costosas. Habiendo una amplia variedad de diseños y de combustibles, los tipos de productos refractarios utilizados pueden variar considerablemente. Se requiere de una minuciosa consideración del tipo de combustible y método de encendido antes de poder fabricar un material refractario.

#### **4.1.1.10 Condiciones de funcionamiento**

- **Ataque Químico:** Los combustibles típicos para calderas pueden contener elementos reactivos tales como sodio, potasio o vanadio. Las reacciones entre estos productos de combustión y el revestimiento refractario pueden cambiar las propiedades del revestimiento refractario y resultar en exfoliación, corrosión y/o erosión.
- **Expansión:** Las fracturas o grietas de concretos refractarios por expansiones no consideradas son frecuentes, para controlarlas se requiere contemplar juntas de construcción (juntas frías) o juntas de expansión. Las juntas de construcción son diseñadas para permitir una fractura del material en paneles de tamaño previamente establecidos. Los paneles adyacentes son vaciados unos contra otro sin quitar los traslapes, usando estos como encofrado de borde para el próximo vaciado.

- **Abrasión y Erosión:** Partículas en suspensión en el aire pueden causar abrasión al impactar la superficie de un refractario. La erosión puede ser introducida a lo que un líquido fluye sobre la superficie de un revestimiento refractario.
- **Choque Térmico:** Las fluctuaciones rápidas de temperatura, causadas por la variedad de los combustibles (sea en contenido de BTU o de volatilidad o del lavado de agua en tolvas para cenizas, pueden causar exfoliación. Los tipos de combustible y los métodos de encendido son frecuentemente la fuente de muchas de estas condiciones destructivas de trabajo.

#### **4.1.1.11 Efecto según los combustibles**

- **GAS:** Estos combustibles típicamente se consumen en forma muy limpia. Cuando las calderas encendidas con gas funcionan correctamente (es decir combustible limpio y buen control del quemador) proporcionan un ambiente consistente y suave para refractarios.
- **Fueloil:** En general los fueloiles causan pocos problemas a los refractarios. A medida que baja la calidad del petróleo, las impurezas tales como el sodio y el vanadio aumentan lo cual puede producir ataques químicos. Las llamas del fueloil son más difíciles de controlar. Si la caldera se enciende con petróleo más pesado los refractarios en contacto con la ceniza deben ser mejorados.
- **Carbón:** Lo principalmente destructivo es la abrasión. En unidades encendidas por cargador las parillas están sujetas al roce del carbón y de las cenizas. En quemadores de carbón pulverizado y en quemadores ciclón, los orificios del quemador están sujetos a altas velocidades del aire que tiene partículas de carbón. Las tolvas para cenizas son expuestas a una combinación de impacto y abrasión, al igual que de choque térmico.
- **Desechos de Madera y de Productos Agrícolas:** El encendido con estos combustibles puede causar problemas con refractarios según la naturaleza y las condiciones del combustible que se está utilizando. Combustibles de madera contienen usualmente altos niveles de álcali y sal que causan ataques químicos.

#### **4.1.2 Comportamiento de la fibra refractaria**

En segundo lugar, se encuentra el estudio de la fibra de cerámica refractaria donde se conocieron que algunos de los factores más importantes que determinan la selección de fibra y el tipo de revestimiento de fibra cerámica utilizada en calderas son los siguientes tópicos específicos donde se discutirán sus propiedades y características.( Grupo Morgan Advanced Materials 2014)

Conductividad Térmica

Efecto Del Contenido De Gránulos En La Conductividad Térmica

Desvitrificación

Encogimiento

Resistencia A La Velocidad

Ataque Químico

#### **4.1.2.1 Conductividad Térmica.**

Los tres modos principales de transferencia de calor son, conducción, radiación y convección

- **Conducción:** La transferencia de calor por conducción verdaderamente está compuesta de dos mecanismos separados - conducción en aire entre las fibras, y conducción sólida a través de las fibras individuales y las partículas de gránulos. En temperaturas bajas, la transferencia de calor por conducción es el principal mecanismo de transferencia de calor, como se puede ver en la figura 7. Al subir la temperatura, la conducción a través del aire y a través de los sólidos aumentará junto con la transferencia de calor por radiación.

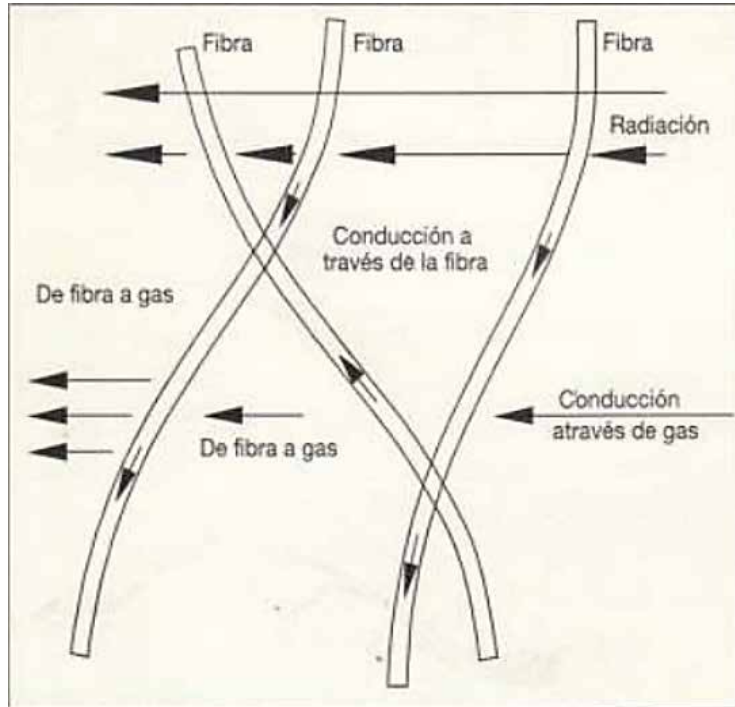


Figura 7 - Transferencia de calor en F.C.R..  
 Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

En la Figura 8 se muestra la relación entre la conductividad del aire, la conductividad de la fibra y la radiación a temperaturas más altas. A temperaturas elevadas, la transferencia de calor radiante se convierte en el mecanismo.

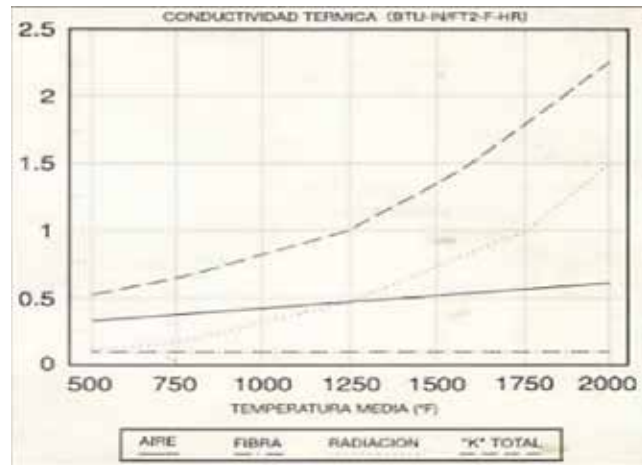


Figura 8 Modos principales de Transferencia de Calor.  
 Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

- **Radiación:** Este es el mecanismo principal de transferencia de calor a altas temperaturas para las fibras cerámicas y consiste de dos partes principales: a) radiación que no es absorbida por la estructura fibrosa sino reflejada y dispersada, b) radiación entre las partículas de fibra que depende de la absorción y emitancia de las fibras y la diferencia en temperatura (distancia térmica) entre dos fibras. La transferencia de calor de energía radiante es proporcional a la diferencia de la 4ta potencia de las temperaturas absolutas de las superficies participantes. Esto quiere decir simplemente que, al subir la temperatura, la transferencia de calor principalmente por causa de la transferencia de radiación, subirá rápidamente, convirtiéndose en el mecanismo dominante de transferencia de calor.
- **Convección:** La transferencia de calor por convección natural es aparente solamente cuando las células de aire individuales son relativamente grandes (aproximadamente 2mm). Con células más pequeñas que éstas la turbulencia de aire natural es nominal y la transferencia de calor por convecciones insignificante. En los productos de fibra cerámica, el tamaño promedio efectivo de poro es pequeño y la transferencia de calor por convección es sostenida a un mínimo absoluto.

#### **4.1.2.2 Efecto Del Contenido De Gránulos En La Conductividad Térmica.**

Dentro de los campos típicos de fabricación, el contenido de gránulos no influye directamente en la conductividad térmica. Indirectamente reduce el rendimiento térmico simplemente reduciendo la cantidad de fibra cerámica dada en una unidad de volumen, lo cual es similar al efecto de diámetro de fibra incrementado. Los gránulos actuarán algo así como un conductor sólido y como un bloqueador de radiación, pero los efectos son insignificantes cuando se comparan con los efectos que tiene la cantidad reducida de fibra en la conductividad térmica.

Donde el gránulo se vuelve importante, es en su relación a la densidad a granel (ej. cuanto más gránulo, más denso el producto y menos fibra presente en una muestra dada, y por lo tanto la conductividad térmica es más alta). Es imperativo que cuando se comparen los valores del contenido de gránulo solo sean comparados cuando se usan métodos de análisis similares. Los dos métodos de medir gránulos son lavados por agua, y ASTM C-892. EL

método de elutriación es la norma en la industria, pero ASTM C-892 puede ser usado también.

- **Método de elutriación:** Este método consiste de dos análisis, el método de tubo singular (vaso) y el método de cuatro tubos (vaso). Thermal Ceramics usa el método de tubo singular para medir ~1 contenido de gránulo en las fibras cerámicas sopladas, y el método de cuatro tubos para la fibra cerámica centrifugada. Los dos métodos se han desarrollado por la diferencia en tamaño físico entre la fibra cerámica soplada y centrifugada. EL método de tubo singular requiere una cámara de recuperación, un tubo de elutriación (separación) y un frasco para la recolección de los gránulos. La fibra cerámica soplada se toma sin quemarse y molida, entonces se introduce en el tubo de elutriación, donde la fibra y los gránulos se separan. Después los gránulos se recogen, se secan y se ciernen para reportar datos típicos para mallas +40, -40 x +100, -100 y el contenido total. EL método de cuatro tubos requiere cuatro cámaras de elutriación (separación). La fibra cerámica centrifugada se quema y se mete en una cámara de mezclado de alta fuerza cortante para separar las fibras. Entonces se meten las fibras y los gránulos en cuatro tubos de elutriación, cada uno de ellos teniendo de flujo de agua diferente. Los gránulos son clasificados por tubos en escalas de malla +50, malla -50 x +100, malla -100 x + 200, y malla -200 x +325. El material recogido es secado y reportado como el contenido total de gránulos. Una variación entre el método de tubo singular y el de cuatro es el hecho que el método de cuatro tubos da en el resultado un porcentaje más bajo de gránulos. Se estima que el método de cuatro tubos dará resultados entre el 6 y el 15 por ciento más bajos que el método de tubo singular. Esto se debe a la medición de partículas de gránulos finos que no es tan exacta en el método de cuatro tubos.
- **ASTM C-892:** Este método de prueba usa fibra cerámica quemada y molida la cual se frota a través de mallas regulares. Este método dé el contenido de gránulos como un peso acumulativo y normalmente no se usa en la medición del contenido de gránulos de la fibra cerámica. Variaciones en los procedimientos de pruebas y métodos darán resultados diferentes de pruebas, por lo tanto, cuando se comparan los contenidos de gránulos de fibra cerámica es importante saber que método de medición fue usado.

#### 4.1.2.3 Desvitrificación.

- **Fibra de alúmina-sílice regular:** La fibra cerámica está generalmente en un estado amorfo al ser producida. La mezcla de caolín o alúmina-sílice se derrite, y se atenúa con un caudal de aire comprimido; la fibra producida está en un estado vítreo o "vidrioso" típico. El término amorfo es definido mejor como "careciente de estructura cristalina o arreglo molecular definido." Una característica de todos los cristales es la ausencia de estructuras cristalinas. Cuando se forman los cristales, el líquido se sofoca o "frisa" rápidamente antes de que los átomos individuales o moléculas se puedan arreglar adecuadamente en una estructura cristalina. Estas moléculas se mantienen en una orientación casual hasta que se añada suficiente energía al sistema para promover reestructura y formar productos cristalinos. Esto es, en esencia lo que significa el término desvitrificación, o recristalización. En el caso de la fibra de caolín o las fibras sintéticas de alúmina sílice, la temperatura de desvitrificación inicial es de aproximadamente 1750-1800°F (950-975°C). El primer producto de la recristalización es mullita. La mullita (ver tabla 5) se precipita de la matriz vidriosa como un cristal bien definido, el cual se puede ver en las curvas de DTA y confirmarse por medio de difracción de rayos-x. EL segundo producto de la recristalización es cristobalita que se empieza a precipitar de la matriz vidriosa rica en silicón después de un periodo extendido de tiempo a 2012°F (1100°C). Como regla rudimentaria ya establecida, las siguientes relaciones de tiempo/temperatura se pueden usar para la formación de cristobalita en las fibras de alúmina-sílice.

La cristobalita se forma después de:

4 meses (13000 horas)	@ 2012°F (1100°C)
2 semanas (300 horas)	@ 2192°F (1200°C)
2 días (50 horas)	@ 2372°F (1300°C)

Tabla 5 Fibra Manta de Alúmina-Sílice, Cambios de Fase

Temperatura °F, (°C)	Mineralogía	Gravedad Específica g/cc	% Volumen de Fase Sólida
<1796 (980)	100% Alúmina-sílice (A) (Caolín)	2.60	4.6
1796 - 2012	64% Mullita 36% Sílice (A)	2.84	4.2
>2012 (1100)	64% Mullita 36% Cristobalita	2.88	4.1

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

- Fibra alúmina-sílice-zirconio:** Este sistema actúa muy diferente al sistema de fibra alúmina-sílice. La forma principal de temperatura baja del material es un vidrio AZS homogéneo el cual es estable hasta una temperatura de aproximadamente 1800 -1830°F (980 - 1000°C). La recristalización inicial consiste de la co- precipitación de productos de mullita y de la forma tetragonal del zirconio. El zirconio aparentemente estabiliza la estructura vidriosa, lo que explica un cambio leve 50°F (10°C) más alta) en la temperatura inicial de desvitrificación cuando es comparado al sistema de fibra de alúmina-sílice. La recristalización secundaria ocurre aproximadamente a 2318°F (1270°C) cuando empieza a precipitarse la cristobalita. El DTA indica un rango de precipitación discreto para este producto muy diferente al mecanismo de precipitación de la cristobalita en el sistema de alúmina sílice. El zirconio aparentemente puede actuar como un mineralizador, promoviendo la precipitación de la cristobalita dentro de un campo finito de temperatura. El zirconio eventualmente reaccionará con la matriz rica en sílice y/o la cristobalita para formar zircón a una temperatura de aproximadamente 2660°F (1460°C). Estos cambios cristalográficos están resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6 Manta de Alúmina-Sílice-Zirconio, Cambios de Fase

Temperatura °F, (°C)	Mineralogía	Gravedad Específica g/cc	% Volumen de Fase Sólida
<1796 (980)	100% Alúmina- sílice-zirconio	2.70	4.4
1796 - 2318 (980 - 1270)	45% Mullita 20% Zirconio (T) 35% Sílica (A)	3.30	3.6
2318 - 2660 (1270 - 1460)	45% Mullita 20% Zirconio (T)	3.40	3.5
>2660 (1460)	45% Mullita 29% Zircón 26% Cristobalita	3.43	3.4
Notas: (A) - Forma amorfa (T) - Forma Tetragonal			

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

#### 4.1.2.4 Encogimiento de los productos de fibra cerámica

Cuando la Fibra de cerámica se calienta empieza a encogerse. Este encogimiento determina el límite de la temperatura máxima de la fibra. Cuando los ingenieros de diseño de hornos, trabajadores del mantenimiento, operadores de equipo de proceso deciden revestir o mejorar sus recipientes, necesitan considerar los efectos del encogimiento. El encogimiento de la fibra cerámica es un proceso continuo, como detallado en la Figura 9. La mayoría del encogimiento ocurre dentro de las primeras 24 horas cuando los filamentos de la fibra se ajustan a su nuevo ambiente. Al ser expuesto el producto a temperatura, aun sobre años, continuará encogiéndose porque ocurren cambios dentro de las mismas partículas individuales de fibra.

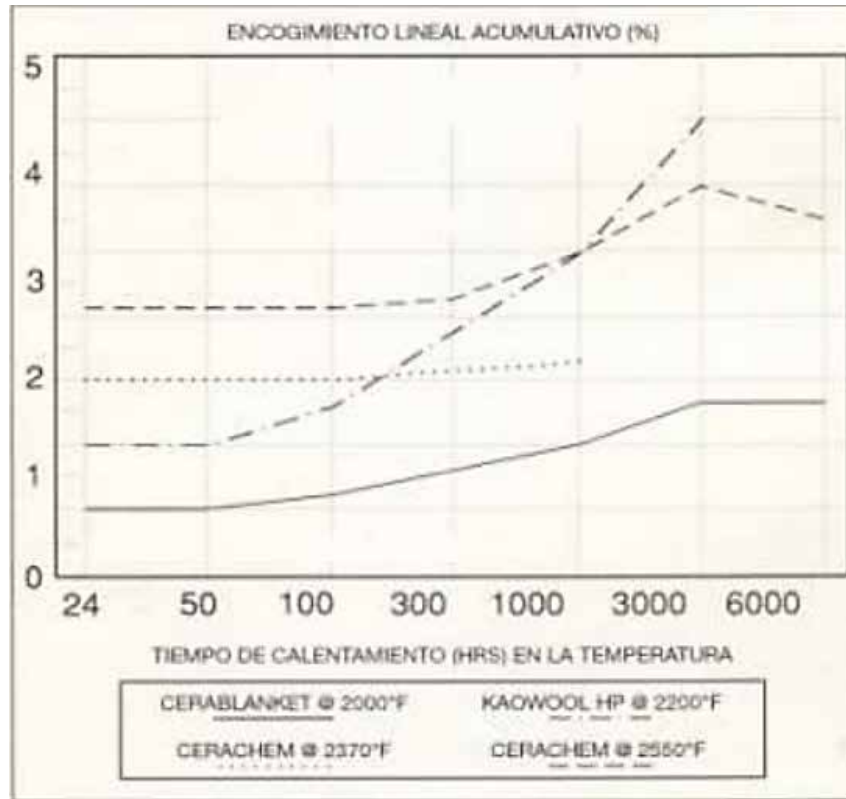


Figura 9 Encogimiento a Largo Plazo F.C.R.

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

En el diseño de revestimientos-de hornos con fibra cerámica, se toman varios pasos para contrarrestar este encogimiento y aprovechar al máximo la vida del revestimiento, dependiendo del sistema de revestimiento que se seleccione. Compresión, tramos corto de manta, listones, patrón de parquet, traslapados, configuración de grano de borde son algunas de las maneras en las que el encogimiento de la fibra cerámica se mantiene al mínimo. Al entender los mecanismos específicos que causan que la fibra cerámica se encoja, se pueden diseñar mejores revestimientos de hornos los que proveerán una vida satisfactoria. El encogimiento de los productos de fibra cerámica está estrechamente relacionado con los siguientes cambios que ocurren al ser expuesta la fibra a incrementos de temperatura: desvitrificación y cristalización, crecimiento de gránulos, y rizado de la fibra cerámica. Discutiremos cada mecanismo en detalle y explicaremos su interacción con el encogimiento de la fibra cerámica. En temperaturas bajas donde la fibra cerámica permanece amorfa o no cristalina, virtualmente no ocurre encogimiento. Solamente cuando la fibra comienza a

desvitrificarse o se cambia de un estado Amorfo vidrioso a un estado cristalino es que el encogimiento comienza.

- **Rizado de la fibra de cerámica:** Cuando la fibra cerámica se fabrica el resultado es un amplio rango de tamaños de filamentos. Los filamentos individuales pueden cambiar de diámetro, cambiar de dirección, o contener cualquiera de una variedad de imperfecciones en su estado amorfo. Al enfriarse rápidamente los productos de material fundido fibrilizado, desarrollarán tensiones diferentes a lo largo de la fibra. Estas tensiones disimilares tienen la tendencia a aliviarse a temperaturas en exceso de la temperatura de desvitrificación en una manera similar a la de los metales recocidos. Al aliviarse estas tensiones la fibra se distorsiona, reduciendo el largo efectivo de la fibra. Al progresar la cristalización la fibra continúa distorsionándose y el largo efectivo se acorta con el tiempo y la temperatura. Este fenómeno inicia y suscita el rizado como resultado directo de la formación de cristal y el crecimiento continuo. La figura 10 ilustra este comportamiento con tensión alta, cristalización inicial (región "A") y tensión baja, cristalización retardada (región "B"). Estos dos mecanismos, cristalización inicial para aliviar tensión y crecimiento del grano de cristal por la relación de tiempo-temperatura, causan la mayor parte del encogimiento en los productos de fibra cerámica.



Figura 10 Cristalización Inducida Por Tensión.  
Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

#### 4.1.2.5 Resistencia A La Velocidad

Uno de los parámetros más comunes que debe de ser considerado en el diseño de revestimientos de fibra cerámica es la habilidad que tiene el revestimiento de resistir el flujo de gas de los quemadores. Por su estructura inherente, a veces es necesario modificar el diseño de revestimiento del horno para acomodar velocidades altas. La velocidad generalmente se mide en términos de pies por segundo (p/s) o metros por segundo (m/s). Es importante cuando se discute la velocidad si se refiere a modelos de flujo laminar o flujo turbulento. El flujo laminar es mucho menos destructivo hacia los revestimientos de fibra que el flujo turbulento donde el aire "se voltea", creando regiones localizadas de velocidad alta en su patrón de flujo. Cuando ocurre un flujo turbulento tal como en codos, curvas o restricciones, se debe tener cuidado especial para proteger adecuadamente el revestimiento de fibra cerámica. Una norma general para las regiones de flujo turbulento es utilizar el próximo nivel de resistencia de velocidad. Más allá de la simple selección de producto, otra alternativa es utilizar sistemas de cobertura que protejan la capa de la cara caliente de la fibra. Las coberturas disponibles son suspensiones coloidales de ambos sílice o alúmina y coberturas de cerámica las cuales son aplicadas en la superficie de las mantas, módulos y tablas. Los productos específicos, límite de uso de temperatura, y velocidad de cobertura son como siguen:

Rigidizador Kaowool 1800°F (982°C) 15 Ft<sup>2</sup>/Gal

Unikote M 2400°F (1316°C) .81 Lb/Ft<sup>2</sup>

Unikote S 2800°F (1538°C) . 81 Lb/Ft<sup>2</sup>

Tabla 7 Velocidades para Flujo Laminar a través de la Superficie de la Fibra Cerámica.

Manta/Empapelado	Ft	m/s
Manta	50 - 70	15 - 21
Manta rigidizada de 8pcf	150	45
Manta húmeda	250	75
<b>Módulos</b>		
Pyro-Bloc®		
8#	100	30
10#	125	37
12#	150	45
15#	150	45
Pyro-Fold™, Uni-Bloc®, Z-Blok®		
8#	125	37
9.3#	140	42
Módulos tratados con Unikote	175	53
<b>Módulos para revestimiento</b>		
Unifelt® 3000	150	45
Unifelt XT	150	45
<b>Placas</b>		
Todas las placas	250	75

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

#### 4.1.2.6 Ataque Químico

La manera más fácil de tratar este tema es discutir individualmente varios agentes corrosivos de los que se sabe que atacan la fibra cerámica. Los ambientes discutidos incluyen flúor y derivados, vanadio y otros metales pesados, azufre y ácido sulfúrico, álcalis y otros ácidos.

- **Flúor y sus derivados:** Sin duda alguna, el flúor es el atacante más agresivo de la fibra cerámica. A temperaturas por debajo de los 212°F (100°C) las reacciones de flúor y vapor de agua con la fibra cerámica lleva a extensa destrucción del material. Aún en concentraciones relativamente pequeñas, el fluoruro de hidrógeno (FH) aparenta atacar preferiblemente la alúmina, formando  $AlF_3$  y  $AlF_3 \cdot 3H_2O$ , causando destrucción masiva de la estructura de la fibra. El flúor ataca todas las formas alúmino-silicosas, incluyendo mullita. Después de que el flúor ataca, muy a menudo se evapora, lo cual casi imposibilita detectar la causa de la falta.
- **Vanadio y otros metales pesados:** El vanadio y otros metales pesados, los cuales están presentes en combustibles de baja calidad, al quemarse, atacan la fibra cerámica. El ataque viene del pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) el cual a temperatura ambiente es sólido, pero se derrite a una temperatura de aproximadamente 1280°F (693°C). La escoria líquida es absorbida dentro de la fibra porosa y reacciona químicamente con el sistema refractario de alúmina-sílice en la fibra cerámica. El pentóxido de vanadio a temperaturas sobre 1280°F (693°C) atacará la fibra, pero la razón de ataque será afectada por los parámetros dados previamente. El reemplazo periódico de materiales en la cara caliente será requerido según se acumula el ataque sobre el tiempo.
- **Azufre y ácido sulfúrico:** La fibra cerámica tiene una resistencia excelente al ácido sulfúrico. Se pueden esperar solamente roturas o reacciones menores de la fibra, típicamente formando sulfato de alúmina ( $Al_2(SO_4)_3$ ) ó hidratos de sulfato de alúmina. Esto generalmente no lleva al fallo de la fibra. La corrosión del anclaje metálico es una preocupación seria. y se deben tomar pasos para proteger

los componentes de metal con una capa bitumástica o lámina inoxidable, o mantener las partes de metal a una temperatura sobre la temperatura a la que se forma el rocío de ácido sulfúrico (generalmente 250- 350°F (121-177°C)). La fibra cerámica en la presencia de hierro (Fe) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) formará un compuesto de sulfato de fierro-alúmina-silicato. Este componente "disolverá" el anclaje y la cubierta, convirtiendo el metal en un material liso.. EL reemplazo periódico de la capa de manta en la cara caliente podría ser requerido. Si se usa una forma modular de fibra cerámica, una capa de Unikote puede ser considerada.

- **Ataque de álcali:** el ataque de álcali en la fibra cerámica parece depender grandemente de tiempo y temperatura. Los alcalinos forman compuestos de bajo derretimiento que llevan al encogimiento intenso/ sinterización de las fibras y al fallo final del revestimiento. Componentes tales como V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, etc. amplifican el comportamiento destructivo o que lleva al fallo prematuro de la fibra. El ataque de álcali usualmente ocurre en la capa de fibra de la cara caliente donde una capa de costra o "escoria" se forma. Al ocurrir más ataque, esto eventualmente degrada la fibra y nueva fibra es expuesta al ataque.
- **Otros ácidos:** Generalmente se piensa que la fibra cerámica es resistente al ácido hidrocórico (HCl), ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). También es resistente al ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) a bajas temperaturas; no obstante, ocurre encogimiento significativo de la fibra al formarse aluminio fosfatos complejos a temperaturas más altas. Es mejor evitar la presencia de fosfatos a temperaturas en exceso de 1000°F (537°C).

#### **4.2 Identificar las zonas críticas de los materiales refractarios en la caldera pirotubular.**

En función del historial de fallas en las calderas, se determinó una zona específica en la caldera, donde se producen fallas de forma frecuente, relacionadas con el revestimiento refractario, en este caso el cemento refractario. Esta zona es: La puerta de la caldera pirotubular, la cual está recubierta por concreto refractario y donde hay incidencia directa de llama.

La consecuencia de la falla en esta zona, tanto desde el punto de vista económico, como desde el punto de vista de seguridad y salud de los trabajadores, es relativamente alta, en

comparación con fallas menores que ocurren en otras zonas. Durante la investigación y recopilación de información, sobre el funcionamiento de la caldera y los trabajos de mantenimiento, se notaron ciertos antecedentes que son importantes mencionar.

### **Antecedentes**

La combustión del diésel produce un depósito consecutivo de productos de combustión que se acumulan en el piso y compuerta de la caldera. Con la acumulación de éstos y las altas temperaturas, se forma una masa fundida llamada escoria. La caldera de Frutika C.A está diseñada para que su funcionamiento se apoye en la combustión simultánea de gas natural y diésel. Sin embargo, en los últimos años, el consumo de diésel ha aumentado, para contrarrestar las pérdidas de calor, vapor ocasionado por fallas en los sistemas de tuberías de la caldera y difícil acceso a la obtención de gas natural.

Se han realizado estudios anteriores, en los cuales se ha detectado que el alto contenido de óxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) y sulfuro ( $SO_3$ ) en el diésel incrementan el daño por corrosión del refractario; sin embargo, hoy en día no hay posibilidad de recurrir a otro combustible más liviano.

Por otro lado, la creciente demanda de producción de jugos cítricos en la empresa, ha obligado a que los equipos se mantengan funcionando sin que haya ningún tipo de parada programada para la limpieza de los residuos de la caldera. Actualmente, la caldera de la empresa ha estado funcionando sin realizarse mantenimiento de su compuerta, por más de 1 año. En trabajos de mantenimiento realizados se han registrado una cantidad considerable de residuos durante paradas de limpieza y mantenimiento de la caldera.

Debido a la cantidad de residuos producidos, el trabajo de mantenimiento de la caldera puede durar hasta 7 días, de los cuales, 6 son utilizados para limpieza y 1 para la instalación del refractario.

Producto de la recolección de información brindada por la empresa de mantenimiento de calderas **SERTECAL CARABOBO C.A** y la empresa de equipos industriales **R y C SUMINISTROS Y AISLAMIENTOS TÉRMICOS C.A** se pudo determinar que las fallas y causas de fallas producidas en el refractario son las siguientes:

- 1. Escorificación** Es una reacción química destructiva entre algún material en el horno y el refractario, formando un nuevo material de menor temperatura de fusión que el refractario y resultando en la formación de líquido a la temperatura de operación.

**2. Spalling** Es el agrietamiento del refractario lo que a menudo resulta en pérdida de trozos del material. Este puede ser térmico, estructural mecánico

**3. Deformación bajo carga en caliente.**

Es la deformación plástica causada por una carga mayor a la resistencia del refractario a la temperatura de operación del horno.

**4. Destrucción mecánica.** Es la abrasión o erosión de la superficie del refractario por el movimiento de sólidos, líquidos, gases o el colapso del revestimiento por vibraciones o sacudidas violentas.

**5. Atmósfera del horno.** La atmósfera del horno contiene impurezas que pueden causar destrucción del refractario. Entre los factores están :

- Atmósfera reductora (poco oxígeno).
- Atmósfera oxidante (abundante oxígeno).
- Hidratación: Es la reacción química entre el óxido de calcio libre o la magnesia y agua, dando como resultado incremento de volumen, agrietamiento y pérdida de resistencia mecánica.
- Vapores alcalinos: Destruyen el refractario por reacciones químicas.
- Cloro o ácido clorhídrico.
- Flúor o ácido fluorhídrico.
- Dióxido de azufre o trióxido de azufre.

**6. Temperatura.**

La temperatura es tomada como una medida de cuan caliente está el refractario en el horno. La temperatura en si, es un factor destructivo poco común, la importancia que tiene es el aumento en la severidad de los otros factores destructivos.

**4.3 Realizar un análisis comparativo de las variables que determinan la eficiencia y durabilidad entre los concretos refractarios y las fibras refractarias en las calderas piro tubulares.**

Se realizó una estrategia para solución de problemas enfocado en el estudio de las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas en la comparación entre el concreto refractario y las fibras de cerámicas refractarias con la finalidad de determinar los factores que determinan la eficiencia y vida útil de los materiales refractarios en las calderas

pirotubulares. Para ello fue preciso conocer las características presentes en fichas técnicas de fabricantes quienes han realizado una serie de ensayos para así conocer estos datos de cada uno de los de los materiales y esto fue lo obtenido.

Existen diferentes fabricantes de cemento y fibra refractaria. Para este análisis comparativo se tomó la marca recomendada por la empresa **SERTECAL CARABOBO C.A**, con los siguientes valores para cada uno de los materiales:

**MORGAN ADVANCED MATERIALS** suministra la siguiente información:

**Concreto convencional: ULTRA 40.**

Concreto refractario para operar a temperaturas extremas con nivel de alúmina superior al 35%.

**Características**

Temperatura límite recomendada de uso de 1200 °C.

Instalación por vaciado

Fraguado al aire

Resistencia al ataque químico

En la tabla 8 se consiguen las propiedades físicas que presenta el concreto ULTRA 40 el cual es aplicado por lo general en la cara caliente del horno o caldera que utilice gas propano o biomasa como combustible, en donde la temperatura no supere el limite recomendado.

Tabla 8 Propiedades físicas concreto ULTRA 40.

<b>Propiedades físicas</b>		
Agua requerida, % del peso a preparar		16
Densidad nominal,		
▪ A la temperatura límite de uso,	kg/m <sup>3</sup>	1900-2000
Módulo de ruptura (ASTM C 133-84)		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C,	MPa:	6.2-9.6
▪ Cocido 5 horas a 815 °C,	MPa:	5.5-7.5
▪ A la temperatura límite de uso,	MPa:	7 – 9
Resistencia a la compresión en frío (ASTM C 133-84)		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C,	MPa:	10.0 – 12.0
▪ Cocido 5 horas a 815 °C,	MPa:	12.4 – 14.3
▪ A la temperatura límite de uso,	MPa:	14.8 – 17.1
Cambio lineal permanente (ASTM C 113-93), %		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C		0 a -0.2
▪ Cocido 5 horas a 815 °C		-0.1 a -0.4
▪ A la temperatura límite de uso		-0.4 a 0.4
Conductividad térmica, Btu*in/h*ft <sup>2</sup> **F (ASTM C 417)		
▪ Temperatura media	a 260°C/500°F	9.7
	a 540°C/1004°F	9.6
	a 815°C/1500°F	9.6
	a 1095°C/2003°F	9.7
<b>Composición química</b>		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %		40.00
SiO <sub>2</sub> , %		46.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %		2.17
CaO, %		7.16
MgO, %		0.25
K <sub>2</sub> O, %		0.56
Na <sub>2</sub> O, %		0.20
TiO <sub>2</sub> , %		3.08.ct
Contenido por bolsa, lb		50

**Concreto Ref**

Concreto refractario para operar a temperaturas extremas (1680°C) con nivel de alúmina superior al 60%. Excelente para aplicaciones en quemadores y en donde hay considerable ataque químico a causa del uso de combustibles fluidos, diésel o carbón mineral. En la tabla 9 se consiguen las propiedades físicas que presenta el concreto ULTRA 80 el cual es aplicado por lo general en la cara caliente del equipo. Es aplicado por vaciado.

Tabla 9 Propiedades físicas concreto ULTRA 80

<b>Nombre del producto</b>	<b>ULTRA 80</b>
<b>Método de instalación recomendado (I)</b>	Vaciado
<b>Fraguado</b>	Al aire
<b>Promedio de kilogramos requeridos para aplicar un metro cúbico.</b>	2084
<b>Promedio de libras requeridas para aplicar un pie cúbico</b>	130
<b>Agua requerida, %</b>	
<b>Agua requerida (%) del peso a preparar</b>	12
<b>Vaciado Gal/qq</b>	1.75-2
<b>Vibrado Gal/qq</b>	1.5-1.75
<b>Límite recomendado de uso, °C / °F</b>	1680 / 3056
<b>Punto de fusión, °C / °F</b>	1760 / 3200
<b>Densidad nominal, cocido a temperatura límite de uso</b>	
<b>Kg/m<sup>3</sup></b>	2084 - 2563
<b>Lb/pie<sup>3</sup></b>	130 - 160
<b>Módulo de Ruptura (ASTM C 133-84)</b>	
<b>Secado 18-24 h. a 105°C</b>	
<b>Libras/pulgadas<sup>2</sup> (psi)</b>	900-1600
<b>Kilogramos/centímetros<sup>2</sup></b>	63-112
<b>A la temperatura límite recomendada</b>	
<b>Libras/pulgadas<sup>2</sup> (psi)</b>	1450 - 2030
<b>Kilogramos/centímetros<sup>2</sup></b>	102 - 143
<b>Resistencia a la compresión en frío (ASTM C 133-84)</b>	
<b>Secado 18 - 24 h. a 105 °C</b>	
<b>Libras/pulgadas<sup>2</sup> (psi)</b>	1900 - 3000
<b>Kilogramos/centímetros<sup>2</sup></b>	134 - 210

<b>A la temperatura límite recomendada</b>	
<b>Libras/pulgadas<sup>2</sup> (psi)</b>	2000 - 3500
<b>Kilogramos/centímetros<sup>2</sup></b>	140 - 246
<b>Cambio lineal permanente, %</b>	
<b>Secado 18 - 24 h. a 105 °C</b>	0 a -0.2
<b>Cocido 5 h. a 815 °C</b>	-0.1 a -0.4

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

### **Concreto convencional: ULTRA 50.**

Concreto refractario para operar a temperaturas de hasta 1350 °C, con un nivel de alúmina superior al 45%.

Ideal para aplicaciones en las que se requiere resistencia al choque térmico y a impacto moderado.

#### **Características**

Temperatura límite recomendada de uso de 1350 °C.

Instalación por vaciado

Fragüado al aire

Alta densidad

Resistente al desgaste por abrasión

Resistente al ataque químico

En la tabla 10 se consiguen las propiedades físicas que presenta el concreto ULTRA 50 el cual es aplicado por lo general en cara caliente de equipos tales como calderas y hornos, en donde la temperatura no supere el límite recomendado.

Tabla 10 Propiedades físicas concreto ULTRA 50.

<b>Propiedades físicas</b>	
Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup> :	1.43
Agua requerida, %p/p:	17
Densidad nominal,	
▪ secado 18 – 24 h a 110 °C, kg/m <sup>3</sup> :	1954
lb/pie <sup>3</sup> :	122
Módulo de ruptura (ASTM C 133-84)	
▪ secado 18 – 24 h a 110 °C, psi:	1010
MPa:	6.97
Resistencia a la compresión en frío (ASTM C 133-84)	
▪ secado 18 – 24 h a 110 °C, psi:	2405
MPa:	16.60
Cambio lineal permanente (ASTM C 113-93)	
▪ secado 18 – 24 h a 110 °C, % :	-0.2 a
Conductividad térmica, Btu*in/h*ft <sup>2</sup> *°F (ASTM C 417)	
▪ Temperatura media a 260°C/500°F	7.3
a 540°C/1004°F	7.3
a 815°C/1500°F	7.5
a 1095°C/2003°F	7.7
<b>Composición química</b>	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %:	46-50
SiO <sub>2</sub> , %:	36.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %:	2.27
CaO, %	7.30
MgO, %	0.26
K <sub>2</sub> O, %	1.73
Na <sub>2</sub> O, %	0.49
TiO <sub>2</sub> , %	2.14
<b>Contenido por bolsa, lb</b>	<b>50.0</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

### **Manta cerámica kaowool 2300**

La manta kaowool 2300, es un aislante térmico producido utilizando caolines naturales y/o materiales sintéticos de alta pureza. La fibra resultante de estos materiales tiene un límite normal de uso de 1.200°C, con un punto de fusión de 1.760 °C. Durante el proceso de fabricación, las fibras se entrelazan formando un producto resistente a la de laminación, y,

por consiguiente, sus características físicas son superiores a las de productos con aglomerantes orgánicos. Este tipo de productos pueden ser utilizados para: Revestimiento térmico de hornos (tratamiento térmico, cerámica, etc.) y cámaras de combustión, Juntas de expansión, Sellos de hornos calentamiento, Filtros de alta temperatura.

En la tabla 11 y 12 se consiguen las propiedades físicas y el análisis químico típico que presenta manta kaowool 2300 la cual posee excelente resistencia al ataque químico, excepto a los ácidos fluorhídrico y fosfórico, y a los álcalis fuertes. No es afectada por el agua ni por el aceite. Las propiedades térmicas y físicas se recuperan una vez secado.

Tabla 11 Propiedades físicas manta kaowool 2300.

<b>COLOR</b>	<b>BLANCO</b>
<b>DIAMETRO PROMEDIO DE LAS FIBRAS (MICRONES <math>\mu</math> )</b>	<b>2,8</b>
<b>LARGO PROMEDIO DE LA FIBRA (cm.)</b>	<b>2 - 25</b>
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA</b>	<b>2,56</b>
<b>TEMPERATURA LIMITE DE USO CONTINUO (°C)</b>	<b>1.260</b>
<b>TEMPERATURA MAXIMA (°C) **</b>	<b>1.427</b>
<b>ENCOGIMIENTO LINEAL % (24 hrs @ 1093 °C)</b>	<b>2,0</b>
<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, W/mK a una temperatura media de 1.090 °C (Manta de 8 Pcf)</b>	<b>0,257</b>
<b>PUNTO DE FUSION (°C)</b>	<b>1.760</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

Tabla 12 Análisis químico manta kaowool 2300.

<b>Si O<sub>2</sub></b>	<b>50,00 %</b>
<b>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></b>	<b>46,00 %</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>1,90 %</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>0,85 %</b>
<b>OTROS</b>	<b>1,25 %</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

### Manta C.

La Manta C, es producida utilizando caolines naturales y/o materiales sintéticos. La fibra resultante de estos materiales tiene un límite normal de uso de 900°C, con un punto de fusión de 1400°C.

#### **Usos:**

- Aislamiento térmico y acústico de hornos, calderas etc.
- Reemplazo del asbesto – amianto, lana mineral de roca o de escoria

En la tabla 13, 14 y 15 se consiguen las propiedades físicas, el análisis químico típico y conductividad térmica que presenta manta C la cual posee excelente resistencia al ataque químico, excepto a los ácidos fluorhídrico y fosfórico, y a los álcalis fuertes. No es afectada por el agua ni por el aceite. Las propiedades térmicas y físicas se recuperan una vez secado. Son de fácil manejo y bajo peso.

Tabla 13 Propiedades físicas manta C.

<b>COLOR</b>	<b>BLANCO</b>
<b>LARGO PROMEDIO DE LAS FIBRAS (Cm.)</b>	<b>5</b>
<b>RESISTENCIA A LA TRACCION (PSI)</b>	<b>4,1</b>
<b>TEMPERATURA LIMITE USO CONTINUO (°C)</b>	<b>900</b>
<b>ENCOGIMIENTO LINEAL % (24 hrs @ 1093 °C)</b>	<b>2,0</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

Tabla 14 Análisis químico manta C.

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>44 %</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>53 %</b>
<b>OTROS</b>	<b>3 %</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

Tabla 15 Conductividad térmica manta C.

<b>TEMPERATURA MEDIA (°C)</b>	<b>260</b>	<b>538</b>	<b>816</b>
<b>W/mK (BTU-in/h-ft<sup>2</sup>-°F):</b>	<b>0,08 (0,54)</b>	<b>0,15 (1,06)</b>	<b>0,25 (1,71)</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

### **Manta CM (Lana Mineral con Malla).**

La Manta CM, es producida utilizando caolines naturales y/o materiales sintéticos. La fibra resultante de estos materiales tiene un límite normal de uso de 900°C, con un punto de fusión de 1400°C. Durante el proceso de fabricación la malla se respuntea sobre malla galvanizada.

#### **Usos:**

- Aislamiento térmico y acústico de hornos, calderas etc.
- Reemplazo del asbesto – amianto, lana mineral de roca o de escoria.

En la tabla 16, 17 y 18 se consiguen las propiedades físicas, el análisis químico típico y conductividad térmica que presenta manta C la cual posee excelente resistencia al ataque químico, excepto a los ácidos fluorhídrico y fosfórico, y a los álcalis fuertes. No es afectada por el agua ni por el aceite. Las propiedades térmicas y físicas se recuperan una vez secado. Son de fácil manejo y bajo peso.

Tabla 16 Propiedades físicas Manta CM (Lana Mineral con Malla).

<b>COLOR</b>	<b>BLANCO</b>
<b>LARGO PROMEDIO DE LAS FIBRAS (Cm.)</b>	<b>5</b>
<b>RESISTENCIA A LA TRACCION (PSI)</b>	<b>4,1</b>
<b>TEMPERATURA LIMITE USO CONTINUO (°C)</b>	<b>900</b>
<b>ENCOGIMIENTO LINEAL % (24 hrs @ 1093 °C)</b>	<b>2,0</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

Tabla 17 Análisis químico Manta CM (Lana Mineral con Malla).

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>44 %</b>
<b>Si O<sub>2</sub></b>	<b>53 %</b>
<b>OTROS</b>	<b>3 %</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

Tabla 18 Conductividad térmica Manta CM (Lana Mineral con Malla).

<b>TEMPERATURA MEDIA (°C)</b>	<b>260</b>	<b>538</b>	<b>816</b>
<b>W/mK (BTU-in/h-ft<sup>2</sup>-°F):</b>	<b>0,08 (0,54)</b>	<b>0,15 (1,06)</b>	<b>0,25 (1,71)</b>

Fuente: Refractarios Nacionales. Grupo Morgan Advanced Materials

En la tabla 19, se muestra las comparaciones de las propiedades y características entre el concreto refractario y la Fibra cerámica refractaria conseguidos con el desarrollo del tercer objetivo específico del presente trabajo.

Tabla 19 Comparativo de las propiedades y características entre el concreto refractario y la Fibra cerámica refractaria.

Propiedades y características	Concreto Refractario	Fibra Cerámica
Temperatura máxima de uso recomendada °C	1350	1200
Punto de fusión °C	1760	1760
Conductividad Térmica Btu*in/ h*ft <sup>2</sup>	9.7	1,7
Composición Química	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 44% SiO <sub>2</sub> 49,3% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 2.1% TiO <sub>2</sub> 2.4% CaO 0.1% MgO 0.1% Alcalis Na <sub>2</sub> O,K <sub>2</sub> O 2.0%	Si O <sub>2</sub> 50,00 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 46,00 % TiO <sub>2</sub> 1,90 % Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,85 % OTROS 1,25 %
Color	Gris	Blanco
Resistencia Química	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Azufre y ácido sulfúrico.</li> <li>• sodio, potasio o vanadio.</li> <li>• Flúor y sus derivados</li> <li>• Alkali y otros ácidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Azufre y ácido sulfúrico.</li> <li>• sodio, potasio o vanadio.</li> <li>• Flúor y sus derivados</li> <li>• Alkali y otros ácidos</li> </ul>
Resistencia a la compresión psi	1900 - 3000	140-340
Densidad kg/m <sup>3</sup>	2084 - 2563	64-192

Fuente: Alexis Henriquez.

En la figura 11 se muestra la matriz de resolución de problema que refleja las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de cada uno de los materiales refractarios.

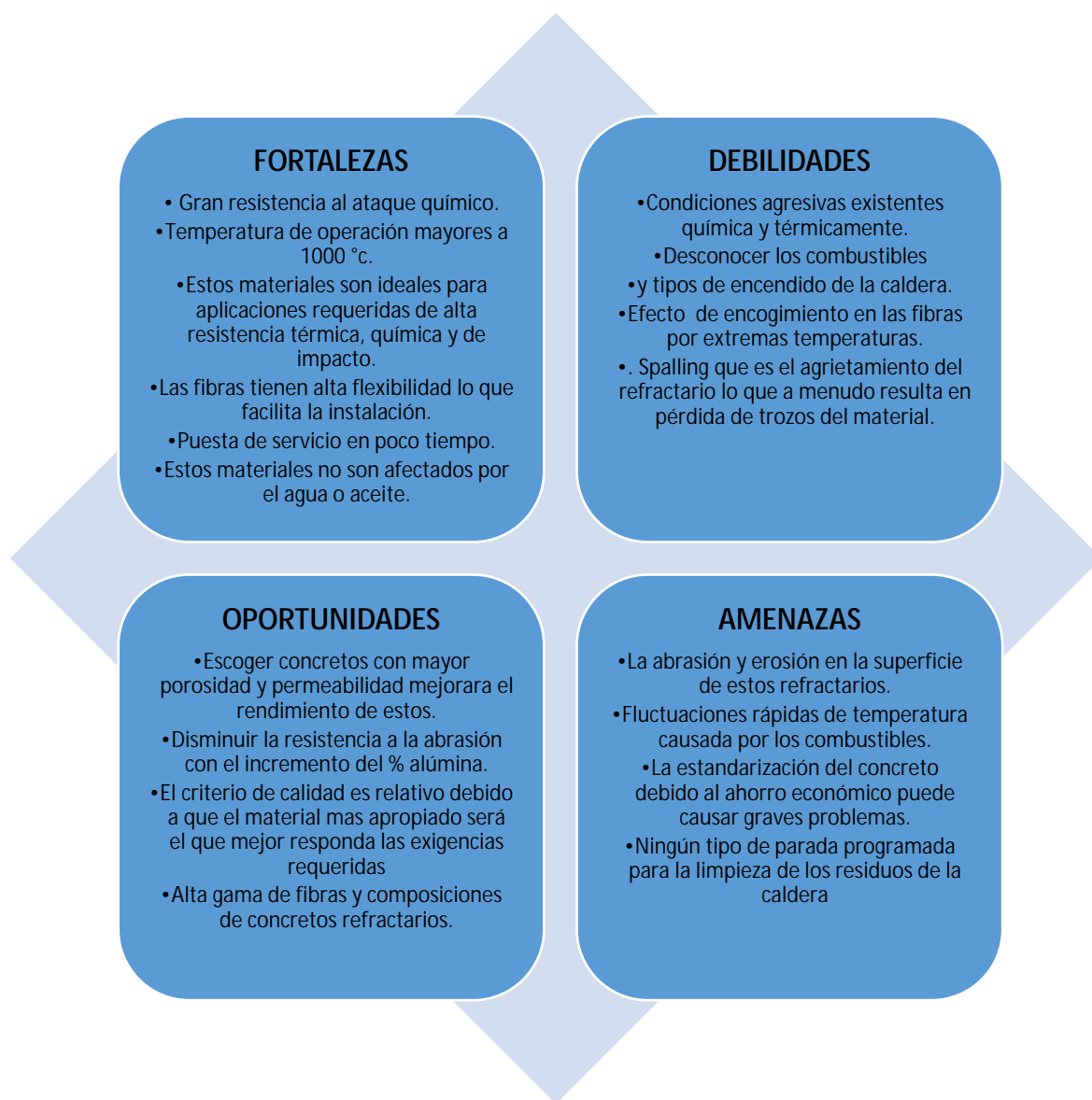


Figura 11 Matriz FODA del concreto refractario y la fibra cerámica refractaria.

Fuente: Alexis Henriquez

## CONCLUSIONES.

A continuación, se presentan las conclusiones de la investigación basadas en los resultados obtenidos de los objetivos anteriormente desarrollados en el capítulo cuatro del presente trabajo:

1. Se analizó la importancia del comportamiento del concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria en calderas pirotubulares, donde se consiguió estudiar cada una de las características que poseen estos materiales refractarios, consiguiendo valores aproximados para la resistencia mecánica en frío del concreto refractario de 350-500 kg/cm<sup>2</sup> para concretos de Alta alúmina (Ácidos) y 500-700 kg/cm<sup>2</sup> para concretos de Dolomita o Magnesita (Básicos), para la determinación de dichos resultados se empleó la Norma ASTM C-133, mientras que la Norma ASTM C-24 demostró que es conveniente que este valor del poder calorífico de dicho material se ubique unos 150° C por encima de la temperatura de clinkerización.
2. Se logró identificar las zonas críticas de los materiales refractarios en la caldera pirotubular mediante la recolección de información suministrada por la empresa donde se encuentra la caldera y el historial de fallas presentado por la empresa encargada del mantenimiento de la misma. arrojando como zona crítica la compuerta de la caldera, la cual está sometida a altas presiones y siendo la receptora principal de las llamas dentro de la caldera. Por otra parte, se logró conocer las diferentes maneras en que puede fallar el concreto refractario, así como también sus posibles causas.
3. Se realizó un análisis comparativo de las variables que determinan la eficiencia y durabilidad entre los concretos refractarios y las fibras refractarias en las calderas pirotubulares, conociendo los valores aportados por los fabricantes los cuales fueron conseguidos con la realización de determinados ensayos y una vez comparadas estas variables se realizó una estrategia para la solución de problemas denominada matriz FODA por sus iniciales (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades, Amenazas) con la finalidad de darle el uso apropiado a cada uno de los materiales refractarios y así garantizar su eficiencia y durabilidad.

4. En este contexto, una conclusión adicional es, que existen diferencias entre la metodología de instalación de refractarios establecida en las prácticas operativas regidas por normativas ya establecidas donde indica la manera adecuada de instalación de los materiales refractarios y los procedimientos utilizados en planta por personal poco capacitado, lo cual influye negativamente en el rendimiento y durabilidad del revestimiento refractario instalado en las zonas críticas de la caldera así como también, se convierte en un riesgo considerable para los operarios de la maquinaria y el cuarto de caldera. Por otra parte, la falta de paradas programadas para la realización de trabajos de mantenimiento de las zonas críticas, así como también mantenimientos preventivos, aumenta la probabilidad de ocurrencia de fallas, debido al desgaste continuo de los revestimientos refractarios y otros elementos de la caldera.

### **RECOMENDACIONES**

Partiendo de las conclusiones anteriormente expuestas, se hacen algunas recomendaciones con el fin de complementar y mejorar la investigación realizada, en futuras investigaciones:

- A medida que los países se desarrollan, aumenta la demanda de hornos y calderas a nivel industrial, por consiguiente, es necesario evaluar la escasez de materia prima en el concreto refractario y la fibra de cerámica refractaria y buscar alternativas de reemplazo para estos aislantes.
- Utilizar las arcillas ya que abundan en la corteza terrestre, siendo materia prima alternativa para el concreto debido a que mantiene su producción de calor y además su resistencia en comparación al convencional.
- Adoptar nuevas tecnologías suplementarias en el aislamiento de equipos garantizando menores costos de producción.
- Verificar mediante otros métodos la resistencia a compresión ya que se ve influenciada con la porosidad entre las partículas.
- Realizar un historial de fallas a partir de los reportes de mantenimiento para evaluar la eficiencia de los revestimientos instalados en las zonas críticas.

- cuantificar la cantidad de material refractario instalado en cada trabajo de mantenimiento. Esta información puede ser importante para estudios posteriores.
- Se recomienda elaborar un manual de instalación, inspección y mantenimiento con personal especializado en el área que permita garantizar la operatividad de los equipos.
- Ofrecer medios para la capacitación del personal de la planta encargado de la instalación de los revestimientos refractarios. De esta manera se tendría un personal más especializado con mayor conocimiento en el área, lo cual permitiría aumentar la calidad de los revestimientos instalados.

## BIBLIOGRAFÍA

- Akhlaghi, O. et al., 2017. **Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement.** , 101, pp.114–122.
- ASTM C134 “**Standard test methods for Size, Dimensional measurements, and Bulk Density of refractory Brick and Insulating Firebrick**”
- ASTM C27 (2002) “**Standard Classification of Fireclay and High-Alumina refractory Brick**”
- Arias, (2006). **La estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado,** trabajo de grado elaborado en la Universidad Pedagógica Experimental Libertador (2003).
- Balestrini, (1997). **La muestra es obtenida con el fin de investigar, a partir del conocimiento de sus características particulares, las propiedades de una población,** presentado en la Universidad del Zulia. Facultad Ingeniería.
- Gutiérrez, D (2000). **Refractarios Industriales: materiales cerámicos heterogéneos,** Caracas, pp. 49-51, 62-72, 93-94
- Incropera Frank, (2009). **Fundamentos de Transferencia de Calor,** 4ta edición. España. Prentice Hall.
- Instituto de Tecnología cerámica. [http://www.tecnociencia.es7entidades/itc/tcn\\_itc4.html](http://www.tecnociencia.es7entidades/itc/tcn_itc4.html)
- Lucía Fernández-Carrasco y Tomás Vázquez. (1996) **Aplicación de La espectroscopía infrarroja AL estudio de cemento aluminoso.** Materiales de Construcción, Vol. 46, no
- Pedro Abarca Bahamondes (2006). **Descripcion de calderas y generadores de vapor.** 1era edición.
- Sabino, C (1992). **El proceso de investigación.** 1ra edición. Caracas, Venezuela Panapo.
- Thermal Ceramics (2006), **Kaowool high temperature boards,** pp.1-2 Disponible en Internet: <http://www.thermalceramics.com> consultado el 25 de noviembre del 2009.
- Yunus Cengel, (2011). **Transferencia de calor y masa,** 4ta edición. España. McGraw-

Hill Interamericana.