



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**ANÁLISIS DEL CONCRETO REFRACTARIO
PARA PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL
EN CALDERAS DE TIPO ACUOTUBULAR.**

Autor: Abraham Machado
C.I: 25.864.163

Urb. Yuma II, calle Nª 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 DEL CONCRETO REFRACTARIO PARA PROLONGACIÓN DE
LA VIDA ÚTIL EN CALDERAS DE TIPO ACUOTUBULAR.**

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

Autor: Abraham Machado
C.I: 25.864.163

Tutora: Ing. Alicia De Pizzella

San Diego, Mayo del 2019



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 los ciudadanos Abraham Machado; portador de la cédula de identidad N°25.864.163. Titulado **ANÁLISIS DEL CONCRETO REFRACTARIO PARA PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN CALDERAS DE TIPO ACUOTUBULAR** 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 Mayo del Año Dos Mil Diecinueve

Ing. Alicia de Pizzella

C.I.: 459888




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

San Diego, Mayo 2019

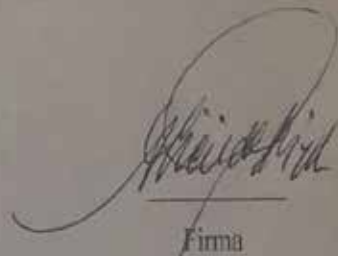
ACTA DE REVISIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

Quienes suscriben esta Acta, dejan constancia que el Proyecto de Trabajo de Grado:
ANÁLISIS DEL CONCRETO REFRACTARIO PARA PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN CALDERAS DE TIPO ACUOTUBULAR. Ha sido revisado y, cumpliendo con los requisitos exigidos para su aprobación, recomiendan su tramitación ante el organismo académico correspondiente.

Prof. Ing. Alicia de Pizzella
Tutor Académico


Firma 25-5-19
Fecha

Prof. Ing. Alicia de Pizzella
Tutor Metodológico


Firma 25-5-19
Fecha

DEDICATORIA

Agradezco primeramente a Dios por darme la fuerza y guiarme por el sendero correcto, por estar conmigo en todo momento y darme la confianza para siempre seguir adelante. Agradezco a mi madre por todo su esfuerzo en darme lo mejor, por el apoyo y por tratar de brindarme la mejor educación siempre, igualmente a mi papa que me ha enseñado que no se necesita tener un título para hacer cosas ingeniosas. Agradezco enormemente a mi tía Rosalba por el apoyo incondicional y por creer en mí, por motivarme y por ser mi mentora y madre también. A mi tía Alejandra, Lisbeth y a toda la familia. A mis profesores de la universidad, por todas las enseñanzas y buenos momentos que nos brindaron a lo largo de toda la carrera. Por eso y muchas cosas más infinitas gracias. A mi tutora Ing. de Pizzella, le agradezco por su dedicación y motivación que nos brindó durante este trayecto para culminar este trabajo de grado. A mis compañeros quienes me ayudaron he hicieron los días en la universidad mejores, por su compañerismo y por estar ahí en cualquier circunstancia, no hace falta nombrarlos, pero siempre estaré agradecidos con todos ustedes.

ÍNDICE

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRAFICAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE CUADRO.....	xii
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO

I EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema.....	3
1.2 Formulación del Problema.....	3
1.3 Objetivos de la Investigación.....	3
1.3.1 Objetivos Generales.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Justificación.....	4
1.5 alcance y limitaciones.....	5

II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.....	6
2.2 Bases Teóricas.....	7
2.2.1 La generación de vapor.....	7
2.2.2 Aspectos generales de los generadores de vapor.....	9
2.2.3 Las calderas o generadores de vapor.....	10
2.2.4 Partes principales de una caldera.....	11
2.2.5 Clasificación de las calderas.....	17
2.2.6 Calderas Piro tubulares.....	18
2.2.7 Calderas Acuotubulares.....	19
2.2.8 Material refractario.....	27
2.2.9 Clasificación de los materiales refractarios.....	27
2.2.10 Concreto Refractario.....	29
2.2.11 Tipos de concretos refractarios.....	30

2.2.12	Uso de los concretos refractarios en la industria.....	31
2.2.13	Concretos Sílico-Aluminosos.....	31
2.2.14	Propiedades de Concreto Sílico-Aluminoso.....	35
2.3	Definición de Términos Básicos.....	39

III MARCO METODOLÓGICO

3.1	Tipo de Investigación.....	41
3.2	Diseño de la Investigación.....	37
3.3	Nivel de Investigación.....	42
3.4	Población y Muestra.....	43
3.5	Técnicas e instrumentos de Recolección de Datos.....	43
3.6	Fases de la Investigación.....	45

IV RESULTADOS

	Análisis la importancia del comportamiento del concreto refractario en	
4.1	Calderasacuotubulares.....	47
4.1.1	Análisis de la Composición Química.....	50
4.1.2	Análisis de la Resistencia Química.....	52
4.1.3.	Análisis de la Densidad volumétrica.....	54
4.1.4	Análisis de la Porosidad y Permeabilidad.....	56
4.1.5	Análisis de resistencia mecánica a la compresión en frio.....	57
4.1.6	Análisis Térmico.....	58
4.1.5.1	Cálculo del flujo de calor unidimensional por conducción de la pared.....	58
4.1.5.2	Cálculo del flujo de calor por convección natural.....	60
4.1.5.3	Cálculo del flujo de calor por radiación.....	63
4.1.5.4	Resultados del balance de flujo de calor en la pared.....	63
4.1.5.5	Cálculo de la potencia calorífica en la pared.....	64
4.1.5.6	Validación de resultados del balance de calor de la pared.....	64
4.1.7.	Análisis de la Alta Refratariedad.....	68
4.1.8	Análisis de la Dilatación Térmica.....	69
4.1.9	Análisis Cambio lineal aparente.....	71

4.2 Identificar las zonas críticas y analizar las fallas del concreto refractario en este tipo de calderas.....	71
4.2.1 Falla zona de quemador y puerta del hogar de la caldera.....	71
4.2.2 Falla en revestimiento periférico del piso de la caldera.....	73
4.3 Analizar los factores determinantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las calderas acuotubulares.....	75
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES.....	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
ANEXOS.....	87
A Calderería López Hermanos, S.A.....	89
B Catálogo de Caldera Acuotubular modelo CIT.....	91
C Catálogo del concreto refractario CONCRAX 1700, Gamma.....	92
D Tabla de fallas y tiempos por actividades de reparación en caldera acuotubular.....	93
E Normas ASTM.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA

1 Partes de las calderas.....	11
2 Clasificación de calderas.....	17
3 Caldera Pirotubular.....	18
4 Caldera Acuotubular, The Babcock & Wilcox.....	20
5 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.....	21
6 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.....	22
7 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.....	24
8 Esquema de una caldera acuotubular.....	25
9 Diagrama de fases SiO ₂ -Al ₂ O ₃	33
10 Observación microscópica de la Mullita.....	35
11 Caldera Acuotubular modelo CIT-350.....	47
12 Partes de la Caldera Acuotubular CIT 350.....	48
13 Partes de concreto refractario en la caldera CIT 350.....	49
14 Porosidad en concretos refractarios.....	56

15	Modelamiento del Flujo de Calor en la pared del refractario.....	58
16	Conductividad Térmica Vs Temperatura CONCRAX 1700.....	65
17	Gradiente de Temperatura de la pared.....	66
18	Gradiente de Flujo de calor de la pared.....	67
19	Gradiente de temperatura de la tapa de hogar y zona de quemador de la caldera CIT.....	72
20	Vista de la escoria solidificada en el piso de la caldera.....	73
21	Rotura y desprendimiento de refractario por no respetar tiempos de secado refractario.....	77
22	Anclaje tipo “V” típicos con diagrama de Espaciamiento y orientación correctos en una superficie.....	78
23	Rotura y desprendimiento de refractario Por puesta en marcha inicial demasiado rápida.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA

1	Tipos de concretos refractarios según su composición de CaO.....	30
2	Principales componentes químicos de los cementos aluminosos.....	33
3	Composición Química del concreto refractario CONCRAX 1700.....	50
4	Conductividad Térmica para concretos refractarios de alta alúmina.....	59
5	Resultados del Balance del Flujo de Calor – pared.....	63
6	Validación de resultados.....	67
7	Flujo de calor y potencia calorífica del concreto CONCRAX 1700 en la pared refractaria.....	68
8	Temperaturas fusión de conos pirométricos.....	69
9	Tipos de acero para anclaje según temperatura de trabajo.....	78

ÍNDICE DE GRAFICAS

GRAFICA

1	Densidad volumétrica del Concreto Refractario CONCRAX 1700.....	55
2	Resistencia mecánica en frío del concreto Refractario CONCRAX 1700.....	57
3	Línea de expansión térmica de materiales refractarios.....	70
4	Curva de secado de concretos refractarios según espesores.....	76

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO

1	Ventajas y desventajas de las calderas Pirotubulares y Acuotubulares.....	26
----------	---	----



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

ANÁLISIS DEL CONCRETO REFRACTARIO PARA PROLONGACIÓN DE LA VIDA ÚTIL EN CALDERAS DE TIPO ACUOTUBULAR

Autor:

Abraham, Machado

Tutor: Ing. Alicia T. Yanez de Pizzela

Fecha: Mayo 201

RESUMEN

En el presente trabajo de grado se logra analizar el comportamiento y propiedades del concreto refractario utilizado en una caldera acuotubular, se realizó cálculos de transferencia de calor en una de las paredes refractarias de la caldera, obteniendo resultados de conducción del flujo de calor y potencia térmica a lo largo de la pared, donde se comprobó en el concreto refractario el correcto desempeño de su principal función como aislante térmico. Se logra identificar las zonas críticas de la caldera con este material debido a factores como largos periodos de funcionamiento sin mantenimiento y falta o mala colocación de anclajes. También se presentan los aspectos más importantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las calderas acuotubulares.

Palabras clave: Caldera, Concreto refractario, Resistencia Térmica.

INTRODUCCIÓN

Las múltiples aplicaciones que tienen las calderas industriales, las condiciones variadas de trabajo y las innumerables exigencias de orden técnico y práctico que deben cumplir para que ofrezcan el máximo de garantías en cuanto a solidez, seguridad, su manejo, durabilidad y economía en su funcionamiento, ha obligado a los fabricantes de estos equipos a un perfeccionamiento constante a fin de encarar los problemas. El intercambio de calor entre el agua de alimentación que recorre los tubos y el ambiente producido por la llama en la caldera, produce el vapor de agua. Este calor y el ambiente generado en la caldera debe permanecer contenido y aislado del exterior, y en particular, de zonas o cámaras, que albergan componentes que intervienen en el proceso y que son sensibles a estas condiciones de trabajo. Este es el papel de los materiales refractarios y aislantes térmicos instalados en las calderas Acuotubulares. De tal manera el siguiente trabajo de investigación consistió en analizar una serie de bibliografías y ensayos de diferentes autores, para analizar el concreto refractario en las calderas acuotubulares. Se tomó en cuenta una serie de factores y variables, que afectan su vida útil., lo cual permitió recopilar los resultados de cada uno de los estudios seleccionados. De tal forma, la presente investigación se encuentra estructurada de la siguiente manera:

Capítulo I: Está formado por el planteamiento del problema diagnosticado, formulación del mismo, objetivos de la investigación, justificación de la investigación, alcance del problema.

Capítulo II: En este capítulo se señalan investigaciones similares en las cuales se basa el desarrollo de este proyecto. Su objetivo es presentar los fundamentos teóricos de las técnicas y herramientas a utilizar en el desarrollo de esta investigación.

Capítulo III: En este capítulo, se indica el tipo de investigación, así como su diseño metodológico, y nivel de investigación, señalando el procedimiento a realizar en este trabajo, también se mencionan las técnicas e instrumentos de investigación, se describe la población y muestra seleccionada y se establecen las fases metodológicas

que permitirá conocer el cómo se obtendrán y analizaran los datos para el logro del objetivo general de la investigación.

Capítulo IV: Resultados del análisis realizado por parte del investigador.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del Problema

Según (Hernández, Fernández, Baptista; 2.014) plantear un problema es: “Afinar y Estructurar formalmente la idea de la Investigación”.

Ya que la eficiencia del concreto refractario, tiene una influencia directa, en el funcionamiento de las calderas acuotubulares, y estas calderas son indispensables en las industrias y en plantas de generación de energía, se propuso realizar un análisis del comportamiento y las propiedades de estos materiales para obtener aspectos para prolongar su vida útil en estas calderas. Las ventajas de estos materiales derivan principalmente de los mayores recursos que ofrece la ingeniería refractaria para la colocación de estos materiales, en especial en cuanto a la técnica de anclajes y por la fácil adaptación a las formas más complicadas, utilizando siempre materiales de serie, cuyo plazo de entrega es inmediato. Todo lo contrario a un revestimiento construido de ladrillos refractarios se aprecia inmediatamente una serie de puntos débiles. El primero, es el gran número de juntas entre las piezas que constituyen el revestimiento; por buenos que sean los ladrillos, la firmeza del revestimiento no puede ser mayor que la de sus uniones. Esta debilidad se agrava si la pared de ladrillos es plana y no está anclada con solidez a la estructura metálica.

Durante la recopilación de la información relacionada con el uso de concretos refractarios en calderas acuotubulares, se hallaron propiedades y aspectos que requieren de un estudio específico.

Se encontró que existen zonas de las calderas donde ocurren fallas del concreto refractario con frecuencia. Estas zonas son consideradas críticas, debido a la extensión del daño que ocasionan y el riesgo de salud que la falla representa para los trabajadores. Debido a la sensibilidad de las propiedades de los materiales refractarios a las condiciones de instalación.

Por ende, el propósito al realizar este análisis del concreto refractario presente en calderas acuotubulares es conseguir conclusiones pertinentes en torno al el comportamiento, propiedades de este material y los factores que lo afecten, con el fin de establecer los aspectos que alarguen su vida útil.

1.2 Formulación del Problema

Basadas en las premisas antes mencionadas surge la siguiente interrogante:
¿Qué importancia tendrá analizar el comportamiento del concreto refractario en calderas acuotubulares para la prolongación de su vida útil?

Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar un análisis del comportamiento del concreto refractario en las calderas acuotubulares, con el fin de ubicar las zonas críticas y establecer parámetros para mejorar su durabilidad.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Analizar la importancia del comportamiento del concreto refractario en calderas acuotubulares.
2. Identificar las zonas críticas y analizar las fallas del concreto refractario en este tipo de calderas.
3. Analizar los aspectos determinantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las calderas acuotubulares.

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. Se considera necesario realizar un análisis del comportamiento para demostrar la confiabilidad de uno de sus componentes más importantes como lo es, el concreto refractario, que permite minimizar costos de combustibles, aumentar la eficiencia térmica y le da seguridad a la estructura de la caldera.

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 Hernández (2014) 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 estuvo limitada a estudios y ensayos previos, realizados por los fabricantes del concreto refractario, además de un análisis térmico del refractario para cálculos de flujo de calor y potencia térmica. Se analizaron zonas críticas debido a planes de mantenimiento e historial de fallas de diferentes calderas acuatubulares.

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 presentara 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).

Nelson Alfonzo Pinto Yuncosa (2015) en su trabajo de grado titulado **“Evaluación de los materiales refractarios utilizados en la caldera de la planta ampliación Tocoa”** realizado en la Universidad Simón Bolívar, Venezuela, para optar por el título de ingeniería de materiales, cuyo objetivo general era estudiar el desempeño de los materiales refractarios en las calderas de las unidades 7,8 y 9 de la Planta Ampliación Tocoa, aporta a la investigación una orientación a nivel conceptual de lo que es el concreto refractario y sus distintas composiciones. Así como Identificar los diferentes materiales refractarios utilizados en las calderas. Se encontró que existen zonas de la caldera donde ocurren fallas del revestimiento refractario con frecuencia. Estas zonas son consideradas críticas.

Así mismo, Espinoza Vicente (2013) en su trabajo **“Evaluación de propiedades térmicas de chaquetas, del horno manga nº3, para identificar placas**

térmicas óptimas en la empresa Doe Run Perú” Universidad Nacional Del Centro Del Perú, Perú. El presente trabajo de Investigación identificó el Material óptimo para la Chaqueta de Refrigeración zona Soplos del Horno Manga N°3 de la empresa Doe Run Perú, el cual cumple la función de transferir el calor para una temperatura interna de 1300°C

En referencia a la identificación de la chaqueta optima, cuyos materiales son refractarios y aislantes, el cual tiene menor transferencia de calor a comparación de la actual Chaqueta, esta vez se elimina el agua, disminuyendo considerablemente la fatiga térmica que se tenía con agua, y de esa forma se disminuye considerablemente las reparaciones de Chaquetas, beneficiando a la empresa DOE RUN PERU. Este trabajo pretende mencionar lineamientos básicos y mostrar alternativas a lo convencional con el objetivo de aumentar considerablemente los rendimientos minimizando las paradas atribuibles a problemas refractarios. Aporta a la investigación, información acerca de los concretos refractarios y ejemplos de análisis térmicos a este tipo de material.

Por último, Ochoa Federico (2006) en su trabajo **“Prolongación de la vida útil del revestimiento refractario en un horno de inducción de INTRAMET”** realizado en la Escuela Superior Politécnica Del Litoral, Ecuador, donde se logra describir el funcionamiento de los hornos de inducción sin núcleos, luego se presenta una descripción del equipo y los problemas encontrados en los refractarios. Aporta a la investigación como se estudian los aspectos para la prolongación de la vida de este material refractario.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1 La generación de 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.

Según Severns y Miles (1974) cuando se habla de generación de vapor, se trata de los cambios de fase que se suceden desde su estado inicial como agua en estado líquido hasta el vapor generado según las necesidades requeridas, que generalmente son de vapor sobrecalentado. Es por esto que las técnicas de generación y uso del vapor de agua son componentes importantes de la ingeniería tecnológica. Durante este proceso de conversión del agua líquida a vapor existen tres etapas diferentes. El agua debe estar hirviendo antes que se pueda formar el vapor, y el vapor sobrecalentado no puede formarse hasta que el vapor esté totalmente seco. En la primera etapa, se aplica calor para incrementar la temperatura del agua hasta la de ebullición correspondiente a las condiciones de presión bajo las cuales se proporciona calor. El punto de ebullición se conoce normalmente como la temperatura de generación o saturación. La cantidad de calor requerido para subir la temperatura del agua desde 0°C hasta la temperatura de saturación se conoce como entalpia del agua o calor sensible. En la segunda etapa y bajo condiciones de presión constante, el agua se convierte en vapor sin aumentar la temperatura. Cuando el agua está hirviendo, el vapor y el líquido tienen la misma temperatura permaneciendo constante, se debe agregar calor para transformar el líquido en vapor, esta cantidad de calor se conoce como calor latente de vaporización, produciendo vapor, la temperatura a la cual ocurre la evaporación se llama temperatura de saturación. Si el vapor producido está libre de agua líquida a la temperatura de ebullición, se dice que es un vapor seco y saturado.

Cuando el vapor contiene líquido se llama húmedo. Esta es la fase de evaporación o de calor latente, en esta fase, el vapor en contacto con el agua líquida se encuentra en la condición conocida como saturado. Puede estar seco o húmedo dependiendo de las condiciones de generación. Un incremento de presión aumenta la temperatura del cambio de fase, y a su vez disminuye el calor latente de vaporización. La energía térmica agregada durante este proceso y la temperatura de

saturación aumentan conforme aumenta la presión. Es decir, a presiones más elevadas que la atmosférica, se deberá agregar más calor sensible al agua líquida antes de que inicie su vaporización. A su vez, el calor necesario para evaporarla tiende a disminuir. Inversamente en un sistema presurizado, si el condensado suficientemente caliente se lleva a menor presión, algo de este condensado tiene el calor necesario para convertirse en vapor. Este se conoce como vapor flash.

2.2.2 Aspectos generales de generadores de vapor

Shield (1979) expuso varios conceptos básicos acerca de los generadores de vapor, los cuales son instalaciones industriales diseñadas para convertir agua líquida en vapor a partir del intercambio térmico entre el agua y una fuente de alto contenido calórico, la cual puede ser gases de combustión u otro fluido. Este vapor se destina a una gran variedad de aplicaciones, entre las que se encuentran la producción de energía eléctrica y el calentamiento en procesos industriales.

Los generadores de vapor más conocidos son: Los rehervidores, los hogares y las calderas y ellos pueden ser de muchas formas y tamaños determinados por los requerimientos del usuario y las limitaciones de espacio. Los objetivos del presente trabajo, se enfocan en el estudio de las calderas acuatubulares que utilizan bagazo como combustible.

Asimismo, Shield (1979) explica que el vapor tiene varias ventajas, que lo hace significativamente indispensable para llevar energía (vector energético), tales como: naturaleza no tóxica, facilidad de transporte de un lugar a otro, alta eficiencia, alta capacidad de calentamiento, bajos costos con respecto a otras fuentes de generación de energía y su alta disponibilidad. Esto se debe a que el vapor puede transportar una cantidad significativa de energía que puede ser aprovechada como trabajo mecánico a través de una turbina o como calor para el uso en un proceso, debido a su contenido de energía como calor latente y sensible.

El objetivo de una caldera, además de generar vapor, es realizar la transferencia de calor con la máxima eficiencia, definiéndola como la relación entre

el máximo calor que puede liberarse en el hogar y el calor absorbido por el agua en los elementos de la caldera.

Cuando se selecciona una caldera se deben considerar los siguientes parámetros: Flujo másico de vapor requerido, Presión, temperatura, calidad del vapor requerido, futuros requerimientos en la planta, localización, características de la carga, tipos de combustibles disponibles, diseño de quemadores, calidad del agua de alimentación y variaciones previstas de la carga.

2.2.3 Las calderas o generadores de vapor

Las calderas o generadores de vapor son un elemento fundamental en el funcionamiento de instalaciones industriales y de servicios son el corazón de los sistemas termo energéticos en los cuales están presentes.

Elas producen el vapor que entrega la energía que demandan los procesos de calentamiento y la producción de potencia mecánica. El término “caldera” se aplica a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales, calefacción o agua caliente para calefacción o para uso general. Por razones de sencillez de comprensión, a la caldera se le considera como un productor de vapor en términos generales. Inicialmente se les denomina calderas hasta que en una etapa más reciente se les comienza a llamar generadores de vapor.

La producción de una caldera se da frecuentemente en kilogramos de vapor por hora, pero dado que el vapor a distintas presiones y temperaturas posee diferentes cantidades de energía, aquel sistema no mide exactamente la energía producida. De este modo, la capacidad de una caldera de vapor se expresa concretamente en forma del calor total transmitido por las superficies de intercambio en kJ/h.

La producción en kg/h normalmente se expresa en kg de vapor a la temperatura y presión de diseño de la caldera, también llamada capacidad nominal correspondiente al nivel de producción donde la caldera trabaja con mayor eficiencia. La ASME estableció en 1889 que un caballo de caldera (HP de caldera) se define como la evaporación en términos de vapor saturado seco de 34.5 lb/h de agua (15,65

kg/h) a temperatura de 100°C, y a la presión atmosférica normal (101.325 kPa) (Severns& Miles, 1974).

Se puede también describir la capacidad en términos relacionados con la superficie de transferencia térmica necesaria para un espacio. Es necesario considerar las siguientes partes en la superficie de caldera para determinar la cantidad de superficie de calefacción disponible para la producción de vapor o agua caliente: tubos, cajas de humos, superficie del hogar, colectores principales de caldera y otros.

2.2.4 Partes principales de una caldera

Debido a que cada caldera dispone, dependiendo del tipo, de partes características, es muy difícil atribuir a todas ellas un determinado componente. En razón de lo anterior se analizarán las partes principales de las calderas en forma general, especificando en cada caso el tipo de caldera que dispone de dicho elemento. Para tal análisis usaremos el esquema de la caldera cilíndrica sencilla. (Ver figura 1).

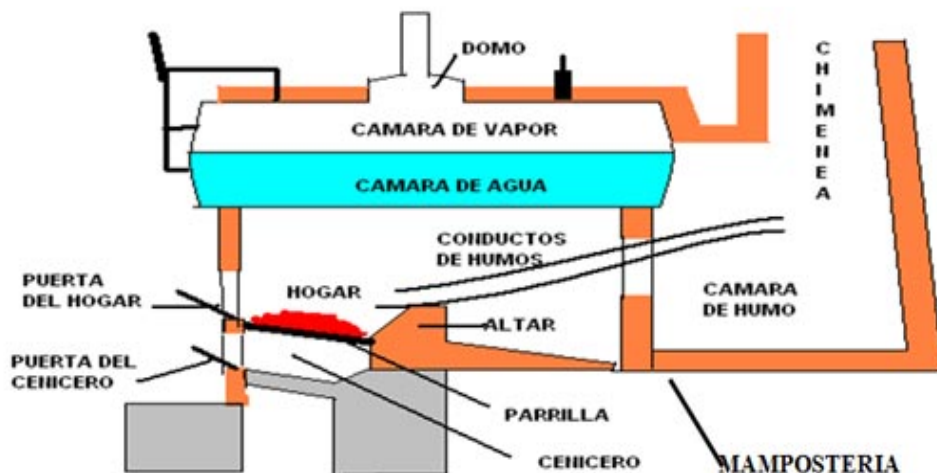


Figura 1 Partes de las calderas.

Fuente: Silva Lora (1998).

Hogar o Fogón: Es el espacio donde se produce la combustión. Se le conoce también con el nombre de Cámara de Combustión.

Puerta Hogar: Es una pieza metálica, abisagrada, revestida generalmente en su interior con ladrillo refractario o de doble pared, por donde se alimenta de combustible sólido al hogar y se hacen las operaciones de control de fuego.

En las calderas que queman combustibles líquidos o gaseosos, esta puerta se reemplaza por el quemador.

Emparrillado: son piezas metálicas en formas de rejas, generalmente rectangulares o trapezoidales, que van en el interior del hogar y que sirven de soporte al combustible sólido. Debido a la forma de reja que tienen, permiten el paso del Aire primario que sirve para que se produzca la combustión.

Cenicero: es el espacio que queda bajo la parrilla y que sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. Los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstaculizar el paso de aire necesario para la combustión

En algunas calderas el cenicero es un depósito de agua.

Puerta del Cenicero: Accesorio que se utiliza para realizar las funciones de limpieza del cenicero. Mediante esta puerta regulable se puede controlar también la entrada del aire primario al hogar. Cuando se hace limpieza de fuegos o se carga el hogar, se recomienda que dicha puerta permanezca cerrada con el objeto de evitar el retroceso de la llama.

Altar: es un pequeño muro de ladrillo refractario, ubicado en el hogar, en el extremo opuesto a la puerta del hogar y al final de la parrilla, debiendo sobrepasar a ésta en aproximadamente 30 cm.

Los objetivos del altar son:

- Impedir que al avivar, cargar o atizar los fuegos tiren partículas de combustibles o escoria al primer tiro de los gases.
- El altar forma también el cierre interior del cenicero.
- Imprimir a la corriente de aire de la combustión una distribución lo mas uniforme posible y una dirección ascensional vertical en todo el largo y ancho de las parrillas.

- Restringir la sección de salida de los gases calientes aumentando su velocidad, lo cual facilita su mezcla y contacto íntimo con el aire, haciendo así que la combustión sea más completa.

Mampostería: Se llama mampostería a la construcción de ladrillos refractarios o comunes que tiene como objeto:

- Cubrir la caldera para evitar pérdidas de calor al exterior
- Guiar los gases y humos calientes en su recorrido.
- Para mejorar el aislamiento la mampostería se dispone, a veces, en sus paredes de espacios huecos (capas de aire) que dificultan el paso de calor al exterior.
- En algunos tipos de calderas, se ha eliminado totalmente la mampostería de ladrillo, colocándose solamente aislamiento térmico en el cuerpo principal y cajas de humo.
- Para este objeto se utilizan materiales aislantes, tales como lana de vidrio recubierta con planchas metálicas.

Conductos de Humos: es aquella parte de la caldera por donde circulan los humos y los gases calientes que se han producido en la combustión, en estos conductos se realiza la transmisión de calor al agua que contiene la caldera. En las calderas ígneas tubulares, estos conductos (tubos) deben instalarse de modo que su extremo superior quede a 10 cm (4 “) por debajo del nivel mínimo de agua de la caldera.

Caja de Humo: Corresponde al espacio de la caldera en el cual se juntan los humos y gases después de haber entregado su calor y antes de salir por la chimenea.

Chimenea: Es el conducto de salida de los gases y humos de la combustión hacia la atmósfera, los cuales deben ser evacuados a una altura suficiente para evitar perjuicios o molestias a la comunidad. Además, tiene como función producir el tiraje necesario para obtener una adecuada combustión, esto es, haciendo pasar el aire necesario y suficiente para quemar el combustible, en caldera que usan combustibles sólidos. Las dimensiones de la chimenea en cuanto a su altura y diámetro estarán

determinadas por el tiraje necesario y condiciones de instalación respecto a edificios vecinas.

En las calderas modernas existe tiraje artificial en que el movimiento del aire se hace por ventiladores sin descartar, desde luego, los usos de la chimenea.

Regulador de Tiro o Templador: Consiste en una compuerta metálica instalada en el conducto de humo que comunica con la chimenea o bien en la chimenea misma. Tiene por objeto dar mayor o menor paso a la salida de los gases y humos de la combustión. Este accesorio es accionado por el operador de la caldera para regular la cantidad de aire en la combustión, al permitir aumentar (al abrir) o disminuir (al cerrar) el caudal. Generalmente se usa en combinación con la puerta del cenicero.

Tapas de Registro o Puertas de Inspección: Son aperturas que permiten inspeccionar, limpiar y reparar la caldera. Existen dos tipos dependiendo de su tamaño:

- Puertas de hombres: Como su nombre lo indica, estas puertas tienen el tamaño suficiente para permitir el paso de un hombre para inspeccionar interiormente la caldera y limpiarla.
- Tapas de Registro: todas las calderas tienen convenientemente distribuidas cierto número de tapas que tienen por objeto inspeccionar ocularmente el interior de las calderas o lavarlas, si es necesario extraer en forma mecánica o manual, los lodos que se hayan acumulado y que no hayan salido por las purgas.

Casi todas las tapas tienen forma ovalada para ajustar de adentro hacia fuera, llevan empaquetadura para su ajuste hermético y un perno central para su apriete. Algunas calderas tienen orificios cilíndricos los cuales se sellan con tapas tornillos.

Puertas de Explosión: Son puertas metálicas con contrapeso o resortes, ubicadas generalmente en la caja de humos y que se abren en caso de exceso de presión en la cámara de combustión, permitiendo la salida de los gases y eliminando la presión. Solo son utilizables en calderas que trabajen con combustibles líquidos o gaseosos.

Cámara de Agua: Es el volumen de la caldera que está ocupado por el agua que contiene y tiene como límite superior un cierto nivel mínimo del que no debe descender nunca el agua durante su funcionamiento. Es el comprendido del nivel mínimo visible en el tubo de nivel hacia abajo.

Cámara de Vapor: es el espacio o volumen que queda sobre el nivel superior máximo de agua y en el cual se almacena el vapor generado por la caldera.

Mientras más variable sea el consumo de vapor, tanto mayor debe ser el volumen de esta cámara. En este espacio o cámara, el vapor debe separarse de las partículas de agua que lleva en suspensión. Por esta razón, algunas calderas tienen un pequeño cilindro en la parte superior de esta cámara, llamado “domo” y que contribuye a mejorar la calidad del vapor.

Cámara de Alimentación de Agua: Es el espacio comprendido entre los niveles máximos y mínimos de agua. Durante el funcionamiento de la caldera se encuentra ocupado por agua y/o vapor, según sea donde se encuentre el nivel de agua.

Otros accesorios:

Válvulas de seguridad: Tiene por objeto dar salida al vapor de la caldera cuando ésta sobrepasa a la presión máxima de trabajo.

Tapón fusible: El tapón fusible, es un elemento que permite el paso de vapor y agua hacia el hogar, cuando el nivel de agua en la caldera baja más allá del mínimo permitido.

Alarmas: Toda caldera dispondrá de un sistema de alarma, acústica o visual, que funcione cuando el nivel de agua alcance el mínimo o el máximo, deteniendo a la vez, el funcionamiento del sistema de combustión, cuando se alcance el nivel mínimo de agua.

Bombas: Este accesorio al igual que el inyector, nos permite reponer el agua que se ha vaporizado en el interior de la caldera. Entre éstas, tenemos las Bombas Centrífugas y las de émbolo.

Inyectores: Los inyectores, son dispositivos que funcionan con el mismo vapor que produce la caldera y son capaces de descargar agua a una presión mayor que la presión interna de la caldera.

Puertas de inspección: Según sus dimensiones se llaman puertas de hombre o tapas de registro. Éstas últimas sólo permiten el paso de un brazo. Ambas puertas sirven para efectuar limpiezas o inspecciones en el interior de los colectores principales o de los tubos según sea su ubicación.

Llaves de purga: Entre las llaves de purga, se pueden distinguir las válvulas de extracción de fondo y las de extracción de superficie. La primera de ellas va ubicada en las partes más bajas de la caldera y sirven para extraer los lodos o barros provenientes de la vaporización de las aguas duras y acción del uso de los desincrustantes.

Retardadores: Consisten en una plancha lisa, del mismo ancho que el diámetro interior del tubo, torcida en forma de hélice, la que se mete en el tubo de caldera. Los gases calientes tienen ahora que recorrer un camino mayor, siendo más lento el paso de ellos por el interior de los tubos y entregando mayor cantidad de calor al agua. La eficiencia de la caldera se aumenta entre un 2 % y 8 % con el uso de retardadores.

Presostatos: Son accesorios que funcionan sobre la base de la máxima y mínima presión de trabajo de la caldera. Actúan sobre el quemador, apagándolo al llegar a la máxima presión para lo cual fue regulado y encendiéndolo al alcanzar la mínima presión deseada.

Termostato: Son accesorios que funcionan de acuerdo a la temperatura del agua. Apagan el quemador cuando se obtiene la máxima temperatura para la cual fue regulada.

Control de nivel de agua: Los controles de nivel de agua, tienen por objeto controlar que el agua, dentro de la caldera, se mantenga en un valor o en un rango pre-determinado.

Control de la llama: Mediante una celda fotoeléctrica se controla la llama (su largo) impidiendo la alimentación de combustible, en caso de que ésta no exista en el hogar.

Control del encendido (chispa): Por medio de este control, se impide que salga combustible sin que exista la chispa para encendido.

2.2.5 Clasificación de las calderas

Las calderas se clasifican basándose en características como su uso, presión de trabajo, materiales, tamaño, por flujo a través de los tubos, sistema de combustión, fuente de calor, clase de combustible, fluido utilizado, sistema de circulación del agua (Shield, 1979). El desarrollo de la tecnología de combustión de calderas, el aumento de los parámetros de vapor y la capacidad hacen que hoy coexistan diferentes tipos de calderas. (Ver figura 2).

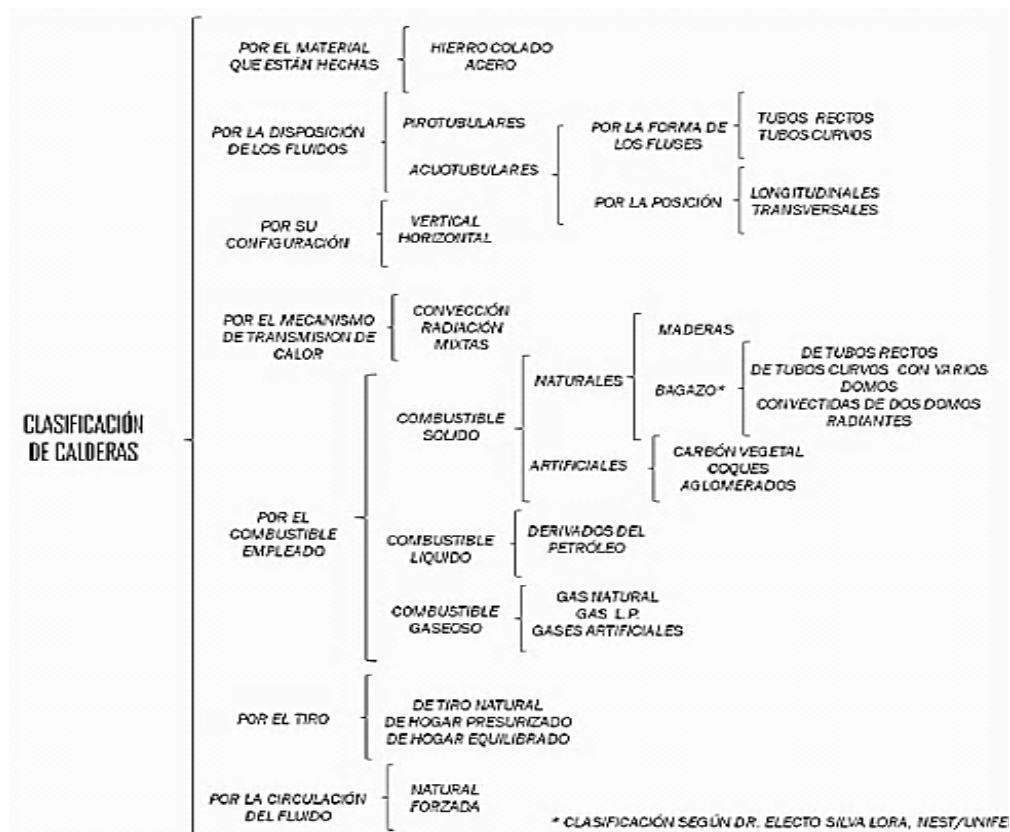


Figura 2 Clasificación de calderas.

Fuente: Silva Lora (1998).

2.2.6 Calderas Piro tubulares

Son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar. Dicho volumen de agua les permite adaptarse mejor a las variaciones de la instalación que las calderas acuotubulares. (Ver figura 3).

El vapor producido por las misma suele tener un título de vapor cercano al 1, es decir, que el contenido de agua por unidad de masa es bajo (3%), no siendo necesario instalar equipos auxiliares complementarios.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares.

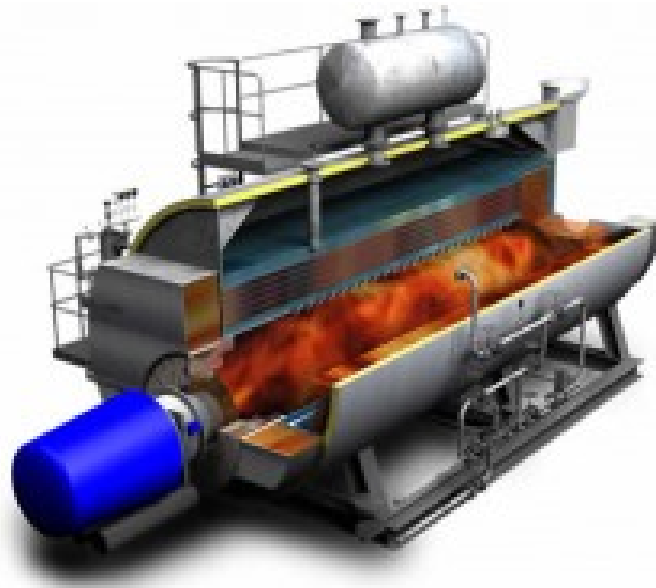


Figura 3 Caldera Piro tubular.

Fuente: Catálogo de calderas López Hermanos S.A.

Los generadores de vapor piro tubulares 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.

2.2.7 Calderas Acuotubulares

En estas calderas, por el interior de los tubos pasa agua o vapor y los gases calientes se hallan en contacto con las caras exteriores de ellos. Son de pequeño volumen de agua. Las calderas acuotubulares son las empleadas casi exclusivamente cuando interesa obtener elevadas presiones y rendimiento, debido a que los esfuerzos desarrollados en los tubos por las altas presiones se traducen en esfuerzos de tracción en toda su extensión. La limpieza de estas calderas se lleva a cabo fácilmente porque las incrustaciones se quitan utilizando dispositivos limpia tubos accionados mecánicamente o por medio de aire.

Las calderas acuotubulares pueden aumentar su capacidad de producción de vapor, aumentando el número de tubos, independientemente del diámetro del calderín del evaporador. Este calderín no está expuesto al calor radiante de la llama. Se caracterizan por tener una alta libertad para incrementar las capacidades y presiones, lo cual es una gran ventaja frente a las calderas pirotubulares.

El costo inicial de una caldera acuotubular es más alto que el de una caldera pirotubular equivalente, sin embargo, una mayor eficiencia compensará este costo inicial. Además, la adición de algunos equipos destinados a la recuperación del calor permitirá la recuperación de los costos más rápidamente (Ver figura 4).

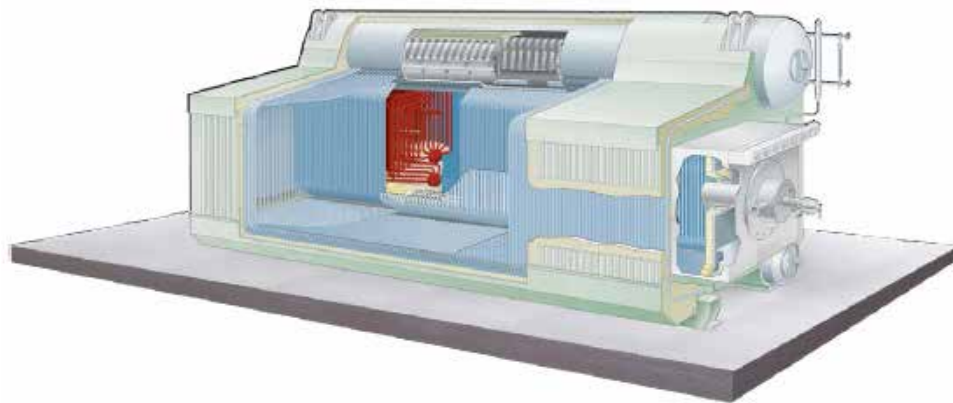


Figura 4 Caldera Acuotubular, The Babcock & Wilcox.

Fuente: Industrial Water-tube
Package Boilers The Babcock & Wilcox (2018).

El vapor obtenido mediante estas calderas puede ser húmedo o seco, dependiendo si se lo hace pasar por un sobrecalentador. Los tubos que manejan la mezcla saturada líquido-vapor, son hechos de acero al carbono mientras que los tubos que manejan vapor sobrecalentado o recalentado, por efecto de transferencia de calor estudiado, deben tener una aleación austenita.

Estos tubos de vapor sobrecalentado son de menor diámetro que los tubos de mezcla saturada líquido-vapor. (Severns & Miles, 1974). La mayoría de los autores las divide en calderas de tubos rectos o curvados, y que pueden estar colocados horizontales, verticales o inclinados. La disposición de tubos en forma curvada presenta mejores características de presión y temperatura, con lo que ha desplazado a la disposición de tubos rectos (Shield, 1979).

- a) De tubos rectos: Este tipo de calderas se clasifican de la siguiente manera: de cabezal de caja (proporcionan una mejor circulación interna) o cabezal seccional, calderín longitudinal o transversal. La diferencia de estos últimos radica en el espacio utilizado debido a que en una caldera de calderín longitudinal por lo regular se requiere de un segundo calderín adicional, en

cambio en uno transversal requiere menor espacio de altura permitiendo mayor anchura y capacidad. (Ver figura 5).

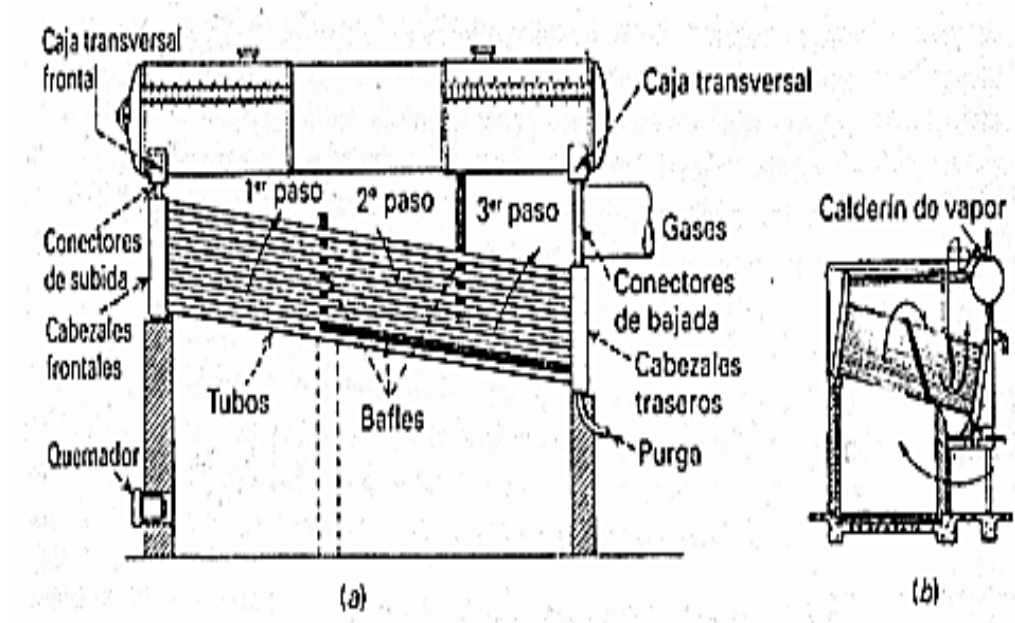


Figura 5 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.

Fuente: Pedro Abarca Bahamondes: "Descripción de Calderas y Generadores de Vapor"

- b) De tubos curvos: La curvatura de los tubos en este tipo de calderas permite que estos entren radialmente en el calderín. Estas calderas permiten la circulación del agua más rápida, por la inclinación de estos así como también entrega más vapor seco; permite libre expansión de tubos. Se pueden encontrar de cuatro, tres, dos calderines o uno. La desventaja que tienen estas es su tamaño y costo. (Ver figura 6).

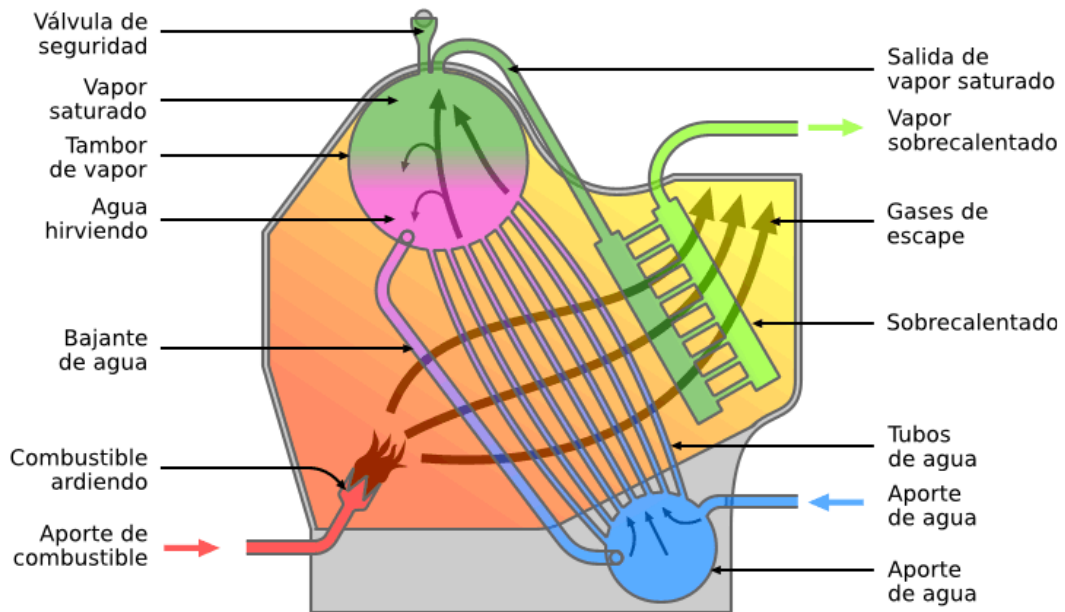


Figura 6 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.

Fuente: Water tube boiler schematic, Emoscopio.

Los tubos se curvan por varias razones:

- Debido a razones de transferencia térmica se hace imposible usar tubos rectos.
- El tubo curvado permite la libre dilatación y contracción del conjunto, normalmente, sobre el calderín inferior de lodos, ya que el calderín superior está separado por estructuras de acero.
- Respuesta rápida a fluctuaciones de carga.
- Gran economía en la fabricación y operación.
- Mayor accesibilidad para limpieza y mantenimiento.
- Producción de un vapor de mejor calidad.
- Capacidad para trabajar en rangos de evaporación mucho más altos.

Las calderas acuotubulares se caracterizan por:

1. Trabajan a altas presiones, dependiendo del diseño llegan hasta 350 psi.
2. Se fabrican en capacidades de 20 HP hasta 2000 HP.
3. Por su fabricación de tubos de agua es una caldera inexplorable.

4. La eficiencia térmica está por arriba de cualquier caldera de tubos de humo, ya que se fabrican de 3, 4 y 6 pasos dependiendo de la capacidad.
5. El tiempo de arranque para la producción de vapor a su presión de trabajo es mínimo.
6. El vapor que produce una caldera de tubos de agua es un vapor seco, por lo que en los sistemas de transmisión de calor existe un mayor aprovechamiento.

Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares

Supóngase que la figura 6 representa una caldera con un solo tubo de agua. Sólo una rama del tubo se calienta, ya que la otra se encuentra protegida por una pantalla aisladora. En la rama izquierda, el calor calienta el agua, generando vapor y haciendo que ambos (agua y vapor) se muevan hacia arriba. Esta mezcla entra al colector y el agua fría pasa a ocupar su lugar en el tubo calentado.

El agua fría se encuentra en el tubo no calentado y en la parte inferior del colector. De esta forma, existe un movimiento continuo de agua-vapor en la dirección que señalan las flechas, en las que siempre la mezcla de agua caliente y vapor sube al colector, mientras el agua fría del fondo del colector baja y ocupa el lugar de esta mezcla.

Funcionan mediante la transferencia de calor, producido generalmente al quemarse un combustible, al agua contenida o circula dentro de un recipiente metálico. En toda caldera se distinguen dos zonas importantes: Zona de liberación de calor u hogar o cámaras de combustión. Es el lugar donde se quema el combustible. Puede ser interior o exterior con respecto al recipiente metálico.

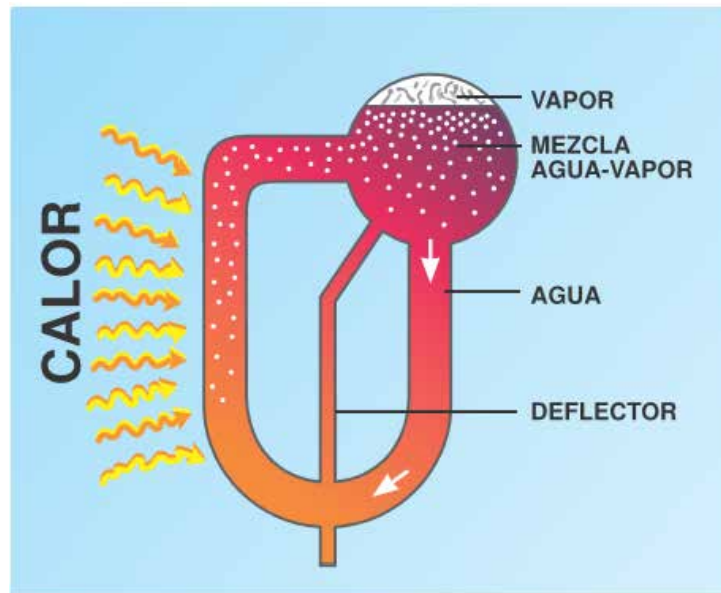


Figura 7 Principio de funcionamiento de las calderas acuotubulares.

Fuente: Pedro Abarca Bahamondes: “Descripción de Calderas y Generadores de Vapor”

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). a) Zona de tubos. Es la zona donde los productos de 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. La generación de vapor para el accionamiento de las turbinas se realiza en instalaciones generadoras comúnmente denominadas calderas. La instalación comprende no sólo la caldera propiamente dicha, sino, además componentes principales y accesorios tales como:

- Economizadores y chimeneas.
- Sobre calentadores y recalentadores.
- Quemadores y alimentadores de aire.

- Condensadores.
- Bombas y tanques de alimentación.
- Domos.

Esquema de una caldera acuotubular de vapor saturado y sobrecalentado

El agua líquida entra al economizador (1), donde se calienta hasta una temperatura próxima a la de saturación (2), se introduce en el calderín y desciende por los tubos de riego (3-3') hasta el colector inferior, distribuyéndose hacia los tubos vaporizadores, donde se forman las burbujas de vapor (4-5) que a su vez se separan en el calderín (6). El vapor saturado (7) puede calentarse por encima de su temperatura de saturación en el sobrecalentador (8). La circulación del agua por los tubos de bajada (riegos) y de subida (vaporizadores) puede ser por convección natural. (Ver figura 8).

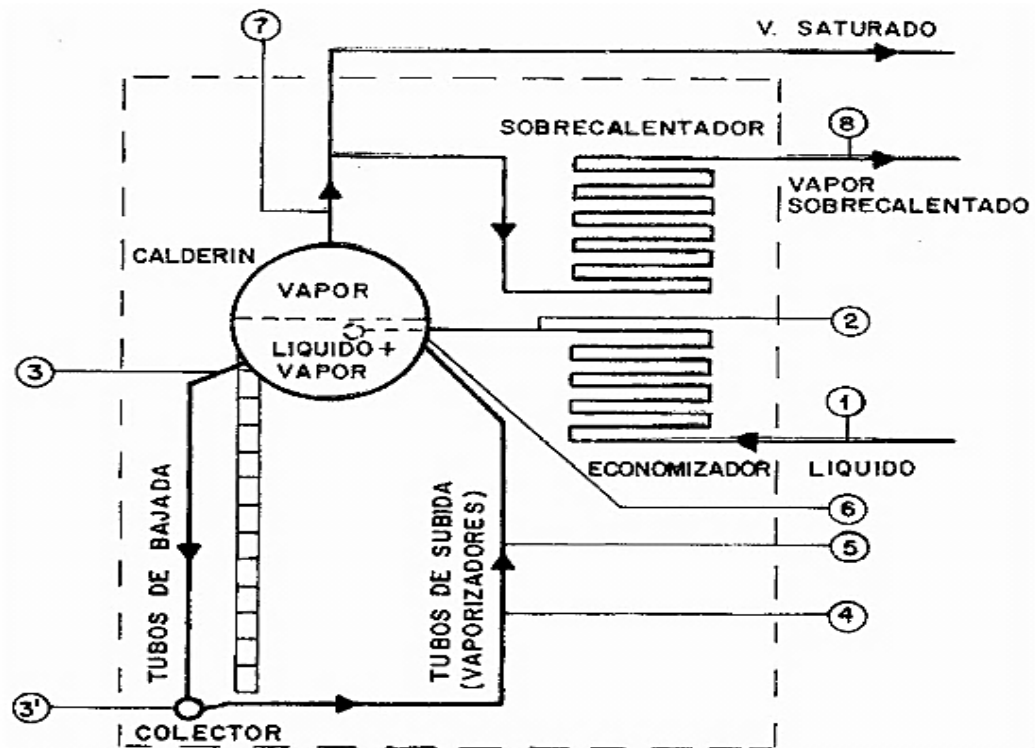


Figura 8 Esquema de una caldera.

Fuente: La. Molina y J.M Alonso: "calderas de vapor en la industria", ed. Bilbao (1996).

Cuadro 1 Ventajas y desventajas de las calderas Piro tubulares y Acuotubulares.

	CALDERAS PIROTUBULARES	CALDERAS ACOUTUBULARES
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Son más económicas que las Acuotubulares. · No requieren tanto tratamiento para el agua de alimentación. · Ocupan poco o menos espacio. · Facilidad para su mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> · Son más livianas que las piro tubulares. · Rapidez en producción de vapor · Adecuadas para presiones elevadas. · Ideal para producción de vapor seco. · Altas eficiencias de funcionamiento.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> · Menor eficiencia de funcionamiento en comparación con las Acuotubulares. · No son adecuadas para presiones elevadas. 	<ul style="list-style-type: none"> · Son costosas debido a la disposición de los tubos · No son adecuadas para presiones bajas · Requieren un tratamiento de agua de alimentación más exigente · Tiempo prolongados para mantenimiento

Fuente: Machado (2019).

2.2.8 Material refractario

Los materiales refractarios son materiales no metálicos, que mantienen sus propiedades físicas y químicas en estructuras o componentes de un sistema, al ser expuestos a temperaturas mayores de 538 °C. Si bien su función principal es resistir altas temperaturas, también se requiere resistencia a otras influencias destructivas como esfuerzos mecánicos y térmicos, corrosión o erosión por sólidos, líquidos y gases, difusión de gases y abrasión

La característica de estos materiales, de mantener sus propiedades a altas temperaturas, hacen que su uso tenga cabida en una gran variedad de industrias: la industria del hierro y el acero, la cual representa cerca del 70% del consumo de estos materiales, la industria petroquímica, la industria del vidrio, en producción de cerámica, cal, cemento, materiales no ferrosos, carbón y la industria termoeléctrica.

Debido a la diversidad de condiciones que existe en las diferentes industrias, hay una gran variedad de productos refractarios en el mercado. Por ello, el primero de los puntos clave en la aplicación efectiva de materiales refractarios como parte de un componente, es la selección. Una selección apropiada produce beneficios como mejorar la economía del proceso operativo, conservar energía, mejorar la continuidad y planificación del mantenimiento para maximizar eficiencia, reduce las paradas de planta y pérdidas de producción y evita fallas catastróficas.

2.2.9 Clasificación de los materiales refractarios

Son clasificados según diferentes criterios, para facilitar la comunicación entre consumidor y proveedor. Con estos criterios de clasificación se crean los grupos bajo los cuales se dividen los materiales y hace posible referirse a un material sin que haya confusión. A continuación se muestran los criterios de clasificación comúnmente utilizados para los materiales refractarios.

Clasificación según su composición química y/o características físico- químicas:

- Sílico-aluminosos: también son llamados de chamota o arcillosos y son materiales formados principalmente por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), en

un porcentaje entre 18 y 44% de alúmina. Químicamente su comportamiento es de carácter ácido.

- Alta alúmina: son materiales cuyo contenido de alúmina se encuentra entre 45 y 99% en peso.
- Sílice: son materiales fabricados principalmente de sílice o cuarcita y químicamente tienen carácter ácido.
- Básicos: son llamados así por ser químicamente básicos y están fabricados principalmente de dolomita (MgO) y cromita (Cr₂O₃).
- Aislantes: son materiales que se caracterizan por su baja conductividad térmica y por presentar una alta porosidad y baja densidad.
- Carbón: son materiales de carbón o grafito con buena conductividad térmica.
- Especiales: los refractarios especiales se clasifican a su vez en refractarios de zirconio; carburo de silicio; nitruro de silicio; oxinitruro de silicón, sialón, carburo de boro, etc.

Clasificación según su presentación

Los materiales refractarios tienen diferentes presentaciones que los hacen adaptables al tipo de aplicación para la cual se requieren. Usualmente, éstos aparecen en los catálogos de proveedores, clasificados según su presentación, en los siguientes;

- Ladrillos y formas especiales
- Morteros
- Moldeables
- Plásticos
- Mezclas de apisonamiento
- Mezclas de proyección
- Fibra cerámica

Los ladrillos son presentados, en general, en formas geométricas convencionales o en formas especiales para construcciones particulares. Dentro de las formas convencionales se encuentran las formas rectas, arco, cuña y llave.

Clasificación de los refractarios según las normas ASTM

A continuación, se describen las distintas clasificaciones establecidas en las normas ASTM:

- Ø Clasificación de ladrillos sílico-aluminosos y de alta alúmina – ASTM C27.
- Ø Clasificación de ladrillos aislantes – ASTM C155.
- Ø Clasificación de moldeables sílico-aluminosos y de alta alúmina – ASTM C401.
- Ø Clasificación de moldeables aislantes – ASTM C401.

2.2.10 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 apropiados 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.

2.2.11 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 (Ver tabla 1).

Tabla 1 Tipos de concretos refractarios según su composición de CaO.

Tipos	% de CaO
Concretos convencionales	> 2,5
Concretos de bajo cemento	≥ 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 Acuotubulares. 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 1 se muestra una clasificación de los concretos refractarios en base a su química, densidad, contenido de cemento y características de instalación.

2.2.12 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 Advanced Ceramics Association and Oak Ridge National Laboratory (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.

2.2.13 concretos Silico- Aluminosos

Estos refractarios se clasifican a su vez en dos tipos:

- Los que tienen un tenor de alúmina (Al_2O_3) que oscila entre un 20% y un 45%.
- Los que cuentan con un 55% a un 100% de Al_2O_3 .

El punto de fusión de estos materiales oscila entre los $1.600^{\circ} C$ y $1.785^{\circ} C$ aproximadamente, aumentando en relación directa con el contenido de alúmina.

Estos refractarios no resisten bien el choque térmico. La conductividad térmica es similar a la de los silícicos, pero inferior a la de los básicos.

Los refractarios sílico-aluminosos que contienen entre un 55% y un 100% de Al_2O_3 se denominan de Alta Alúmina. Se fabrican agregándoles alúmina a los concretos naturales. También se elaboran con alúmina pura. Entre las materias primas que aportan Al_2O_3 tenemos:

ANDALUCITA, SILIMANITA, CIANITA, GIBSITA, BAUXITA, DIASPORO, CORINDON, ETC. Estas se utilizan como inertes previamente calcinadas. Las propiedades ligantes son aportadas por los concretos. Cuando el porcentaje de Al_2O_3 es del 100%, estos materiales resisten temperaturas de $2.050^{\circ} C$.

A medida que aumenta el porcentaje de alúmina, mejora la resistencia del material a la temperatura y se vuelve inerte a escorias básicas o ácidas, ya que la alúmina es anfótera. De igual forma mejora la resistencia a los gases de combustión. Ya que pueden resistir gases oxidantes y reductores. Con el incremento del contenido de Al_2O_3 aumenta la conductividad térmica.

Hoy en día se utilizan cada vez más los refractarios de alta alúmina, desplazando cada vez más a los refractarios elaborados con arcillas naturales.

Esto permite una mayor disponibilidad de los hornos, calderas y elementos de transporte (cucharas de acero y vagones termo), dado el menor consumo de los mismos.

Se utilizan en la fabricación de los revestimientos de Altos Hornos, cucharas de arrabio, cucharas de acero. 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, ya que gobierna sus principales propiedades. En la tabla 2 se presenta los principales componentes químicos de los cementos de aluminatos de calcio.

Tabla 2 Principales componentes químicos de los cementos aluminosos.

Componente químico	Tipo de cemento según contenido de alúmina			
	De 40 %	De 50 %	De 70 %	De 80 %
Al ₂ O ₃	37 – 41%	50 – 53 %	70 – 72 %	79 – 82 %
CaO	36 – 39 %	37 – 39 %	27 – 29 %	16 – 18 %
SiO ₂	3 – 5 %	4 – 5.5 %	< 0.8 %	< 0.4 %
Fe total	14 – 18 %	< 3 %	< 0.4 %	< 0.3 %

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

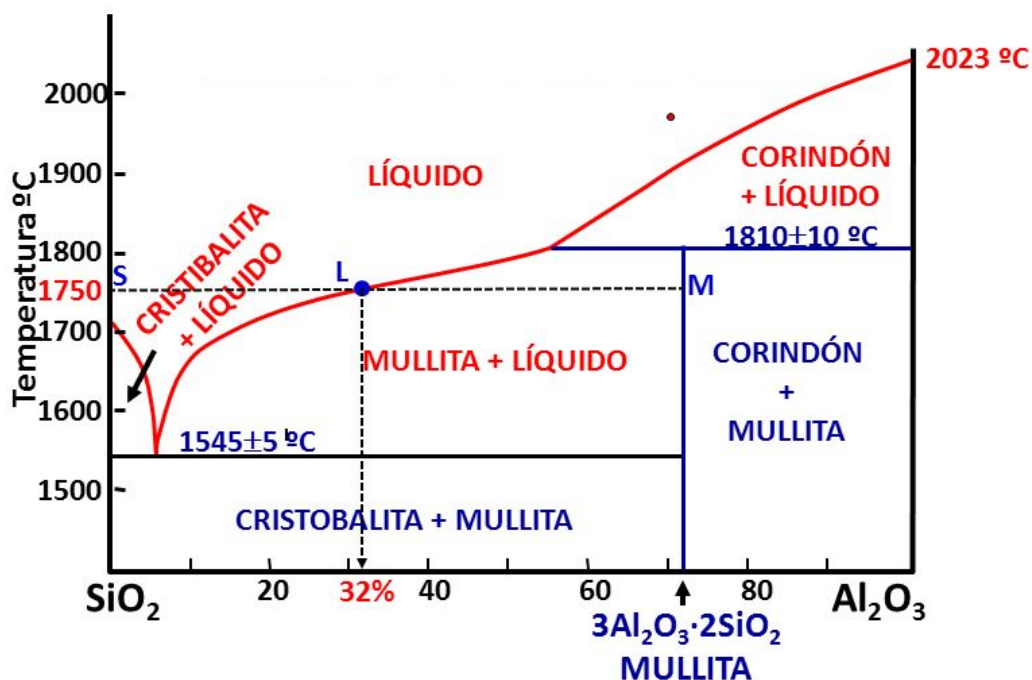


Figura 9 Diagrama de fases SiO₂-Al₂O₃.

Fuente: Bowen&Greig.

El sistema SiO₂-Al₂O₃, se muestra en la figura 9, en el diagrama se observa que a altos % de Al₂O₃ y bajos % de SiO₂. Cuando se alcanza el equilibrio por

encima de 1.470° C es posible la existencia de tres fases cristalinas que son: mullita, cristobalita y corindón.

El punto de fusión de la cristobalita se encuentra a 1.713° C, el punto de fusión de la alúmina a 2.050° C. A 1.585° C existe un eutéctico, es decir, un punto invariante en el cual están en equilibrio: cristobalita, mullita. La mullita es el único compuesto estable dentro de dicho sistema y funde congruentemente a 1850°C, fase de gran importancia debido a que provee varias propiedades a los concretos refractarios sílico-aluminosos, dentro de las más importantes es que da una alta resistencia mecánica, presenta una alta refractariedad y sobre todo una alta resistencia química, por tal motivo es de vital importancia la formación de dicha fase.

La mullita es muy poco frecuente en' la naturaleza. El yacimiento más importante se encuentra en la isla de Mull, en la parte oeste de Escocia, donde se ha formado, en opinión de los geólogos, en condiciones de presión y temperatura muy semejante a las que son necesarias para obtenerla artificialmente.

La mullita es sin embargo muy frecuente en los productos artificiales tales como porcelana, productos a base de fire-clay, refractarios de alto contenido en alúmina, etc. Todos los silicatos de aluminio, hidrosilicatos de aluminio, o mezclas de geles de alúmina y de sílice se transforman en mullita a temperatura elevada.

La mullita observada al microscopio aparece incolora, en forma generalmente de agujas, con una doble refracción media $A = +0,012$, que se pueden reconocer por su forma rómbica (ver figura 8), con estructura cristalina ortorrómbica. El índice de refracción de la mullita varía también al variar el contenido en Al_2O_3 del mineral. Todo esto trae como consecuencia la inseguridad de diferenciación mineralógica al observar una pieza por medios ópticos.



Figura 10 Observación microscópica de la Mullita.
Fuente: Bowen&Greig.

El corindón es un mineral formado por óxido de aluminio, cristaliza en el sistema trigonal, clase hexagonal escalenoédrica. Contiene un 53% de aluminio y las impurezas más habituales son cromo, hierro, vanadio y titanio.

La cristobalita es la fase cúbica de alta temperatura del sílice. Este polimorfismo del cuarzo, se encuentra natural en rocas ígneas, tiene la importancia que permite estudiar científicamente como se forman los cristales en diferentes condiciones geológicas.

2.2.14 Propiedades de Concreto Sílico- Aluminoso

Los cementos de con alta alúmina 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 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 hidróxilos acompañada de una disminución de las resistencias mecánicas.

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 sollicitaciones 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 O₂ 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. 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.

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).

Efecto Spalling: Es el desprendimiento que ocurre en los recubrimientos de los miembros de concreto cuando estos son expuestos al fuego. Este efecto se da rápidamente a los 100 y 150 °C, como un resultado del choque térmico y el cambio de estado del agua intersticial.

Conductividad Térmica: Las pérdidas de calor por radiación en el sistema representan aproximadamente el 10 % del consumo en kcal/kg, por lo cual la capacidad de aislamiento representa un permanente objetivo de control y mejoramiento mediante mejores diseños y sistemas.

Conducción de calor: La transferencia de energía en forma de calor por conducción es un proceso de transmisión de calor basado en el contacto directo entre los cuerpos, sin intercambio de materia, por el que el calor fluye desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que está en contacto con el primero.

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

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 (2012), 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 al análisis del concreto refractario en una caldera acuotubular. Por otro lado, Arias (2012), 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.

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos, según Arias (2012), “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 metódica 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 en calderas acuatubulares.

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 en calderas acuatubulares.

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 refractario, 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 del concreto refractario en calderas acuotubulares.

Obteniendo una serie de estudios y lecturas de diferentes autores, se realiza un análisis que permite conocer la importancia y el comportamiento de este material así como también sus propiedades. También se calculara teóricamente el comportamiento térmico de este material y se comprobara a través de un estudio realizado en SolidWork. 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 y analizar las fallas del concreto refractario en este tipo de calderas.

En este objetivo se analizara a través de estudios y ensayos realizados por otros autores y expertos para luego determinar las zonas más afectadas y las fallas en las calderas acuotubulares, para así cumplir con el objetivo específico número “II”

FASE III: Analizar los aspectos determinantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las caldera acuotubulares.

Se analizará los aspectos determinantes para la prolongación de la vida útil del material, utilizando estudios y ensayos realizados por diferentes autores quedando así cumplido los trabajos y tareas necesarios de la fase “III”.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Este capítulo se enfocó en desarrollar cada uno de los objetivos planteados dentro de la investigación dirigida al análisis del concreto refractario en las calderas acuotubulares, con el fin conocer su importancia, de ubicar las zonas críticas y establecer parámetros para mejorar la eficiencia y su durabilidad.

4.1 Analizar la importancia del comportamiento del concreto refractario en calderas acuotubulares.

Para un análisis más específico se escogió la caldera acuotubular modelo CIT 350 de configuración en delta, de tres pasos de humos, de la Caldaria López Hermanos S.A. (Ver anexo A), con paredes de agua y la tabiquería exterior refractaria, con quemador de gas natural. (Ver figura 11).

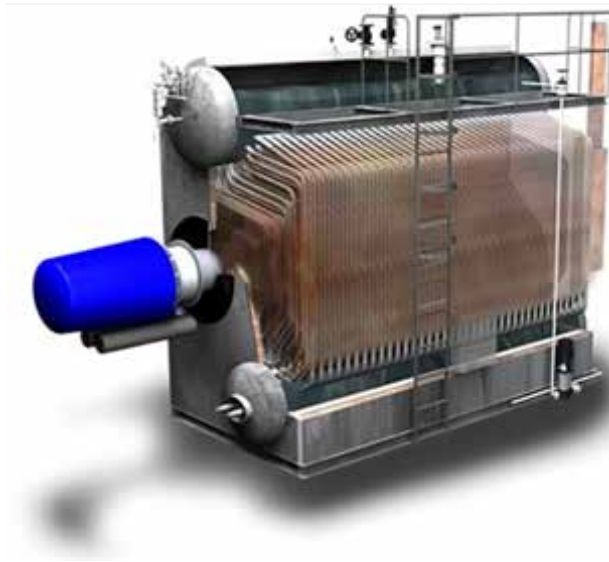


Figura 11 Caldera Acuotubular modelo CIT-350.

Fuente: Catalogo de calderas López Hermanos S.A.

Especificaciones de la caldera (Ver anexo B):

Presión Máxima: 45 Bar

Producción: 10.000 kg*v/h

Altura de pared: 4.65

Largo de pared: 5.6

Área total de pared: 20.608

Espesor de pared: 0.16 validado por la ASTM C-143

Partes de la Caldera Acuotubular CIT-350

En la figura 12 podemos observamos las partes principales de la caldera CIT-350.

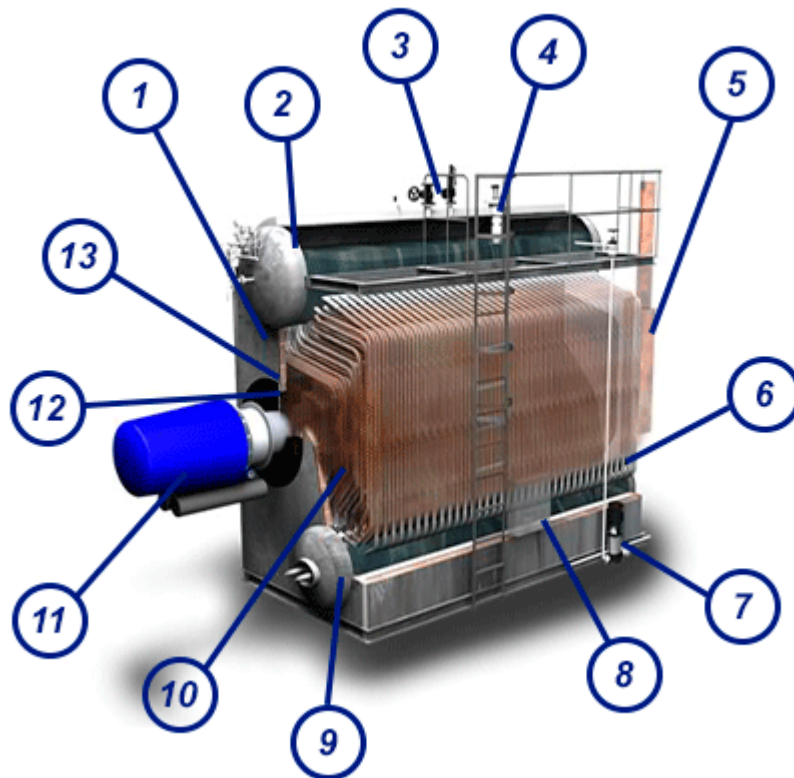


Figura 12 Partes de la Caldera Acuotubular CIT 350.

Fuente: Machado (2019).

1. Cuerpo de la caldera
2. Calderín superior
3. Válvulas de salida de vapor
4. Válvula de seguridad
5. Chimenea
6. Pared de agua
7. Alimentación bomba
8. Controles eléctricos
9. Calderín inferior
10. Tubos de agua
11. Quemador
12. Hogar
13. Aislante concreto refractario

El concreto refractario en esta caldera está ubicado en básicamente toda la parte de la sección de paredes de la cámara de combustión, piso, puerta del hogar y zona de quemador (Ver figura 13).

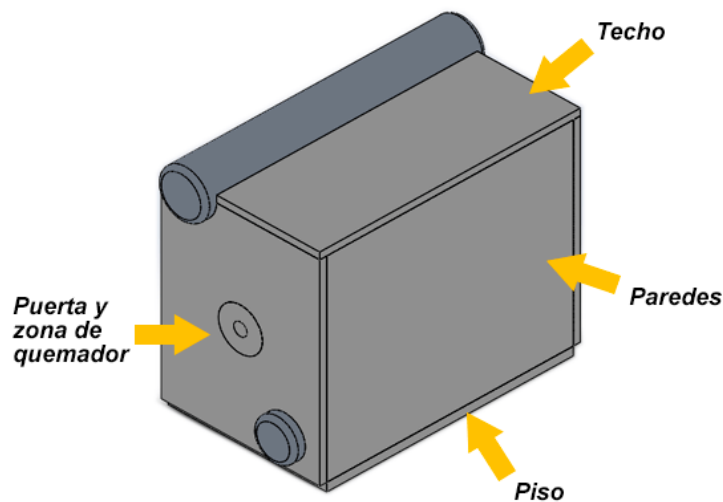


Figura 13 Partes de concreto refractario en la caldera CIT 350.

Fuente: Machado (2019).

Para un análisis del comportamiento del concreto refractario en esta caldera se escogió en concreto de alta alúmina según la ASTM C-27, este concreto es el CONCRAX 1700 de la marca Gamma (Ver Anexo C), con una máxima temperatura de servicio: 1650 °C.

4.1.1 Análisis de la Composición Química

Análisis de la composición química del concreto refractario CONCRAX 1700 proporcionado por el fabricante según la ASTM C – 401. (Ver tabla 3).

Tabla 3 Composición Química del concreto refractario CONCRAX 1700.

Compuesto	%
	84.1
	5.7
Si	5.1
	2.7
	1.6
MgO	0.4
Álcalis	0.4

Fuente: Catalogo de concretos Gamma.

La alúmina tiene un elevado punto de fusión de 2072 °C, alta dureza cualidades que lo convierten en un material cerámico y aislante eléctrico ideal para trabajar en condiciones de altas temperatura.

Aporte al concreto refractario:

- Alta dureza
- Baja conductividad eléctrica
- Bajo coeficiente de dilatación

- Excelente resistencia a la corrosión
- Bajo coeficiente de fricción
- Resistencia a altas temperaturas
- Alta resistencia mecánica

Si

La sílice mejora el fluido refractario vertido, lo que reduce el volumen de agua usada, se adapta fácilmente a la forma y aumenta la eficiencia de la producción. Tiene un punto de fusión de 1713 °C por lo que ofrece intensidad en la ganancia refractaria.

Aporte al concreto refractario:

- Resistencia de temperatura elevada
- Resistencia al choque térmico
- Reducción de agua usada

El óxido de hierro posee un alto punto de fusión 1565 °C, es insoluble y no conduce electricidad e impide la formación de bandas de conducción. Puede ser de color azul, verde, rojo y violeta, por lo que se usa como pigmento en los concretos.

Aporte al concreto refractario:

- Aislante eléctrico
- Pigmentación

El titanio es el cuarto material más abundante del planeta destaca por su resistencia a la corrosión y por su dureza. Posee un punto de fusión de 1668 °C y densidad de 4,54 gm/ .

Aporte al concreto refractario:

- Resistencia a la corrosión
- Alta refractariedad
- Poca conductividad térmica y eléctrica.

Tiene la capacidad de fraguar y endurecer con la adición de agua. Pueden ser vaciados en la obra misma en forma monolítica, o usarse para colar piezas de rápida aplicación. Alto punto de fusión de unos 2572 °C.

Aporte al concreto refractario:

- Retención de agua
- Resistencia a la compresión

MgO

El óxido de magnesio es un sólido blanco que no posee solubilidad en agua con un punto de fusión de 2852 °C.

Aporte al concreto refractario:

- Absorción de la humedad y dióxido de carbono.

Álcalis

Contiene una cantidad relativa pequeña de sodio, potasio o ambos. Su influencia al concreto es significativa. Constituye un factor esencial en la reacción álcali-sílice, cuando menor es el contenido de álcalis, menor es el riesgo de expansión debido a la RAS.

Aporte al concreto refractario:

- Absorción de la humedad y dióxido de carbono.
- Evita la expansión del concreto

4.1.2 Análisis de la Resistencia Química

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.

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.

El hierro presente en el refractario puede reaccionar con el monóxido de carbono, un ataque químico que causa spalling estructural o desprendimiento en capas del refractario. Las propiedades del revestimiento refractario pueden cambiar al reaccionar con estos componentes del combustible y causar como consecuencia erosión, exfoliación y/o corrosión del material.

Permeabilidad al gas

Determina la particularidad de un cuerpo sólido poroso al paso de gas en un sentido, por efecto de una pendiente de presión. Los gases influyen considerablemente en la duración del refractario.

Los ejemplos más conocidos son:

- Efecto del monóxido de carbono de 400 -500° C en los concretos sílico-aluminosos conteniendo óxido de hierro. Bajo la influencia catalítica del óxido de hierro, se produce la descomposición del gas CO y acumulación del carbono en el interior del ladrillo, que pueden conducir a reblandecer la estructura del ladrillo.
- Efecto del metano (CH₄) por encima de los 900° C. También aquí se produce una acumulación del carbono en partículas de óxido de hierro, lo que provoca el reblandecimiento de su estructura.
- Efecto de la atmósfera reductora y oxidante variable a los productos que contienen mineral de cromo, a unos 1.000 o más grados centígrados. Se producen reblandecimientos lentos y destrucciones de la estructura.

Resistencia a la corrosión/erosión

En los procesos de desgaste de refractarios en instalaciones de alta temperatura están involucrados a la vez tres mecanismos de corrosión: disolución, penetración y erosión.

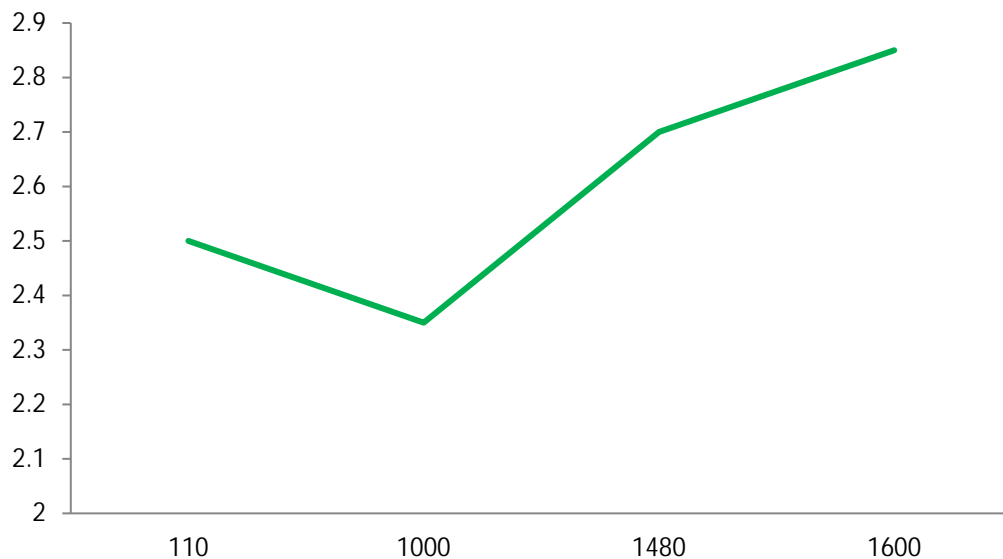
En cuanto al mecanismo de disolución o desgaste químico, es la velocidad de disminución del espesor del refractario y consiste en el transporte de materia que suele estar controlado por la difusión a través de la capa de escoria que está en contacto con el material refractario.

Por otra parte, pueden existir también desgaste termomecánico o por penetración y desgaste tribológico o por erosión.

El daño por corrosión puede ser definido como el desgaste por pérdida de espesor y masa de la cara expuesta del refractario como consecuencia del ataque químico, como las escorias del combustible del quemador. Los concretos sílico-aluminosos, la resistencia a la abrasión disminuirá con el incremento del porcentaje de Alúmina, y aumentará su resistencia a mayores temperaturas.

4.1.3 Análisis de la Densidad volumétrica (gr/)

La grafica 1 indica el cambio de los valores de la densidad volumétrica a diferentes temperaturas. Estos datos son proporcionados por el fabricante, se basan en los resultados promedio de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial, utilizando los procedimientos descritos en la norma ASTM C-134 en base a la medición de las dimensiones de una muestra y su peso después del secado según la norma ASTM C-20.



Gráfica 1 Densidad volumétrica del Concreto Refractario CONCRAX 1700.

Fuente: Machado (2019).

Algo que influye directamente en la densidad del concreto es la cantidad de agua en la preparación del material. Para este concreto es recomendado de 95 a 100

de agua por Kg de material seco según la ASTM C-860 para este análisis se tomó 95 / Kg. En la gráfica se muestra que entre los 110 °C y los 1000 °C existe una pequeña disminución de la densidad debido al proceso de secado del concreto lo cual provoca cambios volumétricos y por tanto repercute directamente en la densidad y al aumentar esta temperatura entrando unos 1400 °C se va formando la mullita mencionada en la figura 8 lo que permite el incremento de la densidad, esta fase de gran importancia debido a que provee otras propiedades a los concretos refractarios sílico-aluminosos, dentro de las más importantes es que da una alta resistencia mecánica, presenta una alta refractariedad y sobre todo una alta resistencia química, por tal motivo es de vital importancia la formación de dicha fase.

Para muchos refractarios la densidad volumétrica proporciona una indicación general de la calidad del producto, a mayor densidad, menor porosidad. Esto le da mayor resistencia al ataque químico y mayor resistencia a la abrasión.

4.1.4 Análisis de la Porosidad

La porosidad en el concreto refractario es de gran importancia en sus características; con menor porosidad, se logra mayor resistencia al ataque químico y a la abrasión, debido a que hay menos penetración en la cara expuesta.

A menor porosidad también se logra más altas resistencias a compresión; esto es debido a que los poros reducen el área de la sección a través de la cual se aplica la carga y ellos actúan como concentradores de tensión.

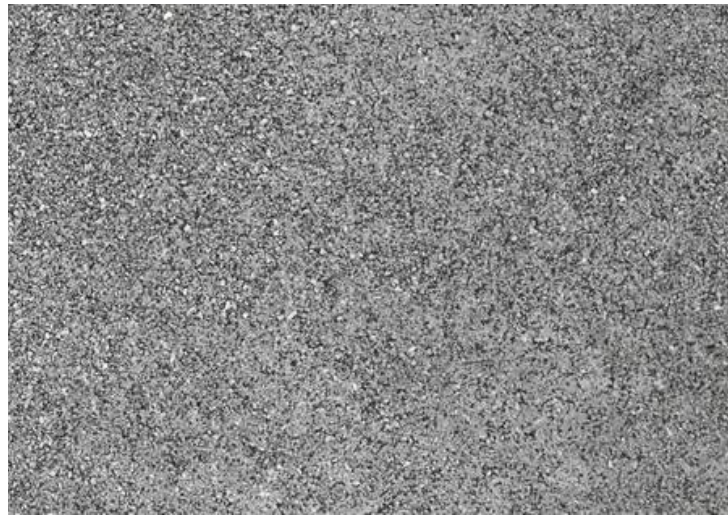


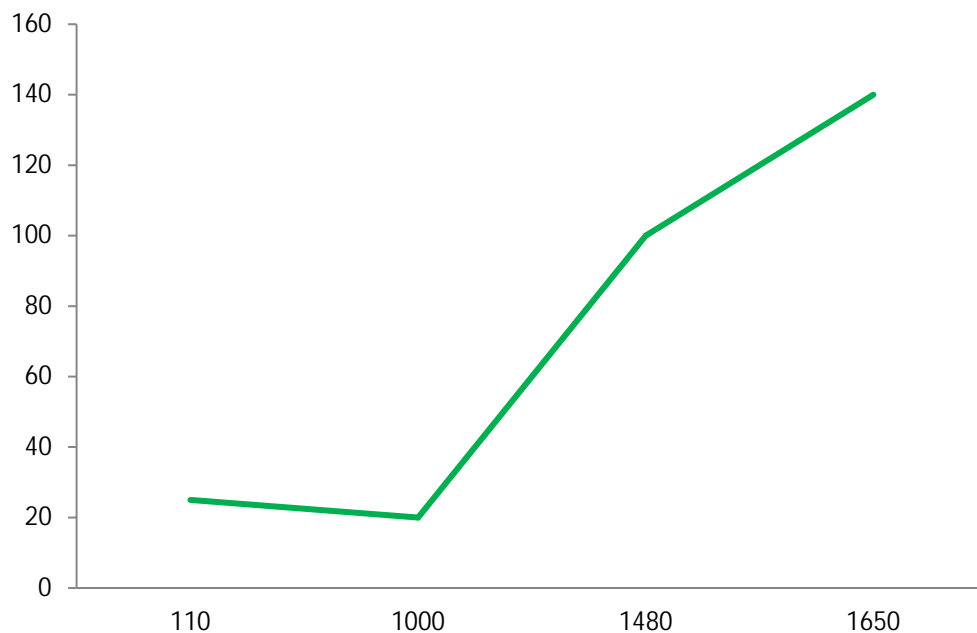
Figura 14 Porosidad en concretos refractarios.

Fuente: Cerámica Fandom.

Para calcular la porosidad en los concretos refractarios se usa el método de Arquímedes, utiliza la diferencia entre el peso de la muestra en seco y luego de ser sumergida en agua (peso de saturación), para obtener el volumen de poros abiertos y calcular la porosidad aparente. Este método se describe detalladamente en la norma ASTM C-20.

4.1.5 Análisis de resistencia mecánica a la compresión en frío

La resistencia mecánica en frío es muy superior a la que tendrá el material a alta temperatura, esta refleja los tratamientos térmicos que recibe el concreto en su manufactura y como afectan a la porosidad, densidad, refractariedad y resistencia a la abrasión. Para su determinación se emplea la Norma ASTM C-133 que implementa ensayos de resistencias y así como la determinación del módulo de la elasticidad y carga de rotura a flexión en probetas.



Gráfica 2 Resistencia mecánica en frío del concreto
Refractario CONCRAX 1700.

Fuente: Machado (2019).

En la gráfica 2 se observa que entre los 110 °C y los 1000 °C la resistencia a la compresión del concreto de 25 a 20 Mpa debido al proceso de secado del concreto. Al aumentar esta temperatura entrando al proceso de quemado, se forma la mullita que logra aumentar la resistencia a unos 100 Mpa para la temperatura de 1400 °C

4.1.6 Análisis Térmico

Para este análisis térmico se tomó una sección de pared lateral del hogar de la caldera CIT-350 fabricada con el concreto refractario CONCRAX 1700. (Ver figura 15).

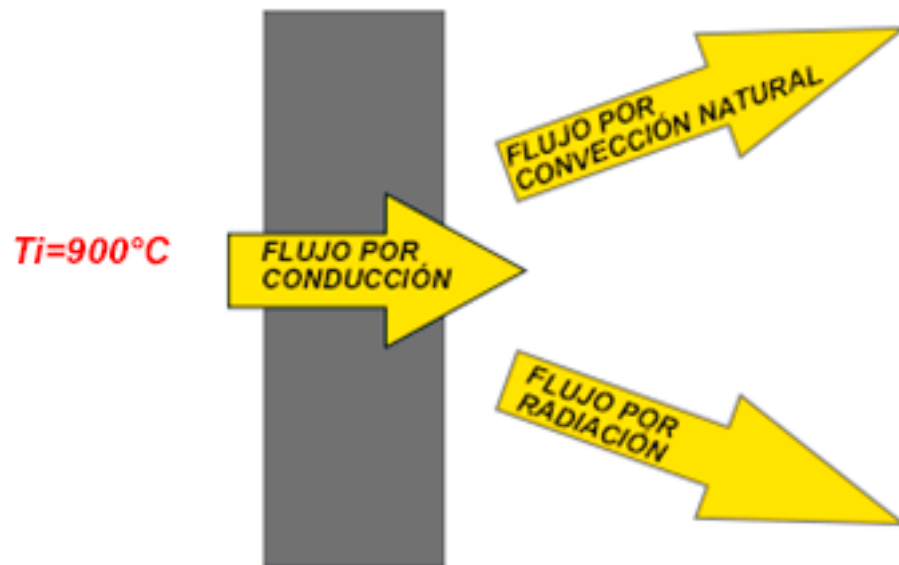


Figura 15 Modelamiento del Flujo de Calor en la pared del refractario.

Fuente: Machado (2019).

De acuerdo a la figura 13 se puede observar que el flujo de calor por conducción es igual a la suma de flujo de calores por convección natural y radiación, dicho balance de calor se observa en la siguiente ecuación

$$= +$$

4.1.6.1 Cálculo del flujo de calor unidimensional por conducción de la pared Conductividad térmica.

En la tabla 4 se tiene lo datos de conductividad versus temperatura para concretos refractarios de alta alúmina >66%.

Tabla 4 Conductividad Térmica para concretos refractarios de alta alúmina.

TEMPERATURA CONCRETO REFRACTARIO		CONDUCTIVIDAD TERMICA
°F	°C	W/m °C
600	315.56	1.70
1200	648.89	1.77
1500	815.56	1.78
1800	982.22	1.80
2200	1204.44	1.80
2600	1426.27	1.96

Fuente: (Harbison Walker, 2005).

Para la Temperatura de la cara caliente de concreto se asume una temperatura de operación de la caldera de 900 °C y para la cara fría 290 °C.

$$= 900 \text{ °C}$$

$$= 290 \text{ °C}$$

La conductividad térmica es referida a la temperatura promedio de la cara caliente y fría del concreto.

$$= (900 \text{ °C} + 290 \text{ °C})/2 = 596 \text{ °C}$$

Para la temperatura promedio calculada, el coeficiente de conductividad de acuerdo a la tabla 4:

$$K = 1,75 \text{ —}$$

Aplicando la ley de Fourier. (Cengel & Ghaar, 2012, p.18.)

Dónde:

: Calor por conducción, (W)

: Conductividad térmica del material, (W/(m °C))

T₁: Temperatura de superficie lado caliente. (°C)

T₂: Temperatura de superficie lado frío, (°C)

e: Espesor del material, (m)

Para este cálculo se toma las temperaturas de la cara caliente y fría de la pared y el coeficiente de conductividad térmica del concreto ya calculado. Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$\frac{Q}{A} = \frac{k(T_1 - T_2)}{e}$$

4.1.6.2 Cálculo del flujo de calor por convección natural

Para la transferencia de calor por convección natural es necesario evaluar el número adimensional de Grashof cuyo valor indica el tipo de flujo si es laminar o turbulento.

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_a) L^3}{\nu^2}$$

Dónde:

: Número de Grashof

: Aceleración gravitacional, (/)

: Coeficiente de expansión volumétrica, (1/k)

: Temperatura de la superficie, (°)

: Temperatura del ambiente, (°)

: , ()

: Viscosidad cinemática del fluido, (/)

Para la evaluación de las propiedades del fluido deben evaluarse a la temperatura promedio de la superficie.

$$= 0.5 (\quad + \quad)$$

A continuación se muestra los cálculos para una Temperatura 290° C en la cara fría de la pared, el cual fue asumido como la temperatura de balance de calor, a continuación se muestra el procedimiento de cálculo con dicha temperatura el cual tiene el criterio para realizar el balance de calor.

= Temperatura de pared cara fría.

$$= 290^\circ$$

$$= T$$

$$= 25^\circ$$

$$= 0.5 (\quad + \quad) = 0.5 (290 + 25)$$

$$= 157.5^\circ$$

Para identificar las propiedades termodinámicas de la temperatura promedio se utiliza la tabla de propiedades Termodinámicas del aire a la presión de 1 atm. (Cengel & Ghajar, 2012, p. 860).

$$: 1$$

$$: 157.5^\circ$$

$$: 9.8 (\quad / \quad^2)$$

$$(-)$$

$$C_p: 1016 \text{ —}$$

$$K: 0,035 \text{ —}$$

$$: 2,946 \cdot 10^{52/}$$

$$: 0,7017$$

(altura de la pared lateral de la caldera)

Reemplazando en la ecuación de Grashof:

—



Se puede observar que el número de Grashof se encuentra dentro del rango para flujo turbulento, por la siguiente definición:

$$(\quad) >$$

Evaluando Rayleigh:

$$Ra = Gr \times Pr$$

$$Ra = \quad \times 0.7017$$

$$= 4,902$$

Evaluando Nussel:

$$\frac{hL}{k} = \frac{0.52}{0.025} = 20.8$$

$$= 20.8$$

Evaluando coeficiente convectivo en la pared:

$$h = \frac{k}{L} \times 20.8 = \frac{0.025}{0.025} \times 20.8 = 20.8$$

$$= 20.8$$

Para determinar el flujo de calor por convección se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = hA(T_s - T_\infty)$$

$$= 20.8 \times 0.025 \times (100 - 20) = 4.16$$

4.1.6.3 Cálculo del flujo de calor por radiación

: Calor perdido por Radiación, W/m²

: 0.93 (Emisividad para concreto según el manual)

To: 563 °K (temperatura de la superficie exterior)

Ta: _____ °K temperatura del aire circundante)

4.1.6.4 Resultados del balance de flujo de calor en la pared

Se puede apreciar que el valor de flujo de calor son muy aproximados por lo que el valor asumido de temperatura del lado caliente y la temperatura del lado frío son correctas para el balance de flujo de calor en la pared de concreto refractario en la caldera. (Ver tabla 5).

Tabla 5 Resultados del Balance del Flujo de Calor - pared.

Flujo de calor (convección natural, radiación)	Flujo de calor (conducción)
+	
6472,955—	—

Fuente: Machado (2019).

4.1.6.5 Cálculo de la potencia calorífica en la pared

Para determinar la Potencia Calorífica se determinó el área exterior expuesta al medio ambiente en donde se produce la transferencia de calor por convección natural más radiación, para luego ser multiplicado por el flujo calorífico:

Para el modelamiento Total de la columna el área de transferencia es:

Área total de la pared: 5.6×4.65

Área total de la pared: 20.608

+)x

Por lo tanto la Potencia calorífica para el modelamiento de la pared es:

—



4.1.6.6 Validación de resultados del balance de calor de la pared

Para la validación se comparó los resultados de temperaturas, Flujo de calor y Potencia Calorífica, para lo cual se siguió los siguientes pasos:

1. Modelamiento

Se modelo una sección de pared lateral de la caladera CIT 350.

2. Creación de estudio térmico

Se utilizó el estudio Térmico del Complemento de Solidwork Simulación.

3. Asignación de material

Para el modelo se asignó el mismo material (CONCRAX 1700), para ello se creó manualmente de acuerdo a la conductividad térmica vs Temperatura. (Ver figura 16).

4. Aplicación de cargas térmicas

Se aplicó cargas térmicas a la pared como el coeficiente convectivo exterior, coeficiente conductivo, emisividad externa, temperaturas interna y ambiental, para obtenerlas temperaturas, flujo de calor y potencia Calorífica.

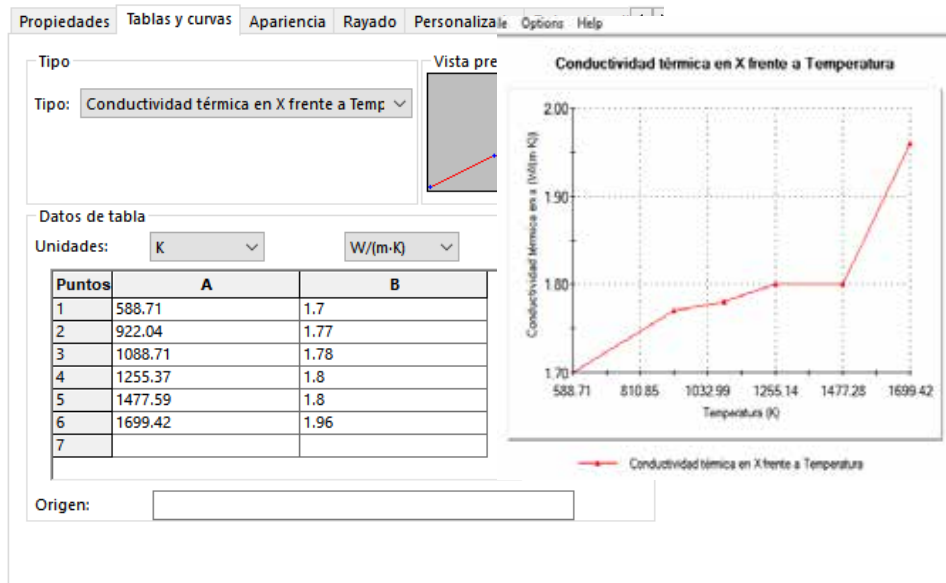


Figura 16 Conductividad Térmica Vs Temperatura CONCRAX 1700.

Fuente: Machado (2019).

5. Resultado de gradiente de temperatura

En la Figura 17 se observa la temperatura máxima de la cara caliente de 900 °C, Se puede apreciar que la temperatura mínima en la cara fría es de 290 °C.

6 Resultado de Flujo de calor de temperatura

En la Figura 18 se muestra el resultado de Flujo Calorífico donde se aprecia un mínimo de 6.358 / 2, además se tiene un máximo de 6714 / 2. Además en la figura 18 se observa un flujo de calor mayoritario de color verde de valor 6668 / 2, siendo aproximado al flujo calorífico calculado de valor 6619.52 / 2.

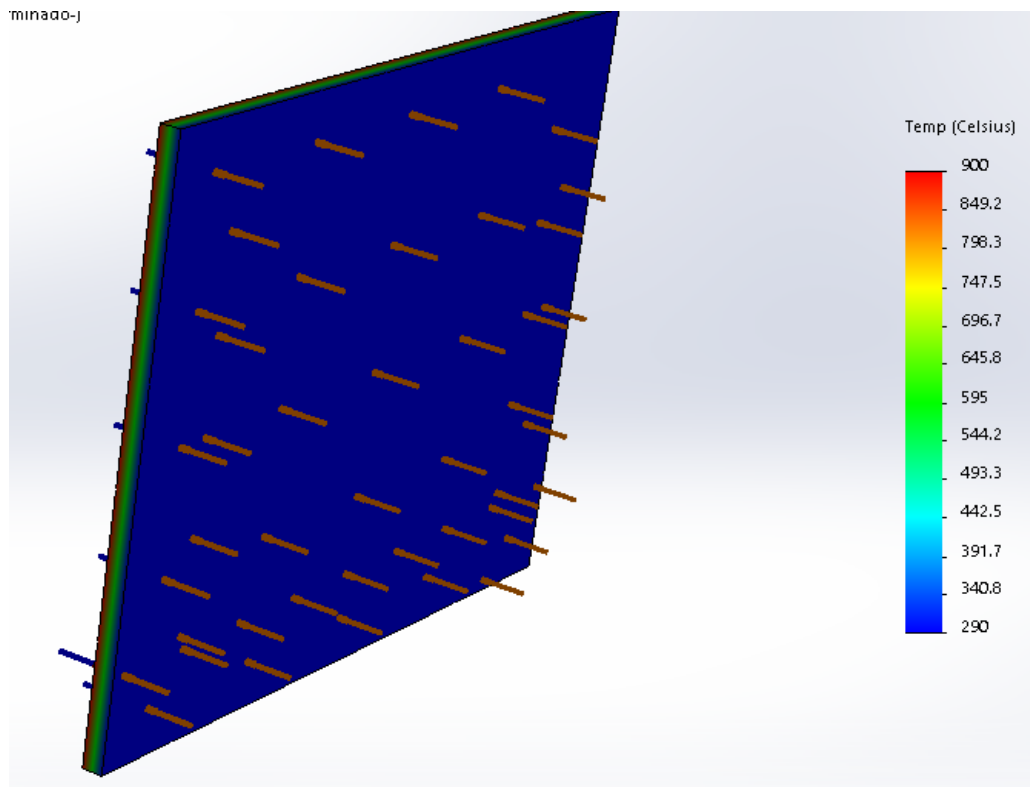


Figura 17 Gradiente de Temperatura de la pared.
Fuente: Machado (2019).

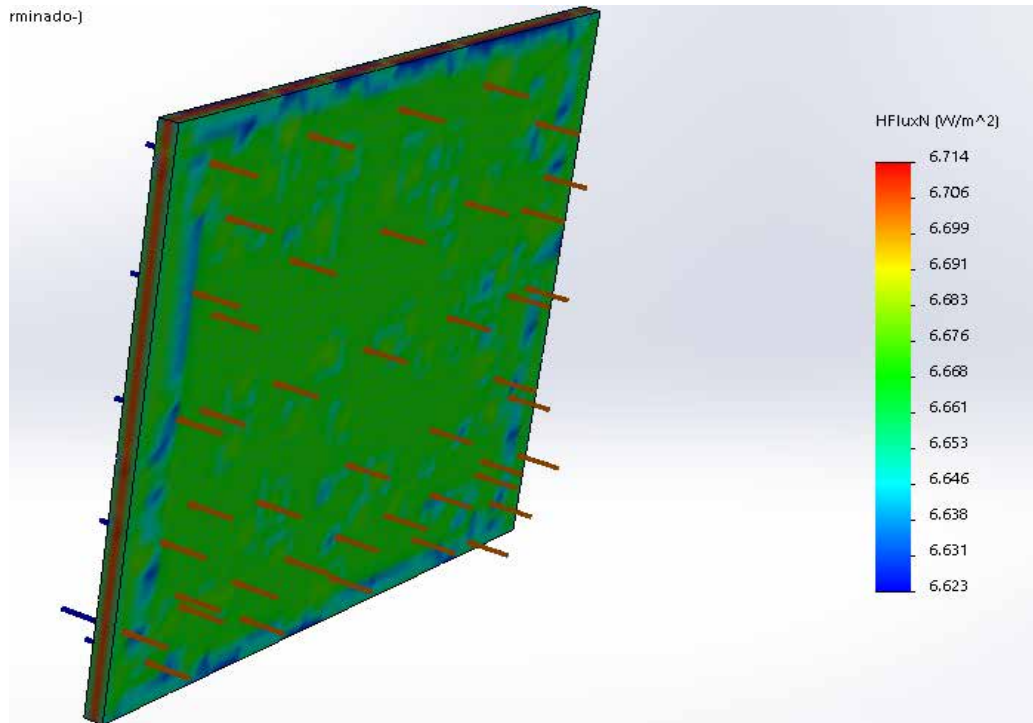


Figura 18 Gradiente de Flujo de calor de la pared.
Fuente: Machado (2019).

Tabla 6 Validación de resultados

	Resultados Solidwork	Resultados Por cálculos
Pared	6668 —	—

Fuente: Machado (2019).

Este tipo de revestimiento se apoya sobre las construcciones metálicas de la armazón, o está suspendida en los tubos de la pantalla de agua. Debe dejar pasar la cantidad mínima del calor al ambiente; al mismo tiempo, la superficie exterior no debe superar los 55 a 60 °C, si la temperatura ambiente oscila entre 28 a 32 °C. Sabiendo esto se calculó el flujo de calor a diferentes temperaturas en la cara caliente de la pared refractaria, y una temperatura de la pared fría a 60 °C.

Tabla 7 Flujo de calor y potencia calorífica del concreto CONCRAX 1700 en la pared refractaria.

Temperatura °C	Flujo de calor —	Potencia calorífica W
100	412.6	2604
200	1453	5208
300	2507	7812
400	3574	10.416
500	4653	13.020
600	5746	15.624
700	6800	18.228
800	7950	20.832
900	9046	23.436
1000	10.168	26.040
1200	12.432	31.248
1450	15.347	37.758
1600	17.312	41.664

Fuente: Machado (2019).

4.1.7 Análisis de la Alta Refractariedad

Debido a la heterogeneidad de su composición y estructura, los refractarios no exhiben un punto de fusión uniforme. La refractariedad está caracterizada por la determinación óptica del equivalente del cono pirométrico (de acuerdo con Seger), es decir: temperatura en la que la punta de un cono fabricado con el material de la muestra se ablanda hasta el punto de tocar la base de la placa. Se utiliza la medida de cono Seger, medida correspondiente a la norma ASTM C-24 (Cono Pirométrico Equivalente).

El concreto refractario CONCRAX 1700 posee un CPE >37 establecido por ensayos realizados por el fabricante, por lo que se puede determinar que temperatura del punto de reblandecimiento de este material refractario es de 1825 °C (Ver tabla 8).

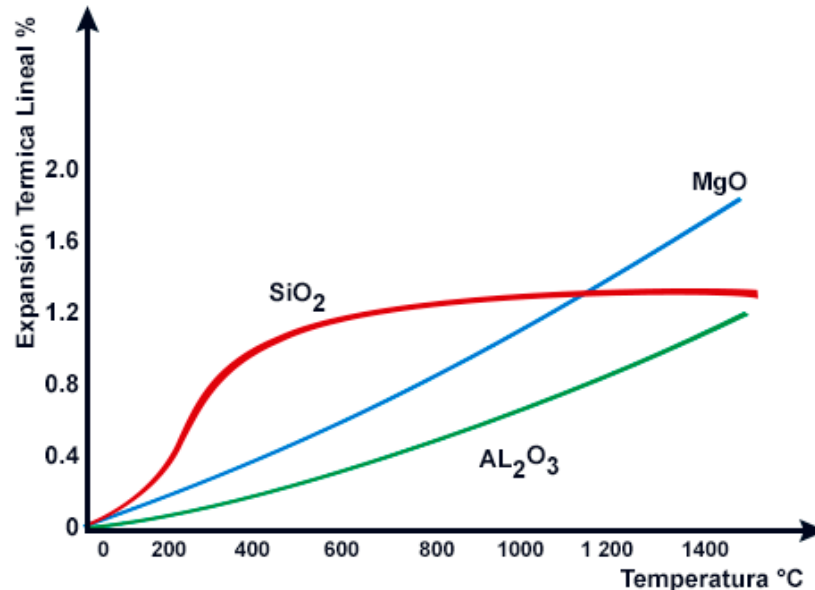
Tabla 8 Temperaturas fusión de conos pirométricos.

1690°C	3074°F	31
1710°C	3110°F	32
1730°C	3146°F	33
1750°C	3182°F	34
1770°C	3218°F	35
1790°C	3254°F	36
1825°C	3317°F	37
1850°C	3362°F	38
1880°C	3416°F	39
1920°C	3488°F	40
1960°C	3560°F	41

Fuente: Cerámica Fandom.

4.1.8 Análisis de la Dilatación Térmica

Es de gran importancia conocer los coeficientes de dilatación del material refractario, a la temperatura de trabajo en cada caso (Ver gráfica 3). La alta temperatura que soporta la cara interior del concreto, en la zona crítica, puede producir 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).



Gráfica 3 Línea de expansión térmica de materiales refractarios.

Fuente: Machado (2019).

Los cambios de temperatura bajo los 650 °C, son fatales para el sílice por su gran coeficiente de dilatación lineal como se observa en la gráfica 3, por lo cual, hay que prevenirlas con velocidades de calentamiento suaves y con más énfasis donde se producen los cambios alotrópicos de la sílice que van acompañados de cambios de volumen. Es fundamental elevar la temperatura en etapas.

4.1.9 Análisis Cambio lineal aparente

Después del calentamiento a alta temperatura y enfriamiento final, quedan frecuentemente modificaciones de longitud, también llamadas como dilataciones o contracciones. Si un concreto refractario experimenta una contracción posterior excesiva, crecen las juntas de expansión, la mampostería se afloja y se producen fugas. En caso contrario, la dilatación posterior también peligrosa, porque pueden producirse asimismo roturas de la mampostería por cargas de presión.

4.2 Identificar las zonas críticas y analizar las fallas del concreto refractario en este tipo de calderas.

En función de estudios mencionados y un plan de mantenimiento de una caldera acuotubular debido al historial de fallas en el refractario (Ver Anexo D), se determinaron dos zonas específicas de la caldera, donde se producen fallas de forma frecuente relacionadas con los concretos refractarios. Estas zonas son: la zona de quemadores, puerta y el revestimiento del piso de la caldera.

La consecuencia de la falla en estas zonas, 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.

4.2.1 Falla zona de quemador y puerta del hogar de la caldera

En este modelo de caldera el área de los quemadores se encuentra justo en la puerta del hogar (Ver Figura 19 y 20), esta zona es más caliente que el área central o superior en calderas. Las condiciones de temperatura, flujo de combustible y aire, son extremas comparado con el resto de la estructura o proceso en una caldera (Ver Figura 21).

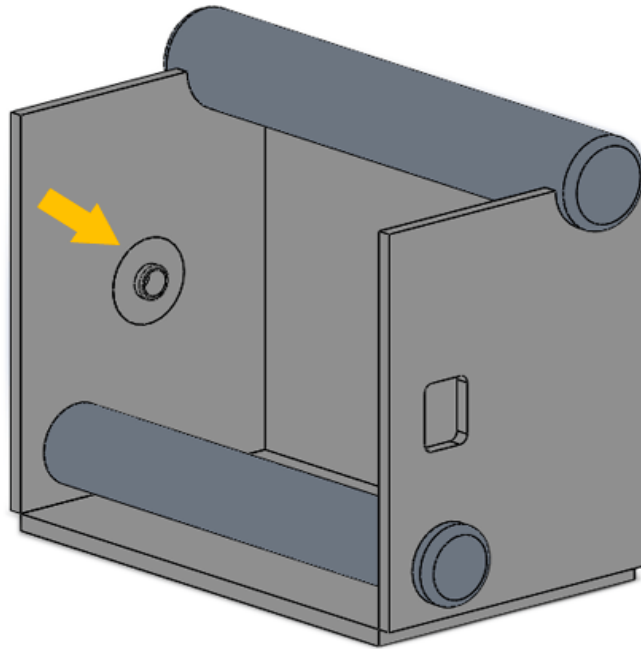


Figura 19 Ubicación de la tapa de hogar y zona de quemador de la caldera CIT 350.
Fuente: Machado (2019).

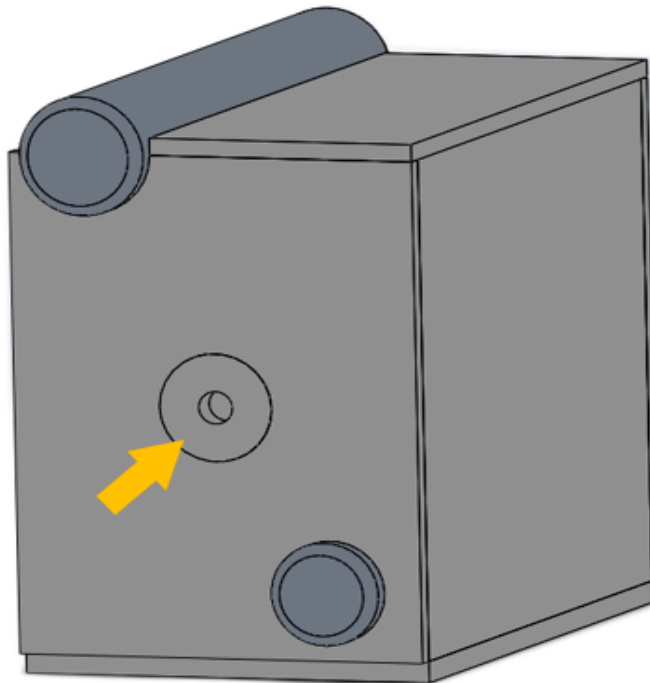


Figura 20 Ubicación de la tapa de hogar y zona de quemador de la caldera CIT 350.
Fuente: Machado (2019).

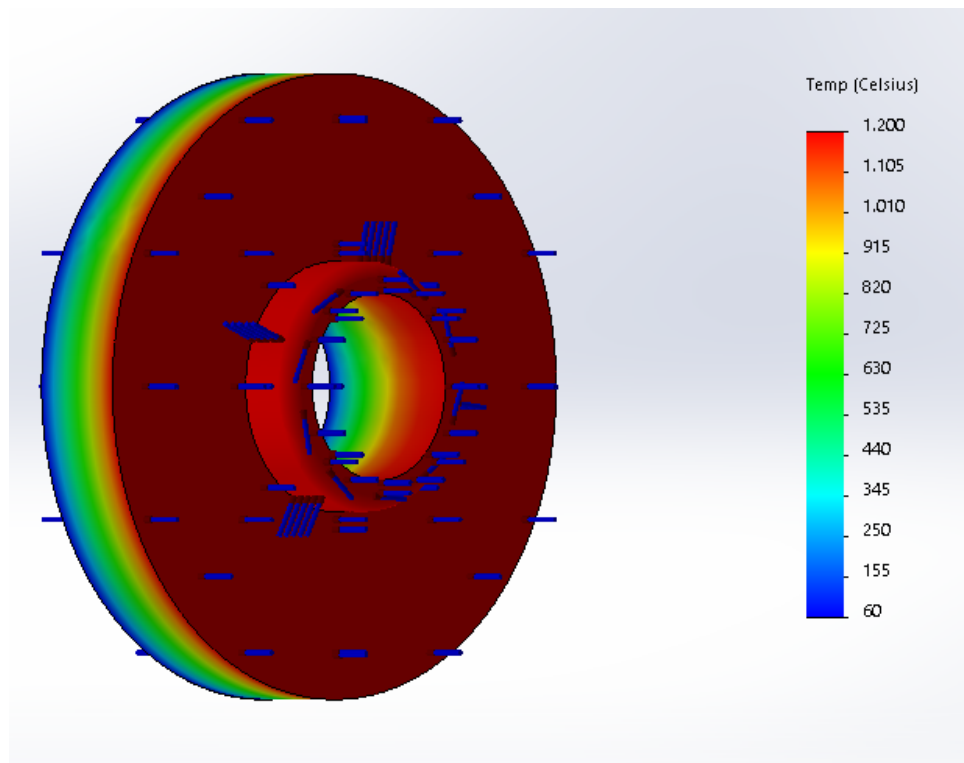


Figura 21 Gradiente de temperatura de la tapa de hogar y zona de quemador de la caldera CIT 350.

Fuente: Machado (2019).

Un anclaje erróneo o la falta de este sistema causa desprendimiento del concreto refractario por el movimiento natural de la estructura al calentarse y enfriarse durante operación normal, lo que hace esta zona una de las más críticas en este tipo de caldera.

4.2.2 Falla en revestimiento periférico del piso de la caldera

La falla en esta zona, ocurre cuando la escoria del combustible fluye hacia el interior de la cámara muerta inferior, por el perímetro del piso del horno.

Para validar esta información se presenta el estudio titulado **“Evaluación de los materiales refractarios utilizados en las calderas de la planta ampliación Tocoa”**, realizado por Pinto Alfonso (2015), en el departamento de Ingeniería De Materiales, Universidad Simón Bolívar. Se analiza que en calderas que emplean fuel oíl, se determinó que la temperatura de ablandamiento de la escoria formada por el

combustible es de 1215° C. Ya que se ha observado que la masa de escoria alcanza a fundirse en las calderas, se podría hacer una comparación con la bibliografía consultada e inferir que las temperaturas en el piso de la caldera, superan esta temperatura. El derramamiento del combustible podría incrementar la temperatura por encima de las temperaturas de trabajo del moldeable instalado, lo que reduce su capacidad de mantener su resistencia mecánica y resistencia al ataque químico.

Los largos tiempos de trabajo de las unidades y el alto consumo de combustible, producen gran acumulación de escoria sobre el piso del horno, que no solo ataca químicamente el material, sino que a su vez produce fuerzas de compresión sobre el material. En la figura 22 se muestra una imagen de la escoria solidificada en el piso del horno.



Figura 22 Vista de la escoria solidificada en el piso de la caldera.

Fuente: Evaluación de los materiales refractarios utilizados en las calderas de la planta ampliación Tocoa, Pinto Alfonzo (2015).

4.3 Analizar los factores determinantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las calderas acuotubulares.

La garantía de los fabricantes de materiales refractarios basando sus apreciaciones en su excelente calidad son valederas, pero en un 40 %, que es la valoración de la influencia de la calidad de fabricación; el 60 % restante dependerá exclusivamente de los factores mencionados en este análisis para la prolongación de su vida útil.

Planificación, diseño e instalación

La planificación, diseño y colocado del refractario deber ser realizado por un equipo de especialistas y con participación del personal que tendrá a su cargo la operación de la planta. El diseño del colocado debe planificarse minuciosamente, tomando en cuenta toda la información acumulada referente a las condiciones dinámicas de trabajo, las exigencias de la puesta en marcha, los medios que generalizan su duración y estabilidad, y las características de los materiales empleados que influyen en las tensiones a que será sometido el refractario y que deberá asimilar.

Influencia de la cantidad de agua en las propiedades

Las cantidades de agua utilizadas en la preparación del moldeable y el procedimiento de instalación están ligados a la resistencia mecánica del moldeable. A medida que aumenta la cantidad de agua, la consistencia se hace más fluida y la resistencia disminuye.

Un método fácil y rápido para medir la consistencia de una mezcla de moldeable, es el método de “bola en mano” (“ball in hand”) establecido en la norma ASTM C-860. Es la técnica más usada para determinar la fluidez de una mezcla. Se forma una bola de moldeable y se lanza entre 15 y 30 cm. de altura sobre la misma mano. Cuando cae, ésta se debe adaptar a la forma de la mano. Si permanece su forma esférica, hace falta agua. Si la mezcla fluye entre los dedos, tiene exceso de agua.

Curado

Durante la fabricación de los concretos refractarios, éstos liberan calor, reacción exotérmica, como consecuencia de reacciones de hidratación que ocurren durante la fragua y curado de los mismos.

No se debe confundir la fragua con el curado, pues la fragua es una reacción de endurecimiento inicial, que ocurre normalmente en los primeros 60 minutos después de haber agregado el agua en el concreto. Por tanto la fragua es la reacción inicial de la fase del curado.

El curado es el periodo en el cual ocurre una secuencia de reacciones químicas, otorgando al producto sus características físicas en frío. Estas reacciones son lentas y necesitan de por lo menos 24 horas para ser completadas.

Para que el curado se procese normalmente, debe considerarse dos parámetros principales: la temperatura y el tiempo.

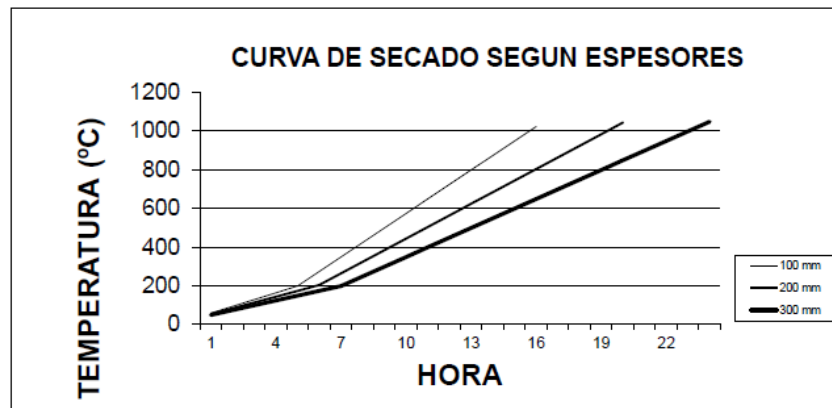
De acuerdo a la cantidad de cemento utilizado para la fabricación del concreto, las reacciones exotérmicas (30 minutos después de agregar el agua) pueden lograr temperaturas superiores a los 70 °C y que también está influenciado por la reactividad del producto, por la temperatura ambiente y del agua, del área a concretar y del volumen aplicado.

Secado

Para garantizar un fraguado hidráulico completo es necesario mantener húmedo el hormigón durante cierto tiempo, regándolo con agua. Hechas estas operaciones, puede ponerse inmediatamente en servicio, teniendo cuidado de calentar suavemente al principio para hacer desaparecer el resto de humedad.

En las partes revestidas con concreto refractarios, el procedimiento es muy sencillo. Los hormigones refractarios se curan después de su instalación, bien rociando la superficie con agua después de quitado el encofrado, o bien manteniendo la superficie de hormigón cubierta con sacos húmedos. En muchas calderas el segundo procedimiento es el más conveniente y fácil. Normalmente, el "curado" debe comenzar de 4 a 6 horas después de verter el hormigón en el encofrado y debe

continuar de 18 a 24 horas. Es muy conveniente para los hormigones refractarios que después de "curados" se les deje secar al aire el mayor tiempo posible, dando lugar a que se evapore parte del exceso de humedad. Para proceder al encendido de los hornos revestidos con hormigón refractario no existe un plazo máximo, siendo mejor cuanto más se tarde. Cuando se calienta por primera vez un revestimiento de hormigón debe procurarse que la temperatura suba lentamente y por igual. En ningún caso debe subir más de 50 °C a la hora. Algunas veces resulta beneficioso el empleo previo de calentadores eléctricos, colocados dentro de la caldera, para las primeras fases de secado y calentamiento, antes de comenzar el verdadero encendido, que se efectúa con los quemadores.



Gráfica 4 Curva de secado de concretos refractarios según espesores.

Fuente: Tecnología SOL-GEL.



Figura 23 Rotura y desprendimiento de refractario por no respetar tiempos de secado refractario.

Fuente: Mantenimiento de calderas industriales, Boch 2013.

Anclajes

Un adecuado anclaje es determinante para la vida útil del concreto. Un anclaje erróneo o la falta de este sistema causa desprendimiento del concreto refractario por el movimiento natural de la estructura al calentarse y enfriarse durante operación normal.

Siempre que haya necesidad de ejecutarse una estructura monolítica deben tomarse cuidados especiales con relación a su estabilidad, sea por la geometría de sus formas o por la posición en que se encuentra, o por las proporciones de área a ser revestidas. Esta estabilidad es conseguida a través de un sistema de anclajes. De esta forma, se debe dimensionar un sistema adecuado de anclajes, que en caso de los productos moldeables son indispensables. Estos pueden ser metálicos o cerámicos. Los anclajes metálicos, normalmente son de acero fundido o laminados, cuya selección está en función de la aplicación a la cual se destina. (Ver tabla9) Normalmente son especificados anclajes metálicos para espesores de revestimientos inferiores a 250 mm, y que la calidad de acero a ser empleado está en función a la

temperatura de interface anclaje-concreto durante la operación. Son varios los tipos de acero recomendados, de acuerdo con los rangos de temperaturas máximas de uso.

Tabla 9 Tipos de acero para anclaje según temperatura de trabajo

TEMPERATURA (°C)	TIPO DE ACERO
Hasta 600	Carbono
Hasta 760	Inox. AISI 304
Hasta 930	Inox. AISI 309
Hasta 1010	Inox. AISI 310
Hasta 1200	Inconel/Incoloy

Fuente: Refractarios de aluminatos de calcio, Morillo 2002.

El anclaje adecuado, con instalación de 10-12” entre centros e intercalados con orientación vertical y horizontal a 90°, permite disminuir la propagación de grietas. Las anclas al estar intercaladas y en forma de “V” sirven como barrera para el mecanismo interno de propagación de grietas dentro del concreto.

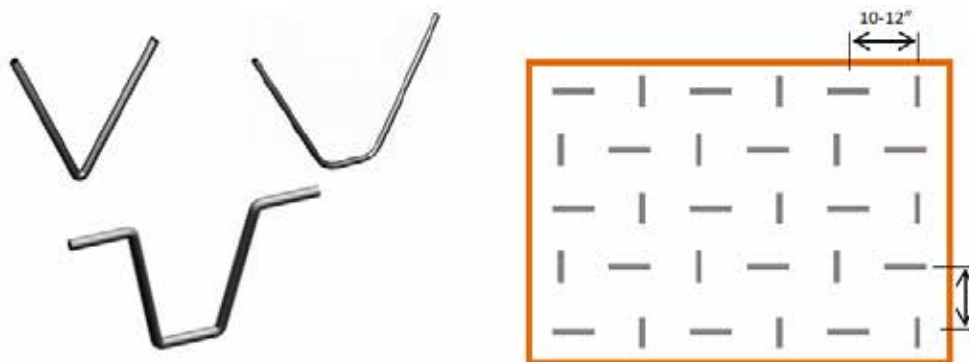


Figura 24 Anclaje tipo “V” típicos con diagrama de Espaciamiento y orientación correctos en una superficie.

Fuente: Refractarios de aluminatos de calcio, Morillo 2002.

Juntas de Dilatación.

Siempre que se construya una estructura monolítica se debe proveer juntas que absorban las dilataciones del concreto cuando es sometido a variaciones de temperatura. Estas juntas deben estar constituidas de materiales combustibles a baja temperatura o de materiales incombustibles que sean compresibles, y no deben tener espesores superiores a 5 mm, debiendo estar espaciados y dimensionados de acuerdo con el área a ser revestida y a la dilatación térmica lineal de cada producto. No se recomienda la utilización de aceites, grasa o asfaltos para las juntas de dilatación, en función de la facilidad de interacción con el concreto y también de la facilidad de remoción durante la fabricación.

En las zonas en que la mampostería y el revestimiento interno de la caldera se formen en la armazón, se debe tener en cuenta en dejar las correspondientes juntas de expansión térmica, para así evitar el agrietamiento de las paredes. Existen varios métodos de construir las juntas de expansión, pero en todas deben cumplirse las siguientes exigencias:

- No deben haber más de 4 metros entre una junta y otra.
- Deben construirse en las esquinas de los hornos, y si es necesario, distribuirse uniformemente en la pared.
- Deben ser herméticas y lo suficientemente libres, para permitir el desplazamiento de la obra cuando alcance la temperatura de trabajo.
- Debe emplearse materiales como el cordón de Asbesto o en polvo, para sellar las partes frías de la junta.

Tipo de combustible

Los problemas de combustión y/o combustible. La calidad del combustible y/o una combustión incompleta tienen afectan directamente el desgaste del refractario. Por ejemplo, los residuos de un combustible de petróleo dejan impurezas (e.g. dióxido de azufre o pentóxido de vanadio) que reaccionan con el revestimiento

refractario, causando eutécticos con menor punto de fusión, y la degradación del refractario. La interacción entre los combustibles comunes y los concretos:

- Gas Natural: Posee una combustión normalmente limpia, y combinado con la correcta operación de las calderas y control del quemador, ofrece un ambiente consistente y no agresivo para los refractarios.
- Fueloil (Combustóleo): Este combustible con denominación liviana, usualmente opera con poca afectación de los refractarios. Los combustibles, considerados pesados y con más impurezas como el sodio y el vanadio, pueden causar ataque químico. Las llamas del Fueloil son más difíciles de controlar, por lo que un combustible más pesado o impuro provee mayor ceniza en el ambiente y mayor abrasión al revestimiento refractario.

Método de encendido de la caldera

Se recomienda regular los quemadores para empezar con encendidos intermitente, si es posible empleando boquillas especiales para lograr un consumo muy bajo), a fin de obtener inicialmente un calentamiento muy lento, por ejemplo, de 25° C por hora durante las primeras veinticuatro horas. Al final de este período la temperatura del hogar debe mantenerse tan constante como sea posible, a unos 650° C de veinticuatro a treinta y seis horas. Durante las veinticuatro horas siguientes se recomienda que la temperatura se aumente de nuevo gradualmente a razón de unos 25° C hora hasta alcanzar la temperatura máxima normal del trabajo de la caldera. Esta operación proporciona al revestimiento el calor suficiente para continuar el proceso de secado, y se debe procurar que el hogar se caliente lo más lentamente posible, y se enfríe, también, despacio, para evitar un choque térmico acusado cuando el revestimiento no está en condiciones de resistirlo. Para cada una de estas operaciones es indispensable un mínimo de doce horas, aunque sería de desear un tiempo más prolongado para el calentamiento.



Figura 25 Rotura y desprendimiento de refractario
Por puesta en marcha inicial demasiado rápida.
Fuente: Mantenimiento de calderas industriales, Boch 2016.

CONCLUSIONES

A partir de los análisis realizados, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se logró analizar la importancia del comportamiento y las propiedades del concreto refractario de sílico-aluminoso CONCRAX 1700 en la caldera acuotubular modelo CIT 350, donde destacan propiedades como la densidad volumétrica, conductividad térmica, alta refractariedad y resistencia química.
- Se analizó la composición química del refractario, que contiene un gran porcentaje de alúmina, compuesto que ofrece gran resistencia química, térmica, densidad y más propiedades al material refractario, así como otros compuestos como la sílice.
- Se realizó cálculos de transferencia de calor en una de las paredes refractarias de la caldera CIT 350, para diferentes temperaturas en las cara interna de esta, desde los 100 °C hasta los 1600 °C, obteniendo resultados de conducción del flujo de calor y potencia térmica a lo largo de la pared compuesta, donde se comprobó un desempeño de su principal función como aislante térmico.
- Se logró identificar la temperatura de fusión del material refractario 1850 °C a través del cono pirométrico de Seger.
- Se identificó que las zonas críticas de refractario en las calderas acuotubulares son las de la puerta, zona de quemadores y piso del el hogar.
- Se analizó que las fallas en las zonas críticas está determinado por la acción de dos factores influyentes: largos periodos de funcionamiento de la caldera sin mantenimiento de los revestimientos en estas zonas y variables en el procedimiento de instalación del revestimiento que afectan su calidad.
- Se identificó que las fallas por desconchamiento o por agrietamiento se debe por la falta o mala colocación de anclajes y juntas de expansión.

- La falta de paradas programadas para la realización de trabajos de mantenimiento de las zonas críticas, aumenta la probabilidad de ocurrencia de fallas, debido al desgaste continuo de los revestimientos refractarios.
- Se logró analizar que los factores determinantes para la prolongación de la vida útil del concreto refractario en las calderas acuotubulares son; la planificación y correcta instalación, la cantidad y calidad del agua en la preparación, curado, secado, anclajes, juntas de dilatación y método de encendido de la caldera.
- Se analizó que el método de encendido es de gran importancia en la prolongación de este material, debido a que si no se respeta el tiempo de encendido, ocurre la rotura y desprendimiento del material por el choque térmico.

RECOMENDACIONES

A continuación se hacen algunas recomendaciones con el fin de complementar y mejorar la investigación realizada, en futuras ocasiones.

- Se recomienda un análisis de las propiedades y de la composición química del concreto refractario para su aplicación en las calderas acuotubulares, para prevenir fallas, paradas de la caldera y altos costos de mantenimiento.
- Se recomienda realizar un análisis térmico de cada componente de refractario en calderas acuotubulares, para determinar la pérdida calorífica total.
- Se recomienda realizar el ensayo de módulo de rotura, luego del secado a 110° C, para comparar los valores con los obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión y estudiar el enlazamiento del moldeable a bajas temperaturas.
- Realizar un historial de fallas a partir de los reportes de mantenimiento para evaluar la eficiencia de los revestimientos instalados en las zonas críticas.
- Se recomienda realizar paradas correctivas cada 10 meses, para realizar los trabajos de mantenimiento en el piso del horno. De esta forma, se mantiene menor acumulación de escoria y se reparan los revestimientos refractarios con mayor frecuencia, para prevenir la ocurrencia de las fallas. También se podría reducir el tiempo de duración de la parada, por la disminución de la cantidad de escoria a limpiar en el piso de la caldera.
- Se recomienda elaborar un manual de instalación, inspección y mantenimiento con personal especializado en el área que permita garantizar la operatividad de los equipos.
- Se recomienda ofrecer medios para la capacitación del personal 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Harbison Walker. (2005). **Handbook of Refractory Harbison Walker**.
Obtenido de Handbook of Refractory Harbison Walker.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). **Metodología de la Investigación**. (6a. Ed.). México D.F.: McGraw-Hill. México.
- Incropera Frank, (2009). **Fundamentos de Transferencia de Calor**, 4ta edición.
- Jaume Caselles Torrescasana & Cesar Alfonso Zepeda León, (2010). **Plan de mantenimiento preventivo de la caldera de la empresa Walter ferreti, Enabas**.
- Nelson Alfonso Pinto Yuncosa (2015) **Evaluación de los materiales refractarios utilizados en la caldera de la planta ampliación Tocoa**.
Presentado en la Universidad Simón Bolívar.
- Ochoa Federico, (2006) **Prolongación de la vida útil del revestimiento refractario en un horno de inducción de INTRAMET**, realizado en la Escuela Superior Politécnica Del Litoral.
- Pedro Abarca Bahamondes (2006). **Descripción de calderas y generadores de vapor**. 1era edición.
- Rodríguez José, (2013). **Concretos refractarios de bajo cemento para calderas acuotubulares**.

Sabino, C (1992). **El proceso de investigación**. 1ra edición. Caracas, Venezuela.

Severns, W., & Miles, J. (1974). **La producción de energía mediante el vapor, aire o gas**. Barcelona: Reverté, S.A.

Yunus Cengel, (2011). **Transferencia de calor y masa**, 4ta edición. España. McGraw-Hill Interamericana.

ANEXOS

ANEXO A

Calderería López Hermanos, S.A.



Es una fábrica de calderas con más 80 años de experiencia, ofrecen productos de primera calidad e innovadores. Ubicada en Paterna, Valencia (España), en el Polígono Industrial Fuente del Jarro.

Historia

En 1.935 inicia en la ciudad de Valencia la actividad como taller de reparación y mantenimiento de calderas. En los inicios trabajamos en distintos campos de la industria, especializándonos en calderas de vapor de las que han desarrollado varios modelos con tecnología y patentes propias, siempre mejorando el rendimiento y la calidad del producto.

El aumento en la producción obligó en 1.965 a cambiar la ubicación de los talleres, trasladándonos a las instalaciones de la calle Río Escalona, lo que supuso un importante desahogo y nos permitió la construcción de equipos de mayor tamaño, ampliar las secciones de producción y contar con un servicio de mantenimiento eléctrico y de equipos de combustión. Aquel cambio también permitió comenzar la construcción de equipos realizados en acero inoxidable.

1.972 fue el año en el que realizan la primera homologación de la serie de calderas tipo GVL-H.

En 1.988 las calderas fueron recalculadas sobre la norma UNE, realizando ya el diseño para su uso como calderas consumidoras de gas como combustible.

La expansión de la compañía en ámbitos nacionales e internacionales obligó a un nuevo traslado en 1.999 al Polígono Industrial Fuente del Jarro, en Paterna, a cinco kilómetros de Valencia. En las actuales instalaciones se cuenta con todos los

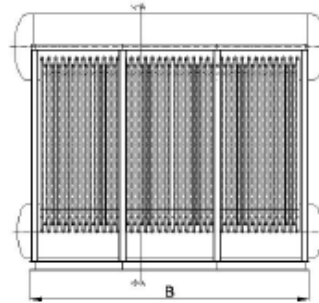
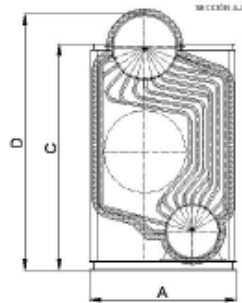
elementos necesarios para la fabricación de los equipos que los clientes puedan necesitar con 5.000 m² cubiertos y 16 metros de una altura, se puede fabricar calderas acuotubulares y pirotubulares de gran tamaño.

ANEXO B

Catálogo de Caldera Acuotubular modelo CIT

Jun-2010 CALDERERÍA LÓPEZ HERMANOS S.A. Calle Ciudad de Sevilla, 49 - Polígono Industrial Fuente del Jarro- 46988 PATERNA (Valencia) - Telf: 961343717 - Fax: 961322656 <http://www.lopezhermanos.es>

DIMENSIONADO



CIT
GENERADOR
ACUOTUBULAR

CARACTERÍSTICAS

Código	Producción (Kg-v/h)	Superficie De Calef. (m ²)	V _{total} l	Ø Calderín superior (mm)	Ø Calderín inferior (mm)	B (mm)	A (mm)	C (mm)	D (mm)
CIT -15	400	15	960	650	650	1800	1700	2905	2095
CIT -20	500	20	1060	650	650	2000	1700	2905	2095
CIT -25	800	25	1330	650	650	2480	1700	2905	2095
CIT -30	900	30	1500	650	650	2760	1700	2905	2095
CIT -35	1100	35	1830	650	650	3320	1700	2905	2095
CIT -40	1000	40	1850	900	650	2440	2260	3650	2780
CIT -42	1400	42	2150	650	650	3524	1700	2905	2095
CIT -50	1800	50	2400	650	650	4360	1700	2905	2095
CIT -60	1600	60	2300	900	650	2780	2260	3650	2780
CIT -70	2000	70	2500	900	650	2996	2260	3650	2780
CIT -85	2400	85	2850	900	650	3260	2260	3650	2780
CIT -110	3000	110	3350	900	650	3600	2260	3650	2780
CIT-150	4000	150	4460	900	650	4040	2260	3650	2780
CIT-175	4500	175	5350	900	650	4640	2260	3650	2780
CIT-180	5000	180	4832	1100	950	3860	3060	4650	3680
CIT-210	6000	210	5440	1100	950	4210	3060	4650	3680
CIT-230	7500	230	6740	1100	950	4973	3060	4650	3680
CIT-350	10000	350	8060	1100	950	5600	3060	4650	3680
CIT-410	12000	410	9100	1100	950	6300	3060	4650	3680
CIT-470	14000	470	9600	1100	950	6662	3060	4650	3680
CIT-500	16000	500	10800	1100	950	7930	3060	4650	3680
CIT-505	18000	505	16500	1200	1000	7220	4250	6400	4920
CIT-650	20000	650	18100	1200	1000	7830	4250	6400	4920
CIT-800	25000	800	19300	1200	1000	8600	4250	6400	4920
CIT-950	30000	950	21500	1200	1000	9620	4250	6400	4920
CIT-1050	34000	1050	23700	1200	1000	10800	4250	6400	4920

CATÁLOGO ONLINE DE PRODUCTOS - Ed:0.1
CALDERERÍA LÓPEZ HERMANOS S.A.

ANEXO C

Catálogo del concreto refractario CONCRAX 1700, Gamma.

CONCRAX 1700	Propiedades
Clasificación NTC - 814 , ASTM C - 401	Clase F
ANÁLISIS QUÍMICO (%)	
AL ₂ O ₃	84.1
SiO ₂	5.1
Fe ₂ O ₃	1.6
TiO ₂	2.7
CaO	5.7
MgO	0.4
Alcalis	0.4
CPE	>37
Temperatura equivalente (°C) NTC-706, ASTM C-24	1820
Máxima temperatura de servicio	1650
Máximo tamaño del grano (mm)	5
Material seco requerido por metro cúbico (kg)	2500-2600
Agua de preparación (cm ³ de agua/kg de material seco) NTC - 988 , ASTM C - 860	95-105
DENSIDAD VOLUMÉTRICA (gr/cm³)	
ASTM C - 134	
110°C	2.50-2.60
1000°C	2.35-2.45
1480°C	2.70-2.80
1600°C	2.85-2.95
MÓDULO DE RUPTURA EN FRÍO (MPa)	
NTC - 988 , ASTM C-133	
110°C	6.0-9.0
1000°C	3.0-5.0
1480°C	25.0-30.0
1600°C	50.0-60.0
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN FRÍO (MPa) NTC - 988 , ASTM C-133	
110°C	25.0-45.0
1000°C	20.0-30.0
1480°C	100.0-120.0
1600°C	140.0-160.0
CAMBIO LINEAL PERMANENTE (%)	
NTC - 988 , ASTM C - 401 y ASTM C - 865	
1000°C	0.0-0.2C
1480°C	3.0C-4.0C
1600°C	4.0C-6.0C
Presentación kg	25

ANEXO D

**Tabla de fallas y tiempos por actividades de reparación
en caldera acuotubular.**

FALLAS	ACTIV.	DESCRIPCION DE ACTIVIDAD	TIEMPO MIN MINUTOS	TIEMPO MAX MINUTOS	MTTO. SEMANA	MTTO. MES	MTTO. TRIMES.	MTTO. ANUAL	
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	14	REFRACTARIO PUERTA							
		CHEQUEAR	1	3			X	X	
		REPARACION MENOR:							
		PIQUETEAR	10	15					
		PONER ANCLAS	3	5					
		RELLENAR	10	13					
		REPARACION MAYOR:							
		BAJAR PUERTA	20	30					
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	20	30					
		SACAR AISLANTE VIEJO	5	8					
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	10					
		PONER ANCLAS NUEVAS	10	15					
		PONER AISLANTE NUEVO	3	5					
		PONER FORMALETA	8	12					
		PONER REFRACTARIO NUEVO	8	13					
		FRAGUADO	1440	1600					
RETIRAR FORMALETA	5	8							
SUBIR PUERTA	20	30							
CERRAR PUERTA	10	15							
APARICIÓN DE PUNTOS CALIENTES POR GRIETAS	15	REFRACTARIO PUERTA							
		CHEQUEAR	1	3			X	X	
		REPARACION MENOR:							
		PIQUETEAR	10	15					
		PONER ANCLAS	3	5					
		RELLENAR	10	13					
		REPARACION MAYOR:							
		BAJAR PUERTA	20	30					
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	20	30					
		SACAR AISLANTE VIEJO	5	8					
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	10					
		PONER ANCLAS NUEVAS	10	15					
		PONER AISLANTE NUEVO	3	5					
		PONER FORMALETA	8	12					
		PONER REFRACTARIO NUEVO	8	13					
		FRAGUADO	1440	1600					
RETIRAR FORMALETA	5	8							
SUBIR PUERTA	20	30							
CERRAR PUERTA	10	15							
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	16	REFRACTARIO PUERTA							
		CHEQUEAR	1	3			X	X	
		REPARACION MENOR:							
		PIQUETEAR	10	15					
		PONER ANCLAS	3	5					
		RELLENAR	10	13					
		REPARACION MAYOR:							
		BAJAR PUERTA	20	30					
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	20	30					
		SACAR AISLANTE VIEJO	5	8					
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	10					
		PONER ANCLAS NUEVAS	10	15					
		PONER AISLANTE NUEVO	3	5					
		PONER FORMALETA	8	12					
		PONER REFRACTARIO NUEVO	8	13					
		FRAGUADO	1440	1600					
RETIRAR FORMALETA	5	8							
SUBIR PUERTA	20	30							

		CERRAR PUERTA	10	15				
FALLAS EN LOS ANCLAJES	17	REFRACTARIO PUERTA						
		CHEQUEAR	1	3			X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR	10	15				
		PONER ANCLAS	3	5				
		RELLENAR	10	13				
		REPARACION MAYOR:						
		BAJAR PUERTA	20	30				
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	20	30				
		SACAR AISLANTE VIEJO	5	8				
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	10				
		PONER ANCLAS NUEVAS	10	15				
		PONER AISLANTE NUEVO	3	5				
		PONER FORMALETA	8	12				
		PONER REFRACTARIO NUEVO	8	13				
		FRAGUADO	1440	1600				
		RETIRAR FORMALETA	5	8				
SUBIR PUERTA	20	30						
CERRAR PUERTA	10	15						
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	18	REFRACTARIO PUERTA						
		CHEQUEAR	2	3			X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR	3	5				
		PONER ANCLAS	1.5	3				
		RELLENAR	2	4				
		REPARACION MAYOR:						
		BAJAR PUERTA	8	12				
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	10	13				
		SACAR AISLANTE VIEJO	3	5				
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	7				
		PONER ANCLAS NUEVAS	3	5				
		PONER AISLANTE NUEVO	2	4				
		PONER FORMALETA	2	4				
		PONER REFRACTARIO NUEVO	5	8				
		FRAGUADO	1440	1600				
		RETIRAR FORMALETA	1	2				
SUBIR PUERTA	8	12						
CERRAR PUERTA	5	7						
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	19	REFRACTARIO PUERTA						
		CHEQUEAR	2	3			X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR	3	5				
		PONER ANCLAS	1.5	3				
		RELLENAR	2	4				
		REPARACION MAYOR:						
		BAJAR PUERTA	8	12				
		SACAR REFRACTARIO VIEJO	10	13				
		SACAR AISLANTE VIEJO	3	5				
		LIMPIAR Y CEPILLAR	5	7				
		PONER ANCLAS NUEVAS	3	5				
		PONER AISLANTE NUEVO	2	4				
		PONER FORMALETA	2	4				
		PONER REFRACTARIO NUEVO	5	8				
		FRAGUADO	1440	1600				
		RETIRAR FORMALETA	1	2				
SUBIR PUERTA	8	12						
CERRAR PUERTA	5	7						
DESGASTE DESPRENDIMIENTO EROSIÓN DEBIDO A PARTICULAS DE COMBUSTIBLE	20	REFRACTARIO BOCA DE QUEMADOR						
		INSPECCIONAR					X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR						
		RELLENAR						
		APISONAR						
		REPARACION MAYOR:						
		FIJAR EL MOLDE						
RELLENAR Y APISONAR								

		FRAGUADO						
		RETIRAR EL MOLDE						
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	21	REFRACTARIO BOCA DE QUEMADOR						
		INSPECCIONAR	3	4			X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR	5	10				
		RELLENAR	7	8				
		APISONAR	10	13				
		REPARACION MAYOR:						
		QUITAR REFRACTARIO VIEJO	20	30				
		FIJAR EL MOLDE	15	20				
		RELLENAR Y APISONAR	45	60				
		FRAGUADO	1440	1660				
		RETIRAR EL MOLDE	7	10				
ROTURA Y DESPRENDIMIENTO DEL REFRACTARIO	22	REFRACTARIO BOCA DE QUEMADOR						
		INSPECCIONAR	3	4			X	X
		REPARACION MENOR:						
		PIQUETEAR	5	10				
		RELLENAR	7	8				
		APISONAR	10	13				
		REPARACION MAYOR:						
		QUITAR REFRACTARIO VIEJO	20	30				
		FIJAR EL MOLDE	15	20				
		RELLENAR Y APISONAR	45	60				
		FRAGUADO	1440	1660				
		RETIRAR EL MOLDE	7	10				

ANEXO E

Normas ASTM

ASTM C-24 - 09 Método de prueba estándar para el equivalente de cono pirométrico (PCE) de Fireclay y materiales refractarios con alto contenido de alúmina.

ASTM C-143/C-143M – 15 Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico.

ASTM C-27 - 98 Clasificación estándar de ladrillos refractarios de arcilla refractaria y alto contenido de alúmina.

ASTM C-401 - 12 Clasificación estándar de refractarios moldeables de alúmina y silicato de alúmina.

ASTM C-134 - 95 Métodos de prueba estándar para el tamaño, medidas dimensionales y densidad a granel de ladrillos refractarios y ladrillos refractarios aislantes.

ASTM C-20 – 00 Métodos de prueba estándar para la porosidad aparente, la absorción de agua, la gravedad específica aparente y la densidad aparente del ladrillo refractario quemado y las formas por agua hirviendo.

ASTM C-860 - 15 Método de prueba estándar para determinar la consistencia del moldeado refractario usando la prueba de bola en mano.

ASTM C-133 – 97 Métodos de prueba estándar para resistencia al aplastamiento en frío y módulo de ruptura de refractarios.