

UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS" - FACULTAD TECNOLÓGICA PROYECTO CURRICULAR DE TECNOLOGÍA E INGENIERÍA MECÁNICA FORMATO DE PROYECTOS DE GRADO Nº DE RADICACIÓN: _____		
INFORMACIÓN EJECUTORES		
<b>Ejecutor 1</b>		
Nombre (s):	LEONARDO	
Apellido (s):	ROJAS PULIDO	
Código:	20122375056	
E-mail:	Pulido926@hotmail.com	
Teléfono fijo:	-	
Celular:	3008703401	
<b>Ejecutor 2</b>		
Nombre (s):		
Apellido (s):		
Código:		
E-mail:		
Teléfono fijo:		
Celular:		
INFORMACIÓN DEL PROYECTO		
Título del Proyecto:	Fabricación y evaluación del desempeño de cinco ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113 (Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick).	
Duración (estimada):	3 meses	
Tipo de Proyecto: (Marqué con una "x")	Innovación y Desarrollo Tecnológico	<input checked="" type="checkbox"/>
	Prestación y Servicios Tecnológicos	<input type="checkbox"/>
	Otro	<input type="checkbox"/>
Modalidad del Trabajo de Grado:	Proyecto	
Línea de Investigación de la Facultad*:	Desarrollo tecnológico local e institucional	
Línea de Investigación del Proyecto Curricular**:	Materiales y procesos de manufactura y Ecoingeniería	
Grupo de Investigación:	Ninguno	
Proyecto de Investigación:		
Áreas del conocimiento que involucra:	Materiales no metálicos, procesos de manufactura, transferencia de calor y resistencia de materiales.	
INFORMACIÓN PASANTÍA		
Nombre de la empresa:		
Dirección:		
Teléfonos:		
Correo electrónico:		
Página Web:		
INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA		
Director: (Vo. Bo.)		
Proyecto de Pasantía: (Tutor): (Vo. Bo.)		
Formulación Proyecto de Grado: (Profesor): (Vo. Bo)	Héctor Orlando Pinilla	

## CONTENIDO

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	4
1.1	ESTADO DEL ARTE .....	7
1.1.1	Algunas experiencias a nivel mundial en la utilización de cenizas .....	11
1.1.2	Estudio ICEL – UNIVALLE .....	14
1.1.3	Usos de la ceniza de Termozipa que se da en la actualidad por parte de la compañía ADTYCIA LTDA .....	16
1.2	JUSTIFICACIÓN .....	18
2	OBJETIVOS .....	20
2.1	OBJETIVO GENERAL.....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
3	MARCO TEÓRICO.....	20
3.1	GENERACIÓN, CAPTACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LA CENIZA EN LA CENTRAL TERMOZIPIA.....	20
3.2	CENIZA.....	22
3.3	REFRACTARIOS .....	22
3.3.1	Clasificación de los refractarios según sus características químicas: .....	23
3.3.2	Clasificación de los refractarios según su proceso de fabricación: .....	23
3.4	CAL.....	25
3.4.1	Usos de la cal en la construcción .....	25
3.4.2	Mezclas de cal.....	25
3.4.3	Propiedades de los morteros de cal .....	26
3.4.4	Tipos de Mezclas .....	26
3.4.5	Resistencia a la compresión.....	27
3.4.6	Permeabilidad .....	27
3.4.7	Durabilidad .....	27
3.4.8	Protección a la salud y el medio ambiente .....	27
3.4.9	Ladrillos de cal y arena:.....	28
4	METODOLOGÍA.....	28
5	CRONOGRAMA.....	30
6	PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN.....	31
7	BIBLIOGRAFÍA.....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Producción de ceniza en la central Termozipa .....	4
Tabla 2: Producción de ceniza volante en cada una de las calderas de la central Termozipa .....	5
Tabla 3: Producción y utilización de cenizas volantes por países, según Manz (1997). CV, Cenizas Volantes; F+E, cenizas de fondo y escoria; REC, total reciclado; N.D., no determinado. Unidades en miles de toneladas. ..	8
Tabla 4: Requerimientos del carbón para las calderas de Termozipa .....	21
Tabla 5: Cronograma de actividades .....	30
Tabla 6: Presupuesto de materiales .....	31
Tabla 7: Presupuesto recurso humano .....	32
Tabla 8: Presupuesto general del proyecto y fuente de financiación .....	32

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La central termoeléctrica Martín del Corral – Termozipa, propiedad de EMGESA S.A E.S:P. es una central de generación de energía eléctrica la cual se encuentra ubicada a cuarenta kilómetros al norte de Santafé de Bogotá en inmediaciones al río Bogotá, en el municipio de Tocancipá. La central entró en operación en el año de 1963 con la puesta en servicio de la unidad uno, la cual en mayo de 1992 fue retirada de operación comercial.

Actualmente la central Termozipa cuenta con cuatro unidades de generación que operan en ciclo Rankin, las cuales usan como combustible carbón mineral traído de las minas de los departamentos de Cundinamarca y Boyacá. La unidad 2 tiene una capacidad de generación bruta de 37,5 MW y las Unidades 3, 4 y 5 tienen una capacidad de generación bruta 66 MW cada una; para una generación bruta total de 235,5 MW.

En las calderas de la central se producen dos tipos de cenizas, volantes y de fondo. Las cenizas volantes son aquellas que por su finura y peso son arrastradas por el flujo de gases de combustión, la extracción de esta tipo de ceniza se realiza en un precipitador electrostático el cual acumula el material en tolvas para ser extraído más adelante por medio de la creación de vacío. Por otro lado, las cenizas de fondo son aquellas que por su tamaño y peso no son arrastradas por el flujo de gases y caen para depositarse en el fondo de la caldera o cenicero.

Un precipitador electrostático es un equipo que se encuentra ubicado sobre el ducto de descarga de gases de combustión a la atmosfera, este es el encargado de captar las cenizas mezcladas con el gas por medio de un proceso electrostático en el cual se carga negativa mente la ceniza con unos electrodos para que esta se adhiera a una serie de placas colectoras cargadas positivamente, posteriormente un sistema de martillos realiza un golpeteo a la placas colectoras para que caiga el material, se deposite en la tolvas y se pueda realizar su extracción.

Operando las cuatro unidades a plena carga se tiene la siguiente producción de ceniza, los datos contenidos en la tabla 1 incluyen la producción de cenizas de fondo las cuales no serán incluidas dentro del proyecto.

Tabla 1: Producción de ceniza en la central Termozipa

<b>PRODUCCION DE CENIZAS VOLATIL Y DE FONDO</b>	
<b>Caldera Unidad N°</b>	<b>Producción Ceniza T/día</b>
2	115,2
3	204
4	204
5	204
<b>TOTAL</b>	<b>707,2</b>

Fuente: Emgesa S.A E.S.P

Para el objetivo de este proyecto se plantea hacer uso de las cenizas volantes que se extraen del flujo de gases por captación electrostática en los precipitadores con que cuenta cada caldera. En la tabla 2 se hace una relación de la producción de cenizas volantes en cada una de las unidades.

Tabla 2: Producción de ceniza volante en cada una de las calderas de la central Termozipa

<b>PRODUCCION DE CENIZA VOLANTE</b>	
<b>Caldera Unidad N°</b>	<b>Producción Ceniza T/día</b>
2	92,16
3	163,2
4	163,2
5	163,2
<b>TOTAL</b>	<b>581,76</b>

Fuente: Emgesa S.A E.S.P

La Central cuenta con un patio a cielo abierto para la disposición de las cenizas en un área aproximada de 20 hectáreas, para almacenar 1.5 millones de metros cúbicos de ceniza. La mitad la conforma los taludes de protección de la margen izquierda del río Bogotá, con sus correspondientes terrazas.

Los sistemas de extracción de cenizas actualmente instalados en las Unidades, son sistemas de extracción de tipo hidráulico, tanto para las cenizas de fondo como las cenizas volátiles, el sistema de remoción de hollín y cenizas volantes de tipo vacío, cuyos componentes principales son las válvulas de salida de las tolvas, las tuberías de transporte de cenizas, un tanque elevado separador de aire, un hidrovactor y un sistema de control automático de tipo secuencial. El sistema de vacío remueve el hollín y las cenizas volátiles de las tolvas del banco principal de la caldera, de los precalentadores de aire, del precipitador electrostático y de la tolva de la chimenea.

El hidrovactor se abastece con agua de río que es suministrada por dos bombas de agua de cenizas a través de una válvula mariposa localizada a la entrada del anterior equipo. A la entrada del hidrovactor se requieren 4800 litros por minuto (1270 GPM) de agua a una presión de 12,1 Kg/cm<sup>2</sup>, (175 psi).

Una tubería de transporte hidráulico de ceniza que conduce las cenizas y escoria, desde el eyector de la tolva de cenizas de fondo y desde el tanque separador de aire elevado, hasta el patio de cenizas. Allí las cenizas se decantarán y serán extraídas por medios mecánicos para ser almacenadas en las terrazas del patio de ceniza a cielo abierto adecuado para este fin, el agua realiza un recorrido por canales para su depuración y retornar nuevamente al río, teniendo un control de flujo y nivel por medio de esclusas.

Este sistema de extracción de ceniza por vía húmeda necesita para su operación un volumen de 19200 Litros/min cuando se tienen operando los cuatro sistemas

en simultáneo. El agua usada en la extracción de la ceniza volante y de fondo se entrega al río con partículas de ceniza en suspensión y un “PH ácido del 5.6”<sup>1</sup>.

Las cenizas al encontrarse depositadas en un patio a cielo abierto permite que durante los meses de verano cuando la ceniza se encuentra totalmente seca y debido a su gran finura sea fácilmente arrastrada por las corrientes de aire que azotan a la región en estos periodos, esta situación genera el recubrimiento de zonas de pastoreos de ganado lechero de fincas vecinas que al ser consumidas por los bovinos impactan la calidad de la leche producida por los animales.

El patio, acopio de ceniza de la central Termozipa, se encuentra situado en el costado izquierdo de la rívera del río Bogotá del cual se extrae el agua para suministro de los municipios de Zipaquirá, Chía, Cájica y el norte de Bogotá. Como se mencionó anteriormente, esta se almacena a cielo abierto lo cual deja el residuo expuesto a la lluvia lo que produce una lixiviación de los metales que forman parte de la composición química del material que posteriormente se unirán al cuse del río contaminando el agua que se toma más adelante para el proceso de tratamiento potabilización.

El almacenamiento y disposición de 707 toneladas de ceniza que produce la central en un día de generación de las cuatro unidades implica un gran reto para la central e impacto ambiental del ecosistema adyacente ya que se requiere de la utilización de nuevos terrenos para su almacenamiento lo que induce en forma directa un aumento en el área superficial del material que quedará expuesto a los vientos y lluvias

Para la producción de ladrillos refractarios de venta comercial las materias primas son arcillas o arenas con una alta concentración de sílice, este tipo de gravas que son extraídas de canteras a cielo abierto por medio de procesos mecánicos como son el uso de excavadoras. En la explotación de estos tipos especiales de arcillas es muy común que se tenga que desechar una gran capa de material vegetal que en la mayoría de los casos es apto para la agricultura.

Como bien se sabe, las canteras de extracción de minerales a cielo abierto generan grandes impactos ambientales, entre los más comunes podemos encontrar la tala de árboles, erosión del terreno y desaparición del hábitat de especies propias de la zona. Las fuentes hídricas también se ven afectadas ya que se puede apreciar una disminución en el caudal de los afluentes y la contaminación del agua con minerales o lodos desechados de la explotación.

---

<sup>1</sup> CIDER-EEB-ISA- U DE LOS ANDES, GALEANO CARLOS, Estudio ambiental de Termozipa, Santafé de Bogotá 1992, p 3, anexos tomo 1, anexo 2C hidrología ewald roessler.

Por otro lado podemos encontrar que los productos refractarios que ofrecen las compañías fabricantes son de elevado costo, dentro de los parámetros que inciden directamente sobre el precio de este tipo de materiales podemos mencionar el alto costo de la extracción de las materias primas, los procesos de fabricación ya que se requiere de maquinaria especial para cumplir con los estándares que demanda la industria.

Las cenizas volantes dentro de su composición química cuentan con un cristal llamado sílice, con una concentración aproximada del 50% en el compuesto; las personas que se encuentran expuestas a la inhalación de este material pueden desarrollar una enfermedad denominada silicosis, patología que se caracteriza por la fibrosis masiva y progresiva de los tejidos pulmonares causando una cicatrización grave que destruye las estructuras pulmonares

Las cenizas producidas durante el proceso de combustión del carbón en las calderas de la central termoeléctrica Termozipa poseen dentro de su composición química un gran porcentaje de sílice el cual es uno de los minerales principales en la composición química de los materiales refractarios teniendo lo anterior como punto de partida cabe hacerse la pregunta: ¿se podría usar la ceniza del carbón producida en la central Termozipa como materia prima para la fabricación y producción de ladrillos refractarios? ¿Cuál será el comportamiento de los ladrillos fabricados usando como materia prima cenizas volantes del carbón cuando sean sometidos a temperaturas que superen los 500 °C.?

El uso de las cenizas volantes producidas por las calderas de la central Termozipa en la producción de ladrillos refractarios puede favorecer la disminución en el consumo de agua del río Bogotá durante los periodos de evacuación del material, la extracción directa de la ceniza en las tolvas de los precipitadores electrostáticos podría disminuir la cantidad de ceniza que se almacena en el patio a cielo abierto haciendo menor la cantidad de terreno que se deba disponer para su acopio, si se tiene un menor volumen de ceniza en contacto con las lluvias se puede disminuir considerablemente la cantidad de metales lixiviados que se mezclan con el agua del río Bogotá y, por último, de obtenerse buenos resultados al final del proyecto la producción de ladrillos refractarios con cenizas volantes como materia prima se puede convertir en una iniciativa para generar una opción de negocio.

## **1.1 ESTADO DEL ARTE**

La generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas a nivel mundial tiene un gran porcentaje de participación, es así que podemos encontrar que el mayor productor de cenizas volantes producto de la combustión del carbón es China, el segundo lugar es ocupado por Rusia y en tercero se encuentra Estados Unidos. “La producción de cenizas volantes de la combustión del carbón en E.E.U.U. y Europa se estima en 88 y 55 millones de toneladas por año respectivamente. De esta producción, una porción muy baja es reciclada, 22% en

E.E.U.U en un promedio sólo el 50% en la Unión Europea, presentándose grandes diferencias de un país a otro”<sup>2</sup>.

Los dirigentes mundiales y en general las naciones en los últimos veinte años se han venido preocupando por la conversación del medio ambiente, dentro los temas discutidos en las convenciones de Rio de Janeiro en 1992 y Kioto en 1997, se mostró que las emisiones de gases de combustión de combustibles fósiles que se realizan sin control a la atmosfera no se pueden permitir por más tiempo ni ser aceptadas por la sociedad. Durante las convenciones mencionadas anteriormente se hizo referencia a las cenizas volantes producto de la combustión del carbón donde se afirmó lo siguiente: “La sustitución de una tonelada de cemento portland por una tonelada de ceniza volante elimina una tonelada de CO<sub>2</sub> emitido durante la producción de cemento”<sup>3</sup>.

Tabla 3: Producción y utilización de cenizas volantes por países, según Manz (1997). CV, Cenizas Volantes; F+E, cenizas de fondo y escoria; REC, total reciclado; N.D., no determinado. Unidades en miles de toneladas.

PAIS	AÑO	CV <sup>a</sup>	F + E	TOTAL	REC	% REC
HOLANDA	1992	780	82	862	88	102.4
ARGENTINA <sup>b</sup>	1992	35	10	45	45	100
ALEMANIA	1992	14300	5740	20040	19840	99
FRANCIA	1993	1436	287	1723	1636	95
COREA DEL SUR	1992	1868	3701	5569	5217	93.7
ISRAEL	1992	462	61	523	479	91.6
PORTUGAL	1992	335	39	374	335	89.6
GRACIA	1992	7000	630 <sup>c</sup>	7630	6800	89.1
POLONIA	1992	14010	N.D	14010	11995	85.6
DINAMARCA	1992	1043	133	1176	920	78.2
ESPAÑA	1992	7444	1431	8875	5582	62.9
HONG KONG	1992	841	71	912	553	60,6
TAIWAN	1994	1206	299	1505	882	58.6
COLOMBIA	1992	924	126	1050	590	56.2
JAPON	1992	3659	472	4131	2153	52.1
ITALIA	1992	910	102	1012	507	50.1
FINLANDIA	1993	490	90	580	230	39.7
CHINA	1992	80641	10498	91139	34100	37.4
IRLANDA	1992	200	22	222	80	36

<sup>2</sup> ANONIMO, Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón, Internet [En línea]. [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6982/03CAPITULO1.pdf?sequence=3>>, p 3.

<sup>3</sup> Ibíd., p, 4.



REINO UNIDO	1989	13300	2200	15500	5467	35.3
USA	1992	43631	16368	59999	18183	30.3

<sup>a</sup> + 1990 toneladas importadas de Alemania , 53% de la producción exportada a Francia/Bélgica  
<sup>b</sup> Existe tan solo una planta termoeléctrica de carbón en Argentina.  
<sup>c</sup> Estimado a partir de datos anteriores. Grecia es el cuarto país del mundo en utilización de cenizas volantes en la industria cementera.

Fuente: Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón.

Son muchas y diversas las aplicaciones de las cenizas volantes en el mundo. Fundamentalmente, se emplean para producir cemento, en el ámbito de la construcción, como relleno en obras de infraestructura y en otros usos<sup>4</sup>. La (ECOBA) Asociación Europea para el Subempleo de los Sub-productos de la Combustión del Carbón se dedica a realizar el seguimiento de los usos y disposición de los residuos de las centrales térmicas propiamente de las cenizas volantes y de fondo emitiendo anualmente un reporte estadístico muy completo en donde se hace una relación detallada del empleo de este material en los países de la comunidad europea.

La ECOBA, ha venido trabajando en la elaboración e implementación de la reglamentación de uso y disposición de la ceniza en busca de la estandarización, este trabajo que realiza la organización tiene como objetivo ayudar a la preservación del medio ambiente y la naturaleza de los recursos minerales primarios, para que en el futuro se puedan proporcionar materias primas valiosas fortaleciendo la inclusión de la hulla en los materiales de construcción ayudando como agregado en la mejora de la durabilidad del hormigón.

Los gobiernos están cada vez más comprometidos con la utilización de materias primas secundarias. En Europa se está mejorando la legislación y normas para aumentar dicho uso. En varios casos, los minerales de carbón traen calidad extra y un mayor rendimiento en comparación con las materias primas principales que sean sustituidos. La aplicación de los minerales del carbón añade una etiqueta verde para la construcción debido al ahorro de energía y la preservación de los recursos naturales<sup>5</sup>.

Durante el año 2009, en los países que conforman la unión europea, se estima que se produjeron aproximadamente 52 millones de toneladas de los PCC. Las cenizas volantes que se extraen del flujo de gases de combustión por precipitación electrostática o por medio de filtros de polvos poseen el mayor

<sup>4</sup> ANONIMO, Ficha técnica, Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escoria, Internet [En línea]. (2011). [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/305.pdf>>, p 15.

<sup>5</sup> ECOBA, página principal ECOBA, Internet [En línea]. (2011). [Consultado 21 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>>

porcentaje de participación dentro de la producción total de residuos de la combustión del carbón.

Dentro de los informes emitidos por la ECOBA anualmente cabe resaltar que en los países europeos “la utilización de cenizas volantes en el sector de la construcción es actualmente alrededor del 48% y para cenizas de fondo en torno a 45 %, mientras que la tasa de utilización de escorias de caldera es de 100 %”<sup>6</sup>.

En la gran mayoría de los casos los residuos producto de la combustión del carbón son empleados como material sustituto de los recursos naturales que se extraen de canteras a cielo abierto, situación que genera grandes beneficios medioambientales ya que se reduce la cantidad de material que se debe extraer del subsuelo y se ayuda a dar una mejor disposición de las cenizas al no tener que ser almacenadas en grandes patios que favorecen la fuga del material con los vientos o lixiviaciones de los metales presentes en los compuestos a los afluentes hídricos. El aprovechamiento de los PCC también ayuda a reducir la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera ya que se reduce la demanda energética de los procesos industriales que se requieren para la fabricación de los materiales sustituidos.

Los PCC tienen una amplia gama de usos, dentro de los más comunes se pueden mencionar las aplicaciones en la industria de la construcción en la cual se adicionan al hormigón para disminuir la concentración de cemento en la mezcla, también se emplea como aglutinante en la construcción de vías y como estabilizadores de suelos, cabe resaltar que las cenizas volantes también pueden ser utilizadas como material de carga mineral y fertilizantes.

Un gráfico de la utilización de cenizas volantes en la industria de la construcción y en la minería subterránea en el 2009 en Europa se da a continuación<sup>7</sup>.

---

<sup>6</sup> ECOBA, página principal ECOBA, Internet [En línea]. (2011). [Consultado 21 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>>

<sup>7</sup> ECOBA, página principal ECOBA, Internet [En línea]. (2011). [Consultado 21 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.ecoba.com/ecobaccputil.html>>

Grafico 1: Usos de las cenizas volantes producto de la combustión del carbón en las diferentes industrias europeas



Fuente: ECOBA

Las aplicaciones de las cenizas volantes producidas en los procesos de generación térmica son variados. Los estudios que se han realizado para determinar sus propiedades y utilización son varios. Los estudios realizados a lo largo del mundo presentan un común denominador el cual es la reactividad nula (inerte) que posee, lo que significa: un producto duradero en el tiempo. “Las cenizas son un material puzolánico, que mezcladas con cal y agua adquieren propiedades cementantes. Por su densidad, son materiales ideales para el diseño de rellenos livianos para aliviar cargas. Además, neutralizan las arcillas ya que es un material no plástico (NP)”<sup>8</sup>.

### 1.1.1 Algunas experiencias a nivel mundial en la utilización de cenizas

“El empleo de productos de la combustión del carbón en Europa se ve influenciado por nuevas normas y legislación medioambiental. Así, en diciembre del 2010 la directiva de marco residuos 2008/98/CE implementó en los estados miembros,

<sup>8</sup> ADTYCIA LTDA, Anexo N° 6.3, ficha técnica – material de ceniza, Informe final de pavimentos y espacio público asociado de la avenida el TAM (AK 129) desde la avenida centenario hasta la avenida Luis Carlos Galán - Código de Obra N° 113, Etapa de Estudios y Diseños Versión 1, Bogotá, Agosto de 2008, p 23.

cada estado tuvo que definir que producto de la combustión del carbón es un subproducto y cuando un material perderá la condición de residuo”<sup>9</sup>. De acuerdo con lo anterior, a partir de esa fecha los productores de cenizas de la combustión del carbón que quieran comercializar los residuos en el mercado, deben cumplir con los parámetros de la norma y adicionalmente haber registrado sus productos de acuerdo con el reglamento REACH.

Para hacer una mirada en los países productores de cenizas volantes podemos mencionar a Gran Bretaña en donde las plantas generan cada año alrededor de 15 millones de toneladas de desperdicio pulverizado, en este país en particular uno de los problemas que más aqueja a este tipo de industria es la eliminación de este residuo, el problema es atacado usando parte de él en una gran cantidad de aplicaciones de construcción, incluyendo concreto, material de relleno y en la estabilización de bases y sub bases en la construcción de carreteras.

También en esta nación casi un millón de toneladas ceniza se utiliza en concreto cada año, reemplazando parte (típicamente 25 a 30%) del contenido del cemento en concreto, de esta manera reduciendo costos.

Por otro lado, Alemania es un país en el que se alcanza a usar hasta el 99% del total de las cenizas volantes de sus plantas térmicas, allí se usa como material de relleno y como material cementante en adición al cemento Portland común.

Las plantas carboeléctricas de Australia producen más de 12 millones de toneladas de cenizas volantes cada año. Aproximadamente el 10% de ese material se incorpora en el cemento y el concreto, el resto termina en tiros inclinados.

En España una de los métodos de aprovechamiento de este tipo de residuos es su incorporación a los materiales de construcción y concretamente al cemento, dando lugar a un nuevo tipo de cemento denominado “cemento compuesto”, según Taylor (1990) o “cemento de adición” según Mehta (1986). Las ventajas de este tipo de cemento incluyen, además del aumento de las prestaciones tecnológicas del material acabado, razones de carácter económico, por el abaratamiento del coste de producción (al reducir importantes cantidades del clínker puro de cemento por la adición del subproducto industrial) y, razones de tipo ecológico por los graves problemas que el almacenamiento de dichos productos origina en el entorno medio-ambiental<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> FICHA TÉCNICA, Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escoria, [En línea]. (2011). [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <  
<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/305.pdf> >, p 15

<sup>10</sup> GARCIA, Lorenzo, Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado, Madrid, España, instituto Eduardo Torreja. CSIC, universidad complutense de Madrid facultad de ciencias químicas, Tesis de grado, 1993,

Holanda es el país de Europa que mejor disposición da a las cenizas ya que se recicla el 100% de la producción de este material. “Además, un estudio de mercado realizado en 1997 por PROGRES (1997) ha mostrado que en Holanda el mercado potencial en los sectores mencionados de nuevos productos derivados de las cenizas volantes, sin incluir las aplicaciones convencionales, es de 175000 Tm año, lo que implica el aprovechamiento de más del 20% de los residuos producidos”<sup>11</sup>, el caso de Holanda es el mejor ejemplo de que las cenizas son un material con propiedades que pueden ser aprovechadas dentro de las diferentes industrias de los países productores de ceniza.

En el año 2002, en los Estados Unidos, se produjeron 95 millones de toneladas de derivados del carbón combustible; 60 millones de toneladas de cenizas volantes, 10.2 millones de toneladas de cenizas de fondo y 1 millón de toneladas de escoria de la caldera y 18.7 de toneladas de materiales FGD; la utilización prioritaria en este país es la estabilización de suelos, dos de los más grandes proyectos realizados son, el aeropuerto de Newark y el terminal marítimo de Portland.

En el año de 1996 se realizaron trabajos investigativos para determinar el comportamiento de las cenizas volantes como inmovilizador y estabilizador de lodos de plantas de tratamientos de aguas residuales polvos de fundición de acero, lodos de hidróxidos de la industria galvánica este proyecto fue desarrollado por progres y PM: MHYSTI, de este estudio también se rescata que se obtuvieron resultados satisfactorios usando las cenizas volantes como estabilizador de residuos industriales.

Como referencia también se tienen los estudios que se ha realizado con las cenizas volantes para la extracción de mátales, especialmente se ha trabajado con la extracción de aluminio pero estas propuestas no han tenido una gran acogida en comparación con las tradicionales fuentes de bauxita, por la dificultad de los procesos de recuperación y los altos costos que estos implican. De las cenizas volantes también pueden extraerse hierro y sílice.

“En países de gran tradición minera, las mezclas de cenizas volantes son utilizadas para la estabilización de antiguas explotaciones mineras (Jarvis y Brooks 1996). Otras aplicaciones puntuales son la construcción de arrecifes artificiales para la industria pesquera (Collins et al., 1991) adsorbentes para la

---

258 p, Internet [En línea]. [Consultado 14 Abr. 2014]. Disponible en <<http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0024801.pdf>>, p 12.

<sup>11</sup> ANONIMO, Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón, Internet [En línea]. [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6982/03CAPITULO1.pdf?sequence=3>>, p 6

desulfurización de gas de combustión (Garea et al., 1997) y materiales de construcción a prueba de fuego (Vilches et al., 2001)<sup>12</sup>

Los residuos generados por esta actividad constituirían un material de primera mano, aprovechable por el sector de la construcción. Todos estos estudios demuestran que las cenizas volantes que anteriormente eran "basura", son una materia prima con enormes ventajas en la industria de la construcción y una excelente solución para evitar que este residuo continúe contaminando el medio ambiente.

### **1.1.2 Estudio ICEL – UNIVALLE.**

En el año de 1993 ICEL y la Universidad del Valle mediante el contrato 5854 realizaron un estudio con el cual se pretendía identificar las posibles utilidades y/o disposición de las cenizas producidas en la combustión del carbón en las calderas de las centrales térmicas de Paipa, Zipaquirá, Guajira y Tasajero.

De este estudio se determinó que las cenizas se podrían aplicar en la producción de cementos, concretos, morteros, prefabricados y materiales silico-calcáreos. El estudio tuvo en cuenta las cenizas volantes de todas las que provienen de puntos diferentes de las cenizas de fondo.

Dentro de los muestreos realizados en el estudio para la evaluación, cabe resaltar los tomados en las tolvas de las calderas 3 y 4 de la central Termozipa, de las cuales después del análisis químico se encontró que estos residuos no cumplen con los requisitos mínimos para las aplicaciones anteriormente descritas de acuerdo con los siguientes factores de evaluación.

Ceniza tolvas caldera unidad 3.

- No cumple con la cantidad de óxidos ácidos.
- No cumple con el mínimo contenido de inquemados.
- No cumple con la finura
- No cumple con la uniformidad.
- No cumple con el factor múltiple
- Cumple con los parámetros requeridos para sulfatos, álcalis totales y humedad.

Ceniza tolvas caldera unidad 4.

---

<sup>12</sup> ANONIMO, Síntesis de zeolitas a partir de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón, Internet [En línea]. [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6982/03CAPITULO1.pdf?sequence=3>>, p 3.

- No cumple con los óxidos ácidos para los puntos de recolección correspondiente al banco principal, precalentador y multiciclón.
- No cumple con el contenido de inquemados.
- No cumple con la finura
- No cumple con la uniformidad
- No cumple con el factor múltiple
- Cumple con el contenido de sulfatos, álcalis total equivalente y humedad.
- Cumple con la sumatoria de óxidos ácidos en el precipitador electrostático.

Con base en los resultados obtenidos por la UNIVALLE y ICEL en marzo del 93 en el estudio “utilización y/o disposición de residuos de la combustión del carbón en las centrales térmicas de: Paipa, Zipaquirá, Guajira y tasajero” se pudo determinar una serie de potenciales usos de carácter tecnológico siempre y cuando se mejore la calidad de los inquemados en la ceniza o se baje a l 6% de concentración de conseguirse lo anterior el listado potencial sería:

- 1 Empleo en la producción de cementos, debiéndose evaluar tres métodos:
  - Molienda conjunta de Clinker, yeso y ceniza.
  - Moliendas independientes de yeso-Clinker y ceniza para luego realizar una mezcla.
  - Mezcla discreta de cemento y ceniza.
- 2 Empleo en la elaboración de concretos evaluándose tres métodos.
  - Reemplazo de cemento.
  - Adición de ceniza como agregado fino, sin reducir la cantidad de cemento.
  - Reemplazo parcial de cemento, agua y agregado fino.

Se deben analizar en todos los casos la impermeabilidad, el rendimiento, el control de temperatura, las resistencias mecánicas, la plasticidad, la durabilidad y la economía.

- 3 Empleo en la elaboración de morteros evaluándose su papel frente a: la plasticidad, la retención de agua, el rendimiento, las resistencias mecánicas y la economía.
- 4 Empleo en la producción de elementos prefabricados:
  - Bloques
  - Adoquines
  - Tubería

Se evaluarían las propiedades mencionadas para la producción de concreto.



- 5 Empleo en la producción de materiales silico-calcáreos, evaluándose: Las resistencias mecánicas, la durabilidad y la economía.
- 6 Empleo en la producción de materiales cerámicos. Evaluándose sus resistencias mecánicas, la durabilidad y la economía.
- 7 Empleo en la elaboración de mezclas de estabilización puzolánica para uso en vías.
- 8 Aplicaciones especiales que se desarrollan con la identificación de las anteriores aplicaciones.
  - Agregados ligeros para concretos especiales.
  - Estabilización y solidificación de desechos, industriales, municipales y vegetales.
  - Usos en agricultura como substrato base de varios cultivos.
  - Producción de arrecifes artificiales.
  - Reemplazo parcial de los agregados para la preparación de pavimentos asfálticos.
  - Estabilización de socavones en las minas de carbón<sup>13</sup>.

En el país, los intentos de utilización de las cenizas de las termoeléctricas, datan de más de 20 años, sobresaliendo los realizados por la Universidad del Valle, la U.P.T.C., la Universidad de Antioquia y la Universidad Nacional. Adicionalmente Monómeros Colombo - venezolanos, Cementos del Caribe, Cementos del Valle, Cementos Boyacá, Cementos Samper y otras han realizado algunos estudios.

### **1.1.3 Usos de la ceniza de Termozipa que se da en la actualidad por parte de la compañía ADTYCIA LTDA**

En Colombia, especialmente en el Distrito Capital, en los últimos diez (10) años, ADT&CIA Ltda., ha reciclado más de un millón de metros cúbicos de cenizas de carbón producidas por TERMOZIPA, en importantes proyectos de construcción y rehabilitación de vías y cimentación para bases de grandes proyectos industriales y de urbanismo dentro de los cuales podemos mencionar:

Edificaciones varias, Rellenos para cimentación, vías internas y zonas de parqueo

- Almacén Makro, Av. Boyacá - Calle 80 - Mio2002 - 30.000 m3

---

<sup>13</sup> CONTRATO CIEL-UNIVALLE 5854, Informe de avance técnico del estudio: "utilización y/o disposición de residuos de la combustión del carbón en las centrales térmicas de: Paipa, Zipaquirá, Guajira y Tasajero". Informe de avance, Santiago de Cali marzo 31 de 1993, p 55.



- Almacenes Carrefour, Calle 170 y Calle 13 por Avenida Ciudad de Cali - año 2000 - 20.000 m<sup>3</sup>
- Almacenes Éxito, Calle 170 (15.000 m<sup>3</sup>) - Calle 80 (18.000 1113)- Zona Franca Fontibón - año 2001 - 35.000 m<sup>3</sup>
- Bodegas Colchones Spring Calle 80 vía Siberia - año 2004 - 2005 - 15.000 m<sup>3</sup>
- Proyecto Celta Parque Industrial Siberia - año 2006 - 20.000 m<sup>3</sup>
- Proyecto Homecenter Imperial Constructora Colpatria S.A. - año 2006 - 7.000 m<sup>3</sup> compactos
- Planta Industrial Quala S.A. Tocancipá - año 2007 - 8.000 m<sup>3</sup>

Urbanismo, construcción de rellenos estructurales para las placas de acercamiento en las siguientes vías.

- Puente elevado vehicular Calle 100 Autopista Norte
- Puente vehicular Carrera 50 Calle 26
- Puente vehicular Calle 153 Autopista norte
- Puente elevado vehicular Calle 134 Autopista Norte
- Puente Avenida Ciudad de Cali Calle 13
- Puente Avenida Ciudad de Cali Calle 26
- Puente Autopista Norte por Calle 170
- Puente Tercer Nivel Calle 92 por NQS
- Puente Humedal Juan Amarillo por Avda. Ciudad de Cali
- Puente Alpina Sopó.
- Puente Calle 183 Centro Comercial Santafé

Todas las obras mencionadas anteriormente fueron ejecutadas para el IDU - excepto el Puente Alpina en Sopó y el Puente del Centro Comercial Santafé - por las principales compañías constructoras de Distrito Capital. En estos rellenos de aproximación de los puentes elevados descritos, se consumieron 150.000 m<sup>3</sup> de cenizas de carbón de TERMOZIPA, aproximadamente.

Rellenos para mejoramiento de la sub base

- Autopista Medellín Calle 80 puente el Cortijo - El Vino. Concesión Sabana de Occidente. Año 1995 - 500.000 m<sup>3</sup>
- Carretera perimetral Chía - Mosquera - Concesionaria del Desarrollo Vial de la Sabana DEVISAB. Año 1997 300.000 m<sup>3</sup>

- Construcción acceso a Lisboa - Suba por la Calle 80. Terraplén de 1 Km de longitud. Año 2003 Contratista principal IDU Pavimentos Colombia, ceniza aplicada 50.000 m<sup>3</sup>
- Cimentación, construcción bodega TOPTEx en Tocancipá, Cundinamarca. Año 2004. Área de la bodega 40.000 m<sup>2</sup>. Volumen de ceniza instalada 40.000 m<sup>3</sup>
- Planta Industrial Quala S.A. Tocancipá - año 2007 - Volumen de Ceniza Instalada 8.000 m<sup>3</sup><sup>14</sup>

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Como se mencionó en el problema, las cenizas volantes producidas en las calderas de la central Termozipa se almacenan en un patio a cielo abierto en donde fácilmente son arrastradas por las corrientes de aire que circulan por esta zona transportándolas a través de la sabana. De obtenerse resultados positivos durante la evaluación del desempeño de los ladrillos se tendrían bases confiables las cuales pueden impulsar el consumo de la ceniza como material primario en la elaboración de ladrillos refractarios, proceso que generaría una notable disminución en la cantidad de ceniza que se dispondría en el patio. Esta situación disminuye el área superficial sobre la cual los vientos circularían para generar arrastre disminuyendo la concentración de material particulado que afecta en forma directa el sistema respiratorio del personal que labora en la planta y las comunidades que se encuentran asentadas en los alrededores de la central.

Con la reducción del volumen de ceniza acumulada en el patio a cielo abierto se favorece la disminución de lixiviación de metales que forman parte de la composición química del material al cauce del río Bogotá durante las temporadas invernales.

De obtenerse un resultado positivo en la evaluación del desempeño de los ladrillos refractarios fabricados con cenizas volantes del proceso de combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa, se puede generar un interés de las compañías nacionales productoras de materiales refractarios a investigar sobre el uso de la ceniza como insumo en otros productos diferentes a los ladrillos, este puede ser el caso de los morteros o masas plásticas para apisonado.

---

<sup>14</sup> ADTYCIA LTDA, Anexo N° 6.3, ficha técnica – material de ceniza, Informe final de pavimentos y espacio público asociado de la avenida el TAM (AK 129) desde la avenida centenario hasta la avenida Luis Carlos Galán - Código de Obra N° 113, Etapa de Estudios y Diseños Versión 1, Bogotá, Agosto de 2008, p 23.

El uso de la ceniza también generaría un impacto ambiental considerable sobre todas las fuentes hídricas circundantes a la central, este es el caso del río Bogotá el cual surte de agua municipios de Chía, Zipaquirá, Cajica y el norte de la ciudad de Bogotá. Como la extracción de la ceniza se haría directamente en la descarga de las tolvas de los precipitadores electrostáticos se disminuye el volumen de material a transportar por vía húmeda hasta el patio, lo cual genera una menor concentración de ceniza en el agua de extracción facilitando el proceso de decantación que ocurre en los canales del patio, lo cual garantiza una mejor calidad de agua que se entrega al río después del proceso.

Por otro lado la extracción de ceniza para los ladrillos directamente de las tolvas de los precipitadores electrostáticos implica que se deba evacuar una menor cantidad de material, situación que genera un cambio en la operación del sistema de evacuación de ceniza ya que se pueden variar los tiempos de operación del sistema haciéndolos más largos, ya no de ocho horas como están programados actualmente; este cambio en la programación implica una reducción en el volumen de agua por día que se usa para el sistema esta agua circularía normalmente por el río sin contaminarse en el proceso industrial, adicionalmente el consumo energético se reduce considerablemente por el menor tiempo que debe estar en operación las bombas de lavado de cenizas las cuales tienen un motor de 300 HP, a esta reducción se suma la reducción en el consumo de aire de para las válvulas de descarga de la tolvas e instrumentos.

La obtención de resultados positivos durante la investigación pueden ser los cimientos para una opción de negocio ya que la utilización de refractarios en el ámbito industrial tienen gran aplicación, entre los usos encontramos recubrimiento interior de las tolvas de escoria de las calderas acuotubulares, paredes laterales de los bancos de convección de calderas acuotubulares, hornos para fabricación de vidrio, recubrimiento de cucharas para acero fundido en acerías, refinerías de petróleo, industria química, industria cementera entre otros; En el ámbito doméstico los ladrillos refractarios son usados en la construcción de chimeneas y hornos de biomasa entre otros.

El costo de una tonelada de ceniza en la central Termozipa es de 30.000 pesos y el costo de un solo ladrillo refractario en el mercado es de 7.000 pesos lo cual convierte a la ceniza en un insumo económico; si se ve dentro de un proceso industria el costo de las materias primas impactan directamente en el precio de venta del producto final, lo cual haría del negocio una buena opción. La creación de la empresa demandaría personal administrativo, técnico y operativo generando nuevos puestos de empleo en la zona lo cual podría mejorar las condiciones de vida de las familias de los trabajadores ya que podrían contar con la posibilidad de tener un empleo estable y los beneficios que esto acarrea.

La producción de ceniza en la central está garantizada ya que durante una jornada de operación de 24 horas de las cuatro unidades a su máxima carga se genera

una cantidad de 581 toneladas cifra que es mucho mayor a la que se emplearía en la fabricación de ladrillos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Fabricar y evaluar el desempeño de cinco ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante extraída de las tolvas de los precipitadores electrostáticos de las calderas de la central Termozipa, cal y melaza a temperaturas de 550, 700, 850, 1000 y 1150 °C, para identificar las posibles aplicaciones industriales y domésticas que se les puedan dar.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar y analizar la información existente sobre los usos de las cenizas volantes producto de la combustión del carbón en la central Termozipa.
- Fabricar cinco ladrillos para prueba, usando como material principal ceniza extraída de las tolvas de los precipitadores electrostáticos de las calderas de la central Termozipa la cual se mezclara con cal y melaza de caña de azúcar para su compactación.
- Poner a prueba cada uno de los cinco ladrillos fabricados a una temperatura diferente, las cuales serán de 550, 700, 850, 1000 y 1150 °C durante un periodo de tres horas.
- Evaluar los cambios morfológicos y posibles daños que se presenten en las estructuras de cada uno de los ladrillos de prueba después de ser sometidos a las temperaturas indicadas, de acuerdo a la norma ASTM C 113 (Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick).
- Determinar de acuerdo a los resultados obtenidos en la evaluación las aplicaciones industriales y domésticas que pueden tener los ladrillos refractarios fabricados con ceniza volante de la central Termozipa.

## **3 MARCO TEÓRICO**

### **3.1 GENERACIÓN, CAPTACIÓN Y DISPOSICIÓN DE LA CENIZA EN LA CENTRAL TERMOZIPIA**

Una central termoeléctrica de carbón es aquella en la cual se genera energía eléctrica a partir de la combustión de carbón para producir vapor de agua el cual se suministra a una turbina para generar electricidad, del proceso de combustión del carbón en las calderas se generan gases de combustión energía y cenizas las cuales son la base de investigación de este proyecto.

El carbón que se recibe en la central para el proceso debe ser carbón térmico, sub-bituminoso y/o bituminoso y sus características se enmarcan dentro de los siguientes parámetros (N.D: No definido):

Tabla 4: Requerimientos del carbón para las calderas de Termozipa

<b>Descripción</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
• Poder calorífico (Kcal/g)	5.500	7.600
• Humedad total (% en peso)	N.D.	≥7 %
• Materia volátil (% en peso)	27	37
• Cenizas (% en peso)	N.D.	<15 %
• Índice de molienda (HGI)	35	N.D
• FSI	N.D.	3.5
• Azufre (% en peso)	N.D.	1,05
• Relación de combustibilidad	1,2	2,2

Fuente: Emgesa S.A

El carbón se almacena en un patio a cielo abierto desde el cual se suministra el combustible por medio de una banda transportadora a las tolvas de alimentación de cada una de las cuatro unidades que se encuentran en servicio. Una vez se encuentra el carbón almacenado en las tolvas se suministra por medio de unos ductos a los pulverizadores o molinos los cuales son los encargados de dar el tamaño de grano requerido en los quemadores de la caldera.

Las cenizas volantes son extraídas del hogar de caldera por medio del arrastre que provoca el flujo de gases que es extraído por los ventiladores de tiro inducido, estas inician a depositarse en las tolvas del banco principal y precalentado de aire, la cantidad de ceniza captada en estas tolvas es muy poco ya que la mayoría es captado en el precipitador electrostático.

El precipitador electrostático es el encargado de capturar las cenizas volantes presentes en los gases de escape de la caldera por medio de electrodos que cargan negativamente las partículas de ceniza para que después sean captadas en las placas colectoras que están cargadas positivamente, la ceniza se hace caer a la tovas por medio del golpeteo de martillos sobre las placas para que se almacenen en las tolvas.

La ceniza almacenada en las tolvas es retirada por medio de vacío el cual es generado por un hidrovactor que adicionalmente humecta la ceniza para ser enviada a un lago de sedimentación del cual se extrae por medio de dragas después de un proceso de decantación y se almacena en un patio a cielo abierto.

### 3.2 CENIZA.

Las cenizas del carbón son el residuo inorgánico resultado de la incineración del material y están compuestas de fases inorgánicas originales y nuevas fases generadas tanto de materia inorgánica como orgánica del carbón. La materia inorgánica del carbón comprende sólidos no cristalinos y cristalinos y fluidos inorgánicos. La materia mineral como parte de la materia inorgánica del carbón consiste principalmente en especies minerales que pertenecen a los sulfuros, sulfosales, óxidos e hidróxidos, silicatos, sulfatos, carbonatos, fosfatos, cloruros, elementos nativos, y otros minerales estrictamente definidos y caracterizados en la ciencia de la mineralogía. “Esta materia mineral comprende todos los elementos que no forman parte de la materia orgánica del carbón (carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre) y es la principal fuente de los elementos que componen las cenizas cuando el carbón se quema en el aire u oxígeno”<sup>15</sup>.

Las cenizas están compuestas principalmente por óxidos mayores que se clasifican en óxidos básicos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), óxidos ácidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$ ) y otros óxidos ( $\text{SO}_3$  y  $\text{P}_2\text{O}_5$ ). Excepto para los elementos de oxígeno y de azufre, que normalmente constituyen las cenizas los residuos de la combustión de carbón pueden agruparse de la siguiente manera: los elementos principales (es decir, elementos en concentraciones superiores al 0,5% en el total del carbón, y éstas se incluyen el aluminio, calcio, hierro y silicio), elementos menores (es decir, aquellos en el rango de concentración de alrededor de 0,02 a 0,5% en el carbón, y los más típicos son el potasio, magnesio, sodio y el titanio y algunas veces fósforo, bario, estroncio, boro y otros, dependiendo de la zona geológica), y oligoelementos (es decir, todos los demás elementos inorgánicos que se detectan en el carbón en menos del 0,02% (200 ppm) hasta partes por billón e inferiores). “La mayoría de los elementos no metálicos, a pesar de que son más volátiles que los metales, dejan un residuo detectable en cenizas de carbón”<sup>16</sup>.

### 3.3 REFRACTARIOS

Los refractarios son materiales, que se usan generalmente cuando las condiciones de operación se caracterizan por la presencia de temperaturas elevadas, erosión, abrasión, impacto, ataque químico, acción de gases corrosivos y otras. Este tipo de materiales se usan generalmente en el recubrimiento de hornos, calderas

---

<sup>15</sup> PEÑA URUEÑA, Mary L, Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma- gamma, Tesis de grado, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, 2011, 125 p. Internet [En línea]. [Consultado 08 Abr. 2014]. Disponible en <<http://www.bdigital.unal.edu.co/5298/1/maryluzpenauruena.2011.pdf> >, p 6.

<sup>16</sup> *Ibíd.*, p. 7.

chimeneas, calcinadores, etc.; La mayor parte de los refractarios son materias cerámicas fabricadas con óxidos de elevado punto de fusión ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Mg, y  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Por lo que el carbón se presenta en la actualidad como una opción importante de refractario.

### 3.3.1 Clasificación de los refractarios según sus características químicas:

- 1 ACIDOS: son aquellos que no son atacados por compuestos ácidos, son fabricados por materias primas silico-aluminosas.
- 2 BÁSICOS: son aquellos que reaccionan con escorias ácidas. Su contenido se basa en magnesita, dolomita, y magnesita -cromo.
- 3 NEUTROS: son relativamente inertes, tanto las escorias silíceas como calizas. En este grupo se incluyen los refractarios de carbón, alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Cromita ( $\text{FeO} \cdot \text{Cr}_2\text{O}_3$ ) y Forasterita ( $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ )

Existiría un cuarto grupo que es el de los refractarios especiales que son materiales nuevos, o muy caros, por su proceso de fabricación como los de  $\text{ZrO}_2$  y  $\text{BeO}$  y se destinan únicamente para fines de investigación y otros usos aislados, tales como energía atómica, o tecnología de turbinas de gas<sup>17</sup>.

### 3.3.2 Clasificación de los refractarios según su proceso de fabricación:

Se clasifican en dos tipos: Ladrillos y especialidades

#### 3.3.2.1 Ladrillos:

Según la forma de ligar las materias primas existen 6 tipos:

- 1 Cocido convencional: en el caso de los refractarios sílico-luminosos durante la cocción se produce incipiente fusión de los compuestos formados por los óxidos constituyentes e impurezas, formando de este manera una matriz soporte que es que le da la rigidez al ladrillo.
- 2 Cocido liga directa: en el caso de los refractarios de magnesia, se comprobó que como un contenido muy bajo de impurezas a alta temperatura (aprox.  $1800^\circ\text{C}$ ), se unían los cristales de Periclasa ( $\text{MgO}$ ) directamente, sin la matriz soporte o siendo ella muy reducida (según el contenido de impurezas).

---

<sup>17</sup> INDUSTRIAS 1, Materiales refractarios. Internet [En línea]. [Consultado 13 Abr. 2014]. Disponible en <[http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19\\_Apunte%20Refractarios.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19_Apunte%20Refractarios.pdf)>, p 4.

- 3 Cocido e impregnado: la impregnación ejerce sobre el ladrillo una función protectora contra el ataque de las escorias. Cuanto más poroso sea el ladrillo, posee una mayor superficie expuesta a la corrosión de la misma. De esta manera se introduce carbono, el cual frente a la acción del FeO de la escoria produce CO, depositándose el Fe que no ataca al refractario.
- 4 Químicamente ligado: No tiene cocción previa. Lo que se hace es la calcinación de las materias primas. En el pastón formado se agrega un elemento químico que produce a través de reacciones químicas la ligazón entre los granos, lográndose la resistencia necesaria para ser transportado, instalado y soportar en peso propio de la instalación. Al evitarse la cocción se obtiene una importante reducción en el costo.
- 5 Ligado con alquitrán: La ligazón de las materias primas se logra con la adición de un alquitrán bituminoso y posterior prensado.
- 6 Templado: Al ladrillo ligado con alquitrán se lo somete a un calentamiento a baja temperatura (400 a 500 ° C) a fin de lograr la deposición del carbono y obtener la resistencia necesaria.

Los ladrillos correspondientes a los tipos 4), 5) y 6), son cocidos en servicio u operación.

### **3.3.2.2 Especialidades:**

Aglutina a todos los materiales refractarios que no tienen forma definida. Existen distintos tipos:

- 1 Tierra refractaria: Mezcla de dos o más materias primas al estado natural sin haber sufrido proceso de calcinación. Solo han sido sometidas a trituración, molienda y clasificación de tamaños (dosificación).  
  
Al ser aplicada no desarrolla ningún tipo de resistencia mecánica. Se la utiliza para sellar imperfecciones de ladrillos.
- 2 Argamasa: La única diferencia que tiene con la tierra refractaria, es que parte de las materias primas que la constituyen son previamente calcinadas.
- 3 Mortero: Producto construido por la mezcla de argamasa con un elemento ligante, que puede ser un cemento aluminio –cálcico, que en presencia de agua le confiere a la mezcla una resistencia mecánica a temperatura ambiente. Se lo utiliza como elemento ligante entre piezas conformadas de material refractario.



- 4 Hormigón: Por medio de una granulometría más grande y un aglomerante de propiedades hidráulicas adecuado, se pueden colar piezas monolíticas o pre moldeados de forma tal que reemplacen a un número importante de ladrillos.
- 5 Plástico: Es una mezcla de materias primas calcinadas, crudas (arcillas muy plásticas) y agua. Pueden ser de endurecimiento al aire o al fuego. En servicio adquiere una menor resistencia mecánica que el hormigón, pero es más poroso lo que lo hace un mejor aislante.
- 6 Masa para proyectar: Es una masa refractaria húmeda que se aplica mediante una máquina de proyección y queda adherida por impacto.
- 7 Masa para apisonar: Material refractario que se aplica en seco, mediante repetidos golpes de una herramienta mecánica. De esta manera se logra una elevada densidad lo que implica una mayor resistencia a la abrasión<sup>18</sup>.

### **3.4 CAL.**

#### **3.4.1 Usos de la cal en la construcción**

- Estabilización de Suelos
- Elaboración de Mezclas
- Elaboración de piezas de concreto
- Restauración de Monumentos Históricos
- Elaboración de pinturas e impermeabilizantes
- Elaboración de adobes

#### **3.4.2 Mezclas de cal.**

Es la combinación de un conglomerante (cal), con arena que se utiliza para unir elementos de construcción (Ladrillos, Bloques, Tabicón, Losetas, Tejas, etc.) entre sí o con una base; así como también para recubrimientos exteriores e interiores de muros y techos.<sup>19</sup>

---

<sup>18</sup> INDUSTRIAS 1. Op. cit., p. 6.

<sup>19</sup> GRUPO CALIDRA, El uso de la cal en la construcción, Internet [En línea]. [Consultado 18 Abr. 2014], Disponible en [http://anfcal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/La\\_cal\\_en\\_la\\_construccion\\_2.pdf.pdf](http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/La_cal_en_la_construccion_2.pdf.pdf), p 10.

### 3.4.3 Propiedades de los morteros de cal

#### En fresco

- Retención de agua/aire
- Trabajabilidad
- Tiempo de fraguado lento

#### Endurecido

- Adherencia
- Resistencia al corte
- Resistencia a la compresión
- Mayor permeabilidad
- Eflorescencia
- Durabilidad<sup>20</sup>

### 3.4.4 Tipos de Mezclas

- **Tipo M:** Es una mezcla de alta resistencia, usado en mampostería con o sin reforzar sujeta a grandes cargas de compresión, acción severa a congelación, altas cargas laterales de tierra, vientos fuertes o temblores. Debe usarse en estructuras en contacto con el suelo como cimentaciones, muros de contención, aceras, tuberías de agua servidas y pozos.
- **Tipo S:** Alcanza alta resistencia a la adherencia. Se utiliza en estructuras sujetas a cargas compresivas normales que requieran alta resistencia a la adherencia, y cuando sea el único agente de adherencia con la pared; como en revestimientos de terracota o baldosas de barro.
- **Tipo N:** Mortero de propósito general utilizado en estructuras de mampostería sobre el nivel del suelo. Bueno para recubrimientos internos y divisiones. Mortero de mediana resistencia que presenta la mejor combinación entre trabajabilidad y economía. Cuando las proporciones de cemento, cal y arena tienen la relación 1:1:6 se pueden obtener valores hasta 195 kg/cm<sup>2</sup> vs las mezclas cemento y arena que alcanzan cerca de 126 kg/cm<sup>2</sup> en ensayos de laboratorio.
- **Tipo O:** Mortero de baja resistencia y alto contenido de cal, utilizado en paredes y divisiones sin carga, y en revestimientos exteriores que no está expuesto a congelación cuando se humedece. Utilizado comúnmente en

---

<sup>20</sup> GRUPO CALIDRA, El uso de la cal en las mezclas de albañilería, Internet [En línea]. [Consultado 19 Abr. 2014] Disponible en [http://anfcal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/EL\\_USO\\_DE\\_LA\\_CAL\\_EN\\_LAS\\_MEZCLAS.pdf](http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/EL_USO_DE_LA_CAL_EN_LAS_MEZCLAS.pdf), p 1.

residencias de uno y dos pisos, preferido por albañiles por tener excelente trabajabilidad y bajo costo<sup>21</sup>

#### **3.4.5 Resistencia a la compresión.**

Es la fuerza que resiste una mezcla al ser sometida a carga en el eje vertical. Las mezclas cemento-arena tienen alta resistencia inicial pero tienden a encogerse después de endurecer provocando fisuras entre las juntas y el tabique lo que ocasiona una pobre adherencia. Los morteros de recubrimiento hechos de cemento muestran fisuras por contracción. Los morteros hechos con cal-arena inicialmente tienen un fraguado más lento y una resistencia inicial menor lo que los hace menos frágiles y a corto plazo más resistentes.

#### **3.4.6 Permeabilidad**

Es la resistencia de un material al paso del agua. Depende del grado de porosidad del material. Si la relación de vacíos de un mortero es muy alta la posibilidad de filtraciones será muy alta, si existen grietas o fisuras provocadas por la poca adherencia o el fraguado rápido, se eleva la posibilidad de las filtraciones. La manera de evitar esto es usando morteros con alto contenido de cal, ya que tiene partículas muy pequeñas y rellena todas las grietas o fisuras.

La cal se carbonata y por lo tanto taponea los huecos por donde penetra el agua, provee alta adhesión, lo que impide separaciones entre las unidades de las mezclas; además tiene la propiedad de absorber la humedad

#### **3.4.7 Durabilidad**

Es la habilidad de una estructura para mantenerse estable en su apariencia original, a través de los años. Basados solamente en la historia y por experiencias empíricas podemos argumentar que los morteros de cal han durado lo que ningún otro. Todas las construcciones antiguas (pirámides, catedrales, etc.) fueron construidos con mortero de cal.

#### **3.4.8 Protección a la salud y el medio ambiente**

Un tema que a todos nos ocupa y preocupa, ya que el ambiente se va afectando diariamente; por las emisiones de: las aguas negras, lluvia ácida, los residuos de metales pesados tóxicos, etc. La cal es uno de los remedios más eficientes en la lucha contra la lenta muerte del ambiente así mismo, elaborando los morteros con cal, se contribuye al mejoramiento del medio ambiente y se pueden evitar

---

<sup>21</sup> GRUPO CALIDRA, El uso de la cal en la construcción, Internet [En línea]. [Consultado 18 Abr. 2014] Disponible en [http://anfcal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/La\\_cal\\_en\\_la\\_construccion\\_2.pdf.pdf](http://anfcal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/La_cal_en_la_construccion_2.pdf.pdf), p 19.

enfermedades como la silicosis, producida por el alto contenido de sílice en los cementos<sup>22</sup>

#### 3.4.9 Ladrillos de cal y arena:

Estos son ladrillos silicocalcáreos, con 90 a 92 partes de arena por 8 a 10 partes de cal. Para hacerlos, la cal se debe apagar mezclada con arena, en mezcladores calentados por camisa de vapor; esto facilita la compresión de las piezas. El moldeo de los ladrillos se hace en forma mecánica con equipos adecuados para tal fin.

Los ladrillos que se obtienen poseen un color gris claro. Hay dos tipos de ladrillos:

- Los refractarios, que son cocidos y fraguados a alta temperatura.
- Los impermeables, que se les adiciona asfalto, alquitrán y otras sustancias similares; requieren un amasado enérgico con maquinaria adecuada y prensado; finalmente son endurecidos al vapor, adquieren un color oscuro, y son compactos y muy resistentes<sup>23</sup>.

## 4 METODOLOGÍA

Ya que el proyecto se basa en la fabricación y evaluación del comportamiento de cinco ladrillos refractarios fabricados a base de cenizas volantes extraídas de las tolvas de los precipitadores electrostáticos de las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, para determinar los cambios físicos que sufren los elementos de prueba durante el ensayo. Es adecuado seguir una metodología de revisión y análisis puesto que cada fase de este se acopla al planteamiento del proyecto.

Por tanto la metodología será desarrollada teniendo en cuenta las fases a que se describen a continuación, los pasos aquí descritos serán la base para la evaluación de los ladrillos refractarios.

- **Fase de Análisis:** Consiste en la recolección de información para el planeamiento y desarrollo del proyecto teniendo en cuenta los trabajos realizados tanto a nivel internacional como nacional desarrollados con las

---

<sup>22</sup> GRUPO CALIDRA, El uso de la cal en las mezclas de albañilería, Internet [En línea]. [Consultado 19 Abr. 2014] Disponible en <[http://anfagal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/EL\\_USO\\_DE\\_LA\\_CAL\\_EN\\_LAS\\_MEZCLAS.pdf](http://anfagal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/EL_USO_DE_LA_CAL_EN_LAS_MEZCLAS.pdf)>, p 4.

<sup>23</sup> MARTINEZ ALAS, Francisco, la cal y su uso en la construcción, Internet [En línea]. [Consultado 18 Abr. 2014] Disponible en <<http://franciscomartinezalas.blogspot.com/2010/10/la-cal-y-su-uso-en-la-construccion-3.html>>

cenizas volantes producto de la combustión del carbón en las centrales termoeléctricas.

- **Fase de Fabricación:** En esta fase se desarrollan todas las actividades relacionadas con la producción de los cinco ladrillos de prueba. Las actividades se iniciaran con la recolección de las cenizas en las válvulas de descarga de uno de los precipitadores electrostáticos de las caldera de la central Termozipa, paso seguido se procederá a con la preparación de la mezcla de los materiales que formaran parte del producto en este caso ceniza, cal y melaza posteriormente se verterá la mezcla en los moldes de dimensiones 230 mm x 60 mm x 110 mm, para ser prensados y lograr la compactación del material, una vez fraguada la mezcla se procederá desencofrar los ladrillos e iniciar el secado de los ladrillos en un horno de gas a una temperatura 150°C durante 24 horas.
- **Fase de Prueba:** En esta fase se someterán cada uno de los cinco ladrillos a una temperatura diferente, las cuales serán de 550, 700, 850, 1000 y 1150 en una muflas de gas de la compañía tratar, cada ladrillo se expondrá a esta temperatura durante un periodo de 3 horas periodo durante el cual se espera que el material experimente cambios en su morfología.
- **Fase de Evaluación:** En esta fase se evaluaran uno a uno los cinco ladrillos, la evaluación constara de una inspección visual la cual se centrara en la búsqueda de grietas superficiales y cambios de forma de los ladrillos. El criterio de aceptación del ladrillo para fines refractarios se basara en la no presencia de grietas superficiales, las temperaturas de operación de los ladrillos se dará de acuerdo al ladrillo sometido a la temperatura más alta que no se haya fisurado.
- **Fase de Comparación:** En esta fase se realizara una comparación de los resultados obtenidos en la fase de evaluación de los ladrillos de prueba con las propiedades de algunos refractarios que se comercialicen en el mercado nacional para determinar una lista de las aplicaciones que podrían tener los ladrillos fabricados en base a cenizas volantes de las calderas de la central Termozipa en el ámbito industrial y doméstico.

## 5 CRONOGRAMA

Tabla 5: Cronograma de actividades

Tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
1	<b>FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DE LADRILLOS A BASE DE CENIZAS VOLANTES</b>	87 días	lun 28/04/14	mar 26/08/14	
2	<b>FASE DE ANÁLISIS</b>	48 días	lun 28/04/14	mié 02/07/14	
3	Revisión bibliográfica digital.	15 días	lun 28/04/14	vie 16/05/14	
4	Revisión bibliográfica de textos	15 días	lun 19/05/14	vie 06/06/14	3
5	Selección de información para el proyecto.	8 días	lun 09/06/14	mié 18/06/14	4
6	Definir las tareas.	5 días	jue 19/06/14	mié 25/06/14	5
7	Asignar, recursos y tiempos para las tareas.	3 días	jue 26/06/14	lun 30/06/14	6
8	Realizar la evaluación de las tareas, verificar si el contenido del plan de trabajo está completo y es acorde al proyecto a desarrollar.	2 días	mar 01/07/14	mié 02/07/14	7
9	<b>FASE DE FABRICACIÓN</b>	15 días	jue 03/07/14	mié 23/07/14	
10	Recolección de cenizas volantes de las tolvas del precipitador electrostático.	1 día	jue 03/07/14	jue 03/07/14	8
11	Transporte de ceniza desde la central hasta el sitio de fabricación de los ladrillos.	1 día	vie 04/07/14	vie 04/07/14	10
12	Compra de materiales requeridos para el proyecto.	1 día	jue 03/07/14	jue 03/07/14	8
13	Fabricación de moldes para la fabricación y prensado de los ladrillos.	2 días	vie 04/07/14	lun 07/07/14	12
14	Fabricación de ladrillos	2 días	mar 08/07/14	mié 09/07/14	13
15	Fraguado de los ladrillos.	7 días	jue 10/07/14	vie 18/07/14	14
16	Desencofrado de los ladrillos.	1 día	lun 21/07/14	lun 21/07/14	15
17	Secado de ladrillos en horno de gas a 150°C	2 días	mar 22/07/14	mié 23/07/14	16
18	<b>FASE DE PRUEBA</b>	8 días	jue 24/07/14	lun 04/08/14	
19	Transporte de los ladrillos hasta tratar.	1 día	jue 24/07/14	jue 24/07/14	17
20	Prueba de ladrillo uno a 550 °C.	1 día	vie 25/07/14	vie 25/07/14	19
21	Prueba de ladrillo dos a 700 °C.	1 día	lun 28/07/14	lun 28/07/14	20
22	Prueba de ladrillo tres a 850 °C.	1 día	mar 29/07/14	mar 29/07/14	21
23	Prueba de ladrillo cuatro a 1000 °C.	1 día	mié 30/07/14	mié 30/07/14	22
24	Prueba de ladrillo uno a 1150 °C.	1 día	jue 31/07/14	jue 31/07/14	23
25	Recepción de ladrillos para evaluación.	1 día	vie 01/08/14	vie 01/08/14	24
26	Generación de curvas de temperatura de sostenido de cada uno de los ladrillos	1 día	lun 04/08/14	lun 04/08/14	25
27	<b>FASE DE EVALUACIÓN</b>	10 días	mar 05/08/14	lun 18/08/14	
28	Evaluación del ladrillo sometido a 550 °C	2 días	mar 05/08/14	mié 06/08/14	26
29	Evaluación del ladrillo sometido a 700 °	2 días	jue 07/08/14	vie 08/08/14	28
30	Evaluación del ladrillo sometido a 850 °C	2 días	lun 11/08/14	mar 12/08/14	29
31	Evaluación del ladrillo sometido a 1000 °C	2 días	mié 13/08/14	jue 14/08/14	30
32	Evaluación del ladrillo sometido a 1150 °C	2 días	vie 15/08/14	lun 18/08/14	31
33	<b>FASE DE COMPARACIÓN</b>	6 días	mar 19/08/14	mar 26/08/14	
34	Recopilación de información de ladrillos refractarios comerciales.	5 días	mar 19/08/14	lun 25/08/14	32
35	Revisión de usos industriales de ladrillos refractarios.	3 días	mar 19/08/14	jue 21/08/14	32

Tarea	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	Predecesoras
36	Elaboración de listado de usos.	3 días	vie 22/08/14	mar 26/08/14	35

## 6 PRESUPUESTO Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

El presupuesto presentado a continuación es financiado en su totalidad por el proponente del proyecto. No se especifican los costos asociados a las instalaciones requeridas para la fabricación de moldes y ladrillos refractarios porque esta parte del proceso se ejecutara en una propiedad personal.

A continuación se especifican los diferentes recursos y su costo asociado para la realización del proyecto:

Tabla 6: Presupuesto de materiales

Generales	Detalle	Unidad de medida	Cantidad	Valor unitario	Total
<b>Impresión documentos y fotocopias</b>	Documentos de interes	Und	150	100	\$ 15.000
<b>Transporte</b>	Desplazamiento de materiales	Und	15	\$ 7.000	\$ 105.000
<b>Internet</b>	Investigación de trabajos y proyectos ya ejecutados	Horas	90	\$1.000	\$ 90.000
<b>Computador</b>	Equipo para informes	Und	1	\$ 1.600.000	\$ 1.600.000
<b>Software</b>	Microsoft office	Und	1	\$ 200.000	\$ 200.000
<b>Ceniza</b>	Material base de los ladrillos	Kg	100	\$ 800	\$ 80.000
<b>Cal</b>	Aglutinante	Kg	10	\$ 1.500	\$ 15.000
<b>Melaza</b>	Aglutinante	Kg	5	\$ 650	\$ 3.250
<b>Madera</b>	Moldes para ladrillos	ml	4	\$ 10.000	\$ 40.000
<b>Mufla de prueba</b>	Ganancia y sostenido de temperatura	Horas	15	\$ 5.000	\$ 75.000
<b>TOTAL</b>					\$ 2.223.250

Tabla 7: Presupuesto recurso humano

Investigador/ experto/auxiliar	Formación académica	Función dentro del proyecto	Dedicación Horas/semana	Valor personal
<b>Autor del proyecto</b>	Estudiante de ingeniería	Ejecutor	40	\$ 2.200.000
<b>Docente tutor</b>	Magister Ingeniería	Asesorar	2	\$ 1.100.000
<b>Apoyo técnico</b>	Técnico	Auxiliar	4	\$ 880.000
<b>TOTAL</b>				\$ 4.180.000

Tabla 8: Presupuesto general del proyecto y fuente de financiación

DESCRIPCIÓN	VALOR TOTAL	FUENTES DE FINANCIACIÓN
Autor del proyecto	\$ 2.200.000	Personal
Tutor	\$ 1.100.000	Institucional
Equipos	\$ 1.600.000	Personal
Software	\$ 200.000	Personal
Materiales	\$ 1.385.250	Personal
Servicios técnicos	\$ 880.000	Personal
Transportes	\$ 105.000	Personal
Internet	\$ 90.000	Personal
<b>Subtotal</b>	<b>\$ 7.560.250</b>	
Imprevistos (3 %)	\$ 226.807	
<b>Total presupuesto</b>	<b>\$ 7.787.057</b>	
Duración estimada en meses	3	
Semanas	13	



## 7 BIBLIOGRAFÍA

ADTYCIA LTDA, Anexo N° 6.3, ficha técnica – material de ceniza, Informe final de pavimentos y espacio público asociado de la avenida el TAM (AK 129) desde la avenida centenario hasta la avenida Luis Carlos Galán - Código de Obra N° 113 - Etapa de Estudios y Diseños Versión 1. Bogotá, Agosto de 2008.

ALVAREZ ESTRADA, Demetrio, Refractarios ligeros, [En línea]. [Consultado 13 Abr. 2014] Disponible en <<http://boletines.secv.es/upload/196504043.pdf>>

APLICACIONES DE MATERIALES REFRACTARIOS EN CALDERAS, [En línea]. [Consultado 13 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.ijmedina.com.ec/Calderas%20-%20Aplicaciones.pdf>>

APRILE, Ariel, BEECHER, Allan, BERTONI, Maximiliano, BRETTI, José y EGLIS, Ivan, Reutilización de cenizas de centrales térmicas, Trabajo práctico, Argentina, 1999. [En línea]. [Consultado 08 Abr. 2014]. Disponible en <[http://www.puntoambiental.com/informes/cenizas\\_centrales.pdf](http://www.puntoambiental.com/informes/cenizas_centrales.pdf)>

CIDER - EEB - ISA, Galeano, Carlos. “Estudio ambiental de Termozipa, anexos, tomo I”. Santafé de Bogotá, 1992.

CONTRATO CIEL-UNIVALLE 5854, Informe de avance técnico del estudio: “utilización y/o disposición de residuos de la combustión del carbón en las centrales térmicas de: Paipa, Zipaquirá, Guajira y Tasajero”. Santiago de Cali marzo 31 de 1993.

EMGESA S.A E.S.P, Mantenimiento del patio de cenizas de la central Termozipa, manual, Bogotá, Septiembre 2008.

EMGESA S.A E.S.P, requisitos y especificaciones para el recibo y control de calidad de carbón de ingreso y consumo en la central Termozipa, Bogotá, Febrero de 2014.

FICHA TÉCNICA, Cenizas volantes de carbón y cenizas de hogar o escoria, [En línea]. (2011). [Consultado 09 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/archivos/residuos/305.pdf> >

GARCIA, Lorenzo, Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado, Madrid, España, Tesis de grado, instituto Eduardo Torreja. CSIC, universidad complutense de Madrid facultad de ciencias químicas, 1993. [En línea]. [Consultado 14 Abr. 2014]. Disponible en <<http://biblioteca.ucm.es/tesis/19911996/X/0/X0024801.pdf>>

GRUPO CALIDRA, El uso de la cal en la construcción [En línea]. [Consultado 18 Abr. 2014] Disponible en <[http://anfacal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/La\\_cal\\_en\\_la\\_construccion\\_2.pdf.pdf](http://anfacal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/La_cal_en_la_construccion_2.pdf.pdf)>

-----, El uso de la cal en las mezclas de albañilería [En línea]. [Consultado 19 Abr. 2014] Disponible en <[http://anfacal.org/media/Biblioteca\\_Digital/Construccion/Mezclas\\_Repellados\\_y\\_Stuccos/EL\\_USO\\_DE\\_LA\\_CAL\\_EN\\_LAS\\_MEZCLAS.pdf](http://anfacal.org/media/Biblioteca_Digital/Construccion/Mezclas_Repellados_y_Stuccos/EL_USO_DE_LA_CAL_EN_LAS_MEZCLAS.pdf)>

INDUSTRIAS 1, Materiales refractarios. [En línea]. [Consultado 13 Abr. 2014]. Disponible en <[http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19\\_Apunte%20Refractarios.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/19_Apunte%20Refractarios.pdf) >

INTRODUCCIÓN, Capítulo 1, [En línea]. [Consultado 11 Abr. 2014] Disponible en <<http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6986/05CAPITULO1.pdf?sequence=5> >

LOPEZ LOPEZ, Cristina y SANCHEZ QUITIAN, Mónica V. Diagnóstico de las centrales termoeléctricas en Colombia y evaluación de alternativas tecnológicas para el cumplimiento de la norma de emisión de fuentes fijas, Trabajo de grado, Bogotá, universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Junio

2007. [En línea]. [Consultado 12 Abr. 2014]. Disponible en <<http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/10185/14922/1/41011162.pdf>>

MIINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, Guía ambiental para proyectos carboeléctricos, resolución 1023, 28 de julio del 2005 [En línea]. [Consultado 11 Abr. 2014]. Disponible en <[http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia\\_ambiental\\_para\\_proyectos\\_carboel%C3%A9ctricos.PDF](http://www.minambiente.gov.co/documentos/Guia_ambiental_para_proyectos_carboel%C3%A9ctricos.PDF)>

MOLINA BAS O.I., MORAGUES TERRADES A., y GÁLVEZ RUIZ J.C. La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón: propiedades físicas, difusión del ion cloruro y del dióxido de carbono, Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, vol. 2, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid 2008 [En línea]. [Consultado 13 Abr. 2014]. Disponible en <<http://www.gef.es/Congresos/25/pdf/8-1.pdf>>

PEÑA URUEÑA, Mary L, Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma- gamma, Tesis de grado, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, 2011. [En línea]. [Consultado 08 Abr. 2014]. Disponible en <<http://www.bdigital.unal.edu.co/5298/1/maryluzpenauruena.2011.pdf>>

QUEROL, X, CREHUET, R, ALASTUEY, A. LOPEZ-SOLER, A, FERNANDEZ-TURIEL, J. L., PLANA, F, PUICERCUS, J.A, Geoquímica y mineralogía aplicadas a estudios de impacto ambiental derivado de la combustión del carbón, Barcelona, Instituto de Ciencias de la Tema Jaume Almera, CSIC, 1996. [En línea]. [Consultado 14 Abr. 2014]. Disponible en <<http://digital.csic.es/bitstream/10261/6767/1/98393.pdf>>

RÍOS C.A., WILLIAMS, C.D. CASTELLANOS O.M, Síntesis y caracterización de zeolitas a partir de la activación alcalina de caolinita y subproductos industriales (cenizas volantes y Clinker natural) en soluciones alcalinas, Colombia, Facultad de Ciencias Básicas Universidad de Pamplona, 2006. [En línea]. [Consultado 12 Abr. 2014]. Disponible en <

[http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_10/recursos/general/pag\\_contenido/publicaciones/bistua\\_revista\\_ciencias\\_basica/2006/12082010/rev\\_bistua\\_vol4\\_num2\\_art8.pdf](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_10/recursos/general/pag_contenido/publicaciones/bistua_revista_ciencias_basica/2006/12082010/rev_bistua_vol4_num2_art8.pdf)>

UPME, unidad de planeación minero energética, La cadena del carbón, [En línea]. (2005). [Consultado 10 Abr. 2014] Disponible en <[http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena\\_carbon.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf)>