

**PRODUCCIÓN, PROPIEDADES Y USOS DE LOS  
RESIDUOS DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN DE  
TERMOTASAJERO.**



**CAMILO ANDRÉS CHÁVEZ VELÁSQUEZ.  
YOHANA LIZ GUERRA MAESTRE.**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015**

# PRODUCCIÓN, PROPIEDADES Y USOS DE LOS RESIDUOS DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN DE TERMOTASAJERO.



AUTORES:

CAMILO ANDRÉS CHÁVEZ VELÁSQUEZ.  
YOHANA LIZ GUERRA MAESTRE.

Trabajo de Grado tipo INVESTIGACIÓN (IN)

DIRECTOR TRABAJO DE GRADO:

Ingeniero Civil MSc. Humberto Valbuena Leguízamo

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2015

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del jurado # 1

---

Firma del Jurado # 2

---

Firma del director

Bogotá D.C., 05 de Febrero de 2015

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de grado se lo dedicamos a nuestro Dios, quien supo guiarnos por el buen camino, darnos fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban; enseñándonos a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

Dedicamos cada una de las páginas de este documento a nuestros maestros y directivos, que influyeron con sus lecciones y experiencias, en la formación profesional.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo; especialmente al Ingeniero Humberto Valbuena Leguízamo, director de esta investigación; por la orientación, el seguimiento, la supervisión de la misma, la motivación y el apoyo recibido a lo largo de este proceso.

Agradecemos a nuestros compañeros Andrés Felipe Romero Quintero y Johan Camilo Hernández Rico, quienes fueron de gran apoyo en la investigación realizada, dado que con sus aportes contribuyeron para llevar a feliz término el proyecto.

Agradecemos a los Directivos del Claustro Universitario, por las oportunidades que nos brindaron en el desarrollo de la investigación y sobre todo, por confiar en nuestras habilidades para la ejecución de la misma.

Agradecemos al Servicio Geológico Colombiano y a ASOCRETO, quienes aportaron un granito de arena durante el proceso de la investigación.

Un agradecimiento muy especial por la comprensión, paciencia y el ánimo recibidos de nuestros familiares y amigos.

A todos ellos, muchas gracias.

# TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>4</b>
<b>1. CENIZAS VOLANTES .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 GENERALIDADES.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 PROPIEDADES FÍSICAS .....</b>	<b>6</b>
1.2.1 Color.....	6
1.2.2 Finura .....	6
1.2.3 Peso Específico.....	8
1.2.4 Densidad. ....	8
1.2.5 Granulometría .....	8
1.2.6 Plasticidad .....	9
1.2.7 Permeabilidad .....	9

<b>1.3 PROPIEDADES QUÍMICAS</b> .....	<b>9</b>
1.3.1 Contenido de Humedad.....	10
1.3.2 Pérdida por ignición.....	10
1.3.3 Reacción en Agua .....	10
1.3.4 Elementos químicos presentes en Cenizas Volantes.....	10
<b>1.4 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b> .....	<b>13</b>
1.4.1 Asociación composición del carbón y la ceniza volante .....	14
1.4.2 Tipos de Carbones .....	16
<b>1.5 PROPIEDADES PUZOLÁNICAS</b> .....	<b>19</b>
1.5.1 Relación tres elementos fundamentales.....	22
1.5.2 Finura .....	23
1.5.3 Peso Específico.....	23
1.5.4 Pérdida por ignición.....	23
<b>1.6 CONDICIONES DEL EQUIPO COLECTOR PARA EL USO DE LA CENIZA VOLANTE</b> .....	<b>24</b>
<b>2. USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES</b> .....	<b>25</b>
<b>2.1 GENERALIDADES</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2 ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO</b> .....	<b>26</b>
2.2.1 Obtención mayor resistencia .....	27

2.2.2 Mejora en la trabajabilidad .....	30
2.2.3 Menor calor de hidratación .....	30
2.2.4 Menor permeabilidad.....	31
2.2.5 Menos expansiones y contracciones.....	32
2.2.6 Resistencia al ataque químico.....	33
2.2.7 Colocabilidad y terminados .....	35
<b>2.3 FORMA DE USO DE LA CENIZA VOLANTE.....</b>	<b>36</b>
2.3.1 Reemplazo de cemento.....	36
2.3.2 Reemplazo del cemento y/o arena.....	37
2.3.3 Método resistencia especificada .....	37
<b>2.4 REQUISITOS PARA EL USO DE LA CENIZA VOLANTE .....</b>	<b>38</b>
<b>2.5 MANUFACTURA DE CEMENTO.....</b>	<b>40</b>
<b>2.6 CENIZA EN AGREGADOS LIVIANOS .....</b>	<b>42</b>
<b>2.7 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS.....</b>	<b>42</b>
2.7.1 Estabilización ceniza-cal .....	43
2.7.2 Tipo de suelo estabilizado .....	44
<b>2.8 TERRAPLENES Y RELLENOS .....</b>	<b>44</b>
<b>2.9 CENIZA EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.....</b>	<b>45</b>
<b>2.10 FABRICACIÓN DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN .....</b>	<b>46</b>

2.10.1 Tuberías de concreto.....	46
2.10.2 Morteros y estucos .....	47
2.10.3 Ladrillos y bloques.....	47
<b>2.11 OBRAS REALIZADAS CON CENIZAS VOLANTES.....</b>	<b>47</b>
2.11.1 Unión Europea .....	47
2.11.2 Estados Unidos .....	49
2.11.3 Canadá.....	50
2.11.4 Argentina .....	50
<b>3. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 NORMA PARA LA UTILIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES COMO ADITIVO .....</b>	<b>52</b>
<b>3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA, TERMOZIPIA Y TERMOGUAJIRA .....</b>	<b>54</b>
3.2.1 Termopaipa .....	54
3.2.2 Termozipa .....	58
3.2.3 Termoguajira .....	60
<b>3.3 ENSAYOS SOBRE CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
3.3.1 Ensayos Químicos.....	61
3.3.2 Ensayos Físicos .....	64

3.3.3 Análisis de Carbones.....	66
<b>4. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE LAS CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO .....</b>	<b>74</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>79</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO B .....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO C .....</b>	<b>114</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Composiciones típicas de cenizas volantes .....	13
<b>Tabla 2.</b> Clasificación ASTM D388-92 de los carbones según su rango .....	19
<b>Tabla 3.</b> Características de las cenizas volantes clase F y C.....	22
<b>Tabla 4.</b> Requisitos de las cenizas volantes según la norma ASTM C618.....	40
<b>Tabla 5.</b> Compuestos de Clinker .....	41
<b>Tabla 6.</b> Proporciones de materiales en mezclas asfálticas .....	45
<b>Tabla 7.</b> Usos de las cenizas volantes a nivel mundial.....	51
<b>Tabla 8.</b> Requisitos químicos.....	52
<b>Tabla 9.</b> Requisito químico suplementario.....	53
<b>Tabla 10.</b> Requisitos físicos.....	53
<b>Tabla 11.</b> Análisis químico de cenizas volantes de Termopaipa. ....	55
<b>Tabla 12.</b> Propiedades físicas de cenizas volantes de Termopaipa .....	55
<b>Tabla 13.</b> Análisis químico de cenizas volantes de Termozipa. ....	58
<b>Tabla 14.</b> Propiedades físicas de cenizas volantes de Termozipa .....	59
<b>Tabla 15.</b> Análisis químico de cenizas volantes de Termoguajira. ....	60
<b>Tabla 16.</b> Densidad y finura de cenizas volantes de Termoguajira. ....	61
<b>Tabla 17.</b> Análisis químico de cenizas volantes de Termotasajero. ....	62
<b>Tabla 18.</b> Análisis próximo de cenizas volantes de Termotasajero .....	62
<b>Tabla 19.</b> Resultados de granulometría en cenizas volantes de Termotasajero. ...	65

<b>Tabla 20.</b> Densidad y finura de las cenizas volantes de Termotasajero.....	66
<b>Tabla 21.</b> Propiedades de las cenizas de Termotasajero, cenizas clase C y Clase F. ....	66
<b>Tabla 22.</b> Análisis próximo del carbón de Termotasajero.....	67
<b>Tabla 23.</b> Resultados de granulometría en el carbón triturado de Termotasajero.	67
<b>Tabla 24.</b> Análisis químico del carbón de Termotasajero, (750°C), % masa.....	69
<b>Tabla 25.</b> Parámetros y clasificación de las cenizas del carbón de Termotasajero. ....	70
<b>Tabla 26.</b> Cuadro comparativo de las cenizas de Termopaipa, Termozipa, Termoguajira y Termotasajero, respecto a la norma NTC 3493. ....	71
<b>Tabla 27.</b> Aplicaciones de las cenizas volantes en Colombia. ....	73
<b>Tabla 28.</b> Cuadro para manufactura de cemento con adición de ceniza volante de Termotasajero.....	76

## LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

<b>Gráfica 1.</b> Difractogramas de rayos X de cenizas volantes españolas: c.v. baja en cal; b) c.v. alta en cal. ....	16
<b>Gráfica 2.</b> Variación de cal hidratada producida en reacción agua-cemento. ....	29
<b>Gráfica 3.</b> Ensayos de resistencia a la compresión de muestras del concreto de laboratorio y muestras de campo. ....	29
<b>Gráfica 4.</b> Variación de la temperatura con el tiempo de fraguado en concreto normal y concreto con ceniza. ....	31
<b>Gráfica 5.</b> Comparación de expansiones producidas en mezclas de concreto con ceniza y sin ceniza. ....	33
<b>Gráfica 6.</b> Resistencia de mezclas de concreto con ceniza volante y mezcla ordinaria cuando es atacado por el ácido sulfúrico. ....	35
<b>Gráfica 7.</b> Resistencia a la compresión de mezclas de concreto con reemplazo ..	72

## RESUMEN

En este documento se mostrará de manera monográfica algunos estudios que se han realizado en cenizas volantes, con respecto a la producción, propiedades y usos. Las cuatro termoeléctricas que se tomaron como referencia de estudio son: Termopaipa, Termozipa, Termoguajira y Termotasajero, siendo esta última la de mayor interés en este trabajo.

Se realizó una visita técnica a la planta Termotasajero, ubicada en el Departamento Norte de Santander – Cúcuta, con el fin de conocer el sistema de operación de la termoeléctrica y el proceso de producción de la ceniza. Luego se hizo un muestreo representativo de este residuo de la combustión del carbón, para enviarlo a la sede principal de la Universidad Santo Tomás, en la ciudad de Bogotá.

En el Servicio Geológico Colombiano se practicaron las siguientes pruebas de laboratorio en la ceniza volante: composición química y su porcentaje de pérdida al fuego, con los siguientes componentes predominantes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeO}_3$ ); también se realizaron los ensayos de análisis próximo y contenido de humedad con las especificaciones recomendadas por la NTC 3493. En la empresa ASOCRETO se realizaron los ensayos de finura Blaine y densidad.

En las muestras de carbón de Termotasajero se analizaron ensayos de granulometría, pruebas de análisis próximo en muestra secada al aire y análisis químico.

Finalmente, teniendo en cuenta la revisión del estado del arte a nivel nacional e internacional e interpretando los resultados de laboratorio, se establecieron los posibles usos de estas cenizas en la construcción de obras civiles.

## INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica se logra de varias maneras, las más utilizadas son las de combustión del carbón en centrales térmicas y la energía potencial de los embalses de agua en las hidroeléctricas. En Colombia, para generar energía eléctrica la más utilizada es la de combustión del carbón. Las termoeléctricas del país producen el residuo denominado “cenizas volantes”, que se deben evacuar en el menor tiempo posible por la contaminación que generan.

En algunas plantas cementeras tienen como proyecto desarrollar nuevos procedimientos de producción industrial, con el fin de mejorar la calidad y durabilidad de las cenizas volantes. Es importante identificar posibles aplicaciones de los residuos del carbón, como material de construcción.

La empresa Termotasajero, que opera como generadora y comercializadora de energía eléctrica originada en Norte de Santander, está en proceso de ampliar la producción de carbón de la región; con estudios ya realizados aumentará el consumo de este mineral. La nueva planta tendrá capacidad de producir 160 megavatios, cifra ligeramente superior a su capacidad actual de 150. Con este proyecto Termotasajero amplía su participación en el dinámico sector del desarrollo minero- energético.

Desde hace varios años se investiga en diversas empresas y universidades, las posibles bondades de este residuo industrial, con el fin de disminuir la problemática ambiental que genera en los sitios donde se deposita, pues el porcentaje del residuo es alto. Uno de los campos en los que ha tenido interés es en la construcción, especialmente como adición en hormigones y también como materia prima en la fabricación de nuevos materiales cementantes.

Las cenizas volantes, además de servir como adición al hormigón, pueden ser utilizadas en fabricación del Cemento Pórtland, aditivos para el concreto, aditivos asfálticos, rellenos y nivelaciones de terrenos, fabricación de ladrillos, bloques, tabiques, estabilizantes de residuos industriales, agregados para fertilizantes, entre otros usos. Para que la ceniza volante se utilice como material de construcción debe permitir beneficios técnicos, económicos y ambientales.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Conocer el sistema operativo de la planta Termotasajero, determinar las propiedades de los desechos del carbón y definir sus usos en la industria de la construcción.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar físicamente y químicamente las cenizas volantes de Termotasajero.
- Desarrollar la revisión del estado del arte de las cenizas volantes y plantear los usos pertinentes en la construcción de obras civiles.
- Elaborar cuadros comparativos de propiedades físico-químicas de las cenizas volantes de las plantas termoeléctricas Termozipa, Termopaipa, Termoguajira y Termotasajero.
- Explicar y clasificar los parámetros de las cenizas volantes y las muestras de carbón obtenidas en la planta Termotasajero.

## 1. CENIZAS VOLANTES

### 1.1 GENERALIDADES

Las cenizas volantes según Cook [1], son partículas muy finas, vitrificadas y esféricas, residuo de la combustión del carbón utilizado en centrales termoeléctricas. Este material está compuesto por tres elementos predominantes: silicio, aluminio y hierro, los cuales se presentan en forma de óxidos que representan del 75% al 95% del total del material. Análisis mineralógicos muestran que del 65% al 90 % de la ceniza se encuentra en estado vítreo.

Las “fly ash” en Estados Unidos o “pulverized fuel ash” en Inglaterra, son residuo de la combustión del carbón pulverizado usado en las centrales termoeléctricas. Desde hace varios años se utiliza la ceniza volante en el aumento de la resistencia del concreto, generando beneficio ambiental, económico, etc. Cuando se usan cenizas volantes de bajas especificaciones no se aumenta la resistencia del concreto.

Las cenizas volantes presentan diferentes propiedades físicas y químicas, dependiendo del tipo de carbón usado y el proceso de combustión de la central termoeléctrica. Por lo general, las cenizas usadas para adición a los cementos y hormigones, provienen de las centrales térmicas de alta temperatura y las centrales térmicas de combustión seca Santaella, [2]. De acuerdo con Heufers [3], la combustión de las centrales térmicas de alta temperatura se realiza a temperaturas de 1500 a 1700 °C; las cenizas caen a un baño de agua y se recolecta de forma sólida. Los precipitadores electrostáticos recolectan una pequeña cantidad de ceniza volante. En las centrales térmicas de combustión seca, el carbón es quemado a temperaturas de 1100 a 1400 °C; el 90 % de ceniza

---

[1] COOK, James E. Fly ash concrete – Technical considerations. En: Concrete International, Septiembre 1983.

[2] L. E. Santaella, “Caracterización física, Química y Mineralógica de las Cenizas Volantes”, Revista Ciencia e Ingeniería Noegradina SIN 0124-8170, Julio-Agosto, 2001, p.47-62.

[3] HEUFERS, H. “Flugaschezement– Herstellungsverfahren, Qualität und Wirtschaftlichkeit”. Zement – Kalk – Gips. 1984. p. 55-61.

generada está constituida por partículas finas recolectadas en los precipitadores electrostáticos.

## 1.2 PROPIEDADES FÍSICAS

Las cenizas volantes no son un material homogéneo, ya que el conjunto de partículas que la constituyen difieren en su composición química, tamaño, granulometría, textura superficial, etc. La ceniza volante está formada por partículas en su mayoría esféricas, unas son partículas fundidas de color gris oscuro (contiene compuestos de hierro), otras son no fundidas de color gris claro, Vargas [4].

La naturaleza vítrea o cristalina de las cenizas volantes que se originan está condicionada no solo a la temperatura de combustión alcanzada, sino a la velocidad de enfriamiento. Un enfriamiento rápido favorece al aumento del contenido de material vítreo y cristalino, con la consiguiente influencia en la reactividad del material y en sus propiedades puzolánicas.

**1.2.1 Color.** El color varía entre crema y el gris oscuro, afectado por las proporciones de carbón libre, hierro y la humedad del entorno. A simple vista tiene una apariencia muy parecida al cemento Pórtland; sin embargo, la apariencia gris de la ceniza volante es resultado directo de la combustión de carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno. El color de la ceniza dentro de la central puede variar desde un gris claro hasta el negro.

**1.2.2 Finura.** La finura se expresa por el área de partículas contenidas en un gramo de peso del material, lo que se nombra superficie específica; sin embargo,

---

[4] VARGAS, Luis; OBREGÓN, José; JUNCO, Alcibíades. "Cenizas de Termozipa, propiedades y usos en el hormigón". Bogotá, 1980, 5p. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia.

Owens [5] estableció, que el efecto de la fineza de la ceniza volante sobre la resistencia del concreto no es función de la superficie específica, sino que depende del tamaño de las partículas. Mientras mayor sea la cantidad de ceniza volante que pase la malla de 45 micras (tamiz N° 325), mayor será su efecto sobre la resistencia del concreto, Mindess [6].

La finura es un factor muy importante para las aplicaciones potenciales de la ceniza, como ejemplo para efectos puzolánicos. Estudios realizados por Frohnsdorff [7], concluyen que las cenizas para el uso en hormigón deben estar comprendidas entre 3 y 100 micras, 80 % pasa tamiz N° 325 y superficie Blaine entre 2 y 4 cm<sup>2</sup>/gr. En la investigación realizada por García B. y Ponce de León [8], establecen que la superficie Blaine debe ser superior a los 3 cm<sup>2</sup>/gr. (El cemento Pórtland tiene finura Blaine de 2,7 cm<sup>2</sup>/gr).

Los métodos que se usan para medir la finura son:

- Directos: Tamiz N° 200 y tamiz N° 325; debe pasar un mínimo de 80% de material en el tamiz N° 325 y un residuo máximo de 20% en el tamiz N° 200.
- Indirectos: Se encuentra el Método Blaine y el Fotoeléctrico con el turbidímetro de Wagner.

Otro método es la difracción de rayos X, presentando la composición mineralógica y el tamaño de las partículas.

Al aumentar la finura de la ceniza se mejora la manejabilidad y la actividad puzolánica en adición con mezclas de concreto.

---

[5] OWENS, Philip. Fly ash and its usage in concrete. En: Concrete, Julio 1979.

[6] Mindess, Sidney and youn, Francis. (1981) "Concrete".Prentice – Hall International.

[7] FORHNSDORFF, G.; CLIFTON, J. R. Fly ashes in cements and concretes: Technical needs and opportunities. Structures and Materials Division Center for Building Technology U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards. Washington, Marzo, 1981.

[8] GARCÍA B, Carlos; PONCE DE LEON, Juan. La ceniza volante como aditivo en el concreto. Bogotá, 1978, 3p.TesisIngeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana.

**1.2.3 Peso Específico.** El peso específico varía generalmente entre 2,2 y 2,8 gr/cm<sup>3</sup>. Elevados porcentajes de hierro incrementan la gravedad específica y al aumentar la presencia de carbón en las cenizas se reduce. Está alrededor de 2/3 del peso específico del cemento Pórtland.

Algunas partículas de ceniza volante como cenosferas, flotan en agua, indicando que su gravedad específica es menos que 1, Erlin y Stark [9].

**1.2.4 Densidad.** La densidad varía tanto con el tamaño de las partículas; es decir, con el material retenido en la malla de 45 micras como en la pérdida por ignición. Valbuena [10]. La densidad de las cenizas en estado compactado a humedad óptima, oscila normalmente entre 1120 Kg/m<sup>3</sup> y 1300 Kg/m<sup>3</sup> y en estado suelto se encuentran valores del orden de 650 Kg/m<sup>3</sup>. Se determina por el método de le Chatelier o por el del picnómetro.

**1.2.5 Granulometría.** Partículas finas de tamaño entre 0,5 mm y 0,001 mm, contienen cristales de sílice.

Debido a la forma esférica de la mayoría de las partículas, la ceniza volante es un polvo granulado de características únicas. Sin embargo, en la fracción más gruesa de 300 a 45 micras, la mayoría de las partículas son negras y porosas. En general, este material grueso y arenoso tiene un valor de pérdida por ignición de 3 a 10 veces mayor que el de la fracción que pasa la malla de 45 micras, lo que indica la presencia de carbón quemado parcialmente, Marsh [11].

---

[9] ERLIN, Bernard and STARK, David. Petrographic Investigations of concrete and concrete aggregates at the Bureau of Reclamation Editors, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

[10] VALBUENA, Humberto. Petrografía de Concretos Hidráulicos con adición de cenizas Volantes de Termopaipa. Bogotá, 2006, 29p. Tesis de Maestría en Ciencias – Geología. Universidad Nacional de Colombia.

[11] MARSH, B, K, Day R.L. And Bonner D.G. (1985). "Pore structure characteristics affecting the permeability of cement paste containing fly ash". En: Cement and Concrete research. Vol. 15.

**1.2.6 Plasticidad.** Ensayos realizado por Vargas, Obregón y Junco [12] en cenizas de Termozipa, termoeléctrica en Colombia, la señalan como material N.P (no plástico). Teniendo en cuenta que la granulometría es de tipo limo y esto implica que sea un material que no tenga cohesión entre las partículas.

**1.2.7 Permeabilidad.** Pruebas realizadas sobre las cenizas de Termozipa, indicaron un valor de K (permeabilidad) de  $3,7 \times 10^{-4}$  cm/seg, lo cual permitió clasificarlo como material de baja permeabilidad, correspondiendo a un limo, Vargas, Obregón y Junco [13].

### 1.3 PROPIEDADES QUÍMICAS

Las cenizas volantes consisten en esferas vidriosas mezcladas con material cristalino y cantidades de carbón. Constan de tres elementos predominantes: Silicio, Aluminio y Hierro.

La composición química de la ceniza volante según la norma NTC 3493 (ASTM C618), exige primordialmente un mínimo de 70 % de óxidos principales ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y un máximo de 5% de sulfato.

Existen otros requerimientos químicos opcionales de magnesia ( $\text{MgO}$ ) y álcalis disponibles ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), cuando la ceniza volante va a usarse para propósitos especiales, como en autoclaves o para reducir la reacción álcali/agregado, Meininger [14].

---

[12] VARGAS, OBREGÓN, JUNCO, Op.cit., p.27.

[13] Ibid. p. 27.

[14] MEININGER, R.C. Use of fly ash in cement and concrete – Report of two recent meetings.En: Concrete International, Julio, 1982.

**1.3.1 Contenido de Humedad.** La humedad de las cenizas volantes es variable, debido a que en el almacenamiento se necesita humedecer las cenizas para evitar la volatilización; la humedad está entre 30% y 70%. Las cenizas obtenidas de la Termoeléctrica Termotasajero se extrajeron del silo de ceniza volátil seca.

**1.3.2 Pérdida por ignición.** La pérdida por ignición está relacionada directamente con contenido de carbón libre; sin embargo, hay otros elementos como bióxido de carbono y anhídrido sulfúrico que afectan estas pérdidas. En norma americana (ASTM C 618-91) y en norma colombiana (NTC 3493) debe ser máximo de 6 %.

La eficiencia de la ceniza volante como puzolana se reduce, debido a la consecuente disminución de óxidos principales, lo que a su vez puede dar como resultado un fraguado más lento en el concreto. La ceniza volante con alto valor de pérdida por ignición da como resultado una decoloración de la superficie del acabado causada por las partículas de carbón que ascienden a la superficie.

Carbones de alto rango como las antracitas, presentan problemas en la combustión generando cenizas con altos contenido de carbón.

**1.3.3 Reacción en Agua.** García B y Ponce de león [15], indicaron que un 2 a 3 % de la ceniza volante es soluble en el agua y su reacción es alcalina, debido a los contenidos de cal libre, aluminatos y silicatos de calcio que le dan al cemento Pórtland la reacción alcalina.

**1.3.4 Elementos químicos presentes en Cenizas Volantes.** Como se indicó, estas cenizas constan de tres elementos predominantes: Silicio, Aluminio y Hierro ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), como lo dice Canals [16], se presenta en menor proporción

---

[15] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.5.

[16] CANALS, Álvarez, L. Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunura (India), en materiales de construcción. Universidad Politécnica de Catalunya. 2007. 92p.

Magnesio (MgO), calcio (CaO), sulfatos (SO<sub>3</sub>) y álcalis (Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O); por lo tanto, los óxidos suman entre el 75 % y el 95 % del total del material. La norma ASTM C618 equivalente a la norma NTC 3493, exige un mínimo de 70% en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y un 5 % como máximo para sulfatos. Valbuena [17], indicó que si la suma de los tres componentes es mayor de 70 %, la ceniza volante es considerada clase F. Si la suma de los tres constituyentes es 50 % o mayor, es considerado clase C por los contenidos significativos de CaO.

Los principales compuestos químicos en cenizas son:

- Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>)
- Trióxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- Óxido de calcio (CaO)
- Óxido de magnesio (MgO)
- Óxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)
- Álcalis, soda y potasio (Na<sub>2</sub>O) y (K<sub>2</sub>O)
- Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>)

García B y Ponce de León [18] explicaron los siguientes compuestos presentes en las cenizas volantes:

**Sílice.** Aproximadamente 25 % a 60 % en la ceniza volante. Está en forma vidriosa como silicatos de calcio, aluminio y hierro, listo a reaccionar químicamente. El cemento Pórtland contiene un 22 % de sílice (SiO<sub>2</sub>) aproximadamente.

**Aluminio.** Se encuentra en condición vítrea amorfa y no cristalina, ya que siempre está combinado con la sílice (10 % a 30 %). La cantidad de aluminio en el cemento Pórtland está entre 3 % a 7 % (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

---

[17] VALBUENA, Op.cit., p.30.

[18] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.6-7.

**Hierro.** Aparece como óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) en un rango de 5 % a 25 %. El hierro en el cemento Pórtland se encuentra en 1%; sin embargo, en los cementos marinos puede estar hasta 9%.

**Cal.** Está presente como óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Las cenizas volantes como un material puzolánico deben presentar una baja cantidad de cal, para posibilitar que los silicatos, aluminio y hierro reaccionen con la cal liberada por la hidratación del cemento Pórtland. La ceniza volante proporciona sílice, aluminio y hierro, para que reaccione con la cal libre del cemento y forme compuestos cementantes.

**Magnesio.** Se encuentra en estado vítreo y como óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ). Este elemento es culpable de las expansiones en la mezcla. El contenido de  $\text{MgO}$  en las cenizas volantes debe ser < 5 % según norma NTC 3493 (ASTM C618).

**Titanio.** Químicamente es muy parecido a la sílice, pero su concentración es tan pequeña que no se tiene en cuenta. Se encuentra como óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ).

**Álcalis, Soda y Potasio.** Presente como óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) y óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Menos de la mitad del 1 % de los álcalis de las cenizas volantes son solubles en agua. En la NTC 3493 el requisito es de 1,5 % máximo en álcalis disponible como  $\text{Na}_2\text{O}$ .

**Azufre.** En la ceniza volante está en forma anhídrida, actúa de una manera similar a la del yeso en cemento. La NTC 3493 establece un 5 % máximo de trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). El cemento Pórtland contiene entre 1 y 2 % ( $\text{SO}_3$ ) [19].

---

[19] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura, Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. NTC 3493. Bogotá, 2014.

La tabla 1 presenta composiciones químicas de las cenizas volantes.

**Tabla 1.** Composiciones típicas de cenizas volantes

Composición	P.F.A.	C.F.A.	F.F.A.	Italia	Brasil	U.S.A.	Termozipa	Termopaipa	Termotasajero
	(Ingl.)	(Canadá)	(Franc.)				(Col.)	(Col.)	(Col.)
SiO <sub>2</sub>	45-51	40-50	42-50	43-53	63-64	20-60	60-65	64-29	53.21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24-32	15-24	16-30	17-20	25-26	10-35	24-30	23	26.74
FeO <sub>3</sub>	7-11	12-19	5-10	5-10	3-5	5-35	5-9	5.74	9.15
CaO	1.1-5.4	4-8	2-4	4-11	1-2	1-2	0.05-0.50	0.81	0.59
MgO	1.5-4.4	0.5-2	0.5-4	1-3	1-2	0.3-4	0.1-0.7	0.53	0.45
Alcalis	3.7-6.2	3-6	4-7	5-8	1-2	1-4	0.1-2	2.03	0.80
SO <sub>3</sub>	0.3-1.3	1-5	0-2	--	--	1-1.2	0-0.5	0.1	0.01
Pérdidas por ignición	1.3-24	--	Incombustible	7-9	1-5	1.5-20	5-30	10-15	7.96

Fuente: Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Valbuena (2006).

#### 1.4 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA

La composición y propiedades de las cenizas dependen paralelamente de la estructura y composición del carbón y de la combustión. Las cenizas volantes para usos en la ingeniería se derivan de los tipos diferentes de carbón.

El carbón está formado por la descomposición de plantas, sin acceso para airear, bajo la influencia de humedad, presión y temperatura. La acumulación sumergida de plantas forma turba en el primer paso del proceso de calcificación. Durante la fase bioquímica, partes de diferentes plantas son digeridas por los hongos y bacterias. Cambios geoquímicos pasan de la conversión de turba a carbón bituminoso.

La mayoría de los campos de carbones bituminosos se depositaron durante los períodos del Cretáceo Carbonífero y superiores, hace 300 a 100 millones de años.

El sub bituminoso, carbón castaño y lignito se formaron más recientemente. Los depósitos de turba están hace unos millones de años atrás, Ochoa [20].

**1.4.1 Asociación composición del carbón y la ceniza volante.** Los compuestos inorgánicos y orgánicos en el carbón, afectan la composición de las cenizas volantes producidas por la combustión. Las cenizas volantes están compuestas principalmente por inorgánico vítreo. La mayoría de las partículas de ceniza volante son vítreas, sólidas o huecas de forma esférica, Mehta [21]. Según Ochoa y González [22], en el carbón triturado a alta fineza, el diámetro medio es 50  $\mu\text{m}$  (pasa tamiz No. 200). Para la mayoría de las partículas pulverizadas del carbón, la calefacción y devolatilización produce una estructura de trabajo frágil. La temperatura de llama llega a estar entre 1370 °C y 1700 °C; el tiempo aproximado para la quema de las partículas es de 1 a 2 segundos. Por ese motivo, la materia mineral en el carbón pasa los procesos de vaporización, descomposición y oxidación. El residuo mineral permanece en estado sólido, plástico o en estado líquido, dependiendo del material o la temperatura.

**Cenoesferas.** Son esferas huecas llenas de aire o de gas inerte. Helmuth [23] indicó un rango de 950 °C a 1130 °C.

La superficie de partículas grandes son ricas en componentes inorgánicos como los sulfatos alcalinos. Después de dejar la zona de combustión, las cenizas se refrescan rápidamente desde 1500 °C a 200 °C en 4 segundos. El material orgánico del carbón aún queda presente en las cenizas volantes, ya que no todos son oxidados por la combustión.

---

[20] OCHOA, Luis; GONZÁLEZ, Germán; Las cenizas volantes y su uso como aditivo en las mezclas de concreto hidráulico. Bogotá, 2005, 30p. Trabajo de grado Ingeniero Civil; Universidad Antonio Nariño.

[21] Mehta, P.K., Pozzolanic and cementitious by products in concrete -Another look. Proceedings of Third CANMENT/ACI Int. Conf., V:M. Malhotra. Michigan, ACI SP 114: American Concrete Institute, SP-79, Vol. 1., 1989. pp 1-43.

[22] OCHOA, GONZÁLEZ Op.cit., p.35.

[23] HELMUTH Richard. Fly Ash in Cement and Concrete.p. 74.

Vargas, Obregón y Junco [24]. Se han asociado grupos de materia mineral del carbón como:

- Esquistos: material metamórfico integrado por cuarzo, feldespato y algunas arcillas.
- Grupo arcilloso: distribuido en el carbón mezclado con desechos orgánicos, durante el periodo de formación del carbón. De tipo arcilla.  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot xH_2O$ .
- Grupo carbonatos: carbonatos hallados en el carbón, como la calcita  $CaCO_3$ , dolomita  $CaCO_3MgCO_3$  y la siderita  $FeCO_3$ .
- Grupo Sulfuro: carbón con alto contenido de sulfuro, con contenidos de sulfato de hierro producido por la pirita.
- Grupo misceláneos: minerales que se encuentran en menores cantidades como el cuarzo, gypsum y granate.

Estudio de carbones americanos por parte de "U.S./Oficina de Minas", identificaron los minerales más comunes como la caolinita, pirita, calcita y siderita.

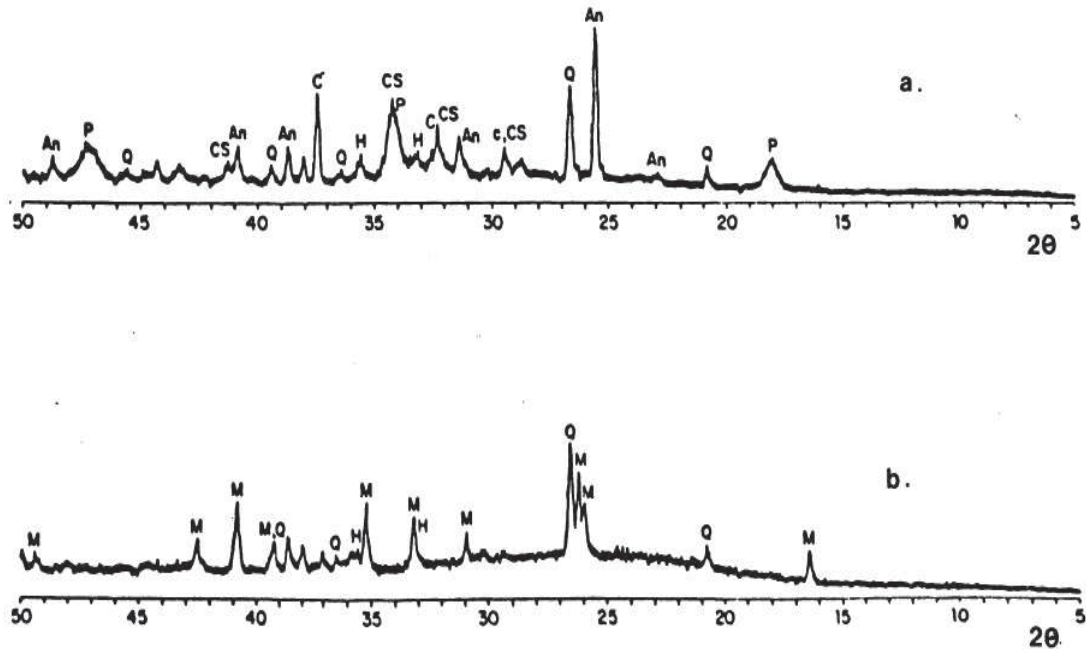
Como se muestra en la gráfica 1, las cenizas volantes clasificadas como bajas en cal presentan los siguientes compuestos mineralógicos: cuarzo (Q), mullita (M), hematites (H), calcita (C), aluminatos cálcicos, etc. Las cenizas volantes altas en cal son más complejas y tienen mayor número de compuestos mineralógicos. En el estudio de cenizas volantes se han encontrado: cuarzo (Q), hematites (H) y anhidrita (An); en ocasiones se observa la presencia de silicatos cálcicos (CS), portlandita (P), cal libre y sílicoaluminatos cálcicos, Pardo y Luzán [25]. El carbón sin quemar, se presenta en la ceniza en forma de partículas irregulares; el porcentaje del carbón puede llegar del 10 % al 12 %; debido a la velocidad y temperatura de combustión, el grado de pulverización, de la naturaleza del material, etc.

---

[24] VARGAS, OBREGÓN, JUNCO, Op.cit., p.11.

[25] PARDO, Antonio; LUZÁN, Pilar; Normalización Española sobre Cenizas Volantes (Normas UNE). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Vol.; 39. No 394 (Marzo-Abril. 1988); p. 59-60

**Gráfica 1.** Difractogramas de rayos X de cenizas volantes españolas: c.v. baja en cal; b) c.v. alta en cal.



Fuente: Normalización española sobre cenizas volantes (normas UNE). Pardo y Luzán (1988).

**1.4.2 Tipos de Carbones.** Ochoa y González [26] explican que los tipos de carbones más comunes son conocidos como bituminosos, semitablilla, tablilla carbón y el de escorias conocidas como carbón del cannel y carbón de boghead. Exámenes realizados a través de microscopio de secciones delgadas, permiten identificar las partes de los árboles que se transformaron los componentes de carbones. Por este método tres componentes fueron identificados, los cuales son la base para determinar el tipo de carbón dependiendo de las proporciones de los componentes:

**Anthraxylon.** Es translúcido derivado de las partes leñosas de los árboles, las tiras gruesas eran ramas grandes o troncos de árboles y las tiras más delgadas eran ramitas.

[26] OCHOA, GONZÁLEZ Op.cit., p.32.

**Attritus.** Es de color gris embotado compuesto casi negro. Se forma de los materiales finos de las plantas. El attritus translúcido incluye la materia del humic similar al anthraxylon, pero con partícula de tamaño pequeño; el attritus opaco contiene una proporción más alta de material opaca granular y material amorfo negro.

**Fuseno.** Carbón de leña mineral, se caracteriza por su lustre de seda, estructura fibrosa y color negro. Los poros a veces están llenos con calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) o con pirita ( $\text{FeS}_2$ ).

Los términos anteriores son de la nomenclatura de Thiessen (americana). La nomenclatura más usada Stopes (europea) les da cuatro nombres: Vítreno, Clareno, Dureno y Fuseno.

Los principales tipos de carbones que se definen por las proporciones de los anteriores componentes son:

Carbón bituminoso, tiene más de 5 % de anthraxylon y menos de 20 % attritus opacos. Tablilla de carbón (embotado), debe tener más de 5 % de anthraxylon y un rango de 20 a 30 % de attritus opacos. El carbón semientablillado con más de 5 % anthraxylon y más de 30 % attritus opacos. Por último la Escoria o carbón del cannel con menos de 5 % anthraxylon.

La composición química del carbón cambia progresivamente durante la carbonatación a los compuestos de bajo oxígeno e hidrógeno, disminución de material volátil y aumentos de valor calorífico. La tabla 2 (Norma ASTM D388-92) clasifica los carbones por medio de carbono fijo, material volátil y el valor calorífico. Se dividen en dos grupos: los carbones de bajo rango (Lignítico y Sub-bituminoso) y carbones de alto grado (bituminosos y antracita). Carbones con el 69 % o más de carbono fijo en base seca y sin ceniza se clasifican según su contenido de carbón fijo, independientemente del poder calorífico.

**Lignítico.** Es la línea más baja de los combustibles sólidos. Es el carbón consolidado con alta humedad, poco dúctil sin consolidar. Está compuesto por tejidos de plantas leñosas y metamorfoseados fácil de reconocer. Tiene un poder calorífico entre 14.654 kJ/kg y 19.306 kJ/kg aproximadamente, según norma ASTM D388-92.

**Subbituminoso.** Este tipo de carbón puede presentar propiedades de un carbón lignito o bituminoso. Algunos tipos de carbones Sub-bituminosos son susceptibles de combustión espontánea, debido a baja densidad y alto contenido de agua. El color se presenta de marrón oscuro a negro. Está subdividido en subbituminoso A, B y C, clasificados por el poder calorífico con humedad natural.

**Bituminoso.** La línea más abundante de carbón, el color se encuentra en castaño oscuro al negro, y no se desintegra tan rápidamente como la escoria del subbituminoso. Carbón suave. Pueden existir variedades no aglomerantes en grupos del tipo bituminoso, especialmente entre los bituminosos con alto contenido en volátiles tipo C. Existen cinco tipos de carbón bituminoso: bajo en volátiles, medio en volátiles, alto en volátiles A, alto en volátiles B, alto en volátiles C.

**Antracita.** Es un carbón duro debido a su metamorfismo, el carbón fijo de la antracita está entre 92 % y 98 % del peso seco. Posee un valor calorífico aproximadamente 8100 Kcal/Kg. Tiene una imagen de semimetálico y fractura semiconcoidea. Se subdivide en tres grupos: meta-antracita, antracita y semiantracita; Esta última, si presenta carácter aglomerante, se clasifica como bituminoso de bajo contenido en volátiles.

El análisis inmediato consta de humedad, material volátil, carbón fijo y ceniza. La humedad es determinada calentando el peso a 1070 °C y la materia volátil por la pérdida de peso a 9500 °C. La pérdida por ignición y el carbón fijo se obtienen del 100 % de la muestra menos los porcentajes humedad, materia volátil y ceniza. La

ceniza es un material incombustible del carbón y en exceso reduce el poder calorífico.

**Tabla 2.** Clasificación ASTM D388-92 de los carbones según su rango

Clase	grupo	Lím. Carbón fijo		Lím. Material volátil		Lím. Poder calorífico				carácter aglomerante
		Igual o mayor que	menor que	Igual o mayor que	menor que	Btu/lb		kJ/kg		
						Igual o mayor que	menor que	Igual o mayor que	menor que	
Antracita	Meta-antracita	98	----	----	2	----	----	----	----	No aglomerante
	Antracita	92	98	2	8	----	----	----	----	
	Semiantracita	86	92	8	14	----	----	----	----	
Bituminosa	Carbón bituminoso, bajo en volátiles	78	86	14	22	----	----	----	----	Comunmente aglomerante
	Carbón bituminoso, medio en volátiles	69	78	22	31	----	----	----	----	
	Carbón bituminoso, alto en volátiles A	----	69	31	----	14.000	----	32.564	----	
	Carbón bituminoso, alto en volátiles B	----	----	----	----	13.000	14.000	30.238	32.564	
	Carbón bituminoso, alto en volátiles C	----	----	----	----	11.500	13.000	26.749	30.238	comunmente aglomerante
					10.500	11.500	24.423	26.749	aglomerante	
Sub-bituminosa	Subbituminosos A	----	----	----	----	10.500	11.500	24.423	26.749	No aglomerante
	Subbituminosos B	----	----	----	----	9.500	10.500	22.097	24.423	
	Subbituminosos C	----	----	----	----	8.300	9.500	19.306	22.097	
Lignítica	Lignito A	----	----	----	----	6.300	8.300	14.654	19.306	
	Lignito B	----	----	----	----	----	6.300	----	14.654	

Fuente: Fuentes de energía no renovables (I). EL CARBÓN. Josana (2014).

## 1.5 PROPIEDADES PUZOLÁNICAS

El término puzolana se adquirió de los tuff volcánicos encontrados cerca del Heno de Nápoles; la mejor consistencia de la ceniza volcánica se obtuvo cerca de Pozzoli, en la falda del Monte Vesuvius, donde los griegos antiguos y romanos

sabían que algunos depósitos volcánicos se mezclaban con tierra, cal, arena y agua; generaba morteros de fuerza superior, mejorando las propiedades cementantes, Ochoa y González [27].

Puzolana es un material silicio y aluminoso que en sí mismo posee un pequeño o ningún valor cementante pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes; debido, al desorden estructural y de su inestabilidad química. Existen puzolanas naturales y artificiales. Las puzolanas naturales son procedentes de erupciones volcánicas, excepto la tierra diatomácea, la cual es formada por silicatos amorfos hidratados, derivados de esqueletos de microorganismos acuáticos. Para los propósitos de esta especificación las puzolanas se dividen en cuatro clases:

**Clase N.** Puzolana natural cruda o calcinada, como alguna tierra diatomácea; opalina, horsteno y pizarra; tufas y cenizas volcánicas o piedra pómez, cualquiera que puede estar o no procesada por calcinación y varios materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias como algunas arcillas y pizarras. Con características composicionales (silico-aluminosos) y estructura amorfa.

**Clase S.** Ejemplos de materiales de esta clase incluyen ciertas piedras pómez procesadas y ciertas pizarras, arcillas y diatomeas calcinadas y trituradas, García B. y Ponce de León [28].

**Clase F.** Valbuena [29], reporta que estas cenizas son producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Contiene gran proporción de silicato vítreo con un alto contenido de sílice, con fases cristalinas de baja reactividad, como mullita, magnetita y cuarzo. Presentan pérdidas por ignición en

---

[27] OCHOA, GONZÁLEZ Op.cit., p.25.

[28] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.68-69.

[29] VALBUENA, Op.cit. p.33.

un rango entre 1 % y 10 %. El uso de esta ceniza en el concreto, mejora la trabajabilidad y a largo plazo mejora la resistencia.

**Clase C.** Según Marusin [30], estas cenizas son generadas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de cenizas presentan propiedades cementantes y puzolánicas. Contiene vidrio cálcico, aluminosilicato, cal libre (CaO), anhídrido de calcio (CaSO), aluminatotrícálcico,  $(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ , sulfaluminato cálcico  $(4\text{CaO}, 3\text{Al}_2\text{O}_3, \text{SO}_4)$  y silicatos de calcio. Cenizas clase C con contenidos elevados de calcio, reaccionan directamente con el agua formando fases cementantes. Presentan pérdidas por ignición menores del 1 %. Pueden presentar contenidos de cal, mayores que 10 %.

La Norma ASTM C 618 y NTC 3493 definen dos clases de cenizas volantes; como la clase F y C. Las clases N y S son puzolanas naturales.

La tabla 3 contiene un resumen de las características de las cenizas volantes clase C y F.

La ceniza volante producida al quemar el carbón se ha descrito como puzolana artificial. La propiedad puzolánica está indicada por la manera y rapidez con que la sílice de la ceniza volante se combina con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento Pórtland. La acción puzolánica depende de la calidad de las propiedades de las cenizas; como la finura, el peso específico, pérdida por ignición y la presencia de silicio, aluminio y hierro. Si la suma de los componentes  $(\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ y } \text{FeO}_3)$  es mayor de 70 %, la ceniza volante se clasifica como clase F. Si la suma de los tres constituyentes es 50 % o mayor, es considerada clase C, debido a los contenidos significativos de CaO, presentes en la ceniza.

---

[30] MARUSIN, Stella L. Experimental examination of fly ash concrete. American Society for Testing and Materials. 1984.

**Tabla 3.** Características de las cenizas volantes clase F y C.

CARACTERÍSTICAS	CENIZA VOLANTE CLASE C	CENIZA VOLANTE CLASE F
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≥ 50 %	≥ 70 %
Na <sub>2</sub> O	< 5 %	Puede ser > 10 %
SO <sub>3</sub>	≤ 5 %	≤ 5 %
CaO	10 % - 40 % Generalmente alto contenido (Pueden contener: periclasa, anhidrita, sulfato alcalino, melilita, merwinita, nefelina, sodalita, C <sub>3</sub> SC <sub>3A</sub> y otros). El calcio se combina principalmente con vidrios silíceos y aluminosos.	< 10 %
Pérdidas por ignición	< 1 %	1 % a < 10 %
Gravedad específica	2.4 – 2.8	
Principal compuesto activo	Calcio vítreo – aluminosilicato	Sílice vítrea o aluminosilicato
Puzolanidad	Propiedades cementantes y puzolánicas	Rara vez cementantes cuando se mezclan solas con agua
Fuente	Carbón sub-bituminosos o lignítico	Carbón antracítico o bituminoso
Reactividad	Al reaccionar con agua puede formar ettringita. Fases vítreas menos abundantes y más reactivas. A menudo exhiben una mayor tasa de reacción a edades tempranas que las clases F.	Requieren contenidos de vidrio mayores para ser tan efectivas en el concreto, como las cenizas clase C. Gran porción de sílice vítrea y fases cristalinas de baja reactividad (mullita, magnetita y cuarzo).
Partículas	Más finas y menos cenosferas.	
Propiedades que influyen en su comportamiento en el concreto	Finura, pérdidas por ignición, expansión y cantidad de SO <sub>3</sub> , CaO y álcalis.	Finura, pérdida por ignición y expansión.
Resistencia en el concreto	La resistencia a edades mayores de concretos de alta resistencia parece ser aceptable. Buenos resultados de resistencia a los 28 días. Cierta ceniza clase C no pueden mostrar la típica ganancia de resistencia a edades mayores de ceniza volante clase F. Existen fuentes que suministran material clase C que permite elevadas resistencias en el hormigón endurecido.	El concreto con ceniza volante clase F puede desarrollar menor resistencia a los siete días de edad o antes, en comparación con concretos sin ceniza volante. En concretos de alta resistencia se han utilizado cenizas clase F, que contribuyen a la trabajabilidad de las mezclas de concreto y ganancia de resistencia a largo término.
OBSERVACIONES	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El contenido de MgO de las cenizas volantes generalmente es &lt; 5 %.</li> <li>✓ Las cenizas volantes utilizadas en concreto, se caracterizan por tener pérdidas por ignición &lt; 6 %.</li> <li>✓ La actividad puzolánica se incrementa proporcionalmente con él %PTN° 325.</li> <li>✓ Se puede encontrar aluminato de calcio vítreo en cenizas volantes con contenidos de &lt;CaO mayores de 20 %. También silicatos de calcio y en menor proporción CaO libre.</li> </ul>	

Fuente: Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Valbuena (2006).

**1.5.1 Relación tres elementos fundamentales.** Se considera beneficiosa la ceniza volante con altos contenidos de sílice y aluminio, con un determinado

contenido de hierro, para ofrecer mayor resistencia a aguas agresivas. Con un alto contenido de estos tres elementos en las cenizas volantes, podrán reaccionar con la cal liberada por la hidratación del cemento Pórtland, formando compuestos de valor cementante de alta resistencia y mejorando la calidad del hormigón.

**1.5.2 Finura.** Al aumentar la finura de la ceniza, mayor será el efecto puzolánico en la resistencia del concreto, resistencia a la abrasión y resistencia al congelamiento. Este se debe a que la velocidad de hidratación de las partículas es mayor mientras más pequeñas sean y la reacción sílice-cal es más eficiente. Cuando la ceniza volante tiene una finura comparable a la del cemento Pórtland, puede ser competente para efectos puzolánicos.

**1.5.3 Peso Específico.** Como se mencionó con anterioridad, la acción puzolánica se favorece cuando la ceniza volante tiene peso específico entre 2,2 y 2,8 gr/cm<sup>3</sup>. Los elevados porcentajes de hierro aumentan la gravedad específica de la ceniza volante.

**1.5.4 Pérdida por ignición.** Según Valbuena [31], está relacionada con el contenido de carbón, donde el efecto puzolánico no se genera adecuadamente, debido a que es un material inerte y no permite la reacción sílice-cal. La ceniza volante con altos contenido de carbón produce una decoloración de la superficie del acabado en adicción al concreto, porque las partículas de carbón ascienden a la superficie. Esto también genera un fraguado más lento en el concreto. Los inquemados son partículas de carbón que no se quemaron adecuadamente, su presencia se debe al tipo de carbón, deficiencia de oxígeno en la planta, tamaños inadecuados de las partículas de carbón en la trituración y tiempo corto en el reactor.

---

[31] VALBUENA, Op.cit., p.32.

## 1.6 CONDICIONES DEL EQUIPO COLECTOR PARA EL USO DE LA CENIZA VOLANTE

La obtención de ceniza volante en el sistema de combustión, se fundamenta en la disposición de quemadores, la trituración y pulverización del carbón.

La finura de la ceniza se determina por el grado de pulverización del carbón, la composición química de la ceniza, de los tipos y cantidades de material mineral presente en el carbón quemado. El uso de las cenizas volantes está afectado por el tipo de colector usado. La elección del colector depende de las partículas más finas de la ceniza volante, antes de la combustión de los gases que se descargan en la atmósfera; puede ser por colectores mecánicos, precipitadores electrostáticos y filtros de tejido.

El colector mecánico es menos eficiente y no cumple con las cenizas en la especificación de la finura Blaine. El precipitador electrostático es más eficiente en la remoción de las partículas finas, por medio de la creación de un campo electrostático; las partículas volátiles se ionizan y precipitan. El precipitador electrostático proporciona una finura Blaine de 2,8 a 3 cm<sup>2</sup>/gr.

La ceniza se descarga en depósitos de alimentación presurizada, un sistema neumático extrae la ceniza volante y la transporta en aire a presión hasta un silo elevado de almacenamiento, Clavijo y Osorio [32].

En la planta Termotasajero, existe un ducto telescópico que permite descargar directamente la ceniza volante seca. Es importante la obtención de la ceniza volante seca, porque no sufre alteraciones importantes, como es el humedecimiento de la ceniza para almacenamiento.

---

[32] CLAVIJO, Oscar; OSORIO Juan; Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Bogotá, 2012, 76p. Trabajo de grado ingeniero civil; Universidad Antonio Nariño.

## **2. USOS DE LAS CENIZAS VOLANTES**

### **2.1 GENERALIDADES**

Considerando la disposición de las cenizas volantes y la posibilidad de aprovechar sus propiedades puzolánicas, se han realizado numerosas investigaciones en la industria de la construcción y especialmente en la fabricación de concreto, en varios países durante los últimos 25 años, con éxito considerable como en Estados Unidos, Inglaterra, Francia, España y Brasil.

Las principales aplicaciones son:

- Adición de cenizas al hormigón.
- Manufactura de cemento Pórtland.
- Agregados livianos.
- Estabilización de suelos.
- Terraplenes y rellenos.
- Mezclas asfálticas
- Otros usos.

En la industria de la construcción, la ceniza volante se ha considerado para estructuras como presas, canales, tuberías, fabricación de bloques, traviesas de ferrocarril, llenado mineral para pavimento asfáltico, terraplenes y drenajes. En Alemania usan las cenizas con cal, para la fabricación de ladrillos ligeros.

En 1939 un revestimiento de calzada fue realizado en Chicago, con cemento que contenía cenizas volantes. En 1952 se inauguró la presa de Hungry Horse sobre el río Flathead (Estados Unidos). La presa fue construida con un concreto que contenía 70 % de cemento y 30 % en peso de ceniza. En los años 30' se incorporaban puzolanas naturales para construcción de presas y obras hidráulicas, con reemplazos hasta de 20 % de cemento; posteriormente, se adicionaron las cenizas volantes producto de la combustión del carbón de las centrales

termoeléctricas. En los años 50 se presentó un desarrollo importante en Europa, en la incorporación al cemento Pórtland debido a la rápida instalación, disminución de permeabilidad y la resistencia al agua, generando los primeros cementos puzolánicos, para la reconstrucción de la post-guerra [33].

## 2.2 ADICIÓN EN MEZCLAS DE CONCRETO

Algunas investigaciones han tenido como objetivo la inclusión de cenizas en el hormigón, dando métodos, requisitos de calidad y técnicas para su correcta utilización. Es pertinente aclarar que no todas las fuentes de cenizas volantes son convenientes para el uso en el hormigón. Como ejemplo se muestra que “la ceniza volante que se produjo del quemado de carbón de lignito de Gippsland, en el estado de Victoria, tiene magnesia alta y volúmenes de sulfato que producen expansión en el concreto. La mayor aplicación para las cenizas en el hormigón a escala mundial es ser un componente de cemento en el hormigón. La ceniza es atractiva al producto del concreto, donde puede reducir el costo”, Ochoa y González [34].

Una de las investigaciones más importantes es la desarrollada en Canadá por Sivasundaram [35], por el CANMET (Canadian Centre for Mineral and Energy Technology), desarrollando concretos, adicionando grandes volúmenes de ceniza volante que tiene todos los atributos del concreto de alto rendimiento, como las propiedades mecánicas, permeabilidad baja, durabilidad, etc. El concreto con adición alta de cenizas volantes se desarrolló para realizar grandes masas de concreto, donde se requiere baja generación de calor y una resistencia inicial adecuada. Este concreto, puede usarse para las aplicaciones estructurales y para la construcción de pavimentos. En algunos estudios de Langley y Leaman [36] por

---

[33] H.S. Meissner. “Química del Cemento Portland”; Pozzolans used in mass concrete”. Symposium on use of pozzolanic material. ASTM 1950, p. 16.

[34] OCHOA, GONZÁLEZ Op.cit., p.22.

[35] SIVASUNDARAM, v. Termal Crack Control of Mass Concrete. MSL División Report. MSL 86-93 (IR). Energy, Mines and Resources Canadá. Ottawa. 1986. p 32.

[36] LANGLEY, W.S; LEAMAN, G.H. Practical User for High – Volumen Fly Ash Concrete Utilizing a Low Calcium Fly Ash. CANMET/ACI International Conference. American Concrete Institute. 1998. 5445- 574p.

el CANMET, se hallaron resistencias a compresión de 8 MPa el primer día, 35 MPa a los 28 días y 43 MPa a los 91 días, de especímenes con cenizas volantes. En aplicaciones de campo, las resistencias del concreto con adición de cenizas volantes fueron de 35 a 50 MPa a los 28 días y de 50 a 70 MPa a los 91 días.

Como se mencionó anteriormente, la ceniza volante puede usarse como adición en el concreto, debido a su acción puzolánica; puede reducir el costo, por la disminución de la cantidad de cemento de la mezcla de hormigón.

A continuación, se expondrán las propiedades que se mejoran con el uso de las cenizas volantes en las mezclas de concreto, pero se aclara que las ventajas y conclusiones que se mostrarán, no se deben generalizar para todas las cenizas; se necesita experimentación para establecer la viabilidad para su uso como adición. Esto se debe a que las cenizas tienen diversas composiciones mineralógicas, químicas y físicas.

**2.2.1 Obtención de mayor resistencia.** Según García B y Ponce de León [37], la ceniza volante se clasifica como puzolana, debido a la gran cantidad de sílice y aluminio que contiene. La resistencia se genera por la hidratación al combinarse el cemento Pórtland con agua. La reacción agua-cemento libera hidróxido de calcio  $\text{CaOH}_2$ ; el resto de la cal reacciona y genera un cemento rígido e insoluble, el cual le da al concreto su resistencia. Luego de que el material está endurecido y se expone a la humedad, el hidróxido de calcio  $\text{CaOH}_2$  se disuelve con el agua y sale a la superficie del material dejando vacíos. Cuando la cal llega a la superficie es atacada principalmente por el dióxido de calcio formando carbonato de calcio; también es atacada por sulfatos, magnesio, dióxido de azufre y trióxido de azufre. Como consecuencia, el concreto debe tener un mínimo de cal que supla con el aumento de la durabilidad y disminución de la permeabilidad.

La ceniza volante aprovecha la liberación de hidróxido de calcio del cemento reaccionando con él. La reacción química entre la cal hidratada, la sílice amorfa y

---

[37] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.8.

el óxido de aluminio, produce compuestos cementosos insolubles, haciendo que las mezclas de concreto con adición de ceniza volante sean más resistentes que un concreto común. Dado que se forman compuestos cementantes, se permite hacer una disminución de la proporción de cemento en la mezcla, dando la misma resistencia que un concreto común.

García B y Ponce de León [38], establecieron que la reacción depende del tiempo; como se muestra en la gráfica 2, la cal hidratada se produce y alcanza la pendiente cero dentro de los primeros 7 días; a partir de ese punto, la ceniza va reaccionando con la cal produciendo los silicatos insolubles, hasta que la cal es totalmente consumida aproximadamente a los 210 días. Ensayos muestran que durante la reacción agua-cemento se liberan 68 kg de cal hidratada por metro cúbico, donde esta cal puede ser utilizada para aumentar la resistencia final de la mezcla.

En la gráfica 3 se muestran resultados de laboratorio en resistencia a compresión, comparados con muestras de campo con mal curado. Estos datos dan una idea del factor de seguridad que ofrecen las mezclas de concreto con adición de cenizas volantes en alguna proporción. Se puede observar que las mezclas con cenizas volantes tienden a aumentar la resistencia a largo plazo. También se evidencia que un adecuado curado y control de las cantidades de los materiales aumenta la resistencia a la compresión. Datos suministrados por estos ensayos muestran que no todo el contenido de ceniza reacciona químicamente, sino que también incrementa la trabajabilidad por su fineza.

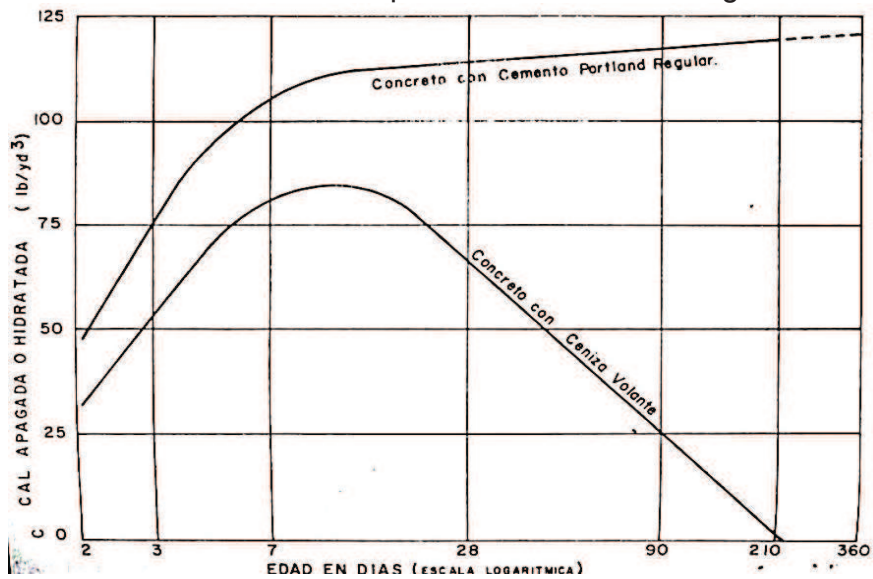
La finura es un factor importante a medida que aumenta y cumple con la finura Blaine; los ensayos de resistencia de 10 % de adición de ceniza, tienen valores aproximados a las mezclas preparadas únicamente con cemento. Sivasundaram [39] mostró que las cenizas volantes clase C tienen una rata de reacción mayor a edades tempranas que las cenizas clase F, y la resistencia a edades mayores en concretos es aceptable.

---

[38] Ibid. p. 9-10.

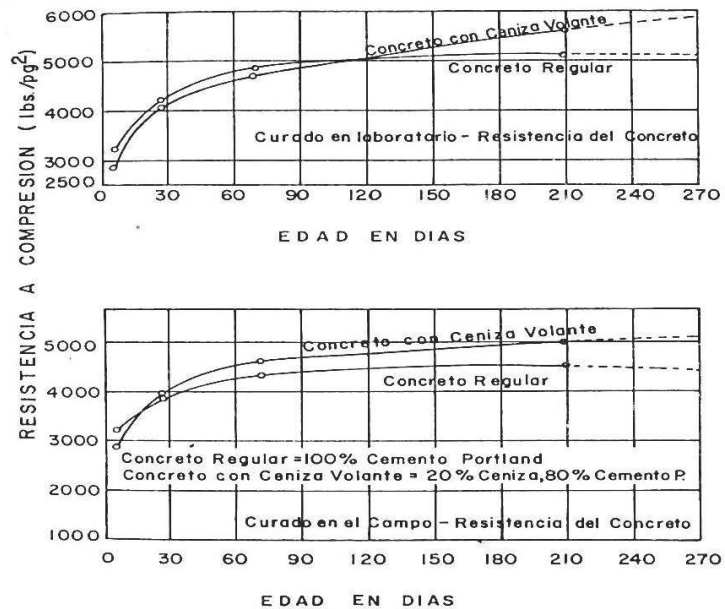
[39] SIVASUNDARAM, V. Fly ash in concrete. Compilation of abstracts of papers from recent international conferences and symposia on fly ash in concrete. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Septiembre 1987.

**Gráfica 2.** Variación de cal hidratada producida en reacción agua-cemento.



Fuente: La ceniza volante como aditivo en el concreto. García B y Ponce de León (1978).

**Gráfica 3.** Ensayos de resistencia a la compresión de muestras del concreto de laboratorio y muestras de campo.



Fuente: La ceniza volante como aditivo en el concreto. García B y Ponce de León (1978).

**2.2.2 Mejora en la trabajabilidad.** Un 15 a 20 % del agua utilizada en mezclas de concreto completa el proceso de hidratación; la restante le proporciona movilidad a la mezcla. Cuando ocurre el fraguado, el agua se evapora y se producen vacíos que tiene consecuencias en la resistencia, García B y Ponce de León [40]. Los concretos con cenizas volantes requieren menos agua, aproximadamente de 1 % a 10 %, en comparación con concretos que solo tiene cemento Pórtland.

La ceniza volante proporciona a los concretos una mayor manejabilidad y colocabilidad. La ausencia de partículas finas en los agregados se mejora con la adición de la ceniza; con su extrema finura y forma sirve como lubricante entre los agregados. Así, la cantidad de agua puede reducirse sin afectar la trabajabilidad ni la colocabilidad.

Para concretos Arquitectónicos, el uso de las cenizas volantes es muy importante para darle manejabilidad y colocabilidad a la mezcla. La cantidad de ceniza para concretos arquitectónicos se dosifica para lograr una trabajabilidad y resistencia requerida.

**2.2.3 Menor calor de hidratación.** Cuando el concreto es utilizado en masa, para grandes estructuras, un gran problema es el aumento de la temperatura en el fraguado, creado por la hidratación del cemento, generando esfuerzos que pueden ocasionar grietas peligrosas. En este caso, es importante el gradiente de temperatura entre el centro y la superficie del elemento del concreto. Neville [41] sugiere, que si el gradiente de temperatura no excede los 20 °C por metro, no ocurrirá agrietamiento térmico producido por el enfriamiento.

En la gráfica 4, García y Ponce de León [42] encontraron que la adición de ceniza reduce el calor de hidratación en proporción directa a la remoción del cemento, debido a que la ceniza es un material inerte y reacciona lentamente, reduciendo la

---

[40] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.12.

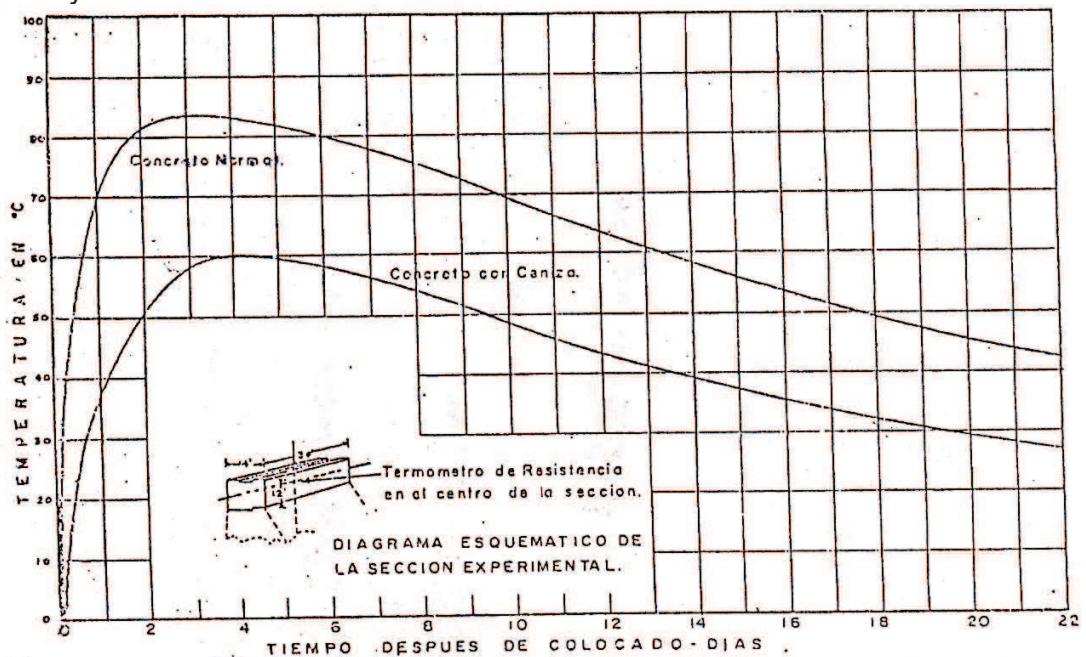
[41] A. M. Neville, "Concreting technology / an essential element of structural design", Concrete International (1998).

[42] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p. 17.

rata de generación de calor. Al reaccionar ( $\text{AlO}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) con la cal libre ( $\text{CaO}$ ), se forman dos compuestos químicos, hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado, llamado gel de Tobermorita.

Estructuras que están sometidas a cambios bruscos de temperatura, pueden sufrir disminución en el módulo de elasticidad; por esta razón es adecuado añadir inclusive de aire a las mezclas con ceniza y sin ceniza. También se observó que la ceniza es benéfica para efectos de congelamiento y descongelamiento.

**Gráfica 4.** Variación de la temperatura con el tiempo de fraguado en concreto normal y concreto con ceniza.



Fuente: La ceniza volante como aditivo en el concreto. García B y Ponce de León (1978).

**2.2.4 Menor permeabilidad.** Esta particularidad se debe a que la ceniza volante en adición al concreto, forma compuestos insolubles por la reacción cal-ceniza, que genera un material cementante con mayor obturación de poros presentes en el concreto. Las mezclas con adición de cenizas volante son comunes en

construcciones de diques, muros de contención y construcciones en presencia de niveles freáticos y altas humedades. García y Ponce de León [43].

La investigación realizada por Tarun, Shiw y Mohammad [44], evaluó la influencia de la adición de cenizas volantes tipo C en la permeabilidad de concretos. Se realizó una mezcla de concreto simple como referencia con resistencia a los 28 días de 41 MPa. Las mezclas con adiciones fueron dosificadas con reemplazos de cemento por ceniza de 0 a 70 % por peso. Se determinó la resistencia y la permeabilidad para cada mezcla. Los concretos analizados con alto contenido de cenizas volantes presentaron menores resistencias en comparación al concreto de referencia. Para edades menores de 40 días, los especímenes con ceniza volante mostraron valores de permeabilidad al agua similares a los concretos sin adición. A 90 días, las mezclas con cenizas volantes presentaron valores menores que el concreto de referencia.

Los efectos del curado de campo y de laboratorio sobre las características de permeabilidad y durabilidad en concretos con adición y sin adición, fueron investigados por Huseyin, Mohammed y Abdulhamid [45], indicando que los curados húmedos más largos son útiles en la producción de concretos densos y de baja permeabilidad en los dos casos. Los concretos con cenizas volantes presentaron permeabilidades más bajas que los concretos estándares, en una semana de curado de campo y de laboratorio. Se puede generar un beneficio económico y técnico, incluyendo regiones en donde el curado del concreto es inadecuado debido a altas tasas de evaporación.

**2.2.5 Menos expansiones y contracciones.** El fenómeno de expansiones es muy dañino para las mezclas de concreto, generado por la reacción cemento-agregados; sin embargo, la adición de la ceniza disminuye los requisitos de agua. La ceniza funciona como lubricante entre los agregados, generando mejor textura

---

[43] Ibid. p. 15.

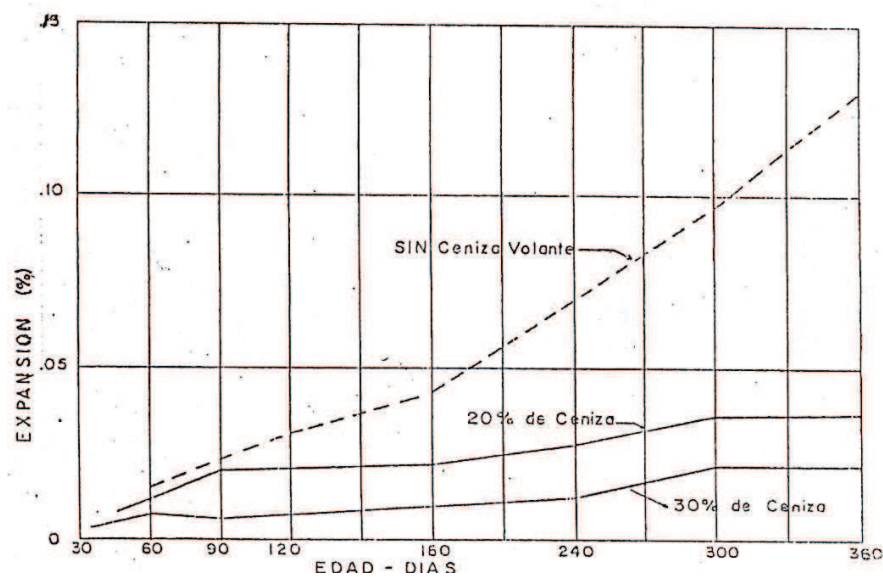
[44] TARUN, R. Naik, SHIW, S. Singh y MOHAMMAD M. Hossain. "Cement and Concrete Research", Vol. 24, N. 5, 1994. pp 913-922.

[45] ABDULHAMID.J, HUSEYIN, Saricimen; MOHAMMED, Maslehuddin. "ACI Materials Journals", Vol 92, N. 2, Marzo. Abril, 1995, pp 111-116.

del material y es adecuada para resistir cambios bruscos de temperatura. Esta ventaja es útil en pavimentos con losas de concreto, que se agrietan rápidamente. Valbuena [46], reportó la norma NTC 3493 (ASTM C618), para limitar el contenido de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) con valor máximo del 1.5 % para las cenizas volantes clase C y F, si el concreto se elabora con agregados reactivos.

En la gráfica 5 se muestra la expansión de mezclas de concreto sin adición de cenizas, 20 % de ceniza y 30 % de ceniza, de la investigación realizada por García B y Ponce de León [47].

**Gráfica 5.** Comparación de expansiones producidas en mezclas de concreto con ceniza y sin ceniza.



Fuente. La ceniza volante como aditivo en el concreto. García B y Ponce de León (1978).

**2.2.6 Resistencia al ataque químico.** Como se expresó anteriormente, la cal liberada por el concreto es atacada por agentes químicos como los sulfatos, sodio,

[46] VALBUENA, Op.cit., p.36.

[47] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p. 20.

magnesio, bióxido de azufre y trióxido de azufre. El concreto con ceniza es inherentemente resistente a sulfatos y al ambiente marino, debido a la reducción en la cal libre y la alúmina reactiva. Ejemplos de ataques químicos: instalaciones industriales, alcantarillas domésticas y tanques de conserva. Las cenizas volantes en adicción al concreto mejoran en alto grado la durabilidad. La corrosión del refuerzo de acero en concreto de ceniza depende de la carbonatación y la penetración de cloruros. La carbonatación depende de la relación agua/cemento de 0.32 y del curado [48].

Ochoa y González [49], explicaron la causa del ataque de sulfatos en el hormigón; se debe a la presencia de  $C_3A$  (Aluminato tricálcico) en el cemento Pórtland y los iones del sulfato del ambiente, produciendo expansión del sulfato en el concreto. Se han realizados estudios de la resistencia al sulfato, del concreto con ceniza y concreto sin ceniza; las muestras se sumergieron en una solución de 5 % de  $Na_2SO_4$ . El hormigón de ceniza mostró una expansión del sulfato baja. Esto se debe a que la mayoría de  $Ca(OH)_2$  se consume en la reacción puzolánica y la permeabilidad baja.

La resistencia al ácido sulfúrico, de mezclas de concreto con cenizas volantes se observa en la gráfica 6.

En la experiencia de la Isla Treat, en 1987, de la exposición de prismas de concreto con cenizas volantes a una atmosfera marina y a la inmersión en el agua del mar. Luego de 8 años de exposición, los resultados de los prismas de concreto con ceniza volante con relación agua / cemento de 0.31, mostraron condiciones excelentes, pero los primas con relación agua / cemento de 0.35 presentaron escamaduras en la superficie. Para la exposición en el ambiente marino se

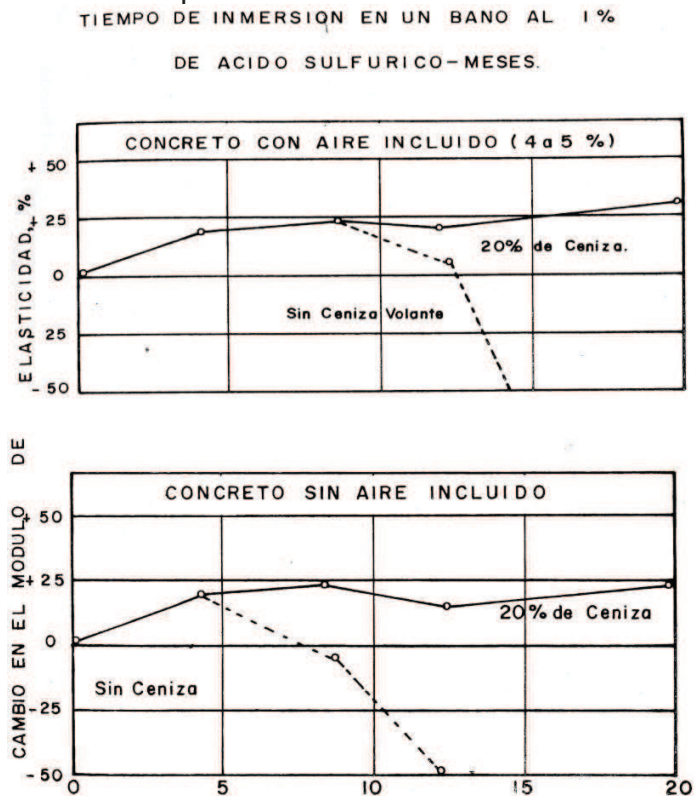
---

[48] GU, P. BEAUDOIN, J; ZHANG, M. H.; and MALHOTRA, V. M. "Performance of Reinforcing steel in Portland Cement and High – Volume Fly Ash concrete". MTL Division Report MTL 98 – 11 (OP&J), Natural Resources Canadá, Ottawa. 1998. p 19.

[49] OCHOA, GONZÁLEZ Op.cit., p.22.

recomienda emplear la relación agua / cemento del concreto con adición de cenizas volantes de 0.31 [50].

**Gráfica 6.** Resistencia de mezclas de concreto con ceniza volante y mezcla ordinaria cuando es atacado por el ácido sulfúrico.



Fuente. La ceniza volante como aditivo en el concreto. García B y Ponce de León (1978).

**2.2.7 Colocabilidad y terminados.** Está relacionada con la trabajabilidad; la colocabilidad beneficia considerablemente el uso de la ceniza volante como adición al concreto. La adición de la ceniza genera mezcla con superficies llanas y mejores características de terminado al concreto. Las características anteriores dependen de la dosificación de la adición de ceniza en la mezcla. Su utilidad es de

[50] MALHTRA, V. M. and BREMNER, T. W. "Performance of Concrete at Treat Island, USA, CANMET Investigations". Concrete in Marine Environment: Proceedings of Third CANMET /ACI International Conference. American Concrete Institute. 1996. p. 52.

gran importancia en concretos colocados a presión y lechadas, por su fácil trabajabilidad y colocabilidad de la mezcla, García B y Ponce de León [51].

Amahjour, Payá, Monzó y Borrachero [52], investigaron la influencia de la adición de la ceniza volante y humo de sílice en las propiedades de las lechadas, como la fluidez, exudación, variación del volumen y la resistencia a la compresión. La ceniza volante permite obtener lechadas con menores relaciones de agua/conglomerante y mayor fluidez, evitando la exudación y retracción. La resistencia a la compresión de las lechadas con puzolanas son elevadas, debido al desarrollo de microestructuras activadas por la presencia de puzolanas y de la relación agua/cemento. Las propiedades de las lechadas con puzolanas son óptimas hasta un 30 % de sustitución.

Se utilizaron 14.000 toneladas de cenizas volantes de la central termoeléctrica de AEP's Rockport (Indiana), actuando como puzolana en el concreto vertido para la reconstrucción de la interestatal, I – 70 en el condado de Clark, Indiana. (E.E.U.U).

## 2.3 FORMA DE USO DE LA CENIZA VOLANTE

A continuación se identificarán tres métodos para la inclusión de la ceniza volante en las mezclas de concreto.

**2.3.1 Reemplazo de cemento.** Este método es aconsejable cuando en el lugar sea difícil el control y no se requiera una resistencia temprana. Se debe determinar previamente la mezcla óptima de concreto y con base en estas dosificaciones se investiga el porcentaje más adecuado en peso, de reemplazo de ceniza por

---

[51] GARCÍA B, PONCE DE LEÓN, Op.cit., p.20.

[52] AMAHJOUR, F; BORRACHERO, M.V; MONZÓ, J.M; PAYÁ, J. Materiales puzolánicos mixtos a base de ceniza volante de central termoeléctrica de carbón (CV) y humo de sílice (HS). VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. Aplicaciones para la fabricación de morteros. Actas del III Cong. 1999. 449-456p.

cemento. El porcentaje se encuentra establecido entre 10 a 30 %, eligiendo el que permita mayores ventajas.

**2.3.2 Reemplazo del cemento y/o arena.** En el caso de reemplazo de arena por ceniza, el procedimiento es similar al anterior, pero el reemplazo se realiza en volumen, para evitar el exceso de material fino; la ceniza es menos densa que la arena (10 a 30 % de volumen). Cuando la sustitución es cemento y arena, la ceniza puede reemplazar un máximo de 20 % del cemento y el resto a la arena. Este método es útil cuando la arena contiene deficiencia de finos.

**2.3.3 Método resistencia especificada.** Según Vargas, Obregón y Junco [53], este método calcula la cantidad de ceniza que debe ser añadida a una mezcla, para que cumpla con la misma resistencia específica a los 28 días, de una mezcla ordinaria de concreto. Análisis Americanos plantearon tres ecuaciones que se deben cumplir.

$$\frac{F}{C} = \frac{\left(\frac{W}{C}\right)'_s - \left(\frac{W}{C}\right)'_w}{\frac{G_{sc}}{G_{scv}} \left(\frac{W}{C}\right)'_w - k \left(\frac{W}{C}\right)'_s} \quad (1)$$

$$\frac{W}{C} = \left(\frac{W}{C}\right)'_s * \left(1 + K \frac{F}{C}\right) \quad (2)$$

$$\frac{A}{C} = N \frac{\frac{W}{C}}{\left(\frac{W}{C}\right)'_w} \quad (3)$$

---

[53] VARGAS, OBREGÓN, JUNCO, Op.cit., p.48-49.

$\frac{F}{C}$  = Relación ceniza volante/cemento.

$\left(\frac{W}{C}\right)'_s$  = Relación agua/cemento por peso, del concreto de mezcla ordinaria, con resistencia equivalente al concreto con ceniza.

$\left(\frac{W}{C}\right)'_w$  = Relación agua-cemento del concreto de mezcla ordinaria, con trabajabilidad equivalente al concreto con ceniza.

$\frac{W}{C}$  = Relación agua/cemento por peso en concreto con ceniza.

$G_{scv}$  = Peso específico de la ceniza volante.

$G_{sc}$  = Peso específico del cemento.

$K$  = Constante eficiencia cementante; es necesaria para ajustar la relación agua/cemento del concreto de ceniza volante, para obtener una resistencia equivalente. El producto  $KF$  da un efecto equivalente al cemento.

$\frac{A}{C}$  = Relación agregado/cemento por peso, del concreto con ceniza.

$N$  = Relación agregado/cemento en peso del concreto y de manejabilidad equivalente al concreto con ceniza.

Para la aplicación de los métodos es necesario tener en cuenta la selección de tipo de ceniza, calidad y tener una adecuada relación agua-cemento. La característica para la escogencia de los métodos depende de las condiciones a las que estará sometida la mezcla.

## 2.4 REQUISITOS PARA EL USO DE LA CENIZA VOLANTE

La composición química y física de las cenizas es compleja y muy variada, donde sus componentes y propiedades producen efectos en las mezclas de concreto. Los países desarrollados han logrado establecer normas; sin embargo, estas son solamente guías para determinar la calidad de las cenizas y no existe una clara

evidencia de que cenizas con estos requerimientos tengan unos resultados aceptables; también, cenizas que no cumplen los requerimientos pueden tener resultados favorables en su uso, ya que no se pueden establecer características y comportamiento del concreto con adición, sino con la caracterización de las cenizas volantes y mezclas de prueba en el laboratorio para cada caso en particular.

Con los requerimientos físicos y químicos de las cenizas, establecidos por las normas A.S.T.M C 618-91 y NTC 3493, no es suficiente para que la ceniza volante analizada, cumpla con las ventajas en la aplicación en las obras ingenieriles.

Las especificaciones establecen requisitos mínimos y máximos para el uso de este residuo. El éxito de la ceniza volante depende de la composición química; debe contener altas proporciones de sílice, aluminio y hierro, elevada finura, mínimo de contenido de carbón, bajo porcentaje de pérdidas por ignición y un elevado peso específico. La finura es otra propiedad importante, la cual proporciona consistencia y mejor trabajabilidad a la mezcla, Valbuena [54].

Como se indicó, si las proporciones de óxidos de silicio, aluminio y hierro suman 70%, la ceniza volante es considerada puzolana clase F y mayores que 50 %, puzolana clase C, con alto porcentaje de cal (CaO).

Las normas ASTM C 618 y NTC 3493 definen los requisitos físicos y químicos de las cenizas volantes, para el uso en el hormigón de cemento Pórtland. La norma ASTM C 311 incluye los métodos para el análisis químico y las pruebas físicas.

La tabla 4 presenta los requerimientos físicos y químicos de las cenizas volantes, según la norma A.S.T.M C 618-73.

---

[54] VALBUENA, Op.cit., p.39-40.

**Tabla 4.** Requisitos de las cenizas volantes según la norma ASTM C618.

Requisitos Químicos	Mínimo	Máximo
Dióxido de silicio + óxido de aluminio + óxido de hierro (SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	70%	----
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	----	5%
Contenido de humedad	----	3%
Pérdida por ignición	----	12%
Álcalis como Na <sub>2</sub> O	----	1,50%

Requisitos Físicos	Mínimo	Máximo
<u>finura</u>		
1. Superficie específica	3,25 cm <sup>2</sup> /gr	---
2. Cantidad retenida tamiz 325	---	34%
<u>Factor múltiple</u> (producto pérdida de ignición y finura)	---	255%
<u>Índice de actividad puzolánica</u>		
1. Con cemento Portland, 28 días	85%	---
2. Con cal, 7 días	80%	---
<u>Agua requerida</u>	---	105,00%
<u>Solidez</u> (expansión o contracción en autoclave)	---	0,50%
<u>Reactividad con álcalis del cemento</u>	---	
Expansión del mortero a los 14 días	---	0,02%
<u>Retracción por secado, 28 días</u>	---	0,03%

Fuente: Cenizas de Termozipa, propiedades y usos en el hormigón. Vargas, Obregón y Junco (1980).

## 2.5 MANUFACTURA DE CEMENTO

Una de las aplicaciones con relevancia es la manufactura de cemento Pórtland puzolánico, donde es posible producir cemento de alta calidad y grandes ventajas económicas. Estas ventajas se deben a la simplificación de la manufactura, en donde la ceniza volante es fuente de sílice y aluminio para la producción de cemento Pórtland puzolánico. El cemento con ceniza volante se ha utilizado para

usos específicos, como los concretos para presas, por el bajo calor de hidratación conseguido por la sustitución de 50 % de Clinker por cenizas volantes.

La ceniza volante en el proceso de fabricación, es incorporada al Clinker antes del proceso de trituración; así aumenta la finura de la ceniza y se obtiene una mezcla homogénea. Se simplifica el proceso de manufactura, donde la ceniza volante actúa como material competente como fuente de sílice y aluminio. Mejora la calidad debido a un alto grado de saturación, contenido elevado de C<sub>3</sub>S (Silicato tricálcico) y C<sub>2</sub>S (Silicato dicálcico), Fernández [55]. En la tabla 5 se presenta un análisis de materiales típicos usados para la producción de cemento y se comparan con las cenizas volantes.

**Tabla 5.** Compuestos de Clinker

Compuesto químico %	Cemento Pórtland	Material calcáreo		Material Arcilloso			Ceniza volante típica
		Caliza	Yeso	Arcilla	Esquisto	Pizarra	
SiO <sub>2</sub>	19-23	2,5	4,6	58,2	51,7	57,4	20-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-8	1,5	2,6	18,4	22,4	23,7	10-35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-4	0,3	1,3	9,3	11,2	4,5	5-35
CaCO <sub>3</sub>	62-66 (CaO)	94,5	90,6	3,3 (CaO)	4,3 (CaO)	5,7	1-20 (CaO)
MgCO <sub>3</sub>	1-4 (MgO)	1,2	0,9	3,9 (MgO)	1,1 (MgO)	7,8	0,3-4 (MgO)
SO <sub>3</sub>	1-2,5	----	----	4,2	2,1	----	1-12
Álcalis	0,5-2	----	----	4,2	3,7	----	1-4

Fuente: Cenizas de Termozipa, propiedades y usos en el hormigón. Vargas, Obregón y Junco (1980).

Los materiales usados en la producción de cemento Pórtland son materiales arcillosos y calcáreos, que generan la composición química del Clinker.

[55] FERNÁNDEZ; Manuel. Influencia de la adición de cenizas volantes en sustitución de cemento y de las temperaturas de curado en las resistencias mecánicas del hormigón.p.12.

**Materiales calcáreos.** Son rocas calizas, margas, rocas cementantes, conchas marinas y productos de hidróxido de calcio.

**Materiales arcillosos.** Arcillas, esquistos, pizarras, escorias de horno.

## 2.6 CENIZA EN AGREGADOS LIVIANOS

Según Vargas, Obregón y Junco [56], los agregados normales como la grava y arena, usados para concretos corrientes, tienen una densidad aproximada de  $2,3 \text{ ton/m}^3$ . El concreto con agregados livianos tiene una densidad menor de  $1,9 \text{ ton/m}^3$ . Sin embargo, los concretos con agregados livianos poseen bajas densidades y resistencia.

Utilizando la ceniza como agregado liviano, con método de sinterización, se puede obtener concreto de  $1,5$  a  $1,9 \text{ ton/m}^3$  y con resistencia de concretos normales. Esto reduce el peso del concreto en un 20 a 30 %, produciendo rentabilidad.

La sinterización de la ceniza genera una baja densidad, debido a la estructura hueca de algunos granos de ceniza; la resistencia depende del aglutinamiento de las partículas finas.

## 2.7 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos está direccionada a tratamientos mecánicos y químicos, que se podrían realizar a un determinado material, para generar un uso específico. La estabilización mejora propiedades como: resistencia, permeabilidad, compresibilidad y durabilidad.

---

[56] VARGAS, OBREGÓN, JUNCO, Op.cit., p.57-58.

Los métodos para la estabilización de suelos son:

- Estabilización mecánica
- Estabilización con cemento
- Estabilización con cal
- Estabilización con asfalto
- Estabilización con silicatos de sodio, resina de anilina, lignina de cromo.
- Estabilización cal-ceniza. (método de estudio).

La elección del método estabilizador depende de: tipo de suelo, requisitos de carga, disponibilidad y costos.

**2.7.1 Estabilización ceniza-cal.** Vargas, Obregón y Junco [57], basados en investigaciones realizadas en Inglaterra y Colombia, demostraron que la estabilización de suelos por este método y con resultados de resistencia a la compresión inconfiada depende de seis aspectos fundamentales.

- Actividad puzolánica y calidad de la ceniza.
- Relación cal-ceniza.
- Contenido total.
- Tipo de suelo.
- Temperatura de curado.

La calidad de la ceniza depende de una baja pérdida por ignición, suficiente área superficial, elevado peso específico, contenidos considerables de sílice, aluminio y hierro y una alta finura. Se necesita un mínimo de contenido de carbón; debido a que los inquemados disminuyen el peso unitario seco y aumentan la necesidad de agua. La finura y el contenido de carbón son relacionadas inversamente; a mayor finura, existe la posibilidad de que reaccione con la cal hidratada.

---

[57] *Ibíd.*, p. 62-63.

Los ensayos para evaluar la ceniza para el uso en la estabilización de suelos son: pasa tamiz N° 325, contenido de carbón por medio de ensayo de pérdida por ignición a 750 °C. La muestra debe cumplir con un 80% pasa tamiz N° 325 y contenido de carbón máximo de 10 %, para el uso de la estabilización de suelos.

La temperatura es un factor importante para el uso de la ceniza en la estabilización de suelos; a mayor temperatura, mejor resistencia. Esto se debe a la reacción puzolánica.

Si hay una relación alta de cal-ceniza, existe mejor resultado en la estabilización; los rangos de relación cal-ceniza están entre 1:10 a 1:2. Con relaciones altas se pueden estabilizar suelos arcillosos.

Para la estabilización de suelos ceniza-cal, las reacciones puzolánicas dependen de los materiales silíceos y aluminosos del suelo a estabilizar. Se debe basar en las características físicas del suelo con ceniza.

**2.7.2 Tipo de suelo estabilizado.** Los resultados favorables se presentan en suelos granulares con bajos porcentajes de suelos finos, dando una adecuada consistencia y puede reaccionar adecuadamente con la cal. En los suelos arcillosos, la estabilización cal-ceniza es perjudicial y genera decrecimiento de la resistencia del suelo. Esto se debe, a la reacción cal con fracción de arcilla y como resultado debilita las propiedades cementantes.

## **2.8 TERRAPLENES Y RELLENOS**

La ceniza estabilizada genera asentamientos mínimos, se puede usar para terraplenes contra estribos de puentes, fundaciones de suelos blandos, etc. Otras ventajas que brindan las cenizas volantes son: relleno liviano, capacidad portante aceptable, facilidad de compactación y material no plástico.

La estabilización de la ceniza se realiza con cal o con cemento, para mejorar las características físicas, químicas, cementantes y puzolánicas.

Un rango óptimo de cal con en ceniza está entre 6 a 10 %, donde la mezcla no presenta expansiones, no se disminuye la permeabilidad ni varía considerablemente la humedad.

Un ejemplo claro del uso de la ceniza como relleno a nivel mundial, es la construcción de la carretera interestatal, Interstate 64/ U.S. Route 35, cercana a Hurricane, W. Va. En Virginia del Oeste (E.E.U.U), en que se usaron 130.000 m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de ceniza volante.

## 2.9 CENIZA EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Estudios de la ceniza como material llenante en mezclas de pavimentos asfálticos fueron realizados por la compañía Edison de Detroit en 1930, dando resultados y sugiriendo especificaciones para el uso. La ceniza volante debe pasar el tamiz N° 40 con el 100 %, pasar no menos de 75 % en el tamiz No 200 y contener un máximo de 12 % de pérdidas por ignición. Vargas, Obregón y Junco [58]. En la tabla 6 se muestran ejemplos de proporciones usadas en Estados Unidos.

**Tabla6.** Proporciones de materiales en mezclas asfálticas

Tipo	Ingredientes, libras por tonelada de mezcla			
	Ceniza	Arena	Asfalto	Piedra partida
Asfalto laminar	220	1580	200	0
Capa de conglomerante	90	720	110	1080 (<=1/2 pg)
Concreto asfáltico	80	730	110	1080 (<=3/8 pg)
Carpeta de grava petrolada	110	950	90	850 (<=1/2 pg)

Fuente. Cenizas de Termozipa, propiedades y usos en el hormigón. Vargas, Obregón y Junco (1980).

[58] *Ibíd.*, p. 78-80.

Según Bhatti [59], las cenizas volantes hidratadas pueden ser utilizadas para hacer el agregado para las bases flexibles. Las cenizas volantes hidratadas son duras y pueden tener fuerzas compresivas hasta de 15 MPa. Cuando están procesadas, las cenizas volantes hidratadas continúan ganando fuerza después de la colocación, formando una capa rígida homogénea.

## **2.10 FABRICACIÓN DE MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN**

Entre los múltiples y variados usos de las cenizas volantes en el sector constructivo, se presentarán algunos como insumos para construcción.

**2.10.1 Tuberías de concreto.** En la fabricación de tuberías con adición de cenizas volantes se aumenta la durabilidad y resistencia, por la disminución de permeabilidad, resistencia al ataque químico por la adición al concreto de propiedades puzolánicas.

La investigación realizada por Lizarazo [60], estudió el ataque del ácido sulfúrico sobre las tuberías de concreto, que se realizan para la recolección de aguas residuales domésticas, pluviales e industriales. Se realizaron ensayos sobre probetas de concreto simple, estudiando el comportamiento frente a la acción de corrosión y probetas de concreto reforzado, donde se vigiló el comportamiento del acero frente a la acción del ácido. De igual forma, se analizó el comportamiento de la ceniza cuando se adiciona al concreto.

---

[59] BHATTY, J. Pautas para usar las cenizas volantes hidratadas como base flexible. Administración federal de la carretera (FHWA). El departamento de Ingeniería Civil de la universidad del tech de Tejas. ICCI. N. 99-1/2.1 A-1. (Octubre. 2000).

[60] LIZARAZO, Juan; Comportamiento de Tuberías de Concreto Frente a la Acción del Ácido Sulfúrico. Bogotá, 2003. Tesis de Grado de Especialización en Estructuras. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

Los resultados presentaron corrosión solamente sobre la superficie exterior del concreto. En las adiciones con un 17 % de ceniza volante, se presentó un mejor comportamiento al ataque del ácido sulfúrico en comparación con las muestras sin cenizas.

**2.10.2 Morteros y estucos.** La fácil manejabilidad de la ceniza volante en adición con cemento, permite aprovechar sus ventajas de colocabilidad y terminados, para producir mejores acabados.

**2.10.3 Ladrillos y bloques.** En la fabricación de ladrillos, la ceniza es añadida como reemplazo de material granular en un 20 % a 30 %, necesario para evitar agrietamientos e hinchamientos producidos por la alta contracción de la arcilla. Se obtiene mejor resistencia, textura y peso. Se constituye como alternativa para evitar el deterioro del medio ambiente.

## **2.11 OBRAS REALIZADAS CON CENIZAS VOLANTES**

En la construcción, la ceniza volante se ha considerado, para estructuras como presas, canales, tuberías, fabricación de bloques, traviesas de ferrocarril, llenado mineral para pavimento asfáltico, terraplenes y drenajes, generando viabilidad económica y ambiental. A continuación se relacionan los usos a nivel mundial, de las cenizas volantes en la industria de la construcción.

**2.11.1 Unión Europea.** En Europa se han implementado las cenizas volantes en la adición de mezclas de concreto, con normativas específicas y claras, para hacer posible concretos de alta resistencia. Desde 1989 en países como Alemania, Dinamarca, Holanda, España, Finlandia, Francia, Inglaterra, Italia, Irlanda, Polonia y Portugal, se han utilizado las cenizas volantes en materia prima en cemento,

bloques, construcción en carreteras, rellenos, ladrillos y aditivo en hormigones [61].

En los años 50 tuvo aplicación importante en Europa la incorporación al cemento Pórtland; debido a la rápida instalación, disminución de permeabilidad y la resistencia al agua.

**Alemania.** En la actualidad este país, usa los 57,5 % de la producción total de cenizas agregados livianos como reemplazo del cemento. En Alemania usan las cenizas con cal, para la fabricación de ladrillos ligeros aireados con vapor.

Se utilizó hormigón con cenizas volantes, en elementos estructurales para las torres “Castor and Pollux” (Frankfurt). Se consiguió una reducción del calor de hidratación en el hormigón.

**España.** Las (CV) se usan para la fabricación de traviesas, en la construcción de vías férreas; de igual forma, para sub-bases de estas obras. En los últimos años se implementa en la construcción de paneles de construcción contra incendios. La fabricación de cemento es uno de los campos más amplios para la utilización de cenizas volantes.

En la carretera Sevilla – Granada (1989) y en la N-I Madrid- La Coruña (1987), se utilizó en rellenos, terraplenes y estabilización de suelos [62].

Se ha implementado en morteros, como el caso de la rehabilitación del Jardín “El Capricho (XVII) en la Alameda de Osuna (Madrid).

---

[61] PEÑA, Umaña. Síntesis de eolitas a partir de cenizas volantes de centrales termeléctricas de carbón. Departamentd’Enginyeria Minera i Recursos Naturals. Abril. 2002. Universidad politécnica de Catalunya.

[62] COLMENAREJO.A. Aplicación de las cenizas volantes en la construcción de carreteras. Jornada Técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid. 1988.

**Holanda.** Recicla el 100 % de la producción de cenizas. El mercado potencial del país en nuevos productos con cenizas volantes, es una oportunidad única de mercado.

**Francia.** La presa de Saint – Hilaire en el Isere, se construyó con 15 % de ceniza en adicción al hormigón. La adición se realizó in-situ. Según Manz [63], se usa el 60 % de cenizas en acción al cemento, estabilización de vías y material de relleno.

Las cenizas volantes se han utilizado en las torres de refrigeración de la Central Térmica de Ansereuilles, para cumplir con resistencias superiores a las de un hormigón natural.

**Inglaterra.** Según ECOBA (Asociación europea para el empleo de los sub-productos de la combustión del carbón), Reino Unido usa el 57 % de la producción total de ceniza como reemplazo de cemento, material de relleno, bloques y agregados livianos. En North Yorkshire, se construyó la variante de 10 Km, con gran cantidad de terraplenes. Para la construcción se usaron 390 KTon de cenizas volantes [64].

**2.11.2 Estados Unidos.** En 1951 la Sociedad de Materiales de Construcción de la Loisne, puso en el mercado dos cementos con cenizas volantes. En 1952 se inauguró la presa de Hungry Horse sobre el rio Flathead (Estados Unidos). La presa fue construida con un concreto que contenía 70 % de cemento y 30 % en peso de ceniza.

Se ha desarrollado concreto con adición de cenizas volantes, escoria y cal libre, aumentando la fuerza estructural en un cierto plazo. Como en el caso de la ruta 2 en Virginia del Oeste en 1971 y 1972, tenía un 54 % de escoria, 5 % de Cemento Pórtland y 46 % de ceniza volante.

---

[63] MANZ, scar. Wrlldwide production of fly ash and utilization in concrete.1989.

[64] LUXAN, Alonso. Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Una experiencia española. Monografía del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. 1995.

Un ejemplo claro del uso de la ceniza como relleno a nivel mundial, es la construcción de la carretera interestatal, Interstate 64/ U.S. Route 35, cercana a Hurricane, W. Va. En Virginia del Oeste (E.E.U.U), en que se usaron 130.000 m<sup>3</sup> (metros cúbicos) de ceniza volante.

**2.11.3 Canadá.** Se ha investigado por el CANMET desde 1985; desarrollan concreto con adición de cenizas, bloques de concreto, se ha usado para el control de nieve y hielo en las carreteras, terraplenes, drenajes y como material de relleno.

**2.11.4 Argentina.** Se han estudiado por Martinez, Andreoni y Poncino [65], las posibilidades de reutilización de las cenizas volantes como relleno en mezclas asfálticas y agente estabilizante de suelos. Se evaluó el comportamiento de la ceniza como agente modificador del envejecimiento del asfalto y la valoración para actuar como agente estabilizante de suelos, con los análisis de resistencia, caracterización elástica y de su deformación permanente.

La tabla 7 presenta los usos que se han desarrollado a nivel mundial, en adiciones y reemplazos de cenizas volantes, en la producción de la construcción. Se evidencia que los países desarrollados han implementado varios usos; esto se debe al beneficio ambiental y económico.

---

[65] MARTÍNEZ, F. ANDREONI, R. PONCINO, H. Utilización de cenizas volantes Como filler de mezclas asfálticas y agente estabilizador de suelos. XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aire: s.d, 1997.

**Tabla 7.** Usos de las cenizas volantes a nivel mundial.

	ALEMANIA	ESPAÑA	HOLANDA	FRANCIA	INGLATERRA	USA	CANADÁ	ARGENTINA
CONCRETO	X	X	X	X	X	X	X	X
CEMENTO	X	X	X		X	X	X	
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	X			X	X	X	X	X
RELLENOS	X	X		X	X	X	X	
PAVIMENTO ASFÁLTICO	X	X	X	X		X	X	X
MORTEROS	X	X		X		X		
ADOQUINES	X	X	X		X	X	X	

### 3. ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

#### 3.1 NORMA PARA LA UTILIZACIÓN DE CENIZAS VOLANTES COMO ADITIVO

Las especificaciones establecen requisitos mínimos y máximos para la utilización de las cenizas volantes, como aditivos minerales para concreto de cemento Pórtland. La norma NTC 3493 es equivalente a la ASTM C 618-91, cuyo título es “CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND”, en donde las propiedades físicas y químicas se determinan de acuerdo a los requisitos expresados.

Las cenizas volantes deben cumplir con los requisitos de composición química indicados en la tabla 8. En la tabla 9 se muestran requisitos químicos suplementarios, específicamente cuando se elabora concreto con algún agregado reactivo, con el fin de que no se presenten expansiones deletéreas debido a la presencia de álcalis.

**Tabla 8.** Requisitos químicos.

Requisitos	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )+óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )+óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), (% mín.)	70,0	70,0	50,0
Trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). (% máx.)	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, (% máx.)	3,0	3,0	3,0
Pérdida al fuego, (% máx.)	10,0	6,0	6,0

Fuente: NTC 3493. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. (2014).

Las cenizas volantes clase F pueden tener hasta un 12 % de pérdida al fuego, si existen registros de desempeño aceptable en los ensayos de resistencia en el laboratorio.

**Tabla 9.** Requisito químico suplementario

Requisitos	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Álcalis disponible como Na <sub>2</sub> O (% máx.)	1,5	1,5	1,5

Fuente: NTC 3493. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. (2014).

Las cenizas volantes deben cumplir con los requisitos físicos indicados en la tabla 10.

**Tabla 10.** Requisitos físicos

Requisitos	Clase de aditivo mineral		
	N	F	C
Finura: -Cantidad retenida cuando se realiza un tamizado húmedo con un tamiz de 45 µm (No 325), (% máx.)	34	34	34
Índice de actividad de resistencia: -Con cemento Pórtland a los siete días mínimo, porcentaje de control.	75	75	75
-Con cemento Pórtland a los 28 d, mínimo, porcentaje de control.	75	75	75
-Con Cal a los siete días. Mínimo (kPa).	5500	5500	-
Agua requerida máx. Porcentaje de control.	115	105	105
Estabilidad: -Contracción o expansión en el autoclave, % máx.	0,8	0,8	0,8

Fuente: Fuente: NTC 3493. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. (2014).

Un requisito físico suplementario es el factor múltiple, calculado como el producto de pérdida al fuego y la finura; correspondiente a la cantidad retenida al realizar un tamizado húmedo con un tamiz de 45  $\mu\text{m}$  (No 325) indicando un 255 % máximo, NTC 3493 [66].

La norma NTC 3823 es equivalente a la norma ASTM C311, estableciendo los ensayos que cubren los procedimientos para el muestreo y ensayo de cenizas volantes para uso como aditivo mineral en el concreto Pórtland. Los ensayos presentes en esta norma fueron realizados en el Servicio Geológico Colombiano; los ensayos de finura Blaine y densidad de la ceniza volante de Termotasajero se realizaron en el laboratorio del concreto de ASOCRETO.

### **3.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CENIZAS VOLANTES DE TERMOPAIPA, TERMOZIPA Y TERMOGUAJIRA**

Se recopilaron resultados de las cenizas volantes de Termopaipa, Termozipa y Termogujira, como adición al concreto con cemento Pórtland y las conclusiones para usos de las cenizas volantes en obras civiles.

**3.2.1 Termopaipa.** Valbuena [67] realizó cilindros con reemplazo en peso, de cemento por ceniza volante con dosificaciones en porcentaje del 0 %, 10 %, 20 %, 25 % y 30 %. En las tablas 11 y 12 se encuentran las propiedades químicas y físicas de las muestras de ceniza volante de Termopaipa. En la tabla 10 se evidencia el análisis químico; basándose en la norma NTC 3493 (ASTM C618), la suma de los tres elementos predominantes (Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )), clasifican a la ceniza como del tipo F con 92,34 % de contenido de óxidos principales en muestra 1 y con 93,71 % para muestra 2. Resultados de inquemados suministrados: en la muestra 1 de 9,18% y

---

[66] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura, Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. NTC 3493. Bogotá, 2014.

[67] VALBUENA, Op.cit., p.54-57.

en la muestra 2, 14,25%; concluyendo que las cenizas no cumplen con el requisito de contenidos de inquemados exigido por la norma NTC 3493. Por medio de análisis petrográfico comprobó que los inquemados no reaccionan químicamente con la pasta de cemento, generando una mala adherencia en la mezcla. Las cenizas de Termopaipa presentan una alta finura Blaine; recomendaciones en investigaciones internacionales y nacionales establecen la finura Blaine para su uso, entre 2,5 y 4,5 cm<sup>2</sup>/gr o superior a 3,0 cm<sup>2</sup>/gr. La densidad de cenizas se encuentra entre 2,2 y 2,8 gr/cm<sup>3</sup>; las muestras analizadas no cumplen con la especificación recomendada. Concluyó, que a medida que se aumentaba el porcentaje de ceniza como adición en la mezcla, se incrementaba la presencia de inquemados, reduciendo la resistencia mecánica de los cilindros de concreto.

**Tabla 11.** Análisis químico de cenizas volantes de Termopaipa.

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	<b>MUESTRA 1 %</b>	<b>MUESTRA 2 %</b>
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	62,9	65,68
Trióxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	23,89	22,10
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,55	5,93
Óxido de calcio (CaO)	0,84	0,77
Óxido magnésico (MgO)	0,56	0,50
Óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,45	0,52
Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	1,49	1,60
Óxido de titanio (TiO <sub>2</sub> )	1,21	1,31
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0,13	0,06
Pérdida por calcinación a 750°C	0,18	0,18

Fuente: Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de Termopaipa. Valbuena (2006).

**Tabla 12.** Propiedades físicas de cenizas volantes de Termopaipa

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>CENIZA</b>	<b>TERMOPAIPA (VALBUENA)</b>
% retenido No 325	-	13,50
Actividad puzolánica	70,3	-
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3,100	3,805
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,135	2,120

Fuente: Clavijo y Osorio (2012) y Valbuena (2006).

La composición química y propiedades físicas se analizaron en el Servicio Geológico Colombiano, en dos muestras de cenizas volantes para las pruebas del proyecto “Petrografía de concretos hidráulicos con adición de cenizas volantes de Termopaipa”. Las propiedades fisicoquímicas de las cenizas se determinaron por la norma NTC 3493 (ASTM C618).

De los análisis de resultados y conclusiones recopilados por Clavijo y Osorio [68]; encontraron:

Las propiedades se ajustaron a la norma, excepto el índice de actividad puzolánica de la ceniza respecto al cemento; es de 70,3 %, siendo inferior al especificado en la norma NTC 3493 (ASTM C618) cuyo valor mínimo es de 75 %.

En concretos con reemplazo del 15 % y 25 % de ceniza diseñados para 21 Mpa y 28 Mpa, presentaron valores de resistencia menores que la mezcla sin ceniza, a edades tempranas; pero a edades entre 60 y 90 días obtuvieron resistencias de diseño. De acuerdo a los ensayos de concreto normal y concreto con cenizas, al comparar los resultados, el reemplazo óptimo de ceniza volante por cemento se encontró en el rango de 15 % a 25 %.

En las dosificaciones con mayores contenidos de cenizas, se generó una reducción en la resistencia a la compresión de las muestras de concreto endurecido.

Los concretos con elevados porcentajes de ceniza, como los de 35 %, pueden ser empleados en obras que no requieran mayores resistencias, como andenes, adoquines, morteros, etc.

---

[68] CLAVIJO, OSORIO Op.cit., p.81-86.

Los cilindros de la investigación no fueron realizados con una sola mezcla, pudiendo presentar variaciones en los resultados obtenidos, aunque trataron de realizar mezclas con las mismas características para todos los ensayos.

En la investigación desarrollada por Fonseca [69], se realizaron 4 mezclas de concreto con reemplazos de cemento por ceniza de Termopaipa a 10, 20, 30 y 40 %; para cada mezcla se fabricaron 30 especímenes. Se preparó mezcla sin ceniza para usarla como referencia. Se ensayaron a compresión a edades de 7, 28, 56 y 100 días. Se encontró que los concretos con adición de ceniza presentaron una resistencia más baja en comparación al concreto sin adición. El concreto con 30 % de adición presentó mayor resistencia, en todas las edades. Se presentaron mejoras significativas a la resistencia a la compresión a edades mayores de 56 días, debido a la lenta reacción puzolánica; sin embargo, la diferencia de resistencia a los 28 días se encontró en el rango de  $\pm 10$  % de la alcanzada del concreto normal.

Gil y Plazas [70] formularon una propuesta para la utilización de cenizas volantes de Termopaipa y Termozipa, como adición en la fabricación de cemento para reemplazar la puzolana, utilizando el proceso de producción de la cementera HOLCIM COLOMBIA S.A. De acuerdo con pruebas efectuadas en plantas del grupo, es factible la utilización de las cenizas volantes en la fabricación de cemento; sin embargo, se debe controlar la composición química para que no varíen las condiciones químicas ni físicas del desempeño del cemento. A edades cortas, el cemento con adición de cenizas volantes presenta un desarrollo de resistencia muy lenta, pero las resistencias finales son mayores por la rápida hidratación.

---

[69] FONSECA, Luis. Efecto de Diferentes Reemplazos de Cemento por Ceniza Volante de Termopaipa sobre Resistencia a Compresión del Concreto. Bogotá. 2004. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

[70] GIL, Claudia; PLAZAS, Ricardo. Propuesta para la utilización de cenizas volantes como adición en la fabricación de cemento tipo I en la Planta cementera de HOLCIM COLOMBIA S.A. Chia. 2007. p34. Especialización en Gerencia de Producción y Operaciones. Universidad de la Sabana.

La ceniza volante de Termopaipa puede ser usada para reemplazar el llenante mineral de mezclas asfálticas. Camacho, Reyes y Troncoso [71], realizaron diferentes ensayos con porcentajes de reemplazo de llenante mineral por ceniza volante entre 15 % a 100 %. Los resultados determinaron un incremento de resistencia y mejor comportamiento para reemplazos del 20 y 25 %.

**3.2.2 Termozipa.** Vargas, Obregón y Junco [72], realizaron los ensayos en los laboratorios de química de la Universidad Nacional de Colombia; los resultados químicos se presentan en la tabla 13. La ceniza volante de Termozipa normalmente presenta ceniza tipo F, con el 96 % en la suma de los tres óxidos predominantes (Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )), pero en los ensayos realizados, estos investigadores obtuvieron como resultado 61,35 %. Esta diferencia puede ocurrir por el tipo de carbón utilizado, la característica de la planta, deficiencia de la combustión en la caldera y el grado de pulverización del carbón.

Hallaron un porcentaje de pérdida por ignición de 27 %, porcentaje que es superior al especificado por la norma NTC 3493 (ASTM C618), de 6 % máximo. La ceniza volante de Termozipa tiene un porcentaje de 0,19 % de  $\text{Na}_2\text{O}$ , inferior al especificado por la norma NTC 3493 (ASTM C618), de 1,5 % máximo.

**Tabla 13.** Análisis químico de cenizas volantes de Termozipa.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	PORCENTAJE %
Dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ )	42,80
Trióxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	15,12
Óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	3,43
Óxido de calcio ( $\text{CaO}$ )	0,27
Óxido magnésico ( $\text{MgO}$ )	0,53
Óxido de sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,19
Óxido de potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ )	1,28

Fuente: Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Clavijo y Osorio (2012).

[71] REYES, O. TRONCOSO, J. CAMACHO, J.F. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. Universidad Militar Nueva Granada. Marzo. 2006.

[72] VARGAS, OBREGÓN, JUNCO, Op.cit., p.57-58.

Las propiedades físicas se encuentran en la tabla 14. Hallaron la finura de la ceniza por método directo de porcentaje retenido en tamiz N° 325, con valor por debajo de los límites que especifica la norma NTC 3493 (ASTM C618), valor máximo del 34 %. El material tiene deficiencia de finura porque tiene partículas de carbón sin quemar provenientes del fondo de la caldera. La densidad no cumple con la especificación recomendada entre 2,2 g/cm<sup>3</sup> y 2,8 g/cm<sup>3</sup>; sin embargo, esta característica hace posible la utilización como material liviano para rellenos y terraplenes.

Realizaron el ensayo de índice de actividad puzolánica de la ceniza con respecto al cemento (I.A.P) regido por la norma ASTM C618, especificando un 75 % como mínimo y el resultado para las cenizas de Termozipa es de 72 %, no cumpliendo con lo establecido en la norma. Este parámetro es uno de las propiedades más importantes para la dosificación de la ceniza en el concreto.

**Tabla 14.** Propiedades físicas de cenizas volantes de Termozipa

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>CENIZA</b>
% retenido No 325	62
Actividad puzolánica	72
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	-
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1,976

Fuente: Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Clavijo y Osorio (2012).

Se realizaron mezclas de concreto sin ceniza y con ceniza, en sustitución al cemento en un 10 %, 15 %, 20 % y 25 %; se fabricaron cilindros para ser ensayados a compresión a edades de 3, 7, 14, 28 y 60 días de curado. Con la recopilación de información de los resultados de resistencia a la compresión para diferentes porcentajes de remplazo y edades, concluyeron que para un remplazo de cemento por ceniza del 10 %, superó la resistencia de la mezcla sin ceniza desde los 14 días y a los 60 días se evidenció que superó en un 4 % la resistencia respecto al concreto sin ceniza. Cuando se aumentaba la adición, decrecía la resistencia a la compresión; a edades tempranas, la disminución de resistencia fue considerable con respecto a la muestra de concreto sin ceniza.

Las cenizas de Termozipa se han utilizado en los último 10 años por la empresa ADT&CIA LTDA, en proyectos de construcción, rehabilitación de vías y cimentaciones. Se usó como relleno para cimentación de almacenes Éxito, Calle 170, Calle 80. Se ha incorporado en rellenos estructurales para las placas de acercamiento en el puente Avenida Ciudad de Cali Calle 13, Puente Autopista Norte por calle 170, etc. En rellenos para mejorar sub-base, se implementó en los proyectos de la carretera perimetral Chia – Mosquera – Concesionaria del Desarrollo Vial de la Sabana [73].

**3.2.3 Termoguajira.** De la recopilación bibliográfica obtenida por Clavijo y Osorio [74], de los resultados en la caracterización de las cenizas volantes de Termoguajira, la tabla 15 presenta la concentración química de la ceniza, obtenida de un promedio de 10 ensayos. La ceniza volante de Termoguajira cumple con la clasificación de cenizas clase F de la norma NTC 3493 (ASTM C618). El contenido de Na<sub>2</sub>O se encuentra en un porcentaje mayor al especificado en la norma, y si se usara en adición al concreto, se podrían presentar expansiones si se elabora con agregados pétreos reactivos.

**Tabla 15.** Análisis químico de cenizas volantes de Termoguajira.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	PORCENTAJE %
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	61,76
Trióxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	19,24
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	8,56
Óxido de calcio (CaO)	2,21
Óxido magnésico (MgO)	1,46
Óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	3,24
Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	2,23
Óxido de titanio (TiO <sub>2</sub> )	1,01
Óxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,18

Fuente: Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Clavijo y Osorio (2012).

[73] ADT&CIA LTDA. Ficha técnica- material de cenizas. Informe final de Pavimentos y Espacio Público Asociado de la Avenida el TAM (Ak 129). Etapa de Estudios y Diseños. Anexo N° 6.3. Agosto. 2008.

[74] CLAVIJO, OSORIO Op.cit., p.87-91.

La densidad y finura de la muestra clase C con contenido elevado de ceniza se presenta en la tabla 16. Encontraron que la densidad varía en sentido inverso a la dimensión de la partícula; entre más fina la ceniza volante, mayor densidad. También, la baja densidad se debe al contenido de inquemados. La superioridad de la clase C representa una superficie específica de 3,241 cm<sup>2</sup>/g. El valor de la finura Blaine cumple con el rango recomendado.

**Tabla 16.** Densidad y finura de cenizas volantes de Termoguajira.

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>CENIZA</b>
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3,241
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,890

Fuente: Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Clavijo y Osorio (2012).

Rangel y Sarmiento [75], investigaron el comportamiento de las cenizas volantes de Termoguajira, Termopaipa y Termozipa en la aplicación como material llenante en mezclas asfálticas. En general las cenizas volantes rigidizaron más que la arena de río y las calizas. Se demostró la factibilidad para usarse como material mineral llenante; no obstante, se debe tener especial cuidado por su volatilidad, que la hace difícil de controlar y transportar.

### **3.3 ENSAYOS SOBRE CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**3.3.1 Ensayos Químicos.** Los ensayos químicos de las cenizas volantes de Termotasajero se realizaron en el Servicio Geológico Colombiano. La tabla 17 presenta la composición química de las cenizas volantes y su porcentaje de pérdida al fuego. La suma de los tres componentes predominantes (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y FeO<sub>3</sub>) de la ceniza de Termotasajero es de 89,1 %, que cumple con la norma NTC 3493 (ASTM C618), que establece como mínimo un 70 % para clasificar la ceniza

---

[75] RANGEL, Leidy; SARMIENTO, Mayra. Influencia de las características granulométricas y mineralógicas del filler sobre rigidez de las mezclas asfálticas. Bucaramanga, 2010. Facultad de Ingeniería Físico – Mecánico; Universidad Industrial de Santander.

como tipo F. El porcentaje de Trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) con un 0,01 %; la norma establece un contenido máximo de 5 %.

La norma NTC 3493 (ASTM C618) especifica un 6 % máximo de inquemados para cenizas tipo F; la pérdida por ignición de la muestra de ceniza volantes es de 7,96 %. La norma NTC 3493 permite hasta un máximo de 12 % para ceniza tipo F, con resultados aceptables en los ensayos de resistencia a compresión de cilindros de concreto. La tabla 18, presenta el análisis próximo de la muestra de ceniza volante de Termotasajero, con el contenido de humedad de la ceniza de 3% tipo F, que cumple con la especificaciones recomendadas por la NTC 3493 (ASTM C618).

**Tabla 17.** Análisis químico de cenizas volantes de Termotasajero.

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA</b>	<b>PORCENTAJE %</b>
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	53,21
Trióxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	26,74
Óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	9,15
Óxido de calcio (CaO)	0,59
Óxido magnésico (MgO)	0,45
Óxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	0,16
Óxido de potasio (K <sub>2</sub> O)	0,64
Óxido de titanio (TiO <sub>2</sub> )	1,28
Óxido de fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,52
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	0,01
Óxido de bario (BaO)	0,14
Óxido de estroncio (SrO)	0,03
Pérdida por calcinación a 750°C	7,96

**Tabla 18.** Análisis próximo de cenizas volantes de Termotasajero

<b>ANÁLISIS</b>	<b>CENIZA</b>
Humedad residual, % masa	0,17
Materia volátil, % masa	1,29
Cenizas, % masa	92,04
Carbono fijo, % masa	6,50
Azufre total, % masa	0,16
Poder calorífico, Btu/lb	908
Poder calorífico, J/g	2111

**Inquemados:** En el siguiente cálculo se determinará el porcentaje de quemados en las cenizas volantes de Termotasajero.

$$INQUEMADOS = \text{Carbono fijo}_{b,s} + \text{Materia volátil}_{b,s} \quad (1)$$

Dónde:

$$\text{Carbono fijo}_{b,s} = (\text{Carbono fijo}_{c,s,a} * 100) / (100 - \text{Humedad residual}) \quad (2)$$

$$\text{Material volátil}_{b,s} = (\text{Materia volátil}_{c,s,a} * 100) / (100 - \text{Humedad residual}) \quad (3)$$

$$INQUEMADOS = [(\text{Carbono fijo}_{c,s,a} * 100) / (100 - \text{Humedad residual})] + [(\text{Materia volátil}_{c,s,a} * 100) / (100 - \text{Humedad residual})]$$

$$INQUEMADOS = [(6,50 * 100) / (100 - 0,17)] + [(1,29 * 100) / (100 - 0,17)]$$

$$INQUEMADOS = \left(\frac{650}{99,83}\right) + \left(\frac{129}{99,83}\right)$$

$$INQUEMADOS = 7,8 \%$$

Se puede hallar y verificar como:

$$INQUEMADOS = 100 - \%C_{z,b,s} \quad (4)$$

$$\%C_{z,b,s} = (\%C_{z,c,s,a} * 100) / (100 - \text{Humedad residual}) \quad (5)$$

$$\%C_{z,b,s} = (92,04 * 100) / (100 - 0,17)$$

$$\%C_{z,b,s} = 9204 / 99,83$$

$$\%C_{z,b,s} = 9204 / 99,83$$

$$\%C_{z.b.s} = 92,2 \%$$

$$\mathbf{INQUEMADOS} = 100 - 92,2 = 7,8 \%$$

$\%C_{z.b.s}$  = Porcentaje de cenizas, base seca.

$\%C_{z.c.s.a}$  = Porcentaje de cenizas, como se acepta.

El porcentaje de inquemados se calculó para compararlo con respecto al determinado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC); el porcentaje de inquemados calculado y verificado es de 7,8 % y el suministrado por SGC es 7,96 %; donde, la diferencia no es muy significativa 0,16 %. La norma NTC 3493 (ASTM C618) especifica un 6 % máximo de inquemados para cenizas tipo F; sin embargo, se podrá usar ceniza que contengan hasta un 12 % de inquemados, dependiendo si se desarrolla un desempeño aceptable en los ensayos de compresión de cilindros de concreto. Romero y Hernández [76], en su trabajo de grado, han desarrollado ensayos de resistencia a la compresión de cilindros con ceniza volante de Termotasajero y concreto normal, evidenciando que al aumentar los porcentajes de reemplazo de cemento por ceniza volante (10%, 20%,25% y 30%), la resistencia a la compresión disminuye, para todas las edades (3, 7, 14, 21, 28 y 60 días). El aumento del contenido de inquemados afecta esta propiedad. La ceniza volante de Termotasajero analizada, no cumple con la especificación de pérdida al fuego recomendada por la norma NTC 3493 (ASTM C618), máximo 6 %, presentando un porcentaje mayor al especificado, 7,96 %.

**3.3.2 Ensayos Físicos.** Los resultados obtenidos de la determinación de la granulometría, en porcentaje de relación de peso en tamices N°. 230 (63 $\mu$ m), N°. 270 (53 $\mu$ m), N° 325(45 $\mu$ m) y N°. 400 (37 $\mu$ m) de las cenizas, están consignados en la tabla 19.

---

[76] ROMERO, Andrés; HERNÁNDEZ, Johan. Diseño de mezclas de hormigón por el método A.C.I. y efectos de la adición de las cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión. Trabajo de grado en curso. Universidad Santo Tomás, Facultad de Ingeniería Civil, sede principal, Bogotá D.C.

**Tabla 19.** Resultados de granulometría en cenizas volantes de Termotasajero.

<b>MATERIAL (% PESO)</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>ACUMULADO</b>
Retenido malla N° 230 (63µm)	32,1	32,1
Pasa malla N° 230 (63µm) y retiene en malla N° 270 (53µm)	2,8	34,9
Pasa malla N° 270 (53µm) y retiene en malla N° 325 (45µm)	9,0	43,9
Pasa malla N° 325 (45µm) y retiene en malla N° 400 (37µm)	31,6	75,5
Pasa malla N° 400 (37 µm) y retiene en fondo	24,3	99,8

La finura es de gran importancia en la aplicación de las cenizas para efectos puzolánicos en materiales de construcción; para ello se determinan las características granulométricas; la NTC 3493 (ASTM C618) exige un valor máximo de 34 % retenido en el tamiz N° 325 (45µm); la ceniza volante de Termotasajero analizada cumple con la especificación recomendada, pues retiene 9 % en el tamiz 32, pero pasa tamiz N° 325 (45µm) no cumple con lo recomendado de 80 % en el ítem 1.2.2, con un 55,9 % pasa tamiz N° 325 (45µm).

En ASOCRETO se realizaron ensayos de finura Blaine y densidad de las cenizas volantes de Termotasajero. La información se indica en la tabla 20. Las cenizas de Termotasajero presentan una baja finura Blaine respecto a las recomendaciones de la bibliografía en investigaciones internacionales y nacionales. La densidad de cenizas se encuentra entre 2,2 y 2,8 gr/cm<sup>3</sup> para su uso como adición al concreto; en donde, la ceniza de Termotasajero no cumple con las recomendaciones.

Un ensayo importante para la obtención de buenos resultados en la adición de cenizas volantes al concreto es el índice de la actividad de resistencia con cemento Pórtland, el cual está reglamentado en la norma NTC 3823 (ASTM

C311). Se recomienda realizar este ensayo para futuras investigaciones con cenizas volantes.

**Tabla 20.** Densidad y finura de las cenizas volantes de Termotasajero.

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>CENIZA</b>
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	2,067
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,103

En la tabla 21 se presenta un resumen de las propiedades físico - químicas de las cenizas de Termotasajero, en comparación con la norma NTC 3493 (ASTM C618) para ceniza tipo C y tipo F. Se identifica la ceniza como clase F con una pérdida al fuego mayor al establecido por la norma.

**Tabla 21.** Propiedades de las cenizas de Termotasajero, cenizas clase C y Clase F.

<b>PROPIEDADES</b>	<b>NORMA (NTC 3493 - ASTM C618)</b>		<b>TERMOTASAJERO</b>
	<b>CLASE C</b>	<b>CLASE F</b>	
<b>Propiedades Químicas</b>			
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO <sub>3</sub>	50 % mín.	70 % mín.	89,1
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	5 % máx.	5 % máx.	0,01
Contenido de humedad	3 % máx.	3 % máx.	0,17
Pérdida por ignición	6 % máx.	6 % máx.	7,8
Álcalis como Na <sub>2</sub> O	1,5 % máx.	1,5 % máx.	0,16
<b>Propiedades Físicas</b>			
% retenido N° 325	34 % máx.	34 % máx.	9
Actividad puzolánica %	75 % mín.	75 % mín.	-----

**3.3.3 Análisis de Carbones.** La planta Termotasajero utiliza carbón bituminoso triturado y pulverizado, como combustible primario. La tabla 22 muestra la

composición del carbón típico de Termotasajero, por medio de un análisis próximo, con poder calorífico de 12.700 Btu/lb y 29.528 J/g; donde, se encuentra clasificado por la norma ASTM D388-92 como carbón bituminoso, alto en volátiles C, que se encuentra en un rango entre 11.500 a 13.000 Btu/lb y 26.749 a 30.238 J/g.

**Tabla 22.** Análisis próximo del carbón de Termotasajero.

<b>ANÁLISIS</b>	<b>CARBÓN</b>
Humedad residual, % masa	2,96
Materia volátil, % masa	38,36
Cenizas, % masa	8,83
Carbono fijo, % masa	49,85
Azufre total, % masa	0,74
Poder calorífico, Btu/lb	12700
Poder calorífico, J/g	29528

La tabla 23 contiene los resultados de la clasificación granulométrica del carbón triturado de Termotasajero.

**Tabla 23.** Resultados de granulometría en el carbón triturado de Termotasajero.

<b>MATERIAL (% PESO)</b>	<b>RETENIDO</b>	<b>ACUMULADO</b>
Retenido malla N° 16 (1,18mm)	39,7	39,7
Pasa malla N° 16 (1,18mm) y retiene en malla N° 30 (0,60mm)	35,5	75,5
Pasa malla N° 30 (0,60mm) y retiene en malla N° 50 (0,30mm)	14,0	89,5
Pasa malla N° 50 (0,30mm) y retiene en malla N° 100 (0,15mm)	4,7	94,2
Pasa malla N° 100 (0,15mm) y retiene en malla N° 200 (0,075mm)	2,7	96,9
Pasa malla N° 200 (0,075mm) y retiene en fondo	3,4	100,3

El análisis granulométrico en los tamices N° 16 y N° 30 representa más del 50 % en peso del material retenido.

El análisis químico del carbón de Termotasajero se presenta en la tabla 24; con este análisis se pueden establecer los parámetros para correlacionar los componentes químicos, diferenciando la clase de carbón dependiendo de las cenizas. Estos son expresados por Peña [77]:

Porcentaje de base ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ ), estos presentan menores temperaturas de fusión.

Porcentaje de ácidos ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ ), tienen altas temperaturas de fusión.

Relación base/ácido (B/A), potencial para que los metales contenidos en las cenizas se combinen en el proceso de combustión para producir sales con bajo punto de fusión.

Relación dolomita ( $\text{MgO} + \text{CaO} / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) * 100 \%$ ). Se usa para cenizas con presencia de óxidos básicos mayores de 40 %.

Relación sílica/alúmina ( $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ). Se usa para complementar el comportamiento de la fusibilidad de las cenizas.

Factor de encostramiento, relación base/ácido (B/A)\*  $\text{Na}_2\text{O}$ . Tendencia al encostramiento.

---

[77] PEÑA, Mary. Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma. Bogotá, 2011, 35p. Tesis de Maestría en Ciencias – Química. Universidad Nacional de Colombia.

Factor de deposición (B/A)\* % SO<sub>3</sub>. Tendencia a la deposición.

Tipo de ceniza. Cenizas bituminosas (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>> CaO + MgO), cenizas ligníticas (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>< CaO + MgO).

**Tabla 24.** Análisis químico del carbón de Termotasajero, (750°C), % masa.

COMPOSICIÓN QUÍMICA	PORCENTAJE %
SiO <sub>2</sub>	62,17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,28
CaO	1,29
MgO	0,41
Na <sub>2</sub> O	0,26
K <sub>2</sub> O	0,86
TiO <sub>2</sub>	1,45
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08
SO <sub>3</sub>	0,37
BaO	0,061
SrO	0,051

En los datos de la composición química de las cenizas y del análisis químico del carbón, no se encontraron variaciones apreciables, excepto la presencia de trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>).

Los parámetros para correlacionar la composición del carbón se presentan en la tabla 25.

**Tabla 25.** Parámetros y clasificación de las cenizas del carbón de Termotasajero.

	Óxidos básicos %	Óxidos ácidos %	Relación Base Ácidos	Relación dolomita %	Relación Silica - alumina	Factor de Deposición	Factor de Encostramiento	Tipo de ceniza
carbón (ceniza)	8,10	90,84	0,09	56,93	2,28	0,02	0,03	Bituminosa
ceniza	10,99	81,23	0,14	50,37	1,99	0,02	0,00	Bituminosa

En la composición de las cenizas de los carbones de Termotasajero, predominan los óxidos ácidos con un valor alto entre 80 % y 90 %, en el proceso de combustión se comportan como cenizas de alta temperatura de fusión. La relación silica- alúmina confirma que las cenizas tiene probabilidad de formar compuestos con bajos puntos de fusión. Los factores de deposición y encostramiento son bajos, por lo cual no tiende a formar compuesto corrosivos. Las cenizas de Termotasajero se clasifican como bituminosas con probabilidad a la fusión de escorias.

La tabla 26, presenta las composiciones químicas y físicas, recomendadas por la norma NTC 3493 (ASTM C618) y los resultados de la caracterización de las cenizas de Termopaipa, Termozipa, Termoguajira y Termotasajero. Se estableció que las cenizas de las termoeléctricas son de tipo F. Se evidencia que la pérdida por ignición es un ensayo primordial para la utilización de las cenizas como adición al concreto con cemento Pórtland. Si se obtienen valores mayores a 6 %, se reduce la resistencia en los ensayos de compresión del concreto.

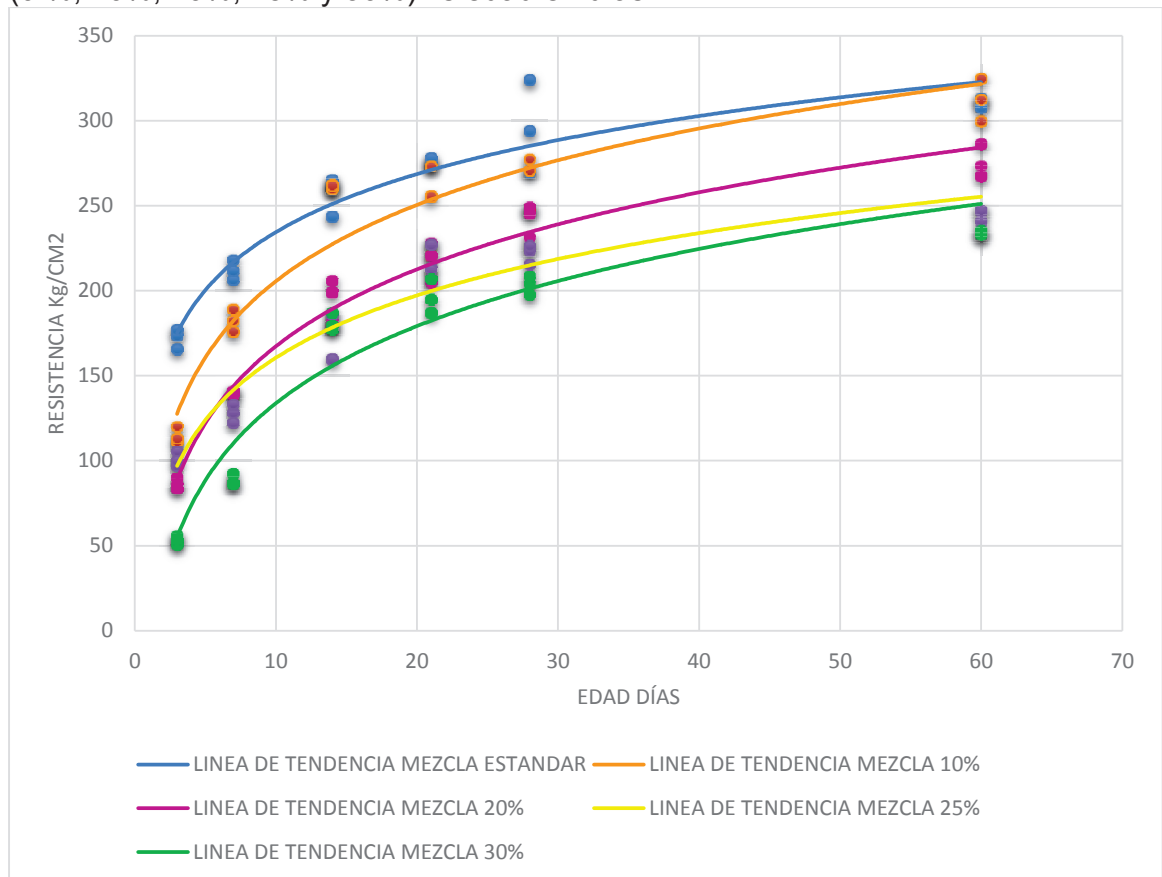
**Tabla 26.** Cuadro comparativo de las cenizas de Termopaipa, Termozipa, Termoguajira y Termotasajero, respecto a la norma NTC 3493.

	NTC 3493	TERMOPAIPA	TERMOZIPIA	TERMOGUAJIRA	TERMOTASAJERO
<b>Propiedades Químicas</b>					
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + FeO <sub>3</sub>	70 % mín.	92,34	61,35	89,56	89,1
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> )	5 % máx.	0,13	-----	-----	0,01
Contenido de humedad	3 % máx.	0,86	-----	-----	0,17
Pérdida por ignición	6 % máx.	9,18	27	-----	7,8
Álcalis como Na <sub>2</sub> O	1,5 % máx.	0,45	0,19	3,24	0,16
<b>Propiedades Físicas</b>					
% retenido N° 325	34 % máx.	13,5	62	-----	9
Actividad puzolánica %	75 % mín.	70,3	72	-----	-----
Peso específico g/cm <sup>3</sup>	-----	2,120	1,976	2,890	2,103
Finura Blaine cm <sup>2</sup> /g	-----	3,805	-----	3,241	2,067

Los resultados de resistencia a la compresión de cilindros de concreto con adición de cenizas volantes de Termotasajero, se presentan en la gráfica 7. Se generaron reducciones en la resistencia a los esfuerzos de compresión, comparados con las mezclas de concreto sin ceniza, a edades de 3, 7, 14, 21, 28 y 60 días. Se concluyó que las cenizas de Termotasajero, presentan un valor alto de inquemados y baja finura. Los especímenes con cenizas a 10 %, 20 %, 25 % y 30 %, tuvieron resistencias inferiores a las de la mezcla sin ceniza, para todas las edades.

La pérdida por ignición no cumple con la especificación sugerida, de máximo 6 %, pues presenta un valor de 7.8 %. Los concretos con porcentajes de ceniza de 25 y 30 %, podrían ser empleados en obras que no requieran mayores resistencias, como andenes y morteros.

**Gráfica 7.** Resistencia a la compresión de mezclas de concreto con reemplazo (0 %, 10%, 20%, 25% y 30%) vs edad en días.



Fuente: Diseño de mezclas de hormigón por el método A.C.I. y efectos de la adición de cenizas volantes de Termotasajero, en la resistencia a la compresión. Romero y Hernández (2014).

La tabla 27 presenta un resumen de los usos de las cenizas volantes, de las termoeléctricas Termozipa, Termopaipa, Termoguajira y Termotasajero.

**Tabla 27.** Aplicaciones de las cenizas volantes en Colombia.

	<b>TERMOZIPA</b>	<b>TERMOPAIPA</b>	<b>TERMOGUAJIRA</b>	<b>TERMOTASAJERO</b>
CONCRETO	X	X		X
CEMENTO	X	X		
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	X			
RELLENOS	X			
PAVIMENTO ASFÁLTICO	X	X	X	
MORTEROS		X		X
ADOQUINES				

#### **4. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE LAS CENIZAS VOLANTES DE TERMOTASAJERO**

Para el uso de cenizas volantes de Termotasajero en la fabricación de concreto hidráulico, se deben tener en cuenta factores de control de calidad de los materiales y de la elaboración de mezclas de laboratorio que contengan ceniza, ya que no se pueden establecer características de comportamiento del hormigón con adición de cenizas, solamente a través de su caracterización físico-química. Para ello, este trabajo está articulado al proyecto de investigación del grupo GIFIC de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás, titulado: “Influencia de las cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión de mezclas de concreto. Estudio petrográfico”; el trabajo de grado titulado “Diseño de mezclas de hormigón por el método A.C.I. y efectos de la adición de las cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión”, también está articulado al proyecto de investigación, para obtener los resultados de la resistencia a compresión. Además, el trabajo de grado de Maestría en Infraestructura Vial, cuyo título es “Estudio petrográfico para explicar la influencia de cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión de mezclas de hormigón” da continuidad a la investigación de los cilindros de concreto, con la elaboración de secciones delgadas y secciones delgadas pulidas, que serán analizadas mediante el uso de microscopio petrográfico y microscopio electrónico de barrido respectivamente.

La finura es relativamente inversa al contenido de carbón en la ceniza y la densidad aumenta con una alta finura o dimensiones de las partículas menores a 45  $\mu\text{m}$ . Igualmente en el método directo de finura, la ceniza volante de Termotasajero está en 55.9 %, pasa tamiz N° 325 (45  $\mu\text{m}$ ) y no cumple con lo recomendado de un 80%.

Con los resultados de la caracterización química se evidencia un valor superior en pérdida al fuego, al establecido por la norma NTC 3493 (ASTM C618), de máximo 6 %. Esta propiedad es fundamental para la elaboración de mezclas de concreto, debido al aumento de inquemados en cada dosificación.

El ensayo de actividad puzolánica identifica, si la ceniza volante posee propiedades puzolánicas. Para próximas investigaciones sobre las cenizas de Termotasajero, se recomienda realizar este ensayo antes de ejecutar los ensayos de resistencia a la compresión de cilindros de concreto, con reemplazo de cemento por ceniza. Este ensayo se reglamenta con la norma NTC 3823 (ASTM C311). Se hacen 6 especímenes de concreto, 3 especímenes con 20 % de cemento por ceniza, y 3 especímenes de la mezcla de control. Se colocan en cuarto húmedo a  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 h, se retiran los moldes del cuarto y se retiran las muestras. Se colocan en agua saturada de cal. Se determina la resistencia a compresión de los 6 especímenes a edades de 7 días o 28 días [78].

Los concretos con adición de ceniza entre 25 % y 30 %, podrían ser empleados para obras donde no se requieran resistencias considerables, como algunos andenes y bloques de concreto, mejorando acabados.

Las cenizas volantes presentaron un peso específico relativamente bajo, característica que cumple el requisito de material liviano, en rellenos y terraplenes.

Teniendo en cuenta las investigaciones mencionadas anteriormente, se reportó un estudio de estabilización, con un porcentaje óptimo de cal entre 6 a 10 %. Ese porcentaje es válido para uso en la estabilización de suelos.

Se recomienda realizar estudios con las cenizas de Termotasajero, para encontrar la relación cal-ceniza, que no genere expansiones y disminuya la permeabilidad. Es conveniente que se hagan ensayos de compresión inconfiada, próctor y CBR, para conocer la influencia en la resistencia de suelos estabilizados.

---

[78] INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura, Muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Pórtland. NTC 3823. Bogotá, 2014.

Las cenizas volantes pueden reemplazar en parte a la arcilla, para generar la composición química en el Clinker, por el gran contenido de sílice y aluminio como dióxido de silicio y trióxido de aluminio. En la tabla 28 se muestra la composición química recomendada con respecto a la composición química de las cenizas de Termotasajero. Las cenizas de Termotasajero cumplen con todos los compuestos químicos primordiales; excepto, el óxido de calcio. Sin embargo, la presencia baja de CaO no influye en la producción de hidróxido de calcio, ya que este compuesto lo proporcionan los materiales Calcáreos. Con la inclusión de las cenizas volantes de Termotasajero, no se generaría cambios en las reacciones químicas durante la fabricación del cemento; sin embargo, no cumple con la norma europea EN 197-1/95 para fabricación de cementos, en la que establece un máximo de inquemados del 5 %. La finura se aumenta en la inclusión al Clinker, si se somete al proceso de trituración y se obtendría una mezcla homogénea de los aglomerantes.

**Tabla 28.** Cuadro para manufactura de cemento con adición de ceniza volante de Termotasajero.

Compuesto químico %	Ceniza volante típica	Ceniza volante Termotasajero
SiO <sub>2</sub>	20-60	53,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-35	26,74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	9,15
CaCO <sub>3</sub>	1-20 (CaO)	0,59
MgCO <sub>3</sub>	0,3-4 (MgO)	0,45
SO <sub>3</sub>	1-12	0,01
Álcalis	1-4	0,8

Podría mejorar el peso de los ladrillos, por su bajo peso específico. Se necesita realizar el ensayo de índice de actividad puzolánica para identificar su comportamiento en la inclusión en la arcilla.

Para el uso de la ceniza como material llenante en mezclas de pavimentos asfálticos, se deben tener en cuenta las especificaciones sugeridas.

## CONCLUSIONES

Se concluye que las cenizas volantes de Termotasajero se clasifican como cenizas tipo F, con el 89.1% de óxidos predominantes, cumpliendo con la norma NTC 3493 (ASTM C618), que establece como mínimo un 70 % ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{FeO}_3$ ). De igual manera cumple con todas las especificaciones de la norma, con excepción de la pérdida por calcinación.

Las cenizas volantes de Termotasajero analizadas no cumplen con la especificación de máximo 6 % por pérdida al fuego, recomendada por la norma NTC 3493 (ASTM C618), conteniendo un porcentaje mayor al especificado. El porcentaje de inquemados obtenido por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) es 7.96% y el porcentaje calculado 7.8%.

La ceniza volante presentó una baja finura Blaine, con respecto a las recomendaciones de la bibliografía investigada, entre  $2,0 \text{ cm}^2/\text{gr}$  y  $4,0 \text{ cm}^2/\text{gr}$ . De igual forma, por el ensayo de método directo para hallar la finura de la ceniza, se evidenció que la ceniza no cumplió con las recomendaciones de 80 % pasa tamiz N° 325 ( $45 \mu\text{m}$ ), para que la ceniza tenga buenos efectos puzolánicos.

La ceniza volante de Termotasajero presentó un bajo peso específico, característica que la haría útil como material liviano para rellenos y terraplenes.

El carbón de Termotasajero se encuentra clasificado por la norma ASTM D388-92 como carbón bituminoso, alto en volátiles C, encontrándose en rango entre 11.500 a 13.000 Btu/lb y 26.749 a 30.238 J/g. La ceniza de Termotasajero se clasifica como bituminosa con probabilidad a la fusión de escorias.

Los inquemados no reaccionan químicamente para formar compuestos cementantes, que incrementen la resistencia del concreto hidráulico. Además, producen debilidad en la pasta de cemento y dificultan la adherencia.

Concluyendo sobre los resultados recopilados de investigaciones realizadas con cenizas volantes de las plantas Termozipa, Termopaipa, Termoguajira y Termotasajero, se observa que en Termopaipa y Termozipa se obtuvieron resultados favorables en reemplazo de cemento por ceniza a 10 % y edades mayores; sin embargo, se puede afirmar que el contenido de inquemados en las cenizas son los causantes de la disminución de la resistencia a compresión en todos los casos. Al aumentar el contenido de ceniza en la mezcla, se incrementa la presencia de los inquemados, reduciendo la resistencia a la compresión de los especímenes.

Los resultados de resistencia a compresión de cilindros de concreto con adición de cenizas de Termotasajero indicaron que, al incrementar el porcentaje de remplazo de ceniza (10 %, 20 %, 25 % y 30 %), la resistencia a la compresión disminuye para todas las edades (3, 7, 14, 21, 28 y 60 días).

Las cenizas volantes producidas en varias termoeléctricas internacionales, se han empleado principalmente como adición en mezclas de hormigón y en estabilización de bases granulares, pero no se ha profundizado su aplicación dentro de la dosificación en mezclas asfálticas, lo cual sería una alternativa de solución para mejorar su capacidad estructural. Se han hecho estudios a nivel internacional y las cenizas volantes son utilizadas en grandes cantidades, especialmente en la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, muros de contención, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, como acondicionador de suelos y, en algunos casos, en los pavimentos rígidos.

## RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones, se recomienda realizar el ensayo de Índice de actividad de resistencia con cemento Pórtland.

Se sugiere realizar pruebas para determinar los módulos de elasticidad, para tener mayor información del comportamiento de los concretos con cenizas volantes.

Realizar investigaciones con cenizas tipo C, para establecer su comportamiento en la adición al concreto.

Es conveniente efectuar estudios para la inclusión de la ceniza en la elaboración de ladrillos y bloque en arcilla; de igual forma, para la elaboración de bloque de concreto de albañilería.

Para futuras investigaciones se recomiendan desarrollar alternativas de usos, para las cenizas volantes de Termoguajira. Se deben realizar pruebas de campo y de laboratorio para las cenizas de Termotasajero, en aplicación de estabilización de suelos y rellenos.

Es necesario hacer estudios con las cenizas de Termotasajero, para la estabilización de suelos; encontrar la relación cal-ceniza, que no genere expansiones, disminuya la permeabilidad y que no varíe la humedad. Es conveniente que se realicen ensayos de compresión inconfiada, próctor y CBR.

La ceniza volante puede reemplazar en parte a la arcilla, por su contenido de dióxido de silicio y trióxido de aluminio. La inclusión de la ceniza en la fabricación del cemento puzolánico, puede generar las mismas reacciones químicas que se producen para un cemento normal. Se recomienda realizar investigaciones con cenizas de Termotasajero, para la elaboración de cemento; buscando beneficio económico y ambiental.

Para usar de las cenizas de Termotasajero como material llenante en pavimentos asfálticos, se recomienda hacer ensayos únicamente con el contenido de cenizas que pasen el tamiz N° 200 y realizar ensayos de composición química, peso específico y superficie específica. Se recomienda realizar todos los ensayos para pavimento asfáltico, como el método Marshall y para su posible reemplazo como material llenante.

Es conveniente revisar y analizar detalladamente la infraestructura y condiciones de operación de las plantas termoeléctricas del país, evaluando aspectos como tipos de carbón, condiciones de combustión, nivel de oxígeno, temperatura, etc.

## BIBLIOGRAFÍA

ABDULHAMID. J, HUSEYIN, Saricimen; MOHAMMED, Maslehuddin. "ACI Materials Journals", Vol 92, N. 2, Marzo-Abril, 1995, pp 111-116.

ADT&CIA LTDA. Ficha técnica- material de cenizas. Informe final de Pavimentos y Espacio Público Asociado de la Avenida el TAM (Ak 129). Etapa de Estudios y Diseños. Anexo N° 6.3. Agosto. 2008.

AMAHJOUR, F; BORRACHERO, M.V; MONZÓ, J.M; PAYÁ, J. Materiales puzolánicos mixtos a base de ceniza volante de central termoeléctrica de carbón (CV) y humo de sílice (HS). VII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. Aplicaciones para la fabricación de morteros. Actas del III Cong. 1999. 449-456p.

BEAUDOIN, GU, P. ZHANG, J; M. H. MALHOTRA, V. M. "Performance of Reinforcing steel in Portland Cement and High – Volume Fly Ash concrete". MTL Division Report MTL 98 – 11 (OP&J), Natural Resources Canada, Ottawa. 1998. p 19.

BHATTY, J. Pautas para usar las cenizas volantes hidratadas como base flexible. Administración federal de la carretera (FHWA). El departamento de Ingeniería Civil de la universidad del tech de Tejas. ICCI. N. 99-1/2.1 A-1. (Octubre. 2000).

CANALS, Álvarez, L. Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunura (India), en materiales de construcción. Universidad Politécnica de Catalunya. 2007. 92p.

CLAVIJO, Oscar; OSORIO Juan; Estado del arte del uso y propiedades de las cenizas volantes de Termo Guajira; Termo tasajero; Termo Paipa y Termo Zipa. Bogotá, 2012, 76, 81, 86, 88, 90, 94, 98p. Trabajo de grado ingeniero civil; Universidad Antonio Nariño.

COLMENAREJO.A. Aplicación de las cenizas volantes en la construcción de carreteras. Jornada Técnica sobre el empleo de cenizas volantes en la construcción de carreteras y caminos rurales. Madrid. 1988.

COOK, James E. Fly ash concrete – Technical considerations. En: Concrete International, Septiembre 1983.

ERLIN, Bernard and STARK, David. Petrographic Investigations of concrete and concrete aggregates at the Bureau of Reclamation Editors, American Society for Testing and Materials , Philadelphia, 1990.

FONSECA, Luis. Efecto de Diferentes Reemplazos de Cemento por Ceniza Volante de Termopaipa sobre Resistencia a Compresión del Concreto. Bogotá. 2004. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia.

FERNÁNDEZ; Manuel. Influencia de la adición de cenizas volantes en sustitución de cemento y de las temperaturas de curado en las resistencias mecánicas del hormigón.p.12.

FORHNSDORFF, G.; CLIFTON, J. R. Fly ashes in cements and concretes: Technical needs and opportunities. Structures and Materials Division Center for

Building Technology U. S. Department of Commerce National Bureau of Standards. Washington, Marzo, 1981.

GARCÍA B, Carlos; PONCE DE LEÓN, Juan. La ceniza volante como aditivo en el concreto. Bogotá, 1978, 3-20, 68, 69p. Tesis Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana.

GIL, Claudia; PLAZAS, Ricardo. Propuesta para la utilización de cenizas volantes como adición en la fabricación de cemento tipo I en la Planta cementera de HOLCIM COLOMBIA S.A. Chia. 2007. Especialización en Gerencia de Producción y Operaciones. Universidad de la Sabana.

HELMUTH, Richard. Fly Ash in Cement and Concrete. p. 74.

HEUFERS, H. "Flugaschezement – Herstellungsverfahren, Qualität und Wirtschaftlichkeit". Zement – Kalk – Gips. 1984. p. 55-61.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura, Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento Pórtland. NTC 3493. Bogotá, 2014.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura, Muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento Pórtland. NTC 3823. Bogotá, 2014.

LANGLEY, W.S; LEAMAN, G.H. Practical User for High – Volumen Fly Ash Concrete Utilizing a Low Calcium Fly Ash. CANMET/ACI International Conference. American Concrete Institute. 1998. 5445- 574p.

LIZARAZO, Juan; Comportamiento de Tuberías de Concreto Frente a la Acción del Ácido Sulfúrico. Bogotá, 2003. Tesis de Grado de Especialización en Estructuras. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia.

LUXAN, Alonso. Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción. Una experiencia española. Monografía del Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. 1995.

MALHTRA, V. M. and BREMNER, T, W. “Performance of Concrete at Treat Island, USA, CANMET Investigations”. Concrete in Marine Environment: Proceedings of Third CANMET /ACI International Conference. American Concrete Institute. 1996. p. 52.

MANZ, scar. Wrlldwide production of fly ash and utilization in concrete. 1989.

MARSH, B, K, Day R.L. And Bonner D.G. “Pore structure characterisitcs affecting the permeability of cement paste containing fly ash”. En: Cement and Concrete reasearch. Vol. 15, 1985.

MARTÍNEZ, F. ANDREONI, R. PONCINO, H. Utilización de cenizas volantes como filler de mezclas asfálticas y agente estabilizador de suelos. XII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aire: s.d, 1997.

MARUSIN, Stella L. Experimental examination of fly ash concrete. American Society for Testing and Materials. 1984.

Mehta, P.K., Pozzolanic and cementitious by products in concrete -Another look. Proceedings of Third CANMENT/ACI Int. Conf., V: M. Malhotra. Michigan, ACI SP 114: American Concrete Institute, SP-79, Vol. 1. 1989. pp 1-43.

MEININGER, R.C. Use of fly ash in cement and concrete – Report of two recent meetings. En: Concrete International, Julio, 1982.

MEISSNER, H.S. “Química Del Cemento Portland”; Pozzolans used in mass concrete”. Symposium on use of pozzolanic material. ASTM 1950, p. 16.

Mindess, Sidney and youn, Francis. “Concrete”. Prentice – Hall international.1981.

NEVILLE, A.M. “Concreting technology / an essential element of structural design”, Concrete International (1998).

OCHOA, Luis; GONZÁLEZ, Germán; Las cenizas volantes y su uso como aditivo en las mezclas de concreto hidráulico. Bogotá, 2005, 22, 25,30-35p. Trabajo de grado Ingeniero Civil; Universidad Antonio Nariño.

OWENS, Philip. Fly ash and its usage in concrete.En: Concrete, Julio 1979.

PARDO, Antonio; LUZÁN, Pilar; Normalización Española sobre Cenizas Volantes (Normas UNE). Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Vol.; 39. No 394 (Marzo-Abril. 1988); p. 59-60.

PEÑA, Mary. Caracterización de cenizas de algunos carbones colombianos in situ por retrodispersión gamma-gamma. Bogotá, 2011, p. Tesis de Maestría en Ciencias – Química. Universidad Nacional de Colombia.

PEÑA, Umaña. Síntesis de eolitas a partir de cenizas volantes de centrales termeléctricas de carbón. Departamentd'Enginyeria Minera i Recursos Naturals. Abril. 2002. Universidad politécnica de Catalunya.

RANGEL, Leidy; SARMIENTO, Mayra. Influencia de las características granulométricas y mineralógicas del filler sobre rigidez de las mezclas asfálticas. Bucaramanga, 2010. Facultad de Ingeniería Físico – Mecánico; Universidad Industrial de Santander.

REYES, O. TRONCOSO, J. CAMACHO, J.F. Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes. Universidad Militar Nueva Granada. Marzo. 2006.

ROMERO, Andrés; HERNANDEZ, Johan. Diseño de Mezclas de Hormigón por el método A.C.I. y efectos de la adición de cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión. Bogotá, 2014. Trabajo de grado, Ingeniería civil. Universidad Santo Tomás.

SANTAELLA, L. E. "Caracterización física, Química y Mineralógica de las Cenizas Volantes", Revista Ciencia e Ingeniería Noegradina SIN 0124-8170, Julio-Agosto, 2001, p.47-62.

SIVASUNDARAM, V. Fly ash in concrete. Compilation of abstracts of papers from recent international conferences and symposia on fly ash in concrete. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Septiembre 1987.

SIVASUNDARAM, V. Thermal Crack Control of Mass Concrete. MSL División Report. MSL 86-93 (IR). Energy, Mines and Resources Canadá. Ottawa. 1986. p 32.

TARUN, R. Naik, SHIW, S. Singh y MOHAMMAD M. Hossain. "Cement and Concrete Research", Vol. 24, N. 5, 1994.pp 913-922.

Universidadevigo, tecnología energética, fuentes de energía no renovables, carbón. {En línea}. {30 julio de 2014} disponible en: ([http://webs.uvigo.es/josanna/pdf/Tecnologia Energetica/Carbon/TEN-T03 Anexo-Carbon.pdf](http://webs.uvigo.es/josanna/pdf/Tecnologia_Energetica/Carbon/TEN-T03_Anexo-Carbon.pdf)).

VALBUENA, Humberto. Petrografía de Concretos Hidráulicos con adición de cenizas Volantes de Termopaipa. Bogotá, 2006, 28-40, 56-57p. Tesis de Maestría en Ciencias – Geología. Universidad Nacional de Colombia.

VARGAS, Luis; OBREGÓN, José; JUNCO, Alcibíades. "Cenizas de Termozipa, propiedades y usos en el hormigón". Bogotá, 1980, 5, 11, 27, 48, 49, 57, 58, 62, 63, 78, 80p. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia.

# **ANEXOS**

# **ANEXO A**

**REGISTRO FOTOGRAFICO PLANTA TERMOTASAJERO**

## PLANTA FÍSICA DE TERMOTASAJERO



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## PATIO DE CARBÓN



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## CARBÓN TRITURADO (CASETA DE TRITURACIÓN)



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## CASA DE MÁQUINA



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## SUB-ESTACIÓN DE 230 K.V.



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## CENIZA VOLANTE DE TERMOTASAJERO



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## SILO DE CENIZA VOLANTE



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

## CHIMENEA TERMOTASAJERO



Fuente: Chávez Camilo y Romero Andrés.

# **ANEXO B**

**PLANTA TERMOTASAJERO.**

**REFERENCIA DEL LIBRO “CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE TASAJERO NORTE DE SANTANDER, SISTEMA DE PLANTA Y DE LA PAGINA WED DE LA EMPRESA.**

## PLANTA TERMOTASAJERO

### GENERALIDADES

La planta Termotasajero consiste de una unidad turbogeneradora con recalentamiento, de dos cilindros en tándem con doble exhosto al condensador y seis extracciones para el calentamiento regenerativo del agua de alimentación de la caldera, para operar con vapor a 127 Kg/cm<sup>2</sup> y 538 ° C a la entrada, con capacidad de 152, 200 KW de capacidad neta en bornes de alta tensión del transformador principal y capacidad bruta de 163.00 KW, un consumo térmico específico confirmado de 2410 Kcal/Kwh, provisto de una caldera para combustión de carbón pulverizado y/o aceite pesado (crudo residual o fuel oil), refrigerada con agua dulce tomada del río Zulia mediante una presa de derivación y un sistema de bombas tornillo de toma, desarenador, tuberías y bombas para la circulación del agua captada a través del condensador de la planta.

Incluye, igualmente, un sistema para el pesaje, recibo, manejo, trituración, pulverización, encendido del carbón requerido por la caldera, de un sistema para la remoción y disposición de las cenizas incluyendo los precipitadores electrostáticos para la remoción de la ceniza de los gases de combustión y una chimenea de 90m de altura para protección del medio ambiente. Consta de una planta de tratamiento de agua para la reposición de las pérdidas del ciclo térmico y la producción de agua potable, de una planta de hidrógeno para reposición del sistema de enfriamiento de cojinetes, aceite y equipos, de un sistema de aire comprimido para servicio general y para el sistema de control e instrumentación neumático de la Planta; además, de todos los equipos, tuberías e instalaciones propias del ciclo térmico, así como de un sistema de control electrónico y digital de supervisión para todos los equipos y sistemas, localizado en la sala de mando de la central y de los transformadores, barrajes, motores eléctricos, tableros, baterías, convertidores y cables.

## LOCALIZACIÓN

La Planta "Termotasajero" se encuentra ubicada en el departamento Norte de Santander, aproximadamente a 30 Km. al sur-occidente de la ciudad de Cúcuta, sobre la margen derecha del río Zulia, en jurisdicción del municipio de San Cayetano y en un lote situado a una altura aproximada de 260 m. sobre el nivel del mar. Este sitio fue escogido por sus ventajas geológicas, la cercanía a los sitios de suministro de carbón, así como a las líneas de transmisión existentes y al río Zulia, cuyo caudal garantiza la cantidad de agua requerida por el sistema de enfriamiento de la Central durante todo el año. La gráfica 1 muestra la localización de la central en los 7° 51' de latitud norte y 72° 38' de longitud al oeste de meridiano de Greenwinsh.

Gráfica 1. Localización 7° 50' 47.4" N 72° 37' 59.1" W.



Fuente: Google Maps, Imágenes 2014 DigitalGlobe, Datos del mapa 2014 Google.

## PROCESO DE GENERACIÓN TASAJERO

**Descripción estación primaria.** El agua requerida para la Planta se toma del río Zulia por medio de tres bombas tornillo (una de reserva), en la bocatoma lateral en la margen derecha, se retiene los desechos mayores por medio de tres rejas a 15° con la vertical.

Se construyó una presa y un dique al extremo izquierdo del dique. La estación de toma consta de:

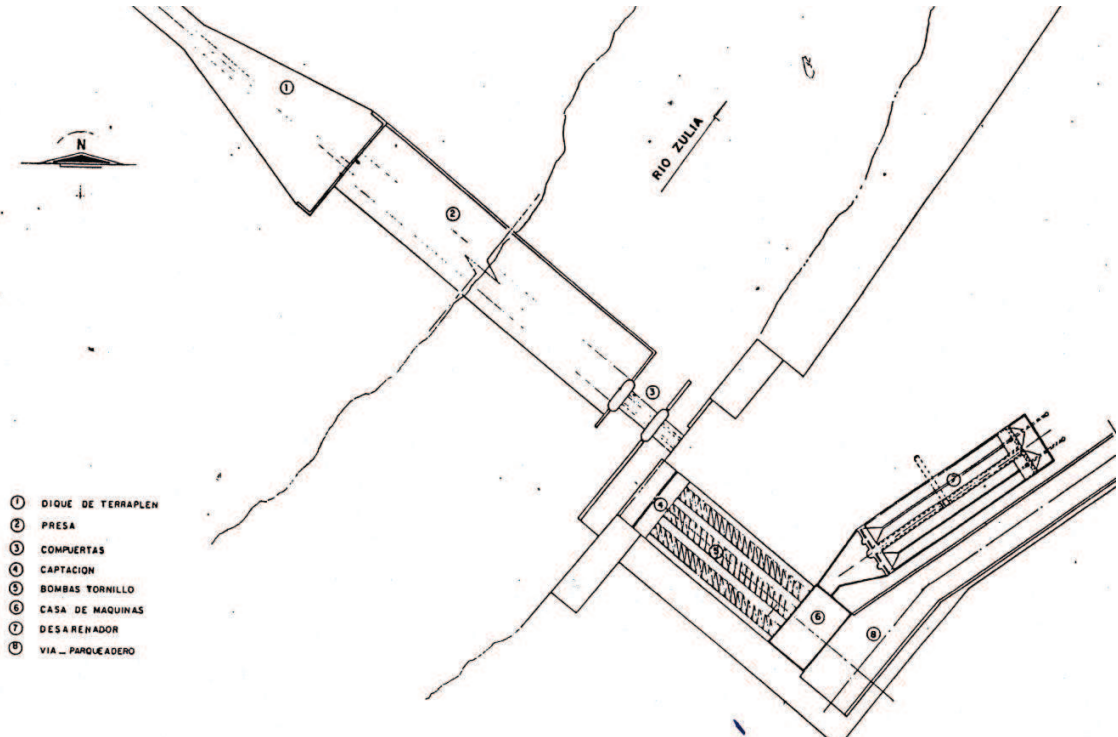
Tres cámaras de captación, recoge el agua del canal y la entrega al canal en cajón común comunicando con el desarenador, por medio de tres bombas tornillo de Arquímedes de triple filete.

Casa de máquinas, que aloja los motores eléctricos, controladores de las bombas tornillo, y controladores de la estación.

Las bombas tornillo envían 25000 m<sup>3</sup>/h hacia el desarenador, el cual consta con una trampa de gravas, dos muros tranquilizadores, y un tanque de carga de salida para retirar las partículas en suspensión. Con dos canales paralelos de decantación, al final de cada canal decantador existe dos compuertas basculantes, pasando el agua hacia un tanque común de carga. Del tanque común de carga inicia la tubería enterrada de concreto hacia el pozo de succión de bombas de agua de circulación.

La grafica 2, presenta la descripción de la estación primaria.

Gráfica 2. Estación primaria.



Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Descripción estación secundaria.** El agua de enfriamiento del tanque de carga del desarenador llega por gravedad a la estación secundaria a través de una tubería enterrada de 1.5 m de diámetro y 475 m de longitud aproximada. Esta estación suministra el agua para enfriamiento del condensador, el sistema abierto de enfriamiento, la planta de tratamiento de agua, el sistema contra incendios, el sistema de manejo de cenizas, etc. La estación secundaria consta de:

Pozo cubierto en concreto de 730 m<sup>3</sup> de capacidad de agua; del pozo se desprenden tres canales también cubiertos, uno para cada bomba de circulación, de 75 m<sup>3</sup> de capacidad de agua cada uno; los canales se aíslan del pozo mediante compuertas verticales, accionadas desde la superficie. Después de las compuertas están los támices rotatorios, los cuales remueven las basuras y desperdicios que están presentes en el río y que no se pudieron remover en las rejas de la bocatoma ni en el desarenador; como hojas y ramas, los cuales pueden

tapar los tubos del condensador de la planta y, las bombas de agua de circulación. Cada bomba suministra el 50 % del agua de enfriamiento necesaria para la operación de la planta a 100 % de carga. Consta de tres bombas, operan dos en paralelo y la tercera en reserva.

Casa subterránea de equipos auxiliares donde se encuentran:

Las bombas Diésel eléctrica y auxiliares, tanque hidroneumático y compresores del sistema contraincendios.

Las bombas de agua cruda.

Las bombas de agua para el sistema de lavado de cenizas, suministrando el agua para el llenado de las tinas bajo el fondo del hogar de la Caldera, para el sello del fondo de la caldera y para la humectación de la ceniza volante en los descargadores rotatorios del silo.

Las bombas de lavado de los tamices rotatorios, las cuales impulsan el agua hasta un cabezal con boquillas, situado en la parte superior de cada tamiz, para lavado de éstos, desprendiendo de las mallas las basuras adheridas.

La caseta de control de los equipos de estación.

**Descripción planta de tratamiento de agua.** Está constituida por un patio de equipos como la planta de pretratamiento, de agua potable y desmineralización. Consta de tanque de almacenamiento de agua filtrada, agua desmineralizada y una caseta de control. En la gráfica 3 presenta la descripción de la planta de tratamiento de Termotasajero.

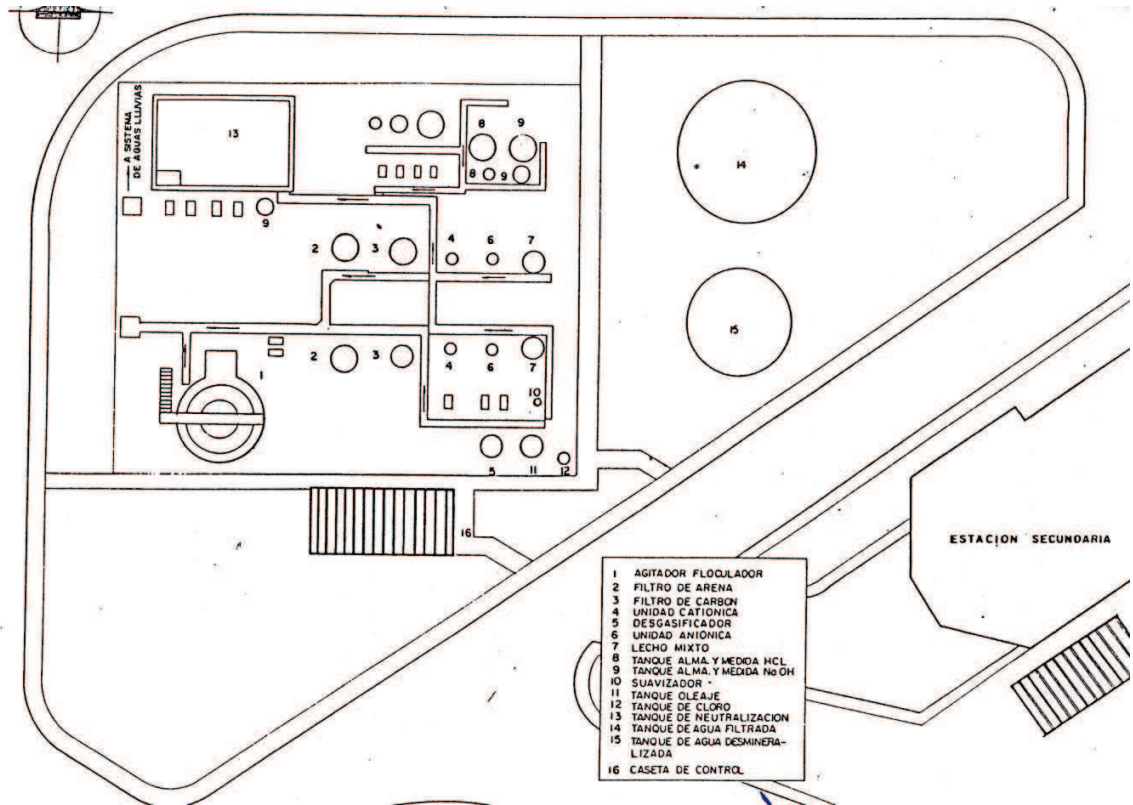
La planta de pretratamiento está constituida por un floculador con agitador de motor eléctrico, con adición de alumbre, cal y coagulante y dos filtros de arena y grava; están diseñados con un caudal de  $43 \text{ m}^3/\text{h}$ . el agua filtrada se almacena en un tanque de  $1400 \text{ m}^3$ . Luego el agua es impulsada por dos bombas centrifugadas, a través de dos filtros de carbón activo con flujo de  $42,8 \text{ m}^3/\text{h}$ . el agua pierde su olor y sabor por el proceso de filtración y  $4,3 \text{ m}^3/\text{h}$  son enviados, para la producción de agua potable, por medio de un suavizador, removiendo y reemplazando los iones de calcio y magnesio que endurecen el agua, por iones de sodio que no causa dureza. Luego se adiciona cloro y se pasa hacia un tanque de oleaje ( $1,5 \text{ m}^3$ ); el agua es enviada por dos bombas, hacia un tanque elevado de  $20 \text{ m}^3$  de almacenamiento que se encuentra en el edificio de casa de máquinas. El suministro de agua potable se realiza utilizando la cabeza del tanque elevado y se distribuye el agua potable hacia los baños, edificio de administración, porterías, taller, almacén, planta de hidrogeno y campamento definitivo.

Para la producción de agua desmineralizada, continúa después del carbón activado, a través de intercambio catiónico, donde los iones positivos de las sustancias disueltas en el agua son reemplazados por iones  $\text{H}^+$  y quedan en la resina catiónica. Luego, por medio de un degasificador diseñado para un flujo de  $38,5 \text{ m}^3/\text{h}$  se elimina el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{O}_2$ .

El agua de salida del degasificador se encuentra libre de gases disueltos en el agua y se lleva a cabo el proceso de intercambio aniónico, donde los aniones son reemplazados por iones  $\text{OH}^-$  y están adheridos a la resina aniónica. Luego en el lecho mixto se separan las resinas antes de la regeneración por medio de su peso. En el último proceso se logra una limpieza completa, para poder enviarla al tanque de agua desmineralizada de  $500 \text{ m}^3$  de capacidad. Las resinas catiónicas se retrolavan y se regeneran mediante la inyección de  $\text{HCl}$  y las aniónicas por medio de inyección de  $\text{NaOH}$ .

El agua desmineralizada se para regenerar los sistemas de la planta de tratamiento, el sistema de condensado y agua de alimentación que termina en el tambor de la caldera.

Gráfica 3. Descripción planta de tratamiento.



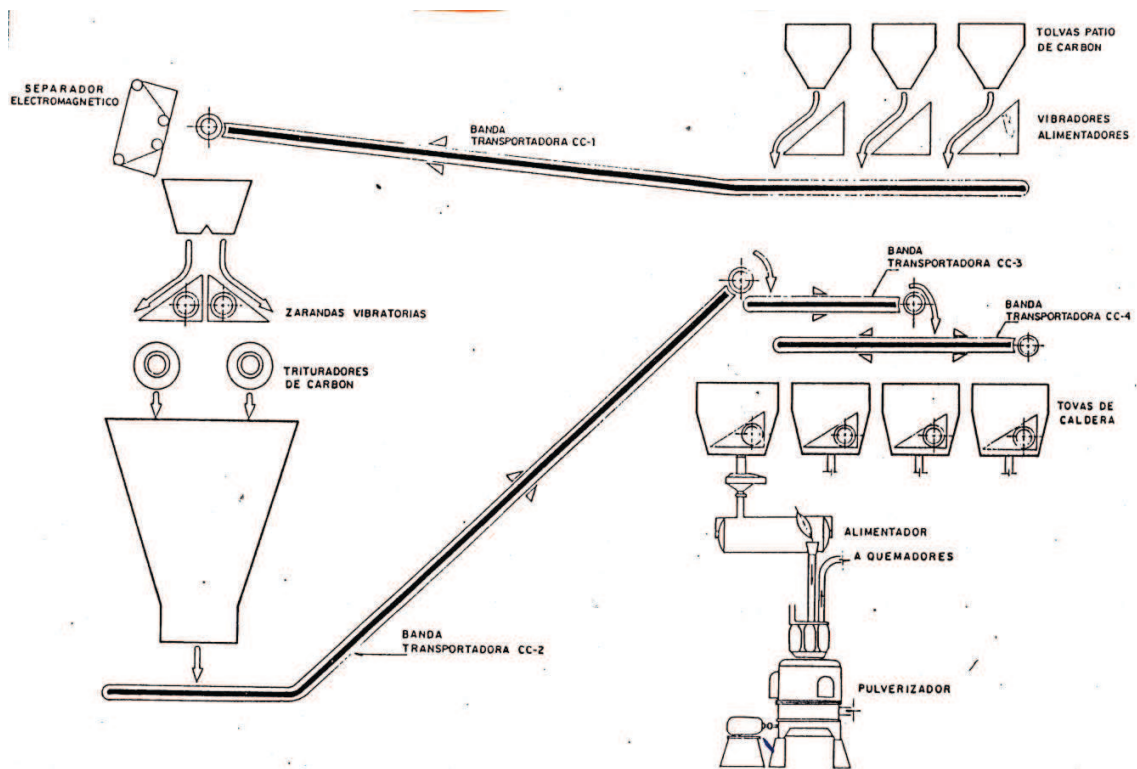
Fuente: Sistemas de planta/Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Sistema de manejo de carbón.** El carbón depositado en el patio de almacenamiento y posteriormente compactado es empujado por coal-dozers hacia tres tolvas subterráneas, las cuales descargan el carbón a una banda transportadora, que va entre un túnel y sale a la superficie para conectar con la casa de trituración. El carbón es separado de residuos metálico por medio de un separador electromagnético para su posterior trituración. El carbón triturado cae sobre una segunda banda transportadora, hacia, dos bandas transportadoras, para llenar las cuatro tolvas de almacenamiento de carbón triturado de la caldera. Debajo de las tolvas se encuentran los alimentadores gravimétricos, los cuales suministran el carbón hacia los cuatro pulverizadores, transportado por aire primario hacia los cuatro quemadores de la caldera.

**Pulverizadores de carbón.** Verticales, de rodillo basculantes y pista; cada uno de los cuatro pulverizadores alimentan un nivel de quemadores de la caldera. Trabajan presurizado por el flujo de aire proveniente de los ventiladores de aire primario, que transporta el carbón pulverizado en suspensión, a través de tuberías hasta los quemadores.

La gráfica 4 presenta el proceso de trituración y pulverización del carbón.

Gráfica 4. Proceso de trituración y pulverización del carbón.

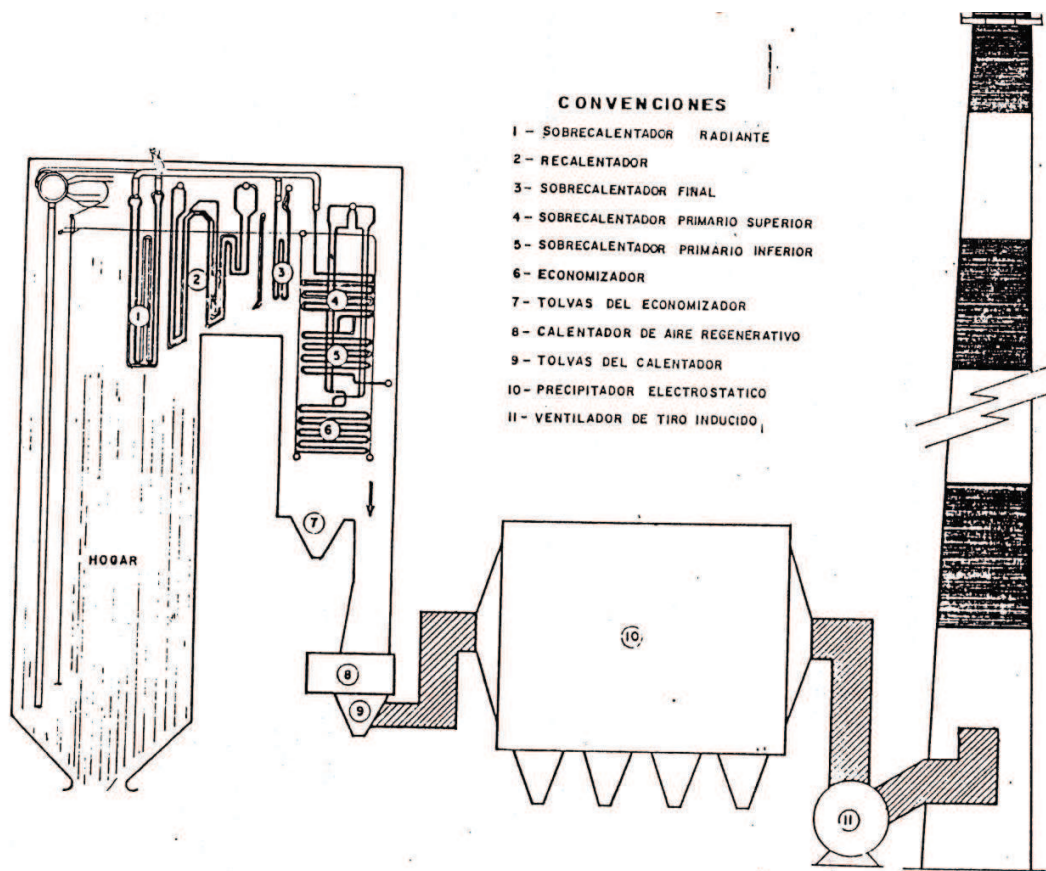


Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Descripción de sistema de remoción de gases.** Los gases producidos en la combustión son removidos, por medio de dos ventiladores de tiro inducido evacuándolos limpios a la atmosfera por la chimenea. A los gases se le remueve la ceniza en cuatro tolvas debajo del economizador, luego debajo del calentador

de aire regenerativo existen seis tolvas y por último las partículas volantes son removidas por la creación de un campo electrostático, donde se ionizan y precipitan en el precipitador electrostático; se almacena en 16 tolvas en la parte inferior. La gráfica 5 muestra las partes que hacen parte del proceso de remoción de gases.

Gráfica 5. Diagrama de gases.



Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Características de la caldera.** La planta está provista de una caldera colgante, de un tambor, radiante, con recirculación y circulación natural, la cual utiliza carbón bituminoso pulverizado, produce 492 toneladas/hora de vapor a 538°C de temperatura de diseño y sobrecalentado a 541 °C, también con una presión de operación de 127 Kg/cm<sup>2</sup> y presión de diseño de 152,57 Kg/cm<sup>2</sup>, consta con un

sistema balanceado de tiro y fue construida en Colombia por Distrital S.A. Las partes de la caldera son:

Tambor de Vapor. Recipiente cilíndrico situado en la parte superior de la caldera, tiene conexiones para la entrada de agua desde el economizador, suministro de agua a los cabezales inferiores de las paredes del hogar por medio de tubos bajantes, válvulas de seguridad, purga continua y la salida de vapor saturado.

Hogar. Formado por paredes verticales de tubos con aletas laterales soldadas, formado un sello hermético a los gases de combustión; en el fondo tiene paredes laterales para conducir la ceniza pesada hacia la tolva de la parte inferior del hogar y de ahí a la tina de remoción de ceniza pesada.

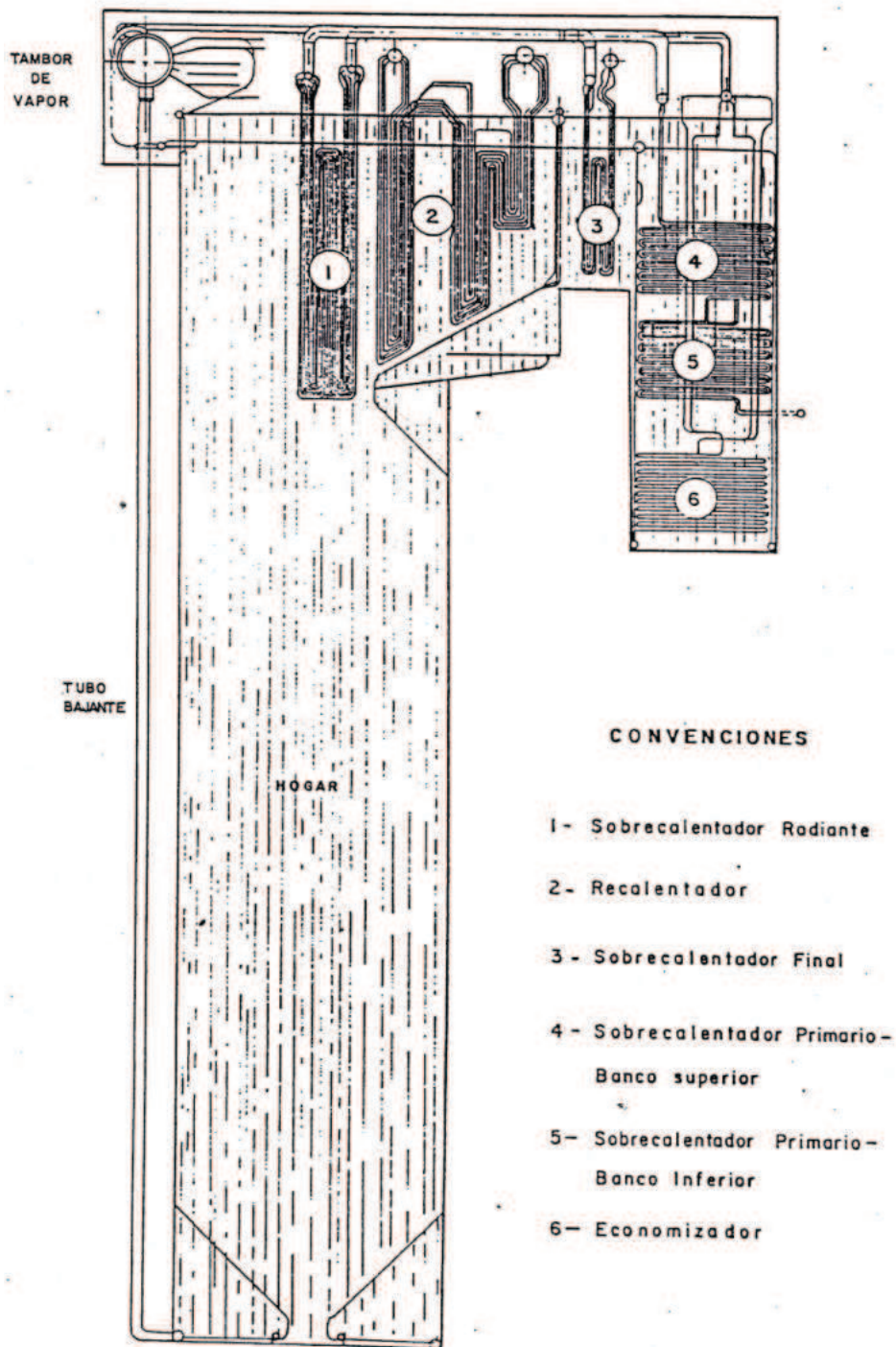
Sobrecalentadores. El sobrecalentador primario está formado por grupos de serpentines horizontales de 110 tubos cada uno. El sobre calentado secundario o radiante ubicado en la salida del hogar y formado por serpentines colgantes de 140 tubos y por último el sobre calentador final formado por serpentines colgantes de 98 tubos.

Recalentador. Formado por dos secciones de serpentines colgantes de 96 tubos en total.

Economizador. Consta de 110 tubos y se localiza debajo del sobrecalentador primario inferior. El encargado fluye el agua de alimentación de la caldera, en sentido contrario a los gases de combustión.

En la gráfica 6 se presentan las partes de la caldera.

Gráfica 6. Diagrama de la caldera.



Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Características de la turbina a vapor.** La turbina a vapor es de dos cilindros en tándem, tres etapas, de doble exhosto al condensador, de 163.000 kW de capacidad de generación, 127 kg/cm<sup>2</sup> de presión de vapor sobrecalentado y 35 kg/cm<sup>2</sup> recalentado, con 541 °C de temperatura del vapor sobrecalentado y 538 °C recalentado, 3.600 rpm de velocidad y 63,5 mm Hg a 40° C de presión de exhosto.

**Descripción del sistema de combustión.** Para que se realice el proceso de combustión se requiere de combustible y aire, estos entran al hogar a través de cajas de aires de cuatro esquinas. El sistema de combustión está conformado por:

Ignitores. Dispone de ocho antorchas, dos por esquina del hogar. Estos usan ACPM y aire, para el encendido de los quemadores de Fuel-Oil.

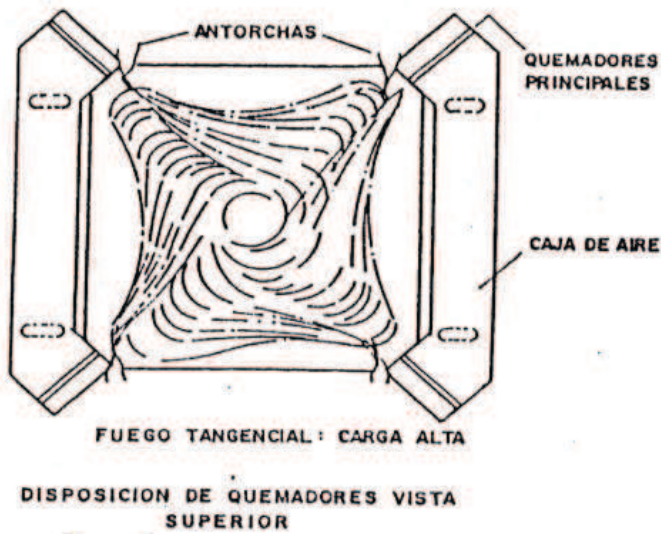
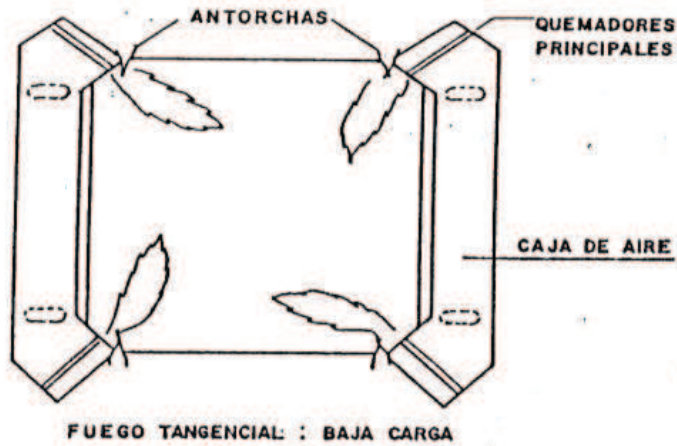
Quemadores de A.C.P.M. Cuatro quemadores llamados quemadores de calentamiento. Se utiliza para el calentamiento de la caldera durante el arranque y para la operación a un 10 % de carga.

Quemadores de Fuel-Oil. Son ocho quemadores dos por esquina del hogar. Se utiliza para el encendido de los quemadores de carbón, para la estabilización de la combustión de carbón a baja carga y puede operar hasta un 60 % de carga.

Quemadores de Carbón. Cuenta con cuatro quemadores por esquina del hogar. Utiliza carbón pulverizado transportado por aire primario.

El combustible y el aire apunta tangencialmente a un círculo imaginario en el centro del hogar, formando un gran remolino de fuego como se muestra en la gráfica 7, asegurando la combustión de todas las partículas.

Gráfica 7. Quemadores.



Fuente. Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Características del generador.** El generador está totalmente cerrado, enfriado por hidrógeno, de tres fases A.C, 204.400 MVA de capacidad, con 20 kV y 60 Hz de frecuencia, con factor de potencia de 0,85.

Planta de hidrógeno. El hidrógeno necesario para enfriar el generador se produce en la Central. La planta de hidrógeno está diseñada para producir 3Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno con una pureza de 99.8% y está dividida en dos partes: una para producción y otra para compresión y llenado de botellas. El hidrógeno se produce mediante un generador de tipo electrolítico y se almacena, a baja presión, en un tanque de 6 m<sup>3</sup>; compresores de tipo diafragma succionan el hidrógeno de este tanque y elevan su presión a 200 kg/cm<sup>2</sup>g.

**Transformador principal.** Es de intemperie flujo aceite forzado enfriamiento, cuenta con 43/54/67 MVA de capacidad, 20 kV en primario y 245/3 kV en secundario de voltaje, el fabricante es Mitsubishi Electric Co.

## **COMBUSTIBLE**

**Carbón.** El combustible primario de la Central es el carbón. La Central utiliza carbón bituminoso triturado y pulverizado, el cual es almacenado en un área de 2,84 hectáreas (patio de almacenamiento), donde alcanza a obtener una cantidad suficiente, para su operación a máxima carga por período de 60 días. El carbón es suministrado desde pequeñas y medianas minas de socavación (75 minas aproximadamente), localizadas en un radio de 40 Km. de la Central y transportado hasta ella en volquetas de 8 y 10 toneladas de capacidad neta. Se deposita en el patio de almacenamiento mencionado anteriormente, compactado constantemente para que no exista llama (sin presencia de oxígeno). La calidad del carbón de Norte de Santander está catalogada como superior al promedio, con bajos niveles de ceniza y azufre. El principal consumidor local es la Central.

El carbón usado en la planta se le realizan ensayos de: contenido de humedad, contenido de cenizas, poder calorífico, contenido de azufre, etc.

El consumo de carbón de la planta, en función de la carga, se presenta en la tabla 1. Con consumo máximo de 55,21 Ton/Hr a 105 % de carga en la termoeléctrica Tasajero.

Tabla 1. Consumo de carbón, en función de la carga.

Carga %	Consumo de carbón (Ton/Hr)
30	17,88
50	29,36
75	41,74
100	53,05
105	55,21

Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Combustibles líquidos.** En Termotasajero se utilizan para el encendido inicial de la caldera y para mantener una combustión estable a baja carga. Fuel-oil y ACPM son transportados a la Central en carros cisterna y almacenados en tanques de almacenamientos con capacidad de 250 m<sup>3</sup> diario.

**Sistema de aceite liviano (A.C.P.M).** Se usa para el encendido inicial de la caldera, para el funcionamiento de los motores diésel del generador de emergencia y del sistema contra-incendio.

Es transportada a la planta por carrotanques y almacenada a un tanque de 250 m<sup>3</sup> de capacidad. Consta de dos bombas centrifugas (una de reserva) para el encendido de las antorchas de la caldera.

**Sistema de aceite pesado (Fuel-Oil).** Es utilizado durante el encendido inicial de la caldera y para mantener la combustión estable a baja carga o cuando se usa un carbón con alta humedad.

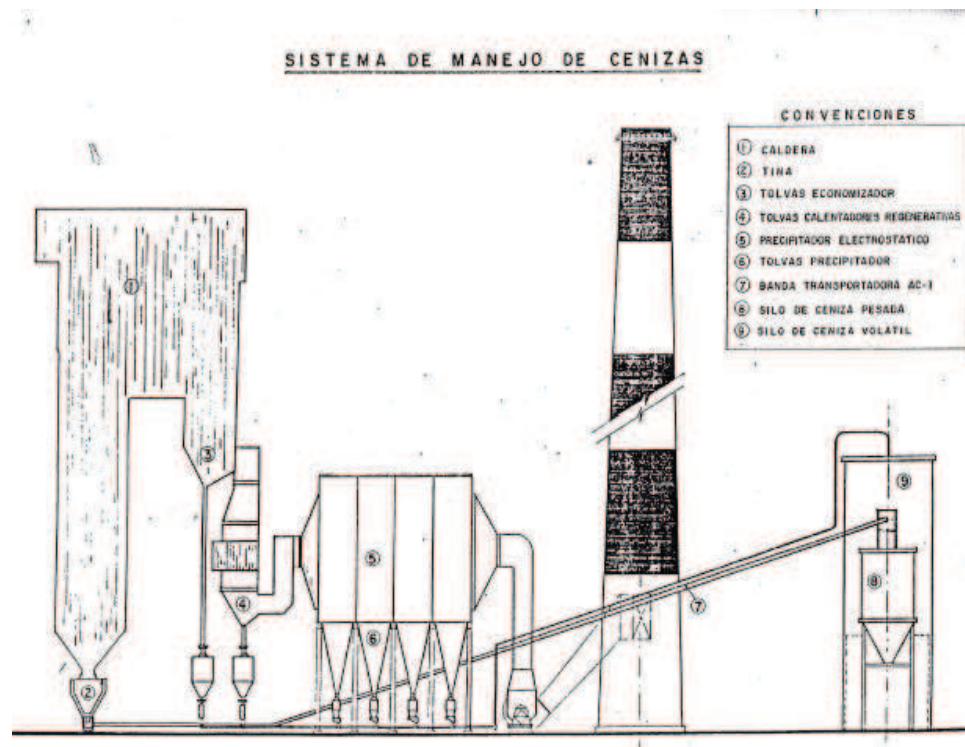
Se almacena en un tanque de 3000 m<sup>3</sup>, por medio de dos bombas centrifugas. Otras dos bombas se encargan de transportar el combustible desde el tanque de

almacenamiento un taque con capacidad de 250 m<sup>3</sup>/diario. El aceite pesado es enviado desde el tanque diario hacia los ocho quemadores de la caldera

## SISTEMA DE MANEJO DE CENIZA

El sistema de manejo de cenizas se divide en dos partes: la primera remueve la ceniza pesada del fondo del hogar de la caldera y la segunda, es utilizada para la remoción de la ceniza volante. En la gráfica 8 se describe el sistema de manejo de cenizas.

Gráfica 8. Sistema de manejo de cenizas.



Fuente: Sistemas de planta/ Central Termoeléctrica de Tasajero.

**Sistema para remoción de ceniza pesada.** Este sistema cuenta con tres equipos: Tina, Banda transportadora y silo de ceniza pesada.

**TINA.** La ceniza pesada que cae al fondo del hogar de la caldera es recogida en una tina metálica externa inundada con agua; está ubicada bajo la tolva seca situada en la parte inferior del hogar y tiene un sistema de desplazamiento lateral, permitiendo realizar labores de mantenimiento.

**BANDA TRANSPORTADORA AC-1.** La ceniza pesada es descargada en la banda transportadora AC-1, para llevarla al silo de almacenamiento. Esta banda tiene una capacidad de 15 ton/h., velocidad verificada de 0.76 m/s., y una inclinación de 15° con la horizontal.

**SILO DE CENIZA PESADA.** La ceniza pesada, proveniente del fondo del hogar de la caldera, es almacenada en un silo elevado de concreto, donde se descarga a volquetas para transportarla y almacenarla al patio de cenizas.

**Sistema para remoción de ceniza volante.** La ceniza se deposita en tolvas metálicas ubicadas así: dos bajo el economizador, seis bajo los calentadores regenerativos y dieciséis bajo los precipitadores electrostáticos.

Un sistema neumático presurizado extrae la ceniza de las tolvas, a través de tanques de acero denominados alimentadores presurizados, y la transporta en aire a presión que circula por tuberías al silo elevado de almacenamiento. La ceniza volátil almacenada en el silo se descarga a volquetas por medio de dos descargadores rotatorios, donde se humedece con agua para que no se esparza en el ambiente en el trayecto hacia el patio de cenizas. Adicionalmente a los descargadores rotatorios, hay un ducto telescópico, el cual descarga directamente la ceniza volante en estado seco cuando se requiera.

El agua utilizada para llenar la tina, y humedecer la ceniza volante en los descargadores rotatorios, se obtiene del pozo de bombas de agua de circulación mediante dos bombas llamadas bombas para manejo de ceniza.

El cargue de cenizas se realiza cada hora y se produce más cenizas volátil, que ceniza húmeda en razón 7:1.

## **CLASES DE ENERGIA**

En el proceso general de la Central Termoeléctrica se desarrollan cuatro clases de energía:

Energía química. Es desarrollada en la caldera por la reacción exotérmica del oxígeno con el combustible.

Energía térmica. El calor producido en la caldera transforma el agua en vapor de alto contenido entálpico.


Energía mecánica. Se desarrolla a partir de la energía térmica, que produce movimiento mecánico a la turbina.

Energía eléctrica. El generador transforma la energía mecánica a energía eléctrica.

La planta Termotasajero se encuentra en el SIN (Sistema Interconectado Nacional) para distribuir energía continua a nivel nacional. Termotasajero es el generador, el transmisor la línea de energía y el distribuidor las eléctricas. La planta lleva 28 años de existencia.

# **ANEXO C**

**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS POR EL SERVICIO  
GEOLÓGICO COLOMBIANO Y ENSAYOS DE FINURA Y DENSIDAD POR EL  
LABORATORIO DEL CONCRETO DE ASOCRETO**

	<b>INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ENSAYOS Y SERVICIOS</b>	<b>GLQ -97</b>
		11-04-2014
<b>GTL- CARACTERIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE MINERALES Y CARBONES</b>		F-LAB-PES-006 V.2
		pag 1 de 1


<b>SOLICITANTE</b>	<b>UNIVERSIDAD SANTO TOMAS BOGOTA</b> <a href="mailto:ekikaliz@hotmail.com">ekikaliz@hotmail.com</a>
<b>DIRECCION</b>	Calle 52 No. 7 - 11 Bogotá D.C.
<b>TELEFONO / FAX</b>	3045233106
<b>TIPO DE MUESTRA</b>	Cenizas Volantes
<b>PROCEDENCIA</b>	Termotasajero
<b>SOLICITUD No.</b>	165 de 02-04-2014

ID MUESTRA	21666-E	NORMA ASTM
<b>REFERENCIA DEL CLIENTE</b>	<b>TERMOTASAJERO</b>	
<b>Resultados en la muestra secada al aire:</b>		
Humedad residual, % masa	0,17	D-3173-11
Materia volátil, % masa	1,29	D-3175-11
Cenizas, % masa	92,04	D-3174-11
Carbono fijo (calculado), % masa	6,50	D-3172-07a
Azufre total, % masa	0,16	D-4239-12
Poder calorífico, Btu/lb	908	D-5865-11a
Poder calorífico, J/g	2111	D-5865-11a
Gravedad Especifica Verdadera	1,94	In house
<b>Análisis Granulométrico, % peso</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>
Retenido M 230 (0,063mm)	32,1	32,1
pasa M 230 (0,063) y retenido M 270 (0,053mm)	2,8	34,9
Pasa M 270 (0,053 mm) y retenido M 325 (0,045mm)	9,0	43,9
Pasa M 325 (0,045mm) y retenido en M 400 (0,037mm)	31,6	75,5
Pasa M 400 (0,037mm) y retenido en fondo	24,3	99,8
Humedad total, % masa	0,22	D-3302M/3302M-12
<b>Análisis Químico de Cenizas</b>		
<b>Resultados en las cenizas de carbón (750°C), % masa</b>		
Silicio como SiO <sub>2</sub>	53,21	
Aluminio como Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26,74	
Hierro como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,15	
Calcio como CaO	0,59	
Magnesio como MgO	0,45	
Sodio como Na <sub>2</sub> O	0,16	D 4326-11
Potasio como K <sub>2</sub> O	0,64	
Titanio como TiO <sub>2</sub>	1,28	
Fósforo como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,52	
Azufre como SO <sub>3</sub>	0,01	
Bario como BaO	0,14	
Estroncio como SrO	0,03	
Perdidas por calcinación a 750°C	7,96	D-3174-11

**Notas**

- Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia.
- El Laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del informe.
- La muestra se preparó bajo Norma ASTM D 2013/D2013M-12.

Maribel Barajas Q  
Química, MPQ-0706  
Coordinadora Grupo Trabajo de Laboratorios de Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones

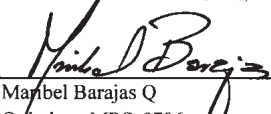
	<b>INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE ENSAYOS Y SERVICIOS</b>	GLQ - 137
		28-05-2014
<b>GTL- CARACTERIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE MINERALES Y CARBONES</b>		F-LAB-PES-006 V.2
		pag 1 de 1

<b>SOLICITANTE</b>	UNIVERSIDAD SANTO TOMAS BOGOTA <a href="mailto:ekikaliz@hotmail.com">ekikaliz@hotmail.com</a>
<b>DIRECCION</b>	Calle 52 No. 7 - 11 Bogotá D.C.
<b>TELEFONO / FAX</b>	3045233106
<b>TIPO DE MUESTRA</b>	Carbón
<b>PROCEDENCIA</b>	Termotasajero
<b>SOLICITUD No.</b>	179 de 07-05-2014

ID MUESTRA	21687-E	NORMA ASTM
<b>REFERENCIA DEL CLIENTE</b>	<b>TERMOTASAJERO</b>	
<b>Resultados en la muestra secada al aire:</b>		
Humedad residual, % masa	2,96	D-3173-11
Materia volátil, % masa	38,36	D-3175-11
Cenizas, % masa	8,83	D-3174-11
Carbono fijo (calculado), % masa	49,85	D-3172-07a
Azufre total, % masa	0,74	D-4239-12
Poder calorífico, Btu/lb	12700	D-5865-11a
Poder calorífico, J/g	29528	D-5865-11a
Índice de hinchamiento, No.	1	D - 720-91-10
<b>Análisis Granulométrico, % peso</b>	<b>Retenido</b>	<b>Acumulado</b>
Retenido M 16 (1,18mm)	39,7	39,7
Pasa M 16 (1,18mm) y retenido M 30 (0,600mm)	35,5	75,5
Pasa M 30 (0,600mm) y retenido M 50 (0,300mm)	14,0	89,5
Pasa M 50 (0,300mm) y retenido en M 100 (0,150mm)	4,7	94,2
Pasa M 100 (0,150mm) y retenido en M 200 (0,075mm)	2,7	96,9
Pasa M 200 (0,075mm) y retenido en fondo	3,4	100,3
Humedad total, % masa	5,45	D-3302M/3302M-12
<b>Análisis Químico de Cenizas</b>		
<b>Resultados en las cenizas de carbón (750°C), % masa*</b>		
Silicio como SiO <sub>2</sub>	62,17	
Aluminio como Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,22	
Hierro como Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,28	
Calcio como CaO	1,29	
Magnesio como MgO	0,41	
Sodio como Na <sub>2</sub> O	0,26	D 4326-11
Potasio como K <sub>2</sub> O	0,86	
Titanio como TiO <sub>2</sub>	1,45	
Fósforo como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,08	
Azufre como SO <sub>3</sub>	0,37	
Bario como BaO	0,061	
Estroncio como SrO	0,051	

**Notas**

- Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la muestra recibida y no a otro material de la misma procedencia.
- El Laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del informe.
- La muestra se preparó bajo Norma ASTM D 2013/D2013M-12. - \* En la orden de análisis, solo solicitaron P y SO<sub>3</sub> debido a que se cuantificaron por FRX, se adicionan los óxidos restantes

  
 Maribel Barajas Q  
 Química, MPQ-0706  
 Coordinadora Grupo Trabajo de Laboratorios de Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones

## RESULTADO DE ENSAYOS DENSIDAD Y FINURA DE LA ADICIÓN

COMPANÍA:	<b>CAMILO ANDRÉS CHÁVEZ</b>		
DIRECCIÓN:	<b>Calle 44 N° 7-94, Apartamento 508</b>	PLANTA:	---
CONTACTO:	<b>Sr. Camilo Andrés Chávez</b>	DIRECCIÓN:	---
TELÉFONO:	<b>3044802111</b>	TELÉFONO:	---
FAX:	---	FAX:	---

MUESTRA:	<b>Adición</b>	PROCEDENCIA:	<b>Termoeléctrica Termotasajero Cucutá</b>
DESCRIPCIÓN:	<b>Ceniza Termotasajero</b>		

FECHA DE RECEPCIÓN	<b>14-05-15</b>	FECHA DE ENSAYO	<b>14-05-19</b>
--------------------	-----------------	-----------------	-----------------

ORDEN DE TRABAJO

**12396**

INFORME N°

**525-14**

### LABORATORIO DE ADICIÓN

TEMPERATURA °C

**22.0**

HUMEDAD %

**53**

Muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso como aditivo mineral en el concreto de cemento pórtland. NTC 3823. Actualización 1997-07-23.

### DENSIDAD DE LA ADICIÓN

Lectura inicial del frasco (ml)	0.4
Temperatura inicial del kerosene (°C)	23.1
Lectura final del frasco (ml)	21.8
Temperatura final del kerosene (°C)	23.2
Masa de la adición usada (g)	45.00
Volumen desalojado (ml)	21.4
Densidad Calculada (g/cm <sup>3</sup> )	<b>2.103</b>

Método para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. NTC 33 Segunda Actualización 97-11-26.

### FINURA DE LA ADICIÓN

DATOS DE LA CALIBRACIÓN DEL BLAINE			
Muestra Patrón Certificada	N° 114	Tiempo Promedio (s)	112.8
Volumen Cámara (cm <sup>3</sup> )	1.846	Temperatura (°C)	24.0
Masa Muestra Patrón (g)	2.80	Superficie específica (cm <sup>2</sup> /g)	<b>3.818</b>

DATOS DEL ENSAYO				
Masa Usada (g)	Temperatura Ambiente (°C)	Tiempo (s)	Tiempo Promedio (s)	Superficie Específica (cm <sup>2</sup> /g)
1.941	22.0	14.9	14.7	<b>2.067</b>
		15.0		
		14.4		

OBSERVACIONES: **Ninguna.****Sede Principal:**Calle 103 No. 15-80  
PBX: (571) 618 0018  
PBX: (571) 756 0990**Laboratorio  
del Concreto:**Calle 79B No. 51-45  
PBX: (571) 610 0797  
PBX: (571) 547 1700

Bogotá D.C., Colombia

Ejecutó:

Wilmar Fredy Sierra  
**Coordinador de Laboratorio**

Revisó:

Ing. Nelson Hernández V.  
**Jefe de Laboratorio y Calidad**

Los resultados emitidos en este informe corresponden a las muestras entregadas al Laboratorio del concreto. El informe no puede ser utilizado en ningún tipo de campaña de información, técnica o comercial. Prohibida su reproducción.







[www.asocreto.co](http://www.asocreto.co)