

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS MEZCLA CEMENTO Y CENIZAS

**Evaluación de las propiedades de cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso
proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta**

Termotasajero Dos.

Leidy Carolina Peñaranda Hurtado

Jenny Amparo Fontalvo Villamil

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías (ECBTI)

Bucaramanga

2020

PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS MEZCLA CEMENTO Y CENIZAS

Evaluación

de las propiedades de cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta Termotasajero Dos.

Leidy Carolina Peñaranda Hurtado

Jenny Amparo Fontalvo Villamil

Trabajo de Grado para Optar el título de Química

Director

Héctor Fabio Cortés

Doctor en ciencias químicas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingenierías (ECBTI)

Bucaramanga

2020

Tabla de contenido

Introducción	3
Justificación.....	5
Planteamiento del problema	6
1. Objetivos	7
1.1 Objetivo General	7
1.2 Objetivos Específicos.....	7
2. Fundamentación teórica	8
2.1 Termotasajero Dos.	8
2.1.1 Cenizas Volantes.....	10
2.2 CEMEX Planta Los Patios.	13
2.2.1 Cemento	14
2.2.2 Cemento Portland.....	15
2.3. Parámetros específicos para cemento de uso general.....	16
2.3.1 Finura	16
2.3.2 Fraguado.....	17
2.3.3 Resistencia a la compresión.	18
2.3.4 Evaluación de la actividad puzolánica.	18
3. Metodología	19
3.1 Muestreo de cenizas volátiles.....	19

3.2 Fluorescencia de rayos X (FRX).....	20
3.3 Preparación de las mezclas Clinker/yeso +ceniza.....	20
3.4 Caracterización de blanco y mezcla de cementos-cenizas.....	20
4. Resultados y análisis	22
4.1 Muestras de cenizas volátiles	22
4.2. Caracterización química de blanco y mezcla de cementos-cenizas.....	24
4.3 Caracterización física de blanco y mezcla de cementos-cenizas.....	29
5. Conclusiones	33
6. Recomendaciones.....	34
Referencias bibliográficas.....	35
ANEXOS.....	40
Anexo 1. Muestreo de ceniza volátil.....	40
Anexo 2. Caracterización química de blanco y mezclas.....	41
Anexo 3. Caracterización física blanco y mezclas.....	42

Lista de tablas

Tabla 1. Composición de las cenizas de acuerdo con la clase de carbón del cual provienen. ...	9
Tabla 2 Métodos de ensayos aplicables para el tipo de Cemento Uso General (UG).	16
Tabla 3 Clasificación del fraguado para cemento puro.....	17
Tabla 4 Composición química de cenizas volátiles de las muestras CZ1, CZ2 y CZ3.....	22
Tabla 5 Índice de actividad de resistencia.....	26
Tabla 6. Propiedades físicas blanco y mezclas.	30

Lista de figuras

Figura 1. Esquema general del proceso de Termotasajero Dos.	9
Figura 2. Estructura morfológica de cenizas volantes de carbón por SEM.	11
Figura 3. Esquema metodológico.....	19
Figura 4. Composición química del blanco y mezclas de cemento – cenizas.....	24
Figura 5. Índice de puzolanidad de las mezclas preparadas.....	27
Figura 6. Resistencia mínima a la compresión en 28 días comparada con NTC 121:2014.....	28

Resumen

La empresa Termotasajero S.A, en su proceso de combustión de carbón para la generación de electricidad tiene como residuo una ceniza volátil con alto contenido de CaO por un tratamiento de desulfurización al que es sometida. Esta ceniza podría ser aprovechada como aditivo para la preparación de cemento de la empresa CEMEX – Los Patios, dado que son empresas que se encuentran en el mismo departamento y que el empleo de ceniza volátil como aditivo al cemento es una práctica que se realiza desde el siglo pasado. En este sentido, en el presente documento de trabajo de grado se planteó como objetivo evaluar las propiedades del cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta Termotasajero Dos. Para ello, primero se recolectaron tres muestras de ceniza provenientes de la termoeléctrica y luego se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (FRX); se seleccionaron las dos muestras con mayor porcentaje de CaO para proceder con la preparación de la mezcla cemento – cenizas en una proporción 70 – 30 % m/m. Las dos muestras de cenizas, junto con un blanco (muestra compuesta de solo Clinker y yeso) se caracterizaron química y físicamente. La caracterización química se llevó a cabo por FRX, mientras que, para la identificación de las propiedades físicas, se realizaron pruebas como el índice de actividad de resistencia, tamizaje, %cal libre, pérdida al fuego, Finura Blane. Se encontró que, las cenizas analizadas son clase N. A su vez, se pudo constatar que las mezclas preparadas presentan actividad puzolánica, alcanzando un 70% de índice de actividad a los 7 días y manteniendo este valor hasta el día 28. Se constató que la adición de cenizas volátiles afecta significativamente propiedades físicas como el porcentaje de cal libre, pérdida por fuego, finura Blaine, tiempo de fraguado inicial y final, aumentando su valor. Finalmente, se puede concluir que las cenizas volátiles provenientes de Termotasajero Dos al ser adicionadas al cemento, cumplen con los parámetros físicos y químicos establecidos para cemento de uso general establecidos por CEMEX.

Palabras clave: ceniza volátil, cemento, fluorescencia de rayos X, puzolanicidad.

Abstract

In the coal combustion process to electric generation of Termotasajero S.A, fly ash with a high content of CaO is generated as a residue due to a desulfurization treatment to which it is subjected. This ash could be used as an additive to the cement preparation of CEMEX - Los Patios, given that they are companies located in the same department and that the use of fly ash as an additive to cement is a practice carried out from the last century. In this order, the objective of this degree document was to evaluate the properties of the cement obtained from Clinker/gypsum mixtures provided by CEMEX with calcareous fly ash produced by the Termotasajero Dos. For that, three ash samples from the thermoelectric plant were first collected and characterized by X-ray fluorescence (FRX). The two samples with the highest percentage of CaO were selected and proceed with the mix of the cement-ash in a ratio of 70-30% m / m. The two ash samples and a blank (sample of only clinker and gypsum) were chemically and physically characterized. The chemical characterization was carried out by FRX. Tests were carried out such as the resistance activity index, screening, % free lime, loss by fire, and Fine Blane. It was found that the ashes are class N. In turn, it was able to verify that the prepared mixtures show pozzolanic activity, reaching a 70% activity index at 7 days and maintaining this value until day 28. It was found that the addition of fly ash significantly affects the percentage of free lime, loss by fire, Blaine fineness, initial and final set reaching a higher value. Finally, it can be concluded that the fly ash from Termotasajero Dos added to the cement complies physical and chemical parameters established for cement for general use by CEMEX.

Keywords: fly ash, cement, X-ray fluorescence, pozzolanicity.

Introducción

La combustión del carbón para la generación de electricidad es un proceso que impacta negativamente al medio ambiente, dado que su principal residuo es la ceniza volátil con alto contenido de SO_x . Para solventar estos problemas existen técnicas de desulfurización, que tratan las cenizas provenientes de la caldera para luego ser llevadas por tuberías que las libera al medio ambiente (Ghosh & Kumar, 2020).

Estas cenizas se caracterizan por estar libre de sulfuros, además de, poseer altos contenidos de dióxido de silicio, óxido de aluminio y óxido férrico, identificándolas como un material puzolánico; es decir, que tienen la capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio, aportando resistencia mecánica. Esta característica hace que puedan ser aprovechadas como materia prima para le mezcla con cemento de uso general; una metodología que se ha trabajado desde los años 1930 (Lamine Zeggar et al., 2019). Autores como Padhye & Deo, (2016) reportan que, las cenizas volantes son una gran alternativa como aditivo del cemento, siempre y cuando estas no excedan el 40% m/m de la mezcla.

De igual forma, una de las principales características que deben cumplir las materias primas para la producción de cemento, es el contenido de óxido de calcio; donde el porcentaje presente de éste en las cenizas volátiles, se vuelve un factor determinante a la hora de su uso en cemento.

Teniendo en cuenta lo anterior, el uso de cenizas volátiles provenientes de la combustión del carbón, como aditivos a la mezcla de cemento portland (Clinker-yeso); actualmente se puede clasificar como un enfoque de economía circular, dado que cierra el ciclo del carbón; transformando un residuo (cenizas) en un coproducto que podría ser aprovechado como insumo en un proceso de fabricación de cemento. Esta clase de sinergia podría ser aplicada a dos empresas

ubicadas en el departamento de Norte de Santander: la termoeléctrica Termotasajero S.A y Cemex -Los patios.

En este orden de ideas, el propósito del presente trabajo es dar a conocer la caracterización física y química de la ceniza volátil de Termotasajero, evaluando la factibilidad de su uso como aditivo para la producción de cemento en CEMEX – Los Patios; con el fin de mitigar los impactos ambientales generados por las cenizas sin sulfuros y aprovechando, no sólo que es considerado un material puzolánico, sino que además presenta un alto contenido de óxido de calcio.

Justificación

Termotasajero S.A, es la primera termoeléctrica del país y de Suramérica en implementar un sistema de desulfurización, de los gases de combustión por un sistema de atomización; el cual consiste en hacer reaccionar la ceniza volante azufrada con cal apagada, que es aplicada en forma de pequeñas gotas atomizadas para que tenga estrecho contacto con la ceniza y pueda reaccionar con el SO_x ; obteniéndose una ceniza rica en CaO y sin presencia de sulfuros. Sin embargo, aun cuando los esfuerzos por mitigar el impacto ambiental han sido grandes, las cenizas volátiles sin sulfuros representan un residuo de difícil manejo y disposición. Actualmente, se generan 100 t/día de estas cenizas, ubicadas en un área específica al aire libre, generando problemas de contaminación por material particulado; y con el tiempo, el suelo que las sostiene podría ceder por el peso y colapsar.

Esta gran cantidad de ceniza se caracteriza por su alta actividad puzolánica, que puede ser aprovechada en procesos productivos del cemento; mejorando su resistencia y disminuyendo sus costos de producción al reemplazar parte de la materia prima.

Por tal razón, el presente trabajo impacta a la región norte santandereana desde el punto de vista económico, al abrir la posibilidad de una alianza estratégica entre dos importantes empresas del departamento como lo son: Termotasajero Dos y CEMEX; así como, desde el punto de vista ambiental, al emplear un residuo de difícil manejo en un proceso, como materia prima en otro.

Planteamiento del problema

Una de las principales fuentes de energía en el país es el carbón; sin embargo, su combustión tiene como consecuencia la generación de ceniza volátil, que no sólo representa un problema ambiental por su alto contenido de sulfuros; si no también, por los inconvenientes que presenta su disposición final. Desde el siglo pasado se ha caracterizado a la ceniza volátil como un material puzolánico, ideal para uso como aditivo en cemento y diversos estudios han reportado las ventajas que trae consigo el empleo de cenizas volátiles en cementos; es por ello, que en el presente trabajo se busca dar respuesta a la pregunta de investigación:

¿Qué efecto tiene la ceniza calcárea de la empresa Termotasajero Dos en la preparación de pasta de cemento de la empresa Cemex de Cúcuta?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades del cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta Termotasajero Dos.

1.2 Objetivos Específicos

- Comparar la composición química de tres muestras de ceniza tratadas con sulfato de calcio producidas en la planta de Termotasajero Dos mediante fluorescencia de rayos X, seleccionando las dos muestras con mayor contenido de CaO.
- Analizar las propiedades mecánicas a dos tipos de cemento obtenidos a partir de dos diferentes mezclas entre cemento y cenizas volátil de la planta Termotasajero Dos.
- Determinar la eficacia de la utilización de cenizas volante calcáreo como aditivo del cemento tipo uso general a partir de los resultados obtenidos.

2. Fundamentación teórica

2.1 Termotasajero Dos.

La Planta de la termoeléctrica "Termotasajero Dos" se encuentra ubicada en el departamento Norte de Santander, aproximadamente a 20 Km, al sur-occidente de la ciudad de Cúcuta, sobre la margen derecha del río Zulia, en jurisdicción del municipio de San Cayetano (Termotasajero, 2008).

La generación de energía eléctrica se realiza a través de un proceso de transformación de energía mecánica, proveniente de turbinas alimentadas con vapor de agua calentado con carbón mineral. El esquema general de este proceso se ilustra en la Figura 1, en donde el carbón que ingresa a la planta es primero pulverizado para poder ser alimentado a la caldera. Durante el proceso de combustión son liberados gases y cenizas, principalmente de naturaleza silícea y de bajo contenido de óxido de calcio, es decir: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3), óxido de calcio (CaO), sílica (SiO_2), además de óxido de magnesio (MgO) y trióxido de azufre (SO_3) (Rawat & Yadav, 2020). No obstante, la composición de las cenizas con cada uno de los compuestos mencionados anteriormente varía dependiendo de la clase de carbón. El carbón se puede clasificar en: bituminoso, sub-bituminoso y lignítico. Los principales componentes de las cenizas volátiles de acuerdo al carbón del que provienen se encuentra descritos en la Tabla 1 (Song et al., 2020), (Ahmaruzzaman, 2010).

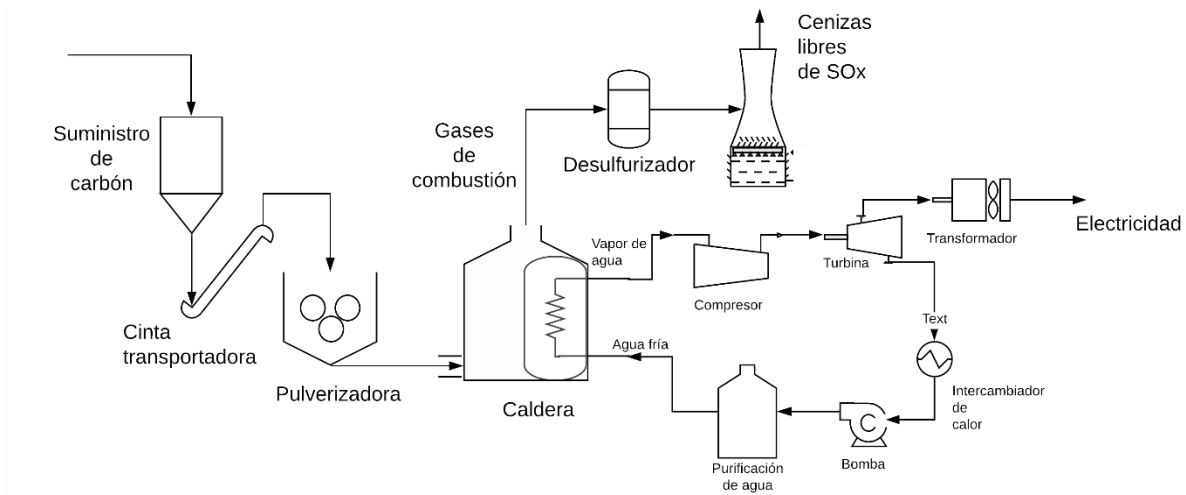


Figura 1. Esquema general del proceso de Termotasajero Dos.

Tabla 1. Composición de las cenizas de acuerdo con la clase de carbón del cual provienen.

(Ahmaruzzaman, 2010)

Componente (%m/m)	Bituminoso	Sub-bituminoso	Lignita
SiO₂	20–60	40–60	15–45
Al₂O₃	5–35	20–30	10–25
Fe₂O₃	10–40	4–10	4–15
CaO	1–12	5–30	15–40
MgO	0–5	1–6	3–10
SO₃	0–4	0–2	0–10
Na₂O	0–4	0–2	0–6
K₂O	0–3	0–4	0–4

Sin embargo, con el fin de minimizar el impacto ambiental por emisiones de SO_x, actualmente en la empresa, los gases de combustión son direccionados a un sistema desulfurizador por atomización (SDA); el cual consiste en hacer reaccionar por medio de atomización la ceniza volante azufrada con cal apagada y obtener un producto de ceniza volante con contenido de sulfato de calcio (entre 3 a 8% CaO); el cual es desechado.

En la termoeléctrica se usa una mezcla de carbón bituminoso y sub-bituminoso, generando alrededor de 100 t/día de ceniza seca, cuyo tamaño individual oscila en el rango 4 μm a 30 μm (Peña & René, 2014). Para la disposición final de este residuo generado, es necesaria una extensión considerable de tierra; y al ser desechado en un patio de cenizas al descubierto, representan un peligro, no solo, por la posibilidad de colapso del terreno a causa de la gran cantidad de material dispuesto; sino que, además, el impacto ambiental aumenta, debido a las partículas finas livianas que pueden elevarse al aire con facilidad.

2.1.1 Cenizas Volantes.

Las cenizas volantes de carbón, cuyas siglas en inglés son CFA (Coal Fly Ash), son materiales inorgánicos, resultante de la combustión de carbón pulverizado, transportada por los gases de combustión y recolectada por medio de precipitadores electrostáticos (González, 2017). La norma UNE-ENV 197-1, divide las cenizas volantes en silíceas (V) y cálcicas (W). Mientras que la NTC 3493: 2019, la cual es la equivalencia en español de la ASTM C618-2019, define como un residuo finamente dividido y puede ser de tipo N, F o C. Esta clasificación depende principalmente del contenido total de dióxido de silicio, óxido de aluminio y óxido férrico.

- Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables, como algunas tierras de diatomeas; opalinas y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o no calcinadas; y varios materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas. Con contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 70%.
- Clase F: producidas por calcinación de carbón bituminoso o antracita, con contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 50%.

- Clase C: producidas por calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, con contenido mínimo de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ del 50%. Estas cenizas poseen propiedades cementantes ya que tienen un contenido de cal superior al 18% (ASTM, 2010; NTC 3493, 2019)

De acuerdo con la anterior clasificación, se evidencia que los componentes más importantes, desde el punto de vista químico, son SiO_2 y Al_2O_3 , que son los que determinan la actividad puzolánica, la cual depende proporcionalmente del contenido de estos dos compuestos. (Kurdowski, 2014).

Las CFA (cenizas volátiles por sus siglas en inglés) es un material complejo que contiene partículas de diferente tamaño y formas, la Figura 2 muestra imágenes de microscópico electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) revelando la presencia de fragmentos minerales irregulares, cuerpos cohesivos, restos de microesferas y una gran cantidad de partículas esféricas, incluidas partículas de cenizas sólidas y cenosferas (Gollakota et al., 2019).

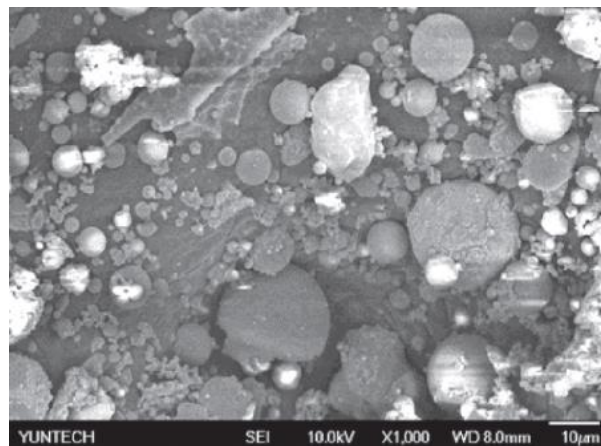
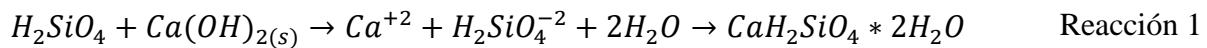


Figura 2. Estructura morfológica de cenizas volantes de carbón por SEM. Tomado de: (Gollakota et al., 2019)

Al ser las cenizas un material puzolánico finamente dividido con cantidades variables de aluminosilicatos amorfos; es posible activarlas con lechada de cal y agua, dando lugar a la reacción puzolánica con un producto estable, según se observa en la reacción 1:



Las cenizas volantes generadas por la combustión del carbón son una materia prima excepcional e inminente para la producción de diversos materiales como hormigón de cenizas volantes, ladrillos de cenizas volantes, baldosas y bloques de cenizas volantes (Ghosh & Kumar, 2020); así como, aditivo al concreto, en cantidades pequeñas, para mejorar su resistencia; ya que, el aumento del contenido de cenizas del 5 al 10% no modifica significativamente el comportamiento mecánico del material (Yin et al., 2018).

La incorporación adecuada de cenizas volantes en la formulación de concreto puede reducir eficazmente el aumento de temperatura del concreto (Du et al., 2018). El estudio realizado por Sharifi et al., (2019), comprueban que la incorporación a cemento portland del material absorbente de secador (SDA) por pulverización que contiene niveles elevados de contenido de cenizas volantes, mejoró la resistencia a la permeabilidad al cloruro y la resistencia a la expansión en autoclave del hormigón.

De la misma manera, González, (2017) menciona como principales ventajas que tiene las cenizas volantes como aditivo a mezclas de concreto: una menor eflorescencia, baja permeabilidad, mayor resistencia al desgaste; fuerte resistencia al sulfato y al ataque corrosivo, mayor resistencia a la lixiviación, mayor resistencia a la sal en suelos y el agua subterránea; mayor

resistencia a lixiviación, al igual que, elimina la necesidad de tener que botar las cenizas en rellenos sanitarios.

En Colombia, como antecedente reciente a lo presentado en el actual documento, se encontró que Bautista-Ruiz, Díaz-Lagos, & Martínez-Ovalle, (2017) realizaron la caracterización de Cenizas Volantes, generadas por la estación termoeléctrica Termopaipa IV, ubicada en la región de Boyacá; encontrando principalmente que estas cenizas son tipo F y tienen un gran potencial para ser usadas como aditivos a cementos.

De manera similar, Aguedelo Moreno & Espinosa Torres, (2017) realizaron análisis del comportamiento en la resistencia a la compresión que tiene la ceniza volante de la termoeléctrica de Paipa (Paipa- Boyacá) en el concreto a un periodo de 72 días respectivamente, encontrando que solo la adición del 2-10% de ceniza volátil al concreto mejora las propiedades de resistencia del concreto analizado.

Lamentablemente, a pesar de las ventajas mencionadas anteriormente, se estima que solo alrededor del 20 al 30% de la ceniza volante generada globalmente se emplea y se utiliza en materiales de construcción principalmente como un aditivo en cemento, hormigón y relleno estructural (Parcker, 2017).

2.2 CEMEX Planta Los Patios.

CEMEX, S.A.B. de C.V. es una multinacional mexicana, que opera en Colombia desde 1996. A nivel nacional, la compañía cuenta con 40 plantas de concreto, 4 plantas de cemento y una planta de aditivos. Actualmente la planta de cemento Cúcuta - Los Patios se encuentra ubicada en el Km. 7 Vía Pamplona, con una capacidad de producción de aproximadamente 400.000 t de cemento al año (La Opinión, 2019).

De manera general, la producción de cemento se realiza en las siguientes etapas (Cementos Progreso, 2019):

- La materia prima compuesta por piedra caliza, ingresa a la planta y se reduce su tamaño a través de la trituración.
- Luego pasa a un proceso de mezclado con diferentes componentes con base al tipo de cemento que se desea y se lleva a la galera de prehomogenización. Durante este proceso, la mezcla prehomogenizada se pulveriza y da como resultado un polvo fino llamado harina cruda.
- La harina cruda pasa por hornos rotatorios, los cuales la calcinan a altas temperaturas.
- En seguida se lleva a cabo reacciones químicas con la harina, se enfría y el producto es un material gris oscuro, también conocido como clínker.
- El clínker es molido y mezclado con materiales tales como yeso o puzolana, dando paso al producto final conocido como cemento.

2.2.1 Cemento

La palabra cemento se aplica a todo tipo de producto o mezcla que presenta propiedades adhesivas y conglomerantes (compuesto de una o varias sustancias capaces de endurecer al reaccionar con otros productos, agua en el caso de los cementos portland), a corto o largo plazo (Marulanda, 2018). Según el número de componentes y las proporciones de la mezcla se obtienen los diferentes cementos:

- **Clinker:** Producto obtenido de calcinar, hasta fusión parcial, mezclas artificiales preparadas, dosificadas a partir de materias calizas y arcillosas convencionalmente.
- **Puzolanas:** Producto natural de origen volcánico, capaz de fijar cal a la temperatura ambiente y formar compuestos hidráulicos.

- **Conglomerados hidráulicos:** material inorgánico finamente dividido que, amasado convenientemente con agua, forma una pasta que fragua y endurece en función de una serie de reacciones y procesos de hidratación. El material una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. (Rubio Encinas & Zarzosa González, 2016).

2.2.1.1 Clasificación del cemento.

La norma NTC 121:2014, clasifica los cementos hidráulicos de acuerdo con sus propiedades físicas de la siguiente forma:

- **Tipo UG:** cemento hidráulico para construcción general. Se utiliza esta clasificación cuando uno o más de los tipos especiales no sean requeridos.
- **Tipo ART:** Alta resistencia temprana.
- **Tipo MRS:** moderada resistencia a los sulfatos.
- **Tipo ARS:** Alta resistencia a los sulfatos.
- **Tipo MCH:** Moderado calor de hidratación.
- **Tipo BCH:** Bajo calor de hidratación.

2.2.2 Cemento Portland

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico, el cual durante el proceso de clinkerización (1450 °C -1500 °C), la mezcla de las diferentes materias primas se combina para obtener las distintas fases mineralógicas del clinker. Las fases son: el silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y una disolución sólida de ferritos-aluminatos cálcicos que se acerca con frecuencia a la composición C_4AF (aluminoferrato) (Mamlouk & Zaniewski, 2018).

Los productos de hidratación de las fases mineralógicas del clinker de cemento Portland son los responsables de las propiedades físicas, químicas y mecánicas que desarrolla el cemento

hidratado y endurecido. Este cemento se obtiene por pulverización de un producto que recibe el nombre de clinker, al que se le adiciona un pequeño porcentaje de un regulador de fraguado, que generalmente es el yeso $\text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$; en otras palabras y de manera general, el cemento portland es una mezcla de Clinker con yeso (Mamlouk & Zaniewski, 2018).

2.3. Parámetros específicos para cemento de uso general (UG)

A los diferentes tipos de cementos se les realizan una serie de análisis para determinar sus características potenciales, estos ensayos en Colombia se rigen bajo la norma NTC (Norma Técnica Colombiana), reportada en la Tabla 2, donde se relaciona el ensayo y el método aplicable.

Tabla 2 Métodos de ensayos aplicables para el tipo de Cemento Uso General (UG). **NTC 121:2014**

Parámetro	Cemento uso general	Referencia normativa
Finura	N.A	NTC 294 :2018
Tiempo de fraguado, ensayo de Vicat		
Inicial, no menos de, minutos	45	NTC 118: 2019
Inicial, no más de, minutos	420	
Resistencia mínima a la compresión MPa		
1 día	N.A	
3 día	8	NTC 220, (2017)
7 día	15	
28 día	24	

2.3.1 Finura

El tamaño de partícula del cemento es una característica importante, puesto que la hidratación comienza en la superficie de las partículas de cemento, a mayor finura, mayor será el área

superficial y más rápido se producirá la hidratación. Entonces, el emplear un material más fino se tiene como resultado un desarrollo más rápido de la resistencia y un calor inicial de hidratación mayor; influyendo en la calidad del producto final (Mamlouk & Zaniewski, 2018). Como tal, se requiere que, en la mezcla de materias primas, el tamaño de las partículas de piedra caliza sea inferior a 125 μm y que el tamaño de las partículas de otras materias primas sea inferior a 45 μm (Tamiz N.325) (Goncalves & Margarido, 2015). En Colombia la NTC 294:2018, establece el método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico.

2.3.2 Fraguado

El fraguado hace referencia al endurecimiento de la pasta de cemento o al cambio de estado plástico a estado sólido, una vez es hidratado. Aunque el fraguado le proporciona al cemento cierta resistencia, se debe diferenciar del término *endurecimiento*, que es la ganancia de resistencia en una pasta de cemento fraguada. El fraguado normalmente se describe en dos niveles: fraguado inicial y fraguado final, su definición depende del método que se utilice para determinarlo, ya sea empleando el aparato Vicat o el método Gillmore (Mamlouk & Zaniewski, 2018). La NTC 118:2019, establece que para determinar el fraguado de una muestra de cemento se debe utilizar el aparato Vicat.

Un cemento puro se puede caracterizar de acuerdo con el tiempo de fraguado, según se muestra en la Tabla 3. Este tiempo depende principalmente y de manera proporcional con el contenido de aluminatos y sulfatos de las muestras.

Tabla 3 Clasificación del fraguado para cemento puro (Mamlouk & Zaniewski, 2018).

Clasificación del fraguado	Tiempo
Fraguado Normal	60 – 120 minutos
Fraguado rápido	10 – 45 minutos
Fraguado instantáneo	< 10 minutos

2.3.3 Resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión se realiza de acuerdo con los métodos de ensayo determinados por la NTC 220:2017, para lo cual se usan cubos de 50 mm de lado. Dicha norma, establece que los cubos de cemento portland deben ser ensayados inmediatamente después de retirarlos de la cámara húmeda a 1, 3, 7 y 28 días; para cemento adicionado las pruebas se realizan al 3, 7 y 28 días.

2.3.4 Evaluación de la actividad puzolánica.

Dado que la puzolanidad es la capacidad que tiene un material para reaccionar con el hidróxido de calcio, aportando resistencia; la modificación en el desempeño del cemento, consecuencia de la adición de cenizas volátiles puzolanas puede ser observado a edades tempranas o con el pasar del tiempo. Para evaluar la forma en que se altera éste desempeño, se hace necesario caracterizar los materiales que serán adicionados y después realizar ensayos en pastas de cementos o en morteros (Uchima Quintero, 2015).

El criterio más conocido para evaluar la puzolanidad es la determinación del índice de actividad de resistencia (IAR) cuyo cálculo se especifica en la NTC 3823: 2020, a partir de la elaboración de cubos de cemento con un porcentaje de ceniza adicionada y cubos sin este aditivo. El índice de actividad de resistencia se determina con la Ecuación 1:

$$IAR = \frac{A}{B} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, A= es la resistencia a la compresión de los cubos de ensayo en MPa.

B= Resistencia a la compresión de los cubos de control

De acuerdo con la NTC 3493-2019, el IAR con cemento portland a los 7 y 28 días debe ser como mínimo 75% respecto al control.

3. Metodología

Para el logro de los objetivos propuestos, se siguió la metodología de acuerdo con el esquema mostrado en la Figura 3.

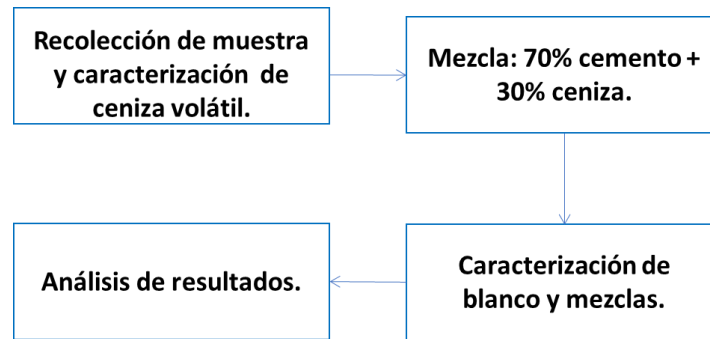


Figura 3. Esquema metodológico.

3.1 Muestreo de cenizas volátiles

Las muestras de cenizas volátiles se tomaron desde el silo de ceniza volante para descarte, un día a la semana, durante tres semanas. En el Anexo 1 se observan los datos del muestreo realizado. Cada día se recolectó 3 muestras de 6 kg aproximadamente cada una en un espacio de 9:00; 11:00 y 13:00, esto de acuerdo con la zona horaria colombiana. Estas 3 recolecciones, se homogeneizaron y seleccionó 10 kg para ser guardados en bolsas de polipropileno con cierre hermético y se envió a caracterización. Las muestras se etiquetaron como: CZ1, CZ2 y CZ3 para su identificación. La caracterización química fue realizada por la técnica de fluorescencia de rayos X, esto con el fin de identificar la composición de las muestras en cuanto a presencia de: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , Na_2O , K_2O , Cl , principalmente, dado que estos compuestos son los requeridos analizar por la NTC 3823, (2020) y reportar según la NTC 3493, (2019).

3.2 Fluorescencia de rayos X (FRX)

La caracterización elemental tanto de las cenizas como de las mezclas se realizó por fluorescencia de rayos X. Para ello, primero se debe preparar una pastilla, tomando 15 g de la muestra (ceniza o mezcla), con 0.6 g del compactante; se coloca en un pulverizador de anillos durante un tiempo estándar estipulado por el laboratorio. Una vez pase este tiempo se saca la muestra pulverizada y se pesan 6,6 g. Posteriormente, se pasan a una prensa para formar la pastilla prensada, la cual se analiza en el equipo de fluorescencia de rayos X Axios Max de la empresa PANAnalytical.

3.3 Preparación de las mezclas Clinker/yeso +ceniza.

Inicialmente, se mezcló el blanco de cemento en un molino Bond, el cual está compuesto por Clinker y yeso en proporciones confidenciales para una mezcla de cemento de CEMEX. Luego se preparó dos mezclas con dos muestras de ceniza con el mayor contenido de CaO, las cuales se llamaron CZ1 y CZ2. Finalmente, se mezcló homogéneamente y por separado CZ1 y CZ2 con este blanco; con una composición de 30% ceniza y 70% cemento. Las mezclas preparadas se identificaron como Mezcla#1 (con CZ1) y Mezcla#2 (con CZ2). La figura A2 del Anexo A, muestra las mezclas preparadas.

3.4 Caracterización de blanco y mezcla de cementos-cenizas.

Una vez preparada la mezcla de ceniza – cemento, se procedió a realizar la caracterización de cada una de las mezclas por fluorescencia de rayos X; así como, se llevó a cabo pruebas de caracterización de propiedades físicas como: finura y resistencia.

La caracterización del tamaño de partícula de las mezclas se realizó calculando el porcentaje de partículas retenidas en un tamiz 325; también, se determinó la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire siguiendo la NTC 33, (2019). Ambos valores se

compararon con los parámetros establecidos por la empresa CEMEX, dado que, no existe ninguna norma técnica colombiana que fije unos valores mínimos que se deban cumplir en esta característica.

La evaluación del tiempo de fraguado de las muestras se llevó a cabo siguiendo los lineamientos expuestos en la NTC 118, (2019). Para la evaluación de la resistencia; así como, de la puzolanicidad de las mezclas, se siguió lo estipulado por la NTC 220, (2017), la cual indica que los ensayos se deben realizar a 1 día, 3 día, 7 día, y 28 día; ensayando 3 especímenes para cada edad.

En cada caso, se realizaron pruebas por triplicado, reportándose el promedio de estos valores en el apartado resultados. Una vez caracterizadas las muestras, se procedió al análisis de resultados.

4. Resultados y análisis

4.1 Muestras de cenizas volátiles

La Tabla 4 muestra el promedio de la composición química de las muestras: CZ1, CZ2 y CZ3, analizadas mediante fluorescencia de rayos X, cada una por triplicado; expresada en porcentaje masa/masa. Así mismo, se presentan los valores de una composición típica de ceniza proveniente de un carbón bituminoso y sub bituminoso documentado por Ahmaruzzaman, (2010). Los componentes nombrados como “otros” incluyen a TiO_2 , P_2O_5 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , NiO , CuO , Ga_2O_3 , GeO_2 , As_2O_3 , Rb_2O , SrO , Y_2O_3 , ZrO_2 , La_2O_3 , WO_3 , PbO , ThO_2 , donde sumando su composición masa aportan el 2,64% (CZ1) y 2,27% (CZ2) y 2.64% (CZ3).

Tabla 4 Composición química de cenizas volátiles de las muestras CZ1, CZ2 y CZ3.

Componente (%m/m)	CZ1	CZ2	CZ3	Bituminoso (Ahmaruzzaman, 2010)	Subbituminoso
SiO_2	55,67	45,5	59,01	20–60	40–60
Al_2O_3	23,14	21,2	22,75	5–35	20–30
Fe_2O_3	7,03	10,5	6,50	10–40	4–10
CaO	4,81	10,5	3,70	1–12	5–30
MgO	0,55	0,00	0,58	0–5	1–6
SO_3	4,54	8,58	3,13	0–4	0–2
Na_2O	0,25	0,29	0,26	0–4	0–2
K_2O	1,36	1,13	1,39	0–3	0–4
Cl	0,03	0,09	0,05	-	-
Otros	2,65	2,27	2,64	-	-

Según se puede observar en la Tabla 4, la composición de las muestras presenta diferencias entre sí, esto se debe a que no provienen de la misma muestra tomada el mismo día; si no de días diferentes con ocho días de separación. No obstante, los valores registrados se encuentran dentro del rango reportado para las cenizas provenientes de un carbón bituminoso y/o sub-bituminoso,

como es el caso de Termotasajero Dos donde se emplea una mezcla de éstos. Cabe mencionar que, de acuerdo con Zapata, Bayer, & Jiménez, (2014) las cenizas de los carbones clasificados como bituminoso y sub-bituminoso son las más usadas en la industria cementera; por tanto, la ceniza generada en este caso puede ser usada como aditivo al cemento.

Como criterio de selección para uso como aditivo al cemento, se estableció las muestras con mayor contenido de CaO, puesto que a mayor presencia de óxido de calcio más estable será el producto de la reacción de activación puzolánica; por tanto, se escogen CZ1 y CZ2. De igual forma, dado que las dos muestras de cenizas tienen un alto contenido de óxido de Silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de calcio (CaO) las caracteriza como compuestos aluminosilicatos y calcáreos. Los óxidos identificados como otros no tienen incidencia reportada para las mezclas de cemento.

En este sentido, CZ1 y CZ2 se pueden clasificar como cenizas clase N, ya que el contenido de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ de CZ1 y CZ2 es de 85,83% y 77,2%, respectivamente, de acuerdo con la norma la NTC 3493 (2019). Adicionalmente, de acuerdo con esta norma se tiene que el porcentaje de óxido de calcio, para cenizas clase N, sólo debe ser reportado y no establece un parámetro mínimo o máximo que se deba cumplir.

Respecto al alto contenido de SO_3 en la muestra CZ2, que es la única que sobrepasa el valor característico para carbones bituminoso/sub-bituminoso, se puede atribuir a un carbón de mala calidad con alto contenido de azufre; haciendo que la ceniza necesitase más tiempo de tratamiento en el desulfurizador, pero dado que los tiempos en planta para dichos tratamientos son estándar y no se varían, se obtuvo este valor y no recibió un tratamiento adicional.

4.2. Caracterización química de blanco y mezcla de cementos-cenizas.

Siguiendo la metodología descrita, después de caracterizar químicamente la ceniza volátil, se procedió a mezclar éstas con el cemento, dejando un blanco de cemento en ausencia de ceniza volátil; los resultados de la caracterización química se pueden observar en la Figura 4 y los resultados obtenidos de los triplicados se muestran en el Anexo 2.

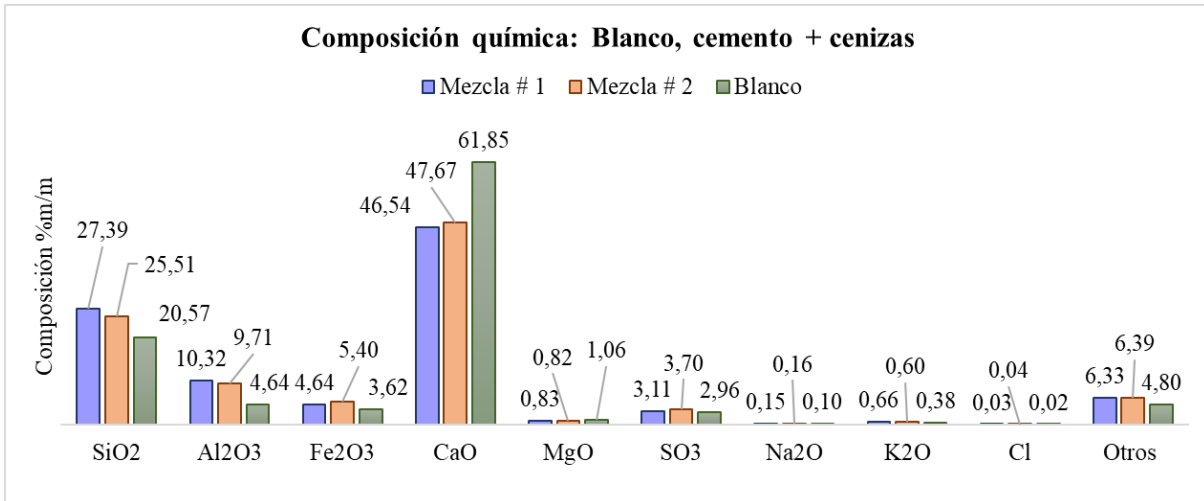


Figura 4. Composición química del blanco y mezclas de cemento – cenizas por Fluorescencia de rayos X

De acuerdo con la Figura 4, el contenido del óxido de magnesio, trióxido de azufre, óxido de sodio y potasio es bajo, lo cual es favorable puesto que su presencia en altas proporciones puede llegar a afectar la expansión de cemento, una vez se hayan endurecido, haciéndolo propenso a la formación de grietas. En relación con el óxido de magnesio, no existe una prueba estandarizada respectiva que relacione el contenido de óxido de magnesio con una expansión del cemento, por tal razón, no existe valor mínimo o máximo registrado por la normatividad colombiana para este compuesto. Sin embargo, de acuerdo con la literatura se considera comúnmente que los cementos que contienen 7–8% de MgO no causan expansión, ni en pruebas de laboratorio, ni en ensayos de campo (Kurdowski, 2014); es decir, la cantidad de MgO presente en las mezclas preparadas de

0,83 % para la Mezcla #1 y 0,82% para la Mezcla #2, se encuentran dentro de los lineamientos anteriormente mencionados.

A su vez, el contenido de SO_3 , no debe sobrepasar el 5% dado que una alta presencia de este compuesto causa que el volumen del concreto cambie después de un largo período de tiempo de maduración. Adicionalmente, un alto contenido de SO_3 aumenta los tiempos de fraguado y una disminución en la resistencia del cemento. Por otro lado, no existe alguna norma que exija un valor mínimo o máximo que deba cumplir sobre el contenido de SO_3 (Kurdowski, 2014).

El óxido de sodio (Na_2O) y óxido de potasio (K_2O) reciben el nombre de álcalis, se encuentran en menor proporción en cada una de las muestras, lo cual es favorable, dado que reaccionan con algunos áridos retardando la velocidad del desarrollo de la resistencia y cuando el cemento es usado en la mezcla del hormigón puede llegar a la desintegración de éste (Mamlouk & Zaniewski, 2018).

Los compuestos químicos de mayor relevancia en una mezcla de cemento-ceniza son el Al_2O_3 , SiO_2 y CaO ; estos tres óxidos se comportan de manera diferente entre sí en mezclas cementosas a causa de su carga (por consiguiente, a su capacidad de unión); y caracterizan la naturaleza puzolánica e hidráulica de un cemento adicionado con cenizas. La actividad puzolánica es directamente proporcional al contenido de Al_2O_3 y SiO_2 , mientras que, el CaO está relacionado con las propiedades hidráulicas (Glosser et al., 2020).

En concordancia con lo mencionado anteriormente, se espera que exista un aumento en la puzolanidad de las mezclas, puesto que, al comparar el contenido de en %m/m de óxidos de Silicio, el Aluminio es mayor que el del blanco, según se observa en la Figura 4. Composición química Figura 4. El cálculo del índice de actividad de resistencia (IAR) permite visualizar la variación de la puzolanidad entre el blanco y las mezclas. Dichos resultados se presentan en la

Tabla 5; en donde, ambas mezclas presentan un mayor IAR que el blanco, obteniendo un valor superior al 75% para el día 28.

El mecanismo inicia con una reacción lenta y con el pasar del tiempo, la presencia de las cenizas CZ1 y CZ2 en las mezclas hace que se alcance una actividad mayor al 70%. Si, las cenizas no ejercieran influencia en la actividad puzolánica, los valores se mantendrían bajos, similares a los del día 1 y 3 y no pasarían del 70% de la resistencia del patrón; tal como ocurre con el blanco, en donde el único elemento que aportara resistencia es el cemento. Lo cual significa que las cenizas son un material apto para ser usado como aditivo en el cemento.

Tabla 5 Índice de actividad de resistencia.

IAR	1 día	3 día	7 día	28 día
Blanco	21,29	29,82	38,75	45,71
Mezcla #1	44,24	76,64	69,62	77,90
Mezcla #2	51,15	68,09	77,97	80,90

Con el fin de confirmar lo expuesto en el párrafo anterior, se construyó la curva del índice de puzolanicidad con relación a la edad en días de las mezclas preparadas, mostrada en la Figura 5. Allí, es posible observar el efecto que tienen la adición de cenizas sobre las mezclas; puesto que, si el cemento fuese el único elemento aportante a resistencia, todos los puntos de resistencias deberían caer dentro de la zona sombreada en marrón debajo en la curva inferior del índice de puzolanicidad.

Los puntos de resistencias por encima de esta zona indican, que son producto de la reacción puzolánica; estas resistencias tardías son mayores a las esperadas cuando el único elemento aportante de resistencias es el cemento puro. Es decir, el 5 o 10% de resistencias adicionales sobre

la región marrón son el producto de la reacción de las cenizas con el cemento, lográndose convertir un material que era un deshecho industrial en una fuente de resistencia a la compresión.

Cabe recalcar que, el presente estudio realizó el seguimiento de las resistencias sólo hasta 28 días; sin embargo, la reacción puzolánica proseguirá en el tiempo mejorando el desempeño del cemento; no solo, por el incremento de las resistencias, sino porque la reacción puzolánica consumirá el exceso de cal libre generada en la reacción del cemento con el agua, eliminando un material que puede ser perjudicial para el concreto y que mejorará el cemento en cuanto a su durabilidad.

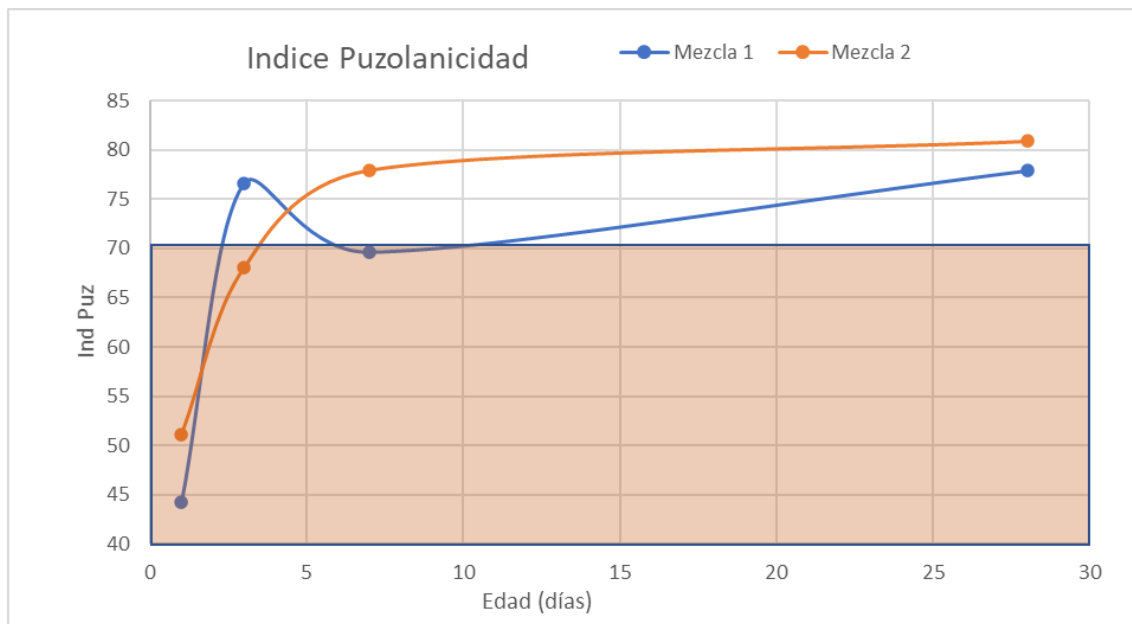


Figura 5. Índice de puzolanicidad de las mezclas preparadas.

De igual forma, se midió la resistencia a la compresión de las mezclas de cemento y el blanco, encontrando que dicho factor disminuye respecto al blanco, cuyos datos pueden ser consultados en la Tabla C1 del Anexo 3 y se presentan gráficamente en la Figura 6; en donde, los valores se encuentran comparados con el requisito mínimo exigido por la NTC 121 (2014).

En la Figura 6 se evidencia que a partir del día 7 los valores de resistencia aumentan en todas las muestras de manera lineal y para el día 28 las dos mezclas alcanzan valores similares de resistencia a la compresión. Al ser comparadas con el blanco, las mezclas presentan valores inferiores de resistencia, resultado esperado, pues el principal elemento generador de resistencia en la mezcla es el cemento puro y dado que, este compuesto se encuentra en menor proporción en la mezcla, su resistencia es menor. Diversos autores han encontrado que la tasa de desarrollo de resistencia del concreto se ve afectada solo por las cenizas volantes con alto contenido de calcio (Lamine Zeggag et al., 2019); sin embargo, en el presente caso de estudio, esta afectación de la resistencia se encuentra dentro de los límites inferiores permitidos por al NTC 121 (2014); por tanto, las cenizas podrían ser utilizadas como aditivos del cemento, dando una resistencia que cumple con los parámetros establecidos por la norma.

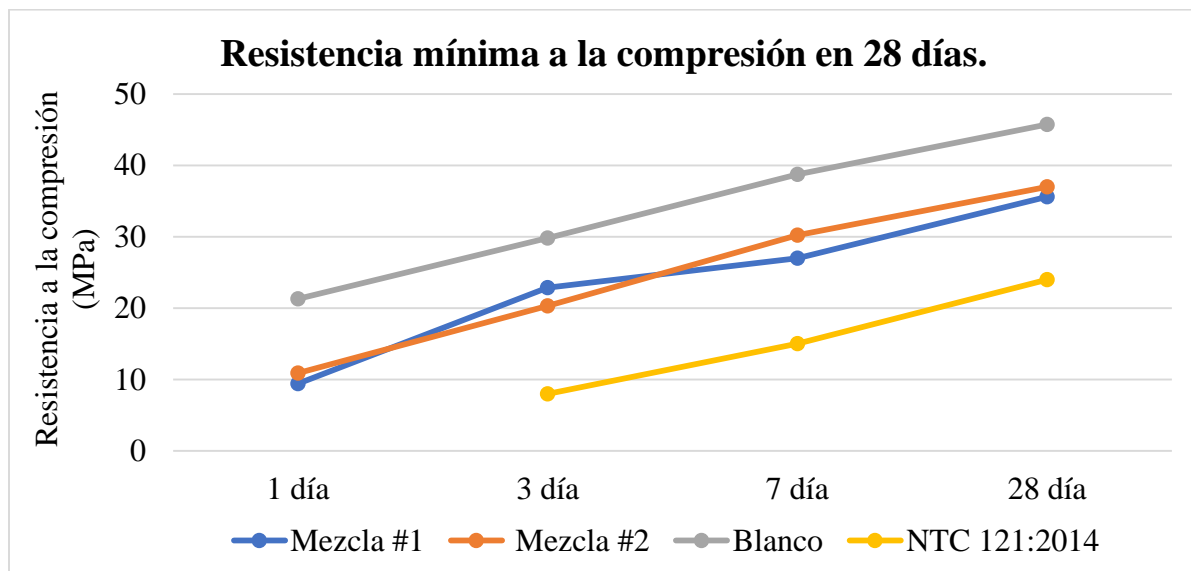


Figura 6. Resistencia mínima a la compresión en 28 días comparada con NTC 121:2014 (valores mínimos requeridos).

4.3 Caracterización física de blanco y mezcla de cementos-cenizas.

El análisis de las propiedades físicas, se realizó mediciones por triplicado y un análisis estadístico de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés) de un factor para cada propiedad física, con un nivel de significancia de 0,05. Se planteó una hipótesis nula en donde la adición de cenizas no afecta al cemento y una hipótesis alternativa en donde la adición de cenizas produce un efecto en la propiedad del cemento analizada. De igual forma, el valor de $F_{2,6}$ de tablas es igual a 5,14, para todos los casos.

La Tabla 6 muestra los valores promedio para el blanco y las mezclas, el límite permisible ya sea por CEMEX o la NTC 121 (2014); así como el factor F calculado del análisis de varianza para cada una de las siguientes propiedades: peso específico, % cal libre, tamaño de partícula (finura), % perdida por fuego, resistencia, tiempos de fraguado inicial (FI), tiempos de fraguado final (FF), finura Blaine.

La Tabla C2 del Anexo 3 muestra el ANOVA del peso específico, encontrando que la adición de cenizas si ejerce un efecto sobre el peso específico del cemento; al ser el factor calculado ($1,18 \times 10^{30}$) un valor muy superior comparado con el Factor F de tablas de distribución (5,14). Esta influencia se ve en la disminución en un 11% (Mezcla #1) y un 10,15% (Mezcla#2) respecto al blanco. Resultado de esperarse, puesto que estas mezclas contienen un 30% menos de cemento/yeso que el blanco; sin afectar la calidad del cemento.

En la Tabla 6 se puede observar que para el valor del porcentaje de cal es mayor para las mezclas; lo cual era de esperarse, puesto que en ellas se ha reemplazado el 30% del cemento con cenizas; a su vez, la diferencia entre los valores de cal libre de las dos mezclas (0,75 % y 1,46%) posiblemente se debe a que la cal libre puede estar encapsulada dentro de la partícula de la ceniza volátil durante su proceso de formación (Kaewmanee et al., 2013). Un valor superior en el

contenido de cal libre en la Mezcla# 2 es concordante con el valor superior de óxido de calcio presente en la ceniza CV2, con la cual está formada, donde según los resultados del FRX para las cenizas presentado en la Tabla 4.

Tabla 6. Propiedades físicas blanco y mezclas.

	Blanco	Mezcla #1	Mezcla #2	Requisito Normativo	Factor calculado Fc con ANOVA	Factor F de tablas
Peso específico (g/cm³)	3,15	2,79	2,83	-*	1,18x10 ³⁰	5,14
%Cal libre	0,60	0,75	1,46	2%*	4346,85	5,14
Finura tamiz #325						
%Past.	97,7	97,56	97,65		6,2	5,14
%Ret.	2,30	2,44	2,35	5%*	6,2	5,14
Perdida por fuego (%)	2,05	2,99	3,07	-*	1549,98	5,14
Finura Blaine (cm/g)	3210	4080	4604	-*	6335,66	5,14
Fraguado Inicial (min)	90	384	303	45**	44338,07	5,14
Fraguado Final (min)	120	470	391	-	18133,44	5,14

*CEMEX

** Inicial no menos de (NTC-121: 2014)

Por otro lado, respecto al ANOVA (Tabla C3 del Anexo 3) para el porcentaje de cal libre el valor del F calculado (4346,85) es mayor que el F de tabla (5,4), por tanto, se puede decir que la presencia de cenizas tiene inferencia significativa en su valor. De esta forma, el porcentaje que registra el blanco hace referencia al óxido de calcio que no reaccionó en el proceso de clinkerización de la fabricación del cemento y, por consiguiente, un valor de 0,6% de cal libre para el blanco solamente indica que el óxido de calcio, en su mayoría, se consumió en el horno.

De modo complementario, la propiedad física del porcentaje de cal libre, en un proceso de clinkerización debe estar entre el rango de valores superiores a 0,5% e inferiores a 2%. Cuando se alcanzan valores superiores se da lugar a un proceso de expansión, lo que conlleva a un aumento del volumen que podría llevar a la generación de fisuras (Goncalves & Margarido, 2015); de igual

forma, este rango es aceptado por CEMEX ; razón la cual, aunque los valores de cal libre en las mezclas aumentan, aún se encuentran dentro de los rangos permitidos por la empresa.

El tamaño de partícula se determinó por la finura, para lo cual se empleó un tamiz #325. Los datos de porcentaje de muestra retenida en dicho tamiz se registran en el Anexo 3 en las

Tabla C4 y de manera similar la Tabla C5 de Anexo 3 presenta los datos del porcentaje de muestra que pasa a través del tamiz. En ambos casos las cenizas influyen de manera no significativa la variación en la finura del cemento, al ser comparado el valor del F calculado (6,2) al F de tabla (5,14). Esto se debe, a que la mezcla preparada se homogeneizó de manera correcta en el momento de su preparación; garantizando, tamaños de partículas similares. Otro punto para resaltar es, que el porcentaje de material que pasa a través del tamiz se encuentra dentro de lo establecido por CEMEX.

El análisis de variancia para la pérdida por fuego, según se puede observar en la Tabla 6, tiene un factor F calculado (1549,98) el cual sobrepasa en gran medida al F por tabla (5,14), por tanto, la adición de cenizas afecta de manera significativa la pérdida por fuego de un cemento y aunque no hay establecido por normatividad un valor límite que deba cumplir, el valor cálculo se encuentra dentro de los parámetros requeridos por CEMEX. En la Tabla C6 del Anexo 3 se presentan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas y del análisis estadístico aplicado.

En cuanto a la finura Blaine la Tabla C7 del Anexo 3 presenta los resultados de las pruebas por triplicado para cada una de las muestras analizadas; así como, el ANOVA. Para esta propiedad se calculó un Factor F de 6335,66 que al ser comparado con el F de tabla (5,41) se evidencia que las cenizas inciden de manera significativa en la finura Blaine del cemento; sin embargo, esta afectación no es negativa y se encuentra dentro de los límites permisibles por CEMEX. Dado que

la NTC 121:2014 ni la NTC 33:2019 no mencionan ningún valor mínimo o máximo que deba cumplirse, se toma como referencia el valor establecido por la empresa.

Finalmente, el fraguado inicial y final del cemento se ve afectado significativamente por la adición de cenizas; pues como se puede revisar en la Tabla 6, el factor F calculado es mayor que el F de tablas (5,14) (la Tabla C8 y Tabla C9 del Anexo 3 muestran los resultados del análisis estadístico para este caso). Aunque los tiempos de fraguado aumenten en ambas mezclas, esta característica no tiene establecido por normatividad un tiempo máximo de fraguado, por el contrario, sólo se exige que el tiempo no sea inferior a 45 min según la NTC 121:2014; y dado que el tiempo de fraguado obtenido por las mezclas preparadas es mayor, cumpliendo con la NTC 121colombiana; por tanto, las cenizas adicionales afectan de manera positiva al cemento.

Ahora bien, desde el punto de vista químico, la velocidad del fraguado del cemento puro está relacionada proporcionalmente con el contenido de aluminatos y sulfatos en las muestras, un fraguado normal requiere bajas concentraciones de estos dos compuestos (Mamlouk & Zaniewski, 2018); el aumento en el tiempo de fraguado en las mezclas se debe a dos factores: el primero de ellos, es la mayor cantidad de aluminato y sulfatos presentes que el blanco (Figura 4); el segundo, se debe al hecho que las cenizas volantes en solución acuosa, dan lugar a que el SiO_2 reaccione con agua para formar una solución saturada de ácido mono silícico y libera una reacción endotérmica, que contribuye a disminuir la hidratación de estos cementos mezclados y prolongue el fraguado (Elmrabet et al., 2019).

5. Conclusiones

- Las cenizas volátiles provenientes de Termotasajero Dos contienen un porcentaje mayor al 70% en su contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , caracterizándolas como altamente puzolonas, lo cual es importante para industrias cementeras, como CEMEX; o para tratamiento de aguas residuales maximizando la adsorción de metales pesados.
- La presencia de las cenizas en un 30% en mezcla con cemento ayuda a mejorar la resistencia del cemento al aumentar continuamente el índice de actividad puzolánica a partir de los siete días, comparado con el blanco.
- Las propiedades físicas de peso específico, % cal libre, finura por tamiz 325, pérdida por fuego y finura Blaine se ven significativamente afectadas por la adición en un 30% de ceniza a cemento, aumentando su valor sin sobrepasar los límites establecidos por CEMEX para el uso de ceniza en cemento.
- Al comparar con el blanco, el tiempo de fraguado inicial y final de la mezcla aumenta por la presencia de cenizas volátiles, cumpliendo lo establecido por la normatividad colombiana para un cemento.

6. Recomendaciones

- Realizar una caracterización morfológica de las cenizas por medio de la técnica Microscopía de barrido electrónico (SEM, por sus siglas en ingles).
- Caracterizar desde el punto de vista mineralógico las muestras de mezcla de ceniza-cemento por difracción de rayos X (DRX).
- Calcular el porcentaje de partículas acumuladas, diámetro efectivo, coeficiente de uniformidad y coeficiente de curvatura a las mezclas de cemento-ceniza para caracterizar el tamaño de partícula.
- Analizar la factibilidad económica de la adición del 30% cenizas a la mezcla del cemento.

Referencias bibliográficas

- Aguedelo Moreno, A., & Espinosa Torres, B. (2017). *Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de termopaipa*. [Universidad Católica de Colombia]. [https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14479/4/Documento Ceniza volante TERMOPAIPA.pdf](https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14479/4/Documento%20Ceniza%20volante%20TERMOPAIPA.pdf)
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>
- ASTM. (2010). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use. *Annual Book of ASTM Standards, C*, 3–6. <https://doi.org/10.1520/C0618>
- Bautista-Ruiz, W. A., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista De Investigación, Desarrollo E Innovación*, 8(1), 135. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>
- Cementos Progreso. (2019). *Proceso de producción de cemento - Cempro*. Cementos Progreso. <http://www.cempro.com/index.php/quienes-somos/procesos-de-produccion/proceso-de-produccion-de-cemento>
- Du, W., Zhang, C., Kong, X., Zhuo, Y., & Zhu, Z. (2018). Mercury release from fly ashes and hydrated fly ash cement pastes. *Atmospheric Environment*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.01.033>
- Elmrabet, R., El Harfi, A., & El Youbi, M. S. (2019). Study of properties of fly ash cements. *Materials Today: Proceedings*, 13, 850–856. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.048>
- Ghosh, S. K., & Kumar, V. (2020). Circular Economy and Fly Ash Management. In *Circular Economy and Fly Ash Management*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0014-5>

- Glosser, D., Suraneni, P., Isgor, O. B., & Weiss, W. J. (2020). Estimating reaction kinetics of cementitious pastes containing fly ash. *Cement and Concrete Composites*, 112(December 2019), 103655. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103655>
- Gollakota, A. R. K., Volli, V., & Shu, C. M. (2019). Progressive utilisation prospects of coal fly ash: A review. *Science of the Total Environment*, 672, 951–989. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.337>
- Goncalves, C., & Margarido, F. (2015). *Materials for construction and civil engineering. Science, Processing and Design*. Springer International Publishing.
- González, G. (2017). *Análisis de la efectividad en la retracción de concretos al adicionar ceniza volante y un aditivo compensador*. [Universidad Nacional de Colombia]. http://bdigital.unal.edu.co/59542/1/TESIS_GGM_APROBADA.pdf
- Kaewmanee, K., Krammart, P., Sumranwanich, T., Choktaweekarn, P., & Tangtermsirikul, S. (2013). Effect of free lime content on properties of cement-fly ash mixtures. *Construction and Building Materials*, 38, 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.035>
- Kurdowski, W. (2014). *Cement and concrete chemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7945-7>
- La Opinión. (2019, March 21). Planta Cemex de Los Patios recibe premio. *La Opinión*. <https://www.laopinion.com.co/economia/planta-cemex-de-los-patios-recibe-premio-173627#OP>
- Lamine Zeggar, M., Azline, N., & Azizi Safiee, N. (2019). Fly ash as supplementary material in concrete: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 357(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012025>
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2018). *Materials for civil and construction engineers* (4th ed.).

Pearson educación limited. <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=7109>

Marulanda, J. (2018). *Materiales de construcción*. El Cid Editor.

<https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:4259/es/ereader/uis/36726?page=73>

NTC 118. (2019). Cementos. Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante aguja de vicat. *ICONTEC, Séptima actualización*.

NTC 220. (2017). Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm O 2 pulgadas de lado. *ICONTEC, Sexta actualización*. [https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=9DA69D00EF466C2D33F8B077131EF7C396DF3D9C2A164539&Req=)

[FR&Q=9DA69D00EF466C2D33F8B077131EF7C396DF3D9C2A164539&Req=](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=9DA69D00EF466C2D33F8B077131EF7C396DF3D9C2A164539&Req=)

NTC 294. (2018). Cementos. Métodos de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico utilizando el tamiz de 45 um (No. 325). *ICONTEC, Quinta actualización*.

[https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=C79ADEF30CE8CF24020601A4D6D0A1185C85277F8E18F642&Req=)

[FR&Q=C79ADEF30CE8CF24020601A4D6D0A1185C85277F8E18F642&Req=](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=C79ADEF30CE8CF24020601A4D6D0A1185C85277F8E18F642&Req=)

NTC 33. (2019). Cementos. Métodos de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. *ICONTEC, ICONTEC, 23*.

NTC 3493. (2019). Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto. *ICONTEC, Segunda actualización*.

NTC 3823. (2020). Muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para uso en el concreto. *ICONTEC*.

[https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=C79ADEF30CE8CF2464AFD97298269F040A8AEDADE780CF53&Req=)

[FR&Q=C79ADEF30CE8CF2464AFD97298269F040A8AEDADE780CF53&Req=](https://bibliotecavirtual.uis.edu.co:3353/pdfview/viewer.aspx?locale=fr-FR&Q=C79ADEF30CE8CF2464AFD97298269F040A8AEDADE780CF53&Req=)

Padhye, R. D., & Deo, N. S. (2016). Replacement of Cement by Fly Ash in Concrete. *International Journal of Engineering Research*, 5(1), 58–60. <https://doi.org/10.17950/ijer/v5i1/014>

- Parcker, J. (2017). *Fly Ash: Properties, Analysis and performance*. Nova Science Publishers, Incorporated.
- Peña, G., & René, L. (2014). Caracterización Morfológica Y Estructural de polvos de cenizas volantes. *I+D*, *14*(2), 14–19.
- Rawat, K., & Yadav, A. K. (2020). Characterization of coal and fly ash (generated) at coal based thermal power plant. *Materials Today: Proceedings, Article in Press*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.292>
- Rubio Encinas, M. J., & Zarzosa González, H. J. (2016). *Química para ingenieros civiles* (3th ed.). Dextra. <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=4635>
- Sharifi, N. P., Jewell, R. B., Duvallet, T., Oberlink, A., Robl, T., Mahboub, K. C., & Ladwig, K. J. (2019). The utilization of sulfite-rich Spray Dryer Absorber Material in portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, *213*, 306–312.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.074>
- Song, H., Fan, H., Gao, H. T., Liu, J. A., & Mou, H. (2020). Improving fly ash brightness with carbon and iron oxide removal. *Recycling*, *5*(1). <https://doi.org/10.3390/recycling5010005>
- Termotasajero. (2008). *Termotasajero SA ESP - Proceso Industrial*.
http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=36
- Uchima Quintero, J. S. (2015). *Evaluación de la puzolanicidad de material obtenido en la calcinación simultánea de biomasa y arcilla caolinítica* [Universidad Nacional de Colombia].
<http://www.bdigital.unal.edu.co/52698/>
- Yin, K., Ahamed, A., & Lisak, G. (2018). Environmental perspectives of recycling various combustion ashes in cement production – A review. *Waste Management*, *78*, 401–416.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.012>

Zapata, R. B., Bayer, J. F. P., & Jiménez, C. S. (2014). Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas. *Revista Ion*, 27(2), 43–54.

ANEXOS

Anexo 1. Muestreo de ceniza volátil

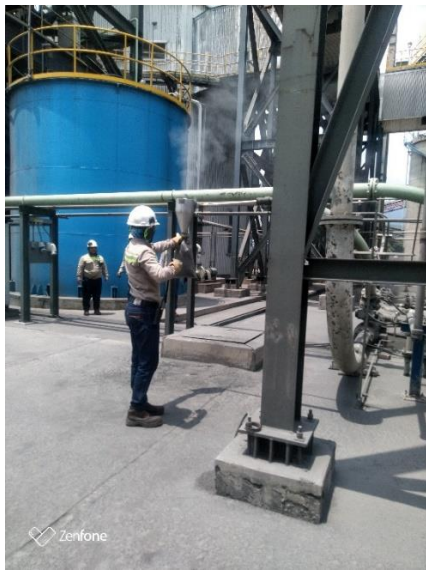


Figura A1. Recolección de cenizas volátiles.

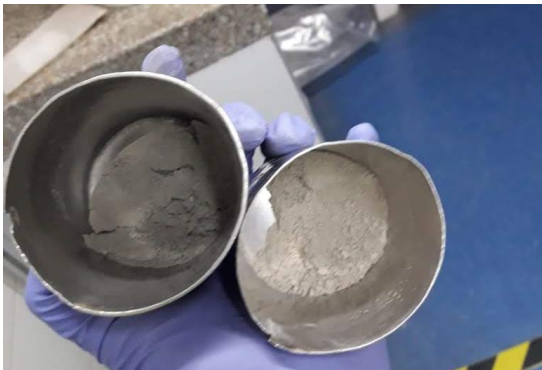


Figura A2. Preparación muestras para fluorescencia de rayos X.

Anexo 2. Caracterización química de blanco y mezclas.

Tabla B1. Resultados FRX del blanco, valores en %m/m.

TIPO Muestra	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Cl
Blanco promedio	20,57	4,64	3,62	61,85	1,06	2,96	0,10	0,38	0,02
Blanco*	20,59	4,70	3,60	61,85	1,06	2,98	0,10	0,37	0,02
Blanco*	20,56	4,65	3,64	61,81	1,05	2,94	0,10	0,38	0,02
Blanco*	20,55	4,56	3,65	61,88	1,06	2,96	0,10	0,37	0,02

Tabla B2. Resultados FRX de la Mezcla #1, valores en %m/m.

TIPO Muestra	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Cl
Mezcla # 1 promedio	27,39	10,32	4,64	46,54	0,83	3,11	0,15	0,66	0,03
Mezcla # 1*	27,43	10,34	4,64	46,60	0,83	3,12	0,15	0,00	0,03
Mezcla # 1*	27,38	10,30	4,70	46,54	0,82	3,12	0,15	0,00	0,03
Mezcla # 1*	27,35	10,32	4,58	46,50	0,83	3,10	0,15	0,00	0,03

Tabla B3. Resultados FRX de la Mezcla #2, valores en %m/m.

TIPO Muestra	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	Na₂O	K₂O	Cl
Mezcla # 2 promedio	25,51	9,71	5,40	47,67	0,82	3,70	0,16	0,60	0,04
Mezcla # 2*	25,48	9,73	5,41	47,73	0,83	3,72	0,16	0,61	0,04
Mezcla # 2*	25,56	9,70	5,40	47,64	0,81	3,68	0,16	0,60	0,04
Mezcla # 2*	25,50	9,71	5,40	47,65	0,81	3,71	0,16	0,60	0,04

Anexo 3. Caracterización física blanco y mezclas.

Tabla C1. Valores de resistencia mínimos a la compresión.

Resistencia (MPa)	Blanco	Mezcla #1	Mezcla #2	NTC 121:2014*
1 día	21,29	9,42	10,89	N.A
3 día	29,82	22,86	20,31	8,0
7 día	38,75	26,98	30,21	15,0
28 día	45,71	35,61	36,98	24,0

*Valores de resistencia mínimos.

Tabla C2. Triplicado medición y ANOVA Peso específico.

Repetición	Blanco %	Mezcla#1 %	Mezcla #2 %	Promedio tratamientos
1	3,15	2,79	2,83	
2	3,15	2,79	2,83	
3	3,15	2,79	2,83	
Promedio	3,15	2,79	2,83	2,92
	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	0,23	8	0,0292	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	0,23	2	0,1168	1,18449x10 ³⁰
Suma de cuadrados residuales (SCR)	5,92x10 ⁻³¹	6	9,86076x10 ⁻³²	

Tabla F_{2,6}(5%) = 5,14 <<<<< 1,18x10³⁰ Si está influenciado

Tabla C3. % Cal libre y ANOVA.

	Blanco (%)	Mezcla#1 (%)	Mezcla#2 (%)	Promedio tratamientos	
1	0,60	0,74	1,46		
2	0,59	0,75	1,44		
3	0,61	0,76	1,47		
Promedio	0,60	0,75	1,46		0,94
	%Cal libre	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio	
Suma de cuadrados totales (SCT)	1,26	8	0,16		
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	1,26	2	0,63	4346,85	
Suma de cuadrados residuales (SCR)	$8,67 \times 10^{-04}$	6	$1,44 \times 10^{-04}$		

Tabla $F_{2,6}(5\%) = 5,14 \llllll 4346,85$ Si está influenciado

Tabla C4. Porcentaje de muestra retenida tamiz #325.

	Blanco %	Mezcla#1 %	Mezcla #2 %	Promedio tratamientos	
1	2,3	2,46	2,36		
2	2,4	2,44	2,38		
3	2,3	2,42	2,32		
Promedio	2,33	2,44	2,35		2,38
	% Pasan	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio	
Suma de cuadrados totales (SCT)	0,03	8	$3,58 \times 10^{-03}$		
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	0,02	2	$9,64 \times 10^{-03}$	6,20	
Suma de cuadrados residuales (SCR)	0,01	6	$1,56 \times 10^{-03}$		

Tabla $F_{2,6}(5\%) = 5,14 < 6,20$ La influencia no están significativa.

Tabla C5. Porcentaje de muestra que pasa a través del tamiz #325.

	Blanco %	Mezcla#1 %	Mezcla #2 %	Promedio tratamientos
1	97,7	97,54	97,64	
2	97,6	97,56	97,62	
3	97,7	97,58	97,68	
Promedio	97,67	97,56	97,65	97,62

	% retenidos	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	0,03	8	$3,58 \times 10^{-03}$	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	0,02	2	$9,64 \times 10^{-03}$	6,20
Suma de cuadrados residuales (SCR)	0,01	6	$1,56 \times 10^{-03}$	

Tabla $F_{2,6}(5\%) = 5,14 < 6,20$ La influencia no están significativa.

Tabla C6. Triplicado y ANOVA Perdida por fuego (%).

	Blanco %	Mezcla#1 %	Mezcla #2 %	Promedio tratamientos
1	2,07	3,02	3,08	
2	2,06	2,96	3,07	
3	2,02	3	3,05	
Promedio	2,05	2,99	3,07	2,70
	% Perdida por fuego	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	1,93	8	2,42E-01	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	1,93	2	9,64E-01	1549,98
Suma de cuadrados residuales (SCR)	3,73E-03	6	6,22E-04	
Tabla F _{2,6} (5%)=	5,14	<<<<<<	1549,98	Si está influenciado

Tabla C7. Triplicado y ANOVA Finura Blaine (cm/g)

	Blanco	Mezcla#1	Mezcla #2	Promedio tratamientos
1	3240	4080	4604	
2	3190	4081	4606	
3	3200	4080	4602	
Promedio	3210,00	4080,33	4604,00	3964,78
	Finura	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	2976351,56	8	372043,94	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	2974942,89	2	1487471,44	6335,66
Suma de cuadrados residuales (SCR)	1408,67	6	234,78	
Tabla F _{2,6} (5%)=	5,14	<<<<<<	6335,66	Si está influenciado

Tabla C8. Triplicado y ANOVA del Fraguado Inicial (minutos)

	Blanco	Mezcla #1	Mezcla #2	Promedio tratamientos
1	91,00	386,00	302,00	
2	90,00	384,00	303,00	
3	90,00	382,00	303,00	
Promedio	90,33	384,00	302,67	259,00
	FRAGUADO INICIAL	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	137950,00	8	17243,75	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	137940,67	2	68970,33	44338,07
Suma de cuadrados residuales (SCR)	9,33	6	1,56	
Tabla F _{2,6} (5%)=	5,14	<<<<<	44338,07	Si está influenciado

Tabla C9. Triplicado y ANOVA fraguado final (minutos).

	Blanco	Mezcla #1	Mezcla #2	Promedio tratamientos
1	123,00	467,00	392,00	
2	121,00	472,00	391,00	
3	117,00	470,00	390,00	
Promedio	120,33	469,67	391,00	327,00
	FRAGUADO INICIAL	Grados de libertad	Cuadrados medios	F-ratio
Suma de cuadrados totales (SCT)	201516,00	8	11,69	
Suma de los cuadrados de los tratamientos (SCF)	201482,67	2	100741,33	18133,44
Suma de cuadrados residuales (SCR)	33,33	6	5,56	
Tabla F _{2,6} (5%)=	5,14	<<<<<	18133,44	Si está influenciado

