

ANÁLISIS DE LOS INQUEMADOS PRESENTES EN LAS CENIZAS VOLANTES COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO

María Margarita Velandia Jaramillo^a, María Juliana Aponte Peña^b,
Sandra Consuelo Diaz Bello^c

^a Facultad de ingeniería Civil. Semillero de Investigación: Nuevos materiales de construcción. USTA.
maria.velandia@usantoto.edu.co

^b Facultad de ingeniería Civil. Semillero de Investigación: Nuevos materiales de construcción. USTA.
maria.aponte@usantoto.edu.co

^c Directora trabajo de investigación. Docente Líder. Semillero de Investigación: Nuevos materiales de construcción. USTA.
sandra.diazb@usantoto.edu.co

Resumen— Los inquemados son producto de la combustión incompleta del carbón. Normalmente tienen un tamaño de partícula mayor que el material mineral, lo cual permite realizar su separación en altos porcentajes para ser implementado en la industria de la construcción. Su formación se puede atribuir al mal funcionamiento del proceso de combustión de las plantas termoeléctricas, afectan las propiedades mecánicas del concreto, principalmente la resistencia a la compresión, cuando son utilizados como agregados del concreto por medio de las cenizas volantes. Este artículo tiene como objetivo principal evaluar el uso de los inquemados de las cenizas volantes e identificar los diferentes métodos de separación para su implementación en la elaboración de concretos. Se desarrollo la revisión bibliográfica, construcción del marco teórico, clasificación de los métodos y el análisis de implementación en Colombia. Como resultado final se determina el método de separación de los inquemados presentes en las cenizas volantes, el proceso de tamizado, el cual permite separar de manera correcta el material inquemado por medio de la malla más apropiada, para obtener el mayor porcentaje de remoción del material. La utilización y aprovechamiento de las cenizas volantes en la creación de nuevos materiales para la construcción contribuyen a tener un medio ambiente más sano disminuyendo la contaminación ambiental, de igual manera se genera un doble beneficio al realizar su separación, ya que se permite la reutilización de los inquemados como combustible.

Palabras clave— Ceniza volante, concreto, inquemados, método de separación, tamizado.

Abstract— The unburned coal are the product of the incomplete combustion of coal. Normally it has a greater particle size than the mineral material, which allows its separation in high percentages to be implemented in the construction industry. Its formation can be attributed to malfunction of the combustion process of the thermoelectric plants, they affect the mechanical properties of concrete, mainly the resistance to compression, when they are used as concrete aggregates by means of the fly ash. This article aims to evaluate the use of unburned coal present in the fly ashes and identify the different separation methods for their implementation in the preparation of concretes. The bibliographic review, construction of the theoretical framework, method classification and implementation analysis in Colombia were carried out. As a final result, the method of separating the unburnt present in the fly ash is determined, which allows the unburned material to be correctly separated by means of the most appropriate mesh, to

obtain the highest percentage of removal of the material. The use and uses of fly ashes in the creation of new materials for construction contribute to a healthier environment by reducing environmental pollution, in the same way, a double benefit is generated when separating it, since it allows the reuse of the unburned coal as fuel.

Keywords— Flash ash, concrete, unburned carbon, separation method, Sifted.

I. INTRODUCCIÓN

A medida que pasa el tiempo la producción de nuevos materiales contribuyen al aumento de la huella de carbono, elevando los niveles de dióxido de carbono (CO₂) presentes en la atmósfera. Según (Milán, 2002) la combustión del carbón es una de las principales causas del calentamiento global, en promedio una planta típica de carbón produce 3.700.000 toneladas de dióxido de carbono (CO₂); los residuos generados por la combustión del carbón producen alrededor de 125.000 toneladas de cenizas. Estos desechos son depositados en espacios disponibles para su acumulación. En la mayoría de los casos, esta disposición ha generado enfermedades respiratorias, pues están ubicadas en áreas aledañas de la población donde se encuentra la Termoeléctrica. Además de esto afecta la vegetación y suele convertir suelos fértiles en infértiles. (Mugica et al., 2003).

El concreto es un material de gran uso en la construcción de obras civiles siendo uno de los materiales más utilizados a nivel mundial, con gran impacto ambiental. Está compuesto de cemento, agregados pétreos (grava y arena), agua y en ocasiones aditivos. Los residuos provenientes de las termoeléctricas, se convirtieron en el principal material de estudio como sustituto parcial del cemento, las cenizas volantes con presencia de inquemados, dependen principalmente del tipo de carbón que las origina (Antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos y lignitos) y de las variables implicadas en el proceso de combustión como la temperatura, tiempo de resistencia del carbón, forma de la caldera y la configuración del fuego. Las cenizas volantes están compuestas principalmente por sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), y óxidos de hierro (Fe₂O₃), y en menor proporción presentan óxido de magnesio (MgO) y de calcio (CaO), sulfatos (SO₃) y álcalis (Na₂O y K₂O)48 e inquemados. (Silva Rojas, 2017).

Esta investigación, busca presentar una alternativa para disminuir los niveles de contaminación que genera el sector de la construcción y a su vez el sector eléctrico por medio de la implementación de cenizas volantes como sustituto parcial del cemento, evaluando la cantidad de inquemados presentes en las mismas, con el fin remover el porcentaje más alto posible para

evitar que su adición genere bajas resistencias, cambios en la estabilidad del concreto y afecte la relación agua cemento, limitando su utilización en diversos procesos industriales. En Colombia entre los materiales más utilizados como cementantes suplementarios se encuentra la ceniza volante como residuo industrial sólido, piedras pómez y tobas.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

Sostenibilidad Ambiental de la implementación

Los materiales generados por la quema del carbón con características puzolanas se definen como un material silíceo o sílico-aluminoso, el cual por sí mismo no posee un valor cementante o es muy bajo, al ser finamente dividido y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. (NTC 385).

Las adiciones más usadas son las escorias de altos hornos, las puzolanas naturales, el humo de sílice, el relleno de caliza y las cenizas volantes; las cenizas volantes poseen diferencias en su composición química, física, mineralógica y granulométrica por ello es de vital importancia realiza su caracterización para verificar las propiedades mecánicas como sustituto de agregado fino en la producción de cemento portland evaluando así su viabilidad. (Bautista Ruiz et al., 2017).

Según la CREG (Comisión reguladora de energía y gas), Colombia en el 2006 tuvo un alcance de 13.280 GWh (Gigawatts hora), el 33% de esta energía es térmica aproximadamente 4.382 GWh distribuida en 15 termoeléctricas en Colombia, gracias a la reserva de carbón con que cuenta el país; Termopaipa para el año 2016, reporto un total de 1.875.497 MWh (Megavatio hora), producido por sus IV unidades, con un aporte de 1.378.05,99 toneladas anuales de CO₂ y un desecho 1.000.678 toneladas. (Gestión energética s.a. e.s.p - gensa, 2016).

La utilización y aprovechamiento de las cenizas volantes en la creación de nuevos materiales no convencionales para concreto contribuye a tener un medio ambiente más sano, disminuyendo la contaminación ambiental y evitando que las cenizas volantes se desplacen a las grandes ciudades y a los cultivos cercanos produciendo enfermedades y suelos infértiles. Según el (DANE, 2020) en Julio de 2020, la producción de cemento gris en el país fue de 1.131,3 miles de toneladas.

Efecto de los inquemados en las cenizas volantes

El uso de aditivos produce en mayor o menor grado alteraciones sobre las propiedades del concreto modificando su fraguado o el endurecimiento (NTC385). Estos efectos pueden tener menor importancia en la práctica y no ser nocivos, pero en general requieren atención y en varios casos se hacen críticos; por lo tanto, es necesario estudiarlos. Según (Matos et al., 2019) los hormigones autocompactantes con alto volumen de cenizas volantes, preparados con un 40-60% de reemplazo de cemento Portland por cenizas volantes, con diferentes finuras presentan una reducción en la viscosidad y el contenido de plastificantes mejoró su capacidad de paso. Los hormigones autocompactantes con alto volumen de cenizas volantes presentaron un aumento significativo hasta los 180 días en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. La evaluación del ciclo de vida, permite valorar los índices de

intensidad de CO₂ producidas por el concreto, los cuales se encuentran entre un 46-30% menos que la referencia utilizada. (Matos et al., 2019).

Debido a las cantidades de concreto producidas en todo el mundo, una pequeña reducción en la emisión de CO₂, puede generar importantes beneficios al medio ambiente. Corresponde a todas las naciones reducir las emisiones totales de CO₂ y contribuir al logro de los objetivos establecidos inicialmente en la Conferencia de Kioto (ONU, 1998) y reafirmados en la más reciente Conferencia de la ONU sobre el Cambio Climático en 2015 en París.

También hay una activación directa de cenizas volantes para producir materiales de construcción que requieren resistencias más bajas, por ejemplo, morteros de mampostería, lechadas, rellenos, ladrillos que no sean de arcilla o paredes de corte de zanjas de lodo para fines de contención. (Suryanto et al., 2017). En el caso de implementar cenizas volantes con un porcentaje de inquemados superior al 10% se puede establecer que reducen considerablemente diferentes propiedades mecánicas, como la obtención de menor resistencia para el concreto, de igual manera disminuyen la absorción superficial en edades tardías; la reducción de este porcentaje contribuye de manera positiva en las propiedades de absorción capilar y permeabilidad de cloruros. Dentro de dichos métodos se pueden emplear los procesos de flotación para mejorar la calidad del agregado. (Suryanto et al., 2017).

III. IMPLEMENTACIÓN EN COLOMBIA

Según (Arbeláez R, 2019) el concreto se basa en dos fases, el agregado (principal función relleno) y la pasta (material cementante, agua, aditivos, y el aire incluido). El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento de los materiales cementantes del concreto y materiales de posible sustitución lo cual puede influir positiva o negativamente en cuanto a las reacciones mecánicas, lo que se busca es poseer ventajas técnicas, económicas y ambientales provenientes de residuos de otros procesos industriales. (Arbeláez R, 2019).

El cemento Portland es un material pulverizado, cuenta con un tamaño de partícula predominante de 30 micras de diámetro. Las adiciones hidráulicas deben alcanzar su potencial cementante por medio de la finura de activación para obtener una similitud a la del cemento. La composición química del cemento proviene de la presencia de ciertos elementos principalmente calcio (Ca), silicio (Si), aluminio (Al) y hierro (Fe), además de otros elementos en menor proporción (S, Mg, Na, K), los cuales inciden de manera favorable o desfavorable en las reacciones químicas asociadas a la hidratación, fraguado y resistencia mecánica.

Dentro de los materiales más utilizados como cementantes suplementarios se encuentra la ceniza volante, la escoria siderúrgica, y el humo de sílice, estos materiales deben tener una alta proporción de especies minerales amorfas las cuales le permiten construir una estructura cristalina estable. Su aplicación es utilizada en la producción de concreto premezclado. Dentro de los procesos utilizados para la implementación de los materiales se encuentran molienda, separación y activación alcalina entre otros.

La NTC 3493 Y ASTM C618, hacen parte de la normativa de la aplicación de cenizas volantes provenientes de la quema del

carbón. Siendo las cenizas volantes compuestos formados principalmente de minerales calcáreos (únicamente clase C), silico-aluminosos y ferrosos; al tener un contenido bajo de carbón “inquemado” se puede implementar en el tiempo de su producción, mientras que si presentan un alto contenido de carbón “inquemado” es recomendable emplear el método de separación triboelectrostática ya que permite mejorar las propiedades de la ceniza al concentrar la fracción de mineral en estado amorfo sino que a su vez recupera la mayor parte de carbón “inquemado” y permite utilizarlo de nuevo en el proceso de combustión de la central termoeléctrica eliminando el 100% de los residuos; para determinar el contenido de carbón “inquemado” se recomienda realizar un ensayo de pérdida por ignición según la norma NTC 184 y ASTM C114.

Los tratamientos de optimización para los diferentes materiales cementantes suplementarios buscan un comportamiento uniforme a lo largo del tiempo para mantener la estabilidad de los diseños de cada muestra cómo se indica a continuación:

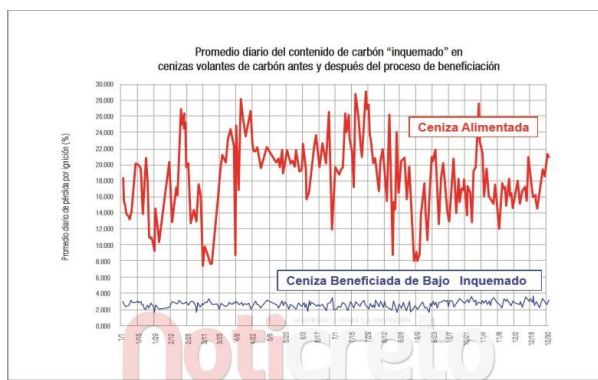


Figura 1. Gráfico de control de la calidad de cenizas volantes en la ciudad de Jacksonville, Florida (USA) antes y después beneficiada, por Arbeláez R, 2019, Materiales Cementantes Suplementarios: imprescindibles en la industria del concreto. *Noticreto* 150, pág. 53.

Según (Arbeláez R, 2019) los principales beneficios del uso de materiales cementantes suplementarios en el concreto, se encuentran relacionados directamente con, su desempeño, costo económico, y contribución ambiental. Entre las más importantes se encuentran:

- A. Desinfección: se relaciona con la reducción de la permeabilidad y aumenta la durabilidad ante la degradación inducida por cloruros.
- B. Propiedades reológicas (deformación y flujo del material): mejoran la trabajabilidad del concreto y disminuye la tendencia a la segregación; lo cual permite trabajar en la reducción de contenido de agua o dosis de aditivos plastificantes.
- C. Mayor resistencia a largo plazo.
- D. Menos calor de hidratación: la sustitución parcial del cemento, para una mezcla de concreto, genera la disminución del calor de hidratación; cuando el porcentaje de adición es mayor, disminuye el incremento de la temperatura.
- E. A nivel general, al sustituir un porcentaje del cemento, se adiciona una materia prima de menor costo.
- F. Ecología industrial: se aplica el concepto, según el cual, se cambian los ciclos abiertos con disposición de residuos, a ciclos cerrados que promueven el total aprovechamiento del mismo.
- G. Reducción de emisiones a la atmósfera, cabe resaltar que la producción de clínker es una de las fuentes que aporta más

emisiones de CO₂ en el mundo. (Arbeláez R, 2019).

IV.METODO DE SEPARACION

Los inquemados son el producto de la quema o combustión incompleta del carbón, su producción depende del tipo de carbón (antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos y lignitos), finura y temperatura de la caldera. (Silva Rojas, 2017). La presencia de un mayor porcentaje de carbón inquemado indica la baja eficiencia de la combustión del horno y esto afecta directamente el estado financiero de los operadores de centrales eléctricas y provoca daños significantes en el tubo de la caldera por formación de escoria la cual reduce la transferencia de calor. Como solución a este problema se busca alcanzar un bajo porcentaje de carbón inquemado, pues a mayor porcentaje de carbón inquemado en cenizas volantes mayor impacto ambiental, como la contaminación de las aguas subterráneas, aire, problemas respiratorios relacionados e incremento de la huella de carbono. Las cenizas volantes con un bajo nivel de carbón inquemado se consideran cenizas volantes de alta calidad ya que mejoran la resistencia del concreto, también reduce el calor de hidratación, el nivel recomendado de carbón inquemado en cenizas volantes está estimado alrededor del 2-5%. (Pogganeswaran et al., 2018).

Dentro de los métodos de separación de inquemados están presentes el uso de sensor de luz infrarroja el cual permite medir la intensidad de carbón en las cenizas volantes, dinámica de fluidos computacional (CFD), diseño de experimentos (DOE), espectroscopia de impedancia electroquímica, pérdida por ignición o análisis termogravimétrico, y el método de ensayo para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos.

El **DOE** (diseño de experimentos) es un método de análisis computacional estadístico que tiene como fin determinar la mejor combinación de parámetros (temperatura, velocidad de flujo, presión, concentración, etc.) en un rango determinado para la optimización de diversos procesos. Este método se puede usar en la operación de las plantas termoeléctricas para lograr un menor porcentaje de inquemados de carbón presentes en las cenizas volantes, el cual es expresado en partes por millón (ppm). Para la ejecución del DOE, se llevó a cabo la combinación de tres conjuntos de parámetros, ángulo de inclinación de quemador (°), flujo de carbón del alimentador (t/h), flujo de aire total (kNm³/h), ejecutando 30 posibles combinaciones de los parámetros, para predecir la mejor combinación. El valor producido por el DOE tuvo una diferencia porcentual entre teórico y real del 28%. Las diferencias fueron significativamente altas, evidenciando que se deben realizar un estudio más detallado agregando otros parámetros para obtener un mejor resultado de optimización. Por lo tanto, se puede desarrollar este modelo con el fin de predecir el parámetro con un menor porcentaje de carbón inquemado en las cenizas volantes y lograr una mayor sostenibilidad. (Pogganeswaran et al., 2018).

La **espectroscopia de impedancia electroquímica** se utiliza para obtener las propiedades eléctricas de las cenizas volantes en el rango de frecuencia de 100 Hz a 10 MHz. Se realiza para caracterizar y evaluar el contenido de carbón inquemado y la

reactividad puzolánica, el método no es destructivo ni invasivo, no es necesario limitar las muestras a pastas de cemento, ya que también se pueden estudiar en morteros y concretos. La cantidad y calidad del agregado son parámetros decisivos en el desempeño del concreto, los dos factores más importantes que determinan la idoneidad de las cenizas volantes son su finura (residuo de 45 μm), para garantizar la reactividad, y su contenido de carbón libre que se cuantifica por la pérdida por ignición (LOI). En el caso de las cenizas volantes bajas en cal producidas a partir de carbones antracíticos y bituminosos, la naturaleza celular de las partículas de carbón da como resultado una superficie específica alta que puede absorber cantidades significativas de aditivos químicos. Además, cuanto mayor es el contenido de carbón de las cenizas, mayor es la demanda de agua para mantener la trabajabilidad. (Suryanto et al., 2017). La respuesta eléctrica de un material poroso saturado se puede cuantificar en términos de su resistencia (o su reciprocidad, conductancia) y capacitancia. La capacitancia es una medida cuantitativa de la polarización de cargas dentro de un material; la conductancia explica cualquier transferencia directa de carga a través del material. Los mecanismos subyacentes responsables del comportamiento están directamente relacionados con las propiedades físicas y químicas del material, se descubrió que la finura de la ceniza desempeñaba un papel importante a este proceso. Se identificaron una serie de características sobresalientes a partir de la conductividad frente a la respuesta en el tiempo que podrían explorarse en la evaluación de la eficacia de diferentes activadores. (Suryanto et al., 2017).

Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos

Se usa principalmente para determinar la gradación de los materiales propuestos para usarse como agregados. Los resultados se usan para determinar la correlación entre la distribución de los tamaños de las partículas y los requisitos específicos de aplicación, y para suministrar los datos necesarios para el control de la producción de varios materiales y mezclas que contienen agregados. Los datos también pueden ser útiles en la determinación de las relaciones de porosidad y entrapamiento. (NTC 77).

Para la realización del tamizado se debe recolectar una muestra de 200 kg, cuartearla lo suficiente hasta obtener un incremento representativo de 300 gr aproximadamente, a continuación, se realiza el análisis granulométrico por medio de las mallas de la serie de Tyler, el tamaño de la abertura debe ser adecuado según el diámetro de la partícula analizada para observar la cantidad de inquemados retenidos en cada malla. Para el análisis de la muestra se recomienda incluir los porcentajes de: Humedad, ceniza, material volátil, carbón fijo, inquemados.

A continuación, se muestra un ejemplo de granulometría realizado a una muestra de ceniza volante proveniente de la Ladrillera San Cristóbal (E1). (Velásquez Vallejo et al., 2007).

Tabla 1

Granulometría y análisis próximos cortos para muestra E1

Malla N°	D ₀ , [mm]	R, [%]	A, [%]	H, [%]	Z, [%]	V, [%]	C, [%]	I, [%]
30	0,589	25,6	25,6	6,6	14,4	14,5	64,5	79
40	0,417	12,6	38,2	6,1	18	18	44,5	62,5
70	0,212	31,8	70	8,1	14,3	14,3	30,8	45,1
100	0,147	11,2	81,2	5,8	11,4	11,4	21,5	32,9
140	0,104	8,9	90,1	3,8	10	10	17,3	27,3
Colec.		9,9	100	2,8	9,1	9,1	11,1	20,2

Donde: Da: abertura; Z: cenizas; R: retenido; V: material volátil; A: acumulado, C: carbono fijo; H: humedad; I: inquemados.

Tomada de: “Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón” Velásquez vallejo, et al, 2007, Energética, N° 38, Pag 110.

Las características químicas y físicas de las cenizas volantes implementadas se determinan según lo establecido en la norma ASTM C618 o su equivalente NTC 3493. Por medio de ello podemos tener una aproximación acerca de los inquemados estos se encuentran establecidos en un rango de 8% al 10%, en caso de presentar un nivel superior se debe contar con los ensayos de laboratorio pertinentes. (Velásquez Vallejo et al., 2007).

Dentro del análisis se realiza la molienda de las cenizas volantes por medio de un molino de bolas durante 30 min a 45 min, lo cual produce la reducción del tamaño de la partícula. Su tamaño óptimo se determina por medio de la resistencia a la compresión según el porcentaje de ceniza volante adicionado. En la siguiente tabla se representa la distribución del tamaño de la partícula de las cenizas volantes seleccionada para la elaboración de concretos, la cual es determinada por medio de granulometría láser. (Valderrama et al., 2011).

Tabla 2

Resistencia a la compresión de morteros con CV molida a 7 días de curado

Tamaño promedio de partícula	Resistencia a la compresión (Mpa)
32,498 μm (CV sin moler)	7,92
23,205 μm (30 min de molienda)	15,58
19,803 μm (45 min de molienda)	17,18

Tomada de: “Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados”. Valderrama, et al, 2011, ingeniería e investigación, vol.31, N°1, Pag 42.

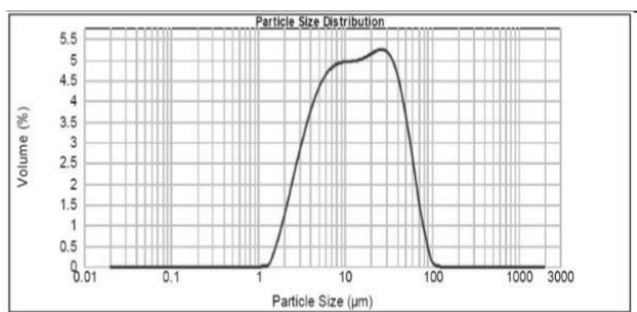


Figura 2. Distribución del tamaño de partícula de la ceniza volante molida. Por: Valderrama, et al, Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados. 2011, ingeniería e investigación, vol.31, N°1, Pag 42

V. RESULTADOS

Evaluar el uso de los inquemados de las cenizas volantes y su implementación en la elaboración de concretos como sustituto parcial del cemento permite conocer la importancia de remover el mayor porcentaje de inquemados presente en las cenizas volantes para evitar la reducción en sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión. Asimismo, los porcentajes más utilizados en el diseño de la mezcla se encuentran entre el 10% y 45%. Por medio de la investigación encontramos que la temperatura juega un papel muy importante en la reacción exotérmica la cual permite obtener valores mayores en la resistencia a la compresión, cabe resaltar que su resultado está relacionado directamente al uso del concreto y sus condiciones ambientales e instalación. Dentro de los resultados obtenidos se encuentra el aumento en la tenacidad, la resistencia a la tracción y en el módulo de elasticidad cuando se implementa el uso de las cenizas volantes en la mezcla de concreto.

Como aporte principal de la investigación realizada en el semillero de investigación NMC (nuevos materiales de concreto) y de forma paralela a lo largo del curso seminario de grado III y previamente en los seminarios I y II, se obtuvo el permiso para la solicitud de la muestra por medio de la decana de la facultad de ingeniería civil, la cual fue reclamada el 5 de junio del 2020. Finalmente se trabaja en la caracterización de la muestra y su análisis granulométrico para realizar la separación de inquemados por medio de tamizado como método de separación principal, lo cual se llevará a cabo en la apertura de los laboratorios de la Universidad Santo Tomas. De igual manera se diseñará el tipo de mezcla a ser utilizada en la elaboración de cilindros de concreto para evaluar el comportamiento de las cenizas volantes, se tiene previsto incluir tres porcentajes diferentes en la mezcla definidos en el 6%, 8% y 10%. A si mismo se busca definir el tamaño del agregado y estudiar la finura del cemento a implementar para obtener un análisis más completo de la mezcla en estudio. Es importante recordar que las partículas más grandes de ceniza volante pueden llegar a ocupar los vacíos entre los agregados más finos y tener como resultado una composición más densa del concreto evitando la formación de micro fisuras.

Lo anteriormente mencionado impacta directamente en el fortalecimiento de la línea de investigación de la universidad y promueve el estudio, análisis e implementación de residuos sólidos de la industria en nuevos materiales de construcción los

cuales contribuyen a la reducción de emisiones de dióxido de carbono.

VI. RESULTADOS

En el desarrollo de la investigación se pudo verificar que uno de los factores que modifican el comportamiento mecánico de los concretos con adición de ceniza volante son los inquemados puesto que no reaccionan químicamente con los compuestos cementantes, lo que desfavorece su uso en el sector de la construcción. Su aplicación en Colombia se ve reflejado en la producción de concreto premezclado. Es de vital importancia caracterizar la muestra de ceniza volante química, física y mineralógicamente para evaluar la reacción de los diferentes componentes y establecer la presencia o ausencia de inquemados. La cantidad y calidad del agregado son parámetros decisivos en el desempeño del concreto, las cenizas volantes implementadas se deben determinar según lo establecido en la NTC 3493.

Los métodos utilizados para la separación de inquemados son la espectroscopia de impedancia electroquímica la cual permite obtener las propiedades eléctricas de las cenizas volantes y clasificarlas según su rango de frecuencia. Otro método a utilizar es el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, el cual se usa para determinar la correlación entre la distribución de los tamaños de las partículas. Por otra parte, se estudio el diseño de experimentos DOE que es un método de análisis computacional estadístico y la dinámica de fluidos computacional (CFD), estos métodos se enfocan en las variables de funcionamiento de las plantas termoeléctricas.

VII. RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar investigaciones sobre la ceniza volante con el fin de evaluar el comportamiento en otros materiales de la construcción utilizados en Boyacá para establecer su comportamiento e implementar diferentes soluciones que contribuyan a la disminución de la huella de carbono del sector tanto industrial como de la construcción en este departamento. Para el diseño de la mezcla se recomienda utilizar porcentajes de adición menores o iguales al 10% de cenizas volantes con el objetivo de no afectar la resistencia del concreto.

VIII. REFERENCIAS

- Arbeláez R, G. E. (Ecore G. (2019). Materiales Cementantes Suplementarios : imprescindibles en la industria del concreto. *Noticreto* 150, 48–54.
- 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), 135–146. Disponible en : https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_duit_ama/article/view/7374
- DANE. (2020). *Estadísticas de cemento gris (ECG)*. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris>
- GESTIÓN ENERGÉTICA S.A. E.S.P - GENSA. (2016).

Informe de sostenibilidad Gensa. 261. Disponible en:
http://www.gensa.com.co/wp-content/uploads/2017/12/Informe_Sostenibilidad_2016-GENSA.pdf

- NTC 77 .Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos., 15 (2018). Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/pdfview/viewer.aspx?locale=es-ES&Q=973B6094162AE4AEF42D404D180BD0B9312408EA304CDFA9&Req=>
- NTC 385. Terminología relativa al concreto y sus agregados., 18 (2019). Disponible en: <https://ecollection-icontec-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/pdfview/viewer.aspx?locale=es-ES&Q=610B7C38069B3638961596EA084A517396DF3D9C2A164539&Req=>
- Matos, P. R., Foiato, M., & Prudencio Jr, L. R. (2019). Propiedades mecánicas ecológicas, en estado fresco y a largo plazo del hormigón autocompactante de alto rendimiento de cenizas volantes de gran volumen. *Materiales de Construcción y Construcción*, 203(0950–0618), 282–293. Disponible en : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819300741>
- MILÁN, P. M. (2002). IMPACTO AMBIENTAL DE UNA TERMOELÉCTRICA. *Pulso, Diario de San Luis*. Disponible en : <http://ambiental.ualp.mx/docs/PMM-AP020711.pdf>
- Mugica, V., Amador, M. A., Torres, M., & FIGUEROA, J. de J. (2003). Mercurio y metales tóxicos en cenizas provenientes de procesos de combustión e incineración. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 93–100. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/26475222_Mercurio_y_metales_toxicos_en_cenizas_provenientes_de_procesos_de_combustion_e_incineracion
- ONU, organización de naciones unidas. (1998). *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. 25. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Pogganeswaran, G., Firas Basim, I., & Taneshwaren, S. (2018). Optimización de parámetros operativos mediante el método DOE para reducir el carbono no quemado de las cenizas volantes para centrales eléctricas de carbón subcrítico de combustión tangencial. 225(05008), 1–6. Disponible en: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2018/84/mateconf_ses2018_05008/mateconf_ses2018_05008.html
- Silva Rojas, I. M. (2017). Estudio petrográfico para explicar la reducción de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por ceniza volante de Termotasajero. *Universidad Santo Tomás*. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/9326>
- Suryanto, B., McCarter, W. J., Starrs, G., & Chrisp, T. . (2017). Caracterización de cenizas volantes mediante espectroscopia de impedancia electroquímica. *Procedia*

- Engineering*, 171, 705–714. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817304241?via%3Dihub>
- Valderrama, C. P., Torres Agredo, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2011). Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 39–46. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v31n1/v31n1a04.pdf>
- Velásquez Vallejo, L. F., De la Cruz Morales, J. F., Sánchez Morales, J. F., & Marín Laverde, M. A. (2007). Remoción De Carbón Inquemado De Las Cenizas Volantes Producidas En El Proceso De Combustión De Carbón. *Revista Energética*, 38(0120–9833), 107–112. Disponible en : <https://revistas.unal.edu.co/index.php/energetica/article/view/9508/10105>

Saufels