

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE BLOQUES
DE ARCILLA MACIZOS CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE

CAMILA ANDREA CASTILLO FONSECA
JULIÁN CAMILO MORA SÁNCHEZ
KAROL MARCELA PARDO GUACANEME



UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2018

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE BLOQUES
DE ARCILLA MACIZOS CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE

CAMILA ANDREA CASTILLO FONSECA
JULIÁN CAMILO MORA SÁNCHEZ
KAROL MARCELA PARDO GUACANEME

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director
MIGUEL ANTONIO CARO
Ingeniero Civil

Asesor metodológico
LAURA MILENA CALA CRISTANCHO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2018

AGRADECIMIENTOS

Damos primero gracias a Dios por la oportunidad que nos brindó de llevar a cabalidad nuestros estudios durante el pregrado, en segunda instancia a nuestros padres por acompañarnos y apoyarnos durante este proceso, y por último, no sin ser menos importante, a nuestro tutor el ingeniero Miguel Antonio Caro por su sello de conocimiento y su guía durante la realización de esta investigación y a la licenciada Laura Milena Cala por su tiempo, guía y conocimiento puesto en la realización del presente proyecto de grado.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	12
2. ANTECEDENTES	14
3. JUSTIFICACIÓN	22
4. OBJETIVOS	23
4.1 OBJETIVO GENERAL	23
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
5. MARCO DE REFERENCIA	24
5.1 MARCO CONCEPTUAL	24
5.1.1 Bloque macizo	24
5.1.2 Características de los bloques macizos.....	24
5.1.3 Propiedades de los bloques macizos.....	24
5.1.4 Clasificación de los bloques.....	25
5.1.5 Materia prima del ladrillo arcilla	27
5.1.6 Composición química de la arcilla	27
5.1.7 Propiedades de la arcilla.....	27
5.1.8 Proceso de fabricación de bloques	28
5.1.9 Impactos ambientales de la industria ladrillera	29
5.1.10 Ceniza volante	29
5.1.11 Características de la ceniza volante	29
5.1.12 Composición química de la ceniza.....	30
5.2 MARCO TEÓRICO	30
5.3 MARCO LEGAL	32
5.3.1 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro I.N.V. E – 123 - 13...33	
5.3.2 Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 13.....33	
5.3.3 Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V.E – 126 - 13.....33	
5.3.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13	33
5.3.5 Difracción de rayos X (DRX).....	34
5.3.6 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017 2005	34
5.3.7 Ensayo de módulo de rotura NTC-4017 2005	34
5.3.8 Ensayo de absorción de agua NTC-4017 2005	34

5.3.9 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC-4017 2005	34
6. DISEÑO METODOLÓGICO	35
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	35
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	35
6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	35
6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	37
6.4.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos por el método del hidrómetro INV E – 123 – 13.....	37
6.4.1.1 Técnica.....	37
6.4.1.2 Instrumentos	37
6.4.2 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13.....	38
6.4.2.1 Técnicas.....	38
6.4.2.2 Instrumentos	38
6.4.3 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13	39
6.4.3.1 Técnicas.....	39
6.4.3.2 Instrumentos	39
6.4.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13	40
6.4.4.1 Técnicas.....	40
6.4.4.2 Instrumentos	40
6.4.5 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017 2005	41
6.4.5.1 Técnicas.....	41
6.4.5.2 Instrumentos	41
6.4.6 Ensayo de módulo de rotura NTC-4017 2005	41
6.4.6.1 Técnicas.....	41
6.4.6.2 Instrumentos	42
6.4.7 Ensayo de absorción de agua NTC-4017 2005	42
6.4.7.1 Instrumentos	42
6.4.8 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC-4017 2005	42
6.4.8.1 Técnicas.....	42
6.4.8.2 Instrumentos	43

6.5 FASES DE INVESTIGACIÓN	43
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS	45
7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ARCILLA	45
7.1.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos por el método del hidrómetro INV E – 123 – 13.....	45
7.1.2 Corrección de menisco	45
7.1.3 Corrección de defloculante o cero	45
7.1.4 Corrección de temperatura	46
7.1.5 Determinación de los Límites de Atterberg	51
7.1.6 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13.....	51
7.1.7 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13	52
7.1.8 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13	55
7.1.9 Ensayo de Difracción de rayos X (DRX)	57
7.2 ELABORACIÓN DE LOS BLOQUES MACIZOS CON ADICION DE CENIZA VOLANTE	58
7.2.1 Sinterización del material para realización de bloques de arcilla con adición de ceniza volante.....	58
7.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017	61
7.2.3 Módulo de rotura o resistencia a la flexión NTC 4017	62
7.2.4 Ensayo de absorción de agua NTC 4017	64
7.2.5 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC 4017	67
7.2.6 Comparación de costos bloques macizos con adición de ceniza volante y bloques macizos convencionales.....	69
.....	69
8. CONCLUSIONES	71
9. RECOMENDACIONES	72
BIBLIOGRAFÍA	73

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ensayos de caracterización de material	32
Tabla 2. Ensayos de prueba a los bloques macizos	33
Tabla 3. Definición y operacionalización de las variables.....	36
Tabla 4. Datos del ensayo de hidrometría para la arcilla.....	47
Tabla 5. Valores para correcciones de resultados para la arcilla	48
Tabla 6. Resultados ensayo hidrometría para arcilla	48
Tabla 7. Datos del ensayo de hidrometría para ceniza volante	49
Tabla 8. Valores para correcciones de resultados para la ceniza volante	50
Tabla 9. Resultados ensayo hidrometría para ceniza volante.	50
Tabla 10. Resultados ensayo del límite líquido para arcilla.	52
Tabla 11. Resultados ensayo del límite líquido para ceniza volante.	52
Tabla 12. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para arcilla.	53
Tabla 13. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para ceniza volante.....	53
Tabla 14. Resultados de límites de Atterberg para arcilla.	55
Tabla 15. Resultados de límites de Atterberg para ceniza volante.....	55
Tabla 16. Resultados de valor de azul de metileno para la arcilla.	56
Tabla 17. Resultados de valor de azul de metileno para la ceniza volante.....	56
Tabla 18. Constitución de mineralogía de las muestras.....	57
Tabla 19. Resultados obtenidos de resistencia a la compresión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.....	61
Tabla 20. Resultados obtenidos de resistencia a la compresión para bloques convencionales.....	62
Tabla 21. Resultados obtenidos de módulo de rotura o resistencia a la flexión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.....	63
Tabla 22. Resultados obtenidos de módulo de rotura o resistencia a la flexión para bloques convencionales.....	63
Tabla 23. Datos del ensayo de absorción de agua para bloques con adición de ceniza volante.....	65
Tabla 24. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques con adición de ceniza volante.....	65
Tabla 25. Datos del ensayo de absorción de agua para bloques convencionales.....	66
Tabla 26. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques convencionales. ...	66
Tabla 27. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques con adición de ceniza volante.....	68
Tabla 28. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques convencionales.....	68
Tabla 29. Presupuesto para 1500 bloques de arcilla sin adición.....	69
Tabla 30. Presupuesto para 1500 bloques de arcilla con adición de ceniza volante en 25%.	69

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Perforaciones horizontales en bloques	25
Figura 2. Perforaciones verticales en bloques	26
Figura 3. Perforaciones permitidas en bloques macizos	26
Figura 4. Proceso de obtención de ceniza volante	29
Figura 5. Cazuela de Casagrande	38
Figura 6. Postura espécimen para módulo de rotura	42
Figura 7. Fases de Investigación	44
Figura 8. Ensayo de granulometría por hidrómetro	47
Figura 9. Curva granulométrica de la arcilla	49
Figura 10. Curva granulométrica de la ceniza volante	51
Figura 11. Curva límites de Atterberg para la arcilla.	54
Figura 12. Curva límites de Atterberg para la ceniza volante.	54
Figura 13. Dosificación de arcilla ceniza volante.	58
Figura 14. Aglomeración del material con agua.	59
Figura 15. Mezcla del material aglomerado.	59
Figura 16. Moldes para los bloques.	60
Figura 17. Bloques de arcilla macizos retirados del molde y expuestos a temperatura ambiente.....	60
Figura 18. Fórmula para obtención de absorción NTC4017.....	64

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE BLOQUES DE ARCILLA MACIZOS CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE

Resumen

El presente estudio, se basa en el comportamiento de bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante en diferentes dosificaciones, esto con el propósito de disminuir las emisiones que produce la industria ladrillera al medio ambiente, y que a su vez suelen ser grandes contaminantes del planeta junto con la industria termoeléctrica; pues el proceso de quema de carbón en central termoeléctrica genera grandes cantidades de energía el cual produce grandes cantidades de residuos, dentro de ellos se encuentra la ceniza volante, material que no tiene buena disposición final.

Con base en lo anterior, se hace necesaria la presente investigación con el fin de determinar la adición en porcentajes favorables de 15%, 20% y 25% de adición ceniza volante al proceso de fabricación de bloques de arcilla macizos, esto con el fin de causar una disminución en los impactos ambientales causados por la industria. De esta manera y teniendo en cuenta el procedimiento para la fabricación de bloques de arcilla macizos es pertinente determinar las propiedades de la arcilla y la ceniza volante, realizando ensayos de laboratorio como: Granulometría, Límites de Atteberhg, Azul de metileno y Difracción de rayos x, por otra parte es necesario realizar un análisis comparativo de los bloques macizos propuestos con los convencionales, determinando el comportamiento físico y mecánico de los bloques; para obtener resultados óptimos y dar cumplimiento a los parámetros mínimos exigidos por la normatividad vigente.

Palabras clave: Residuos, Bloques de arcilla, Ensayos de laboratorio.

Abstract

The present study is based on the behavior of solid clay blocks with addition of fly ash in different dosages, this with the purpose of reducing the emissions that the brick industry produces to the environment, and which in turn are usually large pollutants of the planet together with the thermoelectric industry; because the process of burning coal in a thermoelectric plant generates large amounts of energy but counterproductively large amounts of waste, among which is the fly ash and which does not have a good final disposal.

Based on the foregoing, the present investigation is necessary in order to determine the addition in favorable percentages of 15%, 20% and 25% of fly ash addition to the manufacturing process of solid clay blocks, this in order to cause a decrease in the environmental impacts caused by the industry. In this way and taking into account the procedure for the manufacture of solid clay blocks it is pertinent to determine the properties of the clay and fly ash, performing laboratory

tests such as: Granulometry, Limits of Atteberhg, Methylene Blue and Diffraction of x-rays , on the other hand it is necessary to perform a comparative analysis of the proposed solid blocks with the conventional ones, determining the physical and mechanical behavior of the blocks; to obtain optimal results and comply with the minimum parameters required by current regulations.

Keywords: Waste, Clay blocks, Laboratory tests.

INTRODUCCIÓN

El interés que se ha marcado en los últimos tiempos por el medio ambiente y el aprovechamiento de residuos provenientes de procesos de fabricación de materiales constructivos de múltiples compañías son el motivo que está generando un gran impacto en el proceso de utilización de residuos como optimización de materiales.

Es por esto que, la utilización de estos residuos produce un beneficio para las industrias y para el medio ambiente, pues se logra desarrollar materiales altamente sostenibles con la adición de residuos provenientes de la combustión de carbón industrial.

Así mismo es pertinente aclarar que la ceniza volante constituye la fracción mineral no pulverizada de los carbones, y representan el residuo de las centrales termoeléctricas; estas partículas son el residuo de la combustión de carbón las cuales son transportadas por una corriente de gases producto de la incineración del material y son separados por precipitadores mecánicos y electrostáticos.

Con base en lo anterior, la adición de ceniza volante en bloques de arcilla puede disminuir las propiedades de contracción y el coeficiente de saturación de la mezcla, así mismo el material puede requerir menor temperatura de cocción, lo que permitirá disminuir la energía en este proceso y lograr un ahorro en costos durante la fabricación de los bloques.

Como parte de la investigación se busca evaluar bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante, con el fin de determinar el comportamiento físico y mecánico en comparación con los bloques convencionales; y así mismo, determinar si incrementa o disminuye el factor de granulometría, límites de Atterberg, azul de metileno, difracción de rayos x, resistencia a la compresión, absorción de agua y tasa inicial de absorción; teniendo en cuenta la dosificación del material.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La industria de la construcción tiene un gran impacto en todos los aspectos socio económicos del país, teniendo en cuenta que la construcción está progresivamente cambiando las condiciones ambientales de la sociedad y afectando notablemente a los ecosistemas existentes en el territorio nacional; este impacto es causado por la generación de residuos y su mala disposición en el medio ambiente como por ejemplo, la fabricación de bloques de arcilla convencionales, proceso que genera emisión de residuos de combustión provenientes de los hornos en la etapa de cocción.

Adicionalmente, la cantidad de ceniza volante y residuos de la combustión de carbón son bastantes considerables en las centrales termoeléctricas, las cuales expulsan grandes cantidades de residuos durante el proceso de combustión para la producción de energía. De esta manera, la utilización de ceniza volante en la fabricación de bloques macizos de arcilla tiene particular interés, pues este material tiene una composición química similar a la de la arcilla y está constituida por óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio.

La ceniza volante se ha utilizado también como único material de relleno para proporcionar dureza al suelo, así como la mezcla con yeso o cemento el cual proporciona estabilización en la superficie subterránea de construcciones en ingeniería civil.

Es por esta razón, que se debe utilizar este tipo de material residual en procesos constructivos de bloques macizos, ya que la implementación del uso de ceniza volante mejora la reducción de impacto ambiental al ecosistema y logra la disminución en la explotación de materia prima como la arcilla.

Teniendo en cuenta que la implementación de este tipo de material aporta beneficios a los procesos constructivos, la ceniza volante logra mejorar notablemente las propiedades fisicomecánicas de los bloques macizos de arcilla, entre otras la cohesión del material, lo que caracteriza y mantiene unidas las partículas de este disminuyendo la densidad seca máxima de la materia prima. Este mejoramiento favorece la cohesión del material pues en él se encuentran valores mayores, y a su vez disminuye la resistencia a la contracción con la aplicación de esfuerzos necesitando menor tiempo de cocción el bloque.

En consecuencia, y teniendo en cuenta la actual búsqueda de materiales alternativos en el sector de la construcción, se plantea desarrollar bloques macizos de arcilla con adición de ceniza volante y llevar a cabo la presente investigación con el fin de evaluar tanto las propiedades físicas con Granulometría INV-E-123-13, Límites de Atterberg INV-E-125-13, Azul de metileno INV-E-235-13 y Difracción de rayos x y las propiedades mecánicas de los bloques realizados con

resistencia a la compresión, Modulo de rotura, absorción de agua y tasa inicial de absorción esto utilizando la norma NCT-4017.

Por lo tanto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el comportamiento en resistencia a la compresión y flexión que tienen los bloques macizos de arcilla con adición de ceniza volante respecto a los bloques de arcilla maciza sin adición?

2. ANTECEDENTES

El investigador Leonardo Rojas¹, realizó un estudio sobre la fabricación y evaluación del desempeño de quince ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113 (Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick) , la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas a nivel mundial, tiene un gran un gran impacto, donde el mayor productor de ceniza volante es China, le sigue Rusia y Estados Unidos, el cual se estima este entre los 88 y 55 millones de toneladas por año. El porcentaje de reciclaje esta entre el 22% en Estados Unidos y 50% en la Unión Europea.

En las convenciones de Río de Janeiro en 1992 y Kioto en 1997 se afirmó que: “la sustitución de una tonelada de cemento Portland por una tonelada de ceniza volante elimina una tonelada de CO₂ emitido durante la producción de cemento”.²

Las cenizas volantes inicialmente se emplean para producir cemento para construcción, como relleno en obras de infraestructura y en otros usos. “La Asociación Europea para el Subempleo de los Sub-productos de la Combustión del Carbón (ECOBA) se dedica a realizar el seguimiento de los usos y disposición de los residuos de las centrales térmicas propiamente de las cenizas volantes y de fondo emitiendo anualmente un reporte estadístico muy completo en donde se hace una relación detallada del empleo de este material en los países de la comunidad europea”.³

Los estudios realizados a nivel mundial para la aplicación de las cenizas volantes presentan en común que este material posee una reactividad nula (inerte), esto significa que el material dura con el pasar del tiempo, debido a que son un material puzolánico el cual mezclado con agua y cal produce un cemento efectivo y duradero. Funciona como relleno para aliviar cargas debido a su densidad y equilibra las arcillas ya que es un material no plástico.

¹ ROJAS PULIDO, Leonardo. Fabricación y evaluación del desempeño de quince ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113 (Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick) [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4795/1/RojasPulidoLeonardo2015.pdf>>, p 23.

² SÍNTESIS DE ZEOLITAS A PARTIR de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6982/03CAPITULO1.pdf?sequence=3>>, p. 4.

³ ROJAS PULIDO, Leonardo, op. cit., p. 25.

En Gran Bretaña⁴ las plantas termoeléctricas producen alrededor de 15 millones de toneladas de desperdicio pulverizado al año, también casi un millón de toneladas ceniza se utiliza en concreto, reemplazando algo del contenido del cemento en concreto especialmente entre el 25% y 30% y así disminuir costos. En Alemania usan hasta el 99% de las cenizas volantes en plantas térmicas y se usa como material de relleno y cementante. Australia provoca más de 12 millones de toneladas donde el 10% es agregado al cemento y concreto. Holanda por su parte recicla el 100% de este material ya que demuestran que este material contiene propiedades para aprovechar en las industrias de los países que la originan.

“En el año 2002, en los Estados Unidos, se produjeron 95 millones de toneladas de derivados del carbón combustible; 60 millones de toneladas de cenizas volantes, 10.2 millones de toneladas de cenizas de fondo y 1 millón de toneladas de escoria de la caldera y 18.7 de toneladas de materiales FGD; la utilización prioritaria en este país es la estabilización de suelos, dos de los más grandes proyectos realizados son, el aeropuerto de Newark y el terminal marítimo de Portland”.⁵

En Colombia, en el año de 1993 la ICEL junto con la Universidad del Valle realizó un estudio en el que se debía identificar la disposición y utilización de las cenizas producidas por la combustión del carbón de las calderas térmicas de Paipa, Guajira, Zipaquirá y Tasajero. “De esta manera, se dio que estas se podrían aplicar en la producción de cementos, concretos, morteros, prefabricados y materiales sílico-calcáreos. El estudio tuvo en cuenta las cenizas volantes de todas las que provienen de puntos diferentes de las cenizas de fondo”.⁶

Las fuentes hídricas serían las que más sufrirían un impacto ambiental como por ejemplo el río Bogotá, debido a que la extracción de la ceniza se hace en la descarga de las tolvas de los precipitadores electrostáticos lo que genera una mínima concentración de ceniza en el agua de extracción facilitando el proceso de decantación que ocurre en los canales y así se garantizaría una mejor calidad de agua que se entrega al río luego del proceso.

Para la fabricación de ladrillos con este material que es el objeto de estudio de esta investigación, se debe evacuar:

... una menor cantidad de material, situación que genera un cambio en la operación del sistema de extracción de ceniza ya que se pueden variar los tiempos de operación del sistema haciéndolos más largos, ya no de ocho horas como están programados actualmente; este cambio en la programación implica una reducción en el volumen de agua por día que se usa para el sistema esta agua circularía normalmente por el

⁴ Ibíd., p. 28.

⁵ Ibíd., p. 30.

⁶ Ibíd., p. 31.

río sin contaminarse en el proceso industrial, adicionalmente el consumo energético se reduce considerablemente por el menor tiempo que debe estar en operación las bombas de lavado de cenizas rotadas por un motor de 300 HP, a esta reducción se suma la reducción en el consumo de aire para las válvulas de descarga de la tolvas e instrumentos.⁷

Así mismo, se evidencia que la demanda del consumo de energía ha aumentado debido al crecimiento económico y tecnológico, que a su vez impulsa el incremento de la población a nivel mundial; y ha generado la necesidad de la construcción de centrales termoeléctricas. La industria termoeléctrica, utiliza diferentes combustibles como el carbón, que es un generador de grandes cantidades de residuos sólidos, entre los cuales se encuentra la ceniza volante y la escoria producto de la combustión del carbón para la generación de energía. En la pulverización del material, “por cada tonelada de carbón consumida en una central termoeléctrica se producen entre 40 y 300 kilogramos de cenizas volantes, producto que mundialmente se estima genera una acumulación de residuo de entre 6 y 10 toneladas de ceniza volante mensualmente a nivel mundial”.⁸

En la actualidad, Colombia anualmente genera más de 8.3 toneladas por cada 108 toneladas de carbón pulverizado⁹ y produce unas 7.5 toneladas de ceniza por cada 107 toneladas de residuo de la combustión de material (0.8 toneladas de ceniza volante por cada tonelada de carbón pulverizado).

Generalmente la ceniza volante ya ha sido implementada como adición en el cemento Portland, según el Grupo de Investigación en Química de la Universidad Politécnica de Valencia, los materiales de construcción obtienen un aumento en la resistencia del mortero y además aseguran que “la ceniza depuradora es un residuo que incorporado a morteros y hormigones genera una gran disminución en la cantidad de agua necesaria para la mezcla”¹⁰, mejorando a su vez los parámetros de resistencia y durabilidad de la pasta, así mismo las partículas de cal libre (CaO) que posee la ceniza volante reacciona con los minerales contenidos en la arcilla y causa una mejoría en la reducción de la plasticidad de la mezcla.

⁷ *Ibíd.*, p. 38.

⁸ INSTITUTO TECNOLÓGICO GEO MINERO DE ESPAÑA. Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 1995, p. 136.

⁹ CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL CARBÓN. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Centro de Investigaciones del Carbón, 1996. p. 56.

¹⁰ BORRACHERO, M. V., PAYÁ, J. MONZÓ, J., BONILLA, M. y GIRBÉS, I. Evolución de las resistencias mecánicas de sistemas ternarios cemento/ceniza volante/ceniza de lodo de depuradora: efectos puzolánicos complementarios. [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/038_PAYA.PDF>.

Según la Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency)¹¹, los principales puntos sobre los cuales deben trabajar los productores de cemento son el aumento en la eficiencia energética y el uso de materiales alternativos: combustibles o materias primas.

De acuerdo con lo anterior, se hace necesario dar uso y aprovechamiento al residuo de ceniza volante como material de construcción, con el propósito de disminuir el almacenamiento y el impacto ambiental provocado por la mala disposición del residuo de la pulverización de carbón; mediante el estudio de este residuo de mineral, los bloques de arcilla convencionales fabricados con materia prima plástica y arena, podrían mejorar sus propiedades utilizando la adición de ceniza volante como remplazo en proporción de materia prima, y a su vez minimizar impacto con la explotación de material logrando la utilización de grandes cantidades de residuo de ceniza volante pero que cumpla con los parámetros mínimos establecidos para los bloques de mampostería utilizados en los procesos constructivos.

De acuerdo al artículo *Cementos con cenizas volantes*¹² en la elaboración de cemento Portland se emplea la ceniza volante “en adiciones de 10 a 30 % como remplazo de esta cantidad en el concreto, así mismo el agua necesaria para el proceso de mezclado por unidad de volumen del hormigón generalmente no aumenta y por el contrario puede surgir disminución en la cantidad necesaria para obtener la obtención del mortero; por otra parte, la resistencia del hormigón en las primeras edades, y hasta los 28 días de maduración disminuye, pero en edades posteriores pueden ser iguales o mayores a las que puede alcanzar un hormigón sin adición de ceniza volante. Adicionalmente los cambios de volumen no son afectados significativamente, y se pueden lograr reducciones en el calor de hidratación y la permeabilidad de la mezcla. Teniendo en cuenta las alteraciones que sufre la mezcla con la adición de ceniza, es necesario aumentar la cantidad de aditivo para la adecuada incorporación de aire. Finalmente, la reducción de la expansión dañina provocada por la reacción álcali-árido es menos reducida que cuando se emplean otras puzolanas.

Sin embargo, cuando las cenizas volantes se emplean como adición en el hormigón, se ha comprobado que en cantidades de 15 a 30% de remplazo de material en el peso de la arena de hormigones pobres, se mejora notablemente la trabajabilidad y se obtienen mayores resistencias durante todas las edades de

¹¹ INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050 [en línea] [citado: 25 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>>.

¹² OSSA M., Mauricio y JORQUERA S., Héctor. Cementos con cenizas volantes [en línea] [citado: 13 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/956/1013>>.

maduración del concreto. Por consiguiente la ceniza volante sería la encargada de contribuir con la eficacia de la carencia de finos de un hormigón pobre.¹³

Por otro lado, en el artículo titulado utilización de cenizas volantes en la fabricación de los cementos se menciona que “las normas para la recepción y utilización de cementos han tomado en consideración el aprovechamiento de estos materiales, definiendo los cementos Portland con adiciones hidráulicamente activas, que pueden contener hasta un 20 % de adiciones de material de ceniza volante”.¹⁴

Basado en el trabajo de grado *Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de Termopaipa*¹⁵ se analizó el comportamiento de la resistencia a la compresión que tiene la ceniza volante de la termoeléctrica de Paipa – Boyacá en el concreto a un periodo de 72 días de curado.

En este estudio los investigadores realizaron una recopilación de los datos, después de haberlos sometido a la compresión; y se encuentra que, al pasar los días de curado, estos especímenes presentan un aumento en la resistencia, pero a su vez se analiza que utilizar la ceniza en altos porcentajes no es factible, ya que absorbe más cantidad de agua y la mezcla homogénea se convierte en una mezcla seca, lo que la convierte en un material menos manejable. Los compuestos químicos del cemento y del carbón no son compatibles, ya que haciendo las pruebas de laboratorio a compresión; se nota una variación desfavorable, debido a la ceniza volante de Termopaipa. Para el 20%, 25% y 30% muestran una disminución evidente en la resistencia. La ceniza volante producida por la central de Termopaipa, es carbón bituminoso pulverizado, con capacidad de 321MW lo cual la convierte en la productora térmica de carbón más grande del país. Se concluyó realizando todas las pruebas de laboratorio a compresión que esta propuesta investigativa funciona y es eficaz solo con un rango de porcentajes entre 2% - 10% de ceniza volante, lo cual hace que la compatibilidad de los materiales funcione en el rango óptimo utilizado para la mezcla de concreto hidráulico.

Debido a lo anterior, no se encontró incremento en la resistencia a la compresión con respecto a las muestras falladas a los 56 días; por lo tanto, se determina que el tiempo máximo de generación de resistencia en los cilindros adicionados con ceniza volante, para este caso es de 56 días.

¹³ *Ibíd.*

¹⁴ *Ibíd.*

¹⁵ AGUDELO, Angie y ESPINOSA, Bryan. *Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de Termopaipa* [en línea] [citado: 20 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14479/4/Documento%20Ceniza%20volante%20TERMOPAIPA.pdf>>.

Adicionalmente, la mezcla de concreto con adición de ceniza volante, que más se aproxima a los resultados obtenidos con la mezcla patrón, corresponde al diseño de mezcla con un porcentaje de reemplazo de cemento por ceniza volante del 10% y que basados en la norma NTC 3493 y ASTM C 618-91 la cual especifica que el porcentaje de inquemados máximos admisibles para el uso de las cenizas volantes como adición en el concreto es del 6 %. Por tal motivo, las cenizas de Termopaipa no cumplen debido a que sobrepasa el porcentaje estipulado y llega al 12%.

En otros estudios presentados por Pedro Valdez, Alejandro Durán y Jorge M. Rivera¹⁶ muestran los avances en los últimos años en la tecnología del concreto que se han incorporado en la industria de la construcción, donde se ha adicionado el 50% de ceniza volante al cemento Portland, donde se evidenció que la relación agua cemento disminuye como consecuencia de la adición de residuo para lograr una buena fluidez de la mezcla, permitiendo la reducción a la retracción por secado y la resistencia a la abrasión en concretos fluidos.

Los resultados de la resistencia mecánica a la compresión de las muestras convencionales logran resistencias entre los 26 y los 54 MPa resultado que es comparado con los obtenidos a partir de adición de ceniza volante y aditivo a base de naftaleno los cuales mejoran notablemente la resistencia a valores entre 30 y 63 MPa.

Por otro lado en el artículo llamado *Reducing the environmental impact of concrete*¹⁷ muestra la producción de cemento Portland, la demanda de altos consumos de energía y la producción de gases de efecto invernadero principalmente el CO₂ que produce la fabricación de cemento. Así mismo, el desarrollo sustentable del material ha emergido como una filosofía clave de este siglo. La meta del desarrollo sustentable, para las industrias del cemento y del concreto, puede ser alcanzada si se hace un esfuerzo serio en la utilización efectiva de subproductos puzolánicos y cementantes producidos por las centrales eléctricas termales y en las industrias metalúrgicas.

En ambas series, la mezcla con una adición de 90% de FA presentó mejor comportamiento en estado fresco, que las mezclas con adiciones mayores a 90% de FA, y la utilización de aditivo superfluidificante.

Según el documento de G. Ayesta, M". P. García, F. Blanco y J. Ayala catalogado como Obtención de ladrillos cara vista a partir de cenizas volantes de la Central

¹⁶ VALDEZ, Pedro L, DURÁN, Alejandro, RIVERA, Jorge y JUÁREZ, César. Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. *En*: Ciencia UNAL, vol. 10, no. 1, (mar., 2007), p. 52.

¹⁷ KUMAR, Mehta. Reducing the environmental impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. *En*: Concrete International, vol. 21, no. 11, (oct., 2007), págs. 61-66 [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>>.

Térmica del Narcea (Asturias) en el país de España¹⁸, se caracterizaron las cenizas volantes de la Central Térmica del Narcea (Asturias) para determinar su utilización como materia prima en la obtención de ladrillos cara vista. El moldeado correcto de una pieza de cerámica exige trabajar una pasta con una adecuada plasticidad, para ello se investigó cuál ha de ser la composición óptima de la misma, en cuanto a: humedad, cantidad de lubricante (talco) y de ligante (dextrina blanca). El conformado de las piezas o ladrillos se realiza por prensado, utilizando distintos valores de presión, así como la temperatura de cocción, una vez establecida la velocidad de enfriamiento. Finalmente, las piezas cocidas se someten a los ensayos exigidos por la Norma Básica de Edificación, para ver si cumplen las especificaciones requeridas en cuanto a: absorción de agua, succión, contracción, elasticidad, eflorescencia y resistencia a la compresión.

Los ladrillos cara vista¹⁹, que usualmente se fabrican a partir de una mezcla de arcillas plásticas y arena, que actúan como desgrasante, pueden ser fabricados usando cenizas volantes. Generalmente se sustituye parte de la arcilla plástica por las cenizas. Sin embargo, los autores utilizaron la ceniza volante como materia prima única para la elaboración de ladrillos, confiriéndoles a éstos unas características mínimas admisibles de mercado. Es así que de esta forma se da aprovechamiento a una parte de los millones de toneladas de residuos que se acumulan en las proximidades de las fábricas que los generan y los provocan, con el transcurso del tiempo, esto se convierte en un problema de almacenamiento, de espacio físico y ambiental que se puede mejorar notablemente con la reutilización de estas materias consiguiendo prorrogar la vida de las materias primas, como las arcillas, y las generaciones futuras sin cometer destrucciones en los diferentes ecosistemas.

Se caracterizaron las cenizas volantes según un análisis de granulometría por medio de tamizado en húmedo que dio como resultado una fracción inferior a 45 μ que representa el 85% en peso, y la fracción inferior a 90 μ , el 96%, por otro lado la distribución granulométrica para la fracción menor de 45 μ se determinó con el foto Sedimentador Lumosed, en la que se determinó que el tamaño medio de partícula es de 15 μ .

Luego de determinar la caracterización del material, se realizó el proceso de fabricación de los ladrillos donde la muestra obtenida de la termoeléctrica es humedecida al 6% del peso, siendo conformada por prensado, la presión de

¹⁸ AYESTA, M., GARCÍA, Ma. P., BLANCO, F. y AYALA, J. Obtención de ladrillos cara vista a partir de cenizas volantes de la Central Térmica del Narcea (Asturias). *En*: Materiales de Construcción, vol. 49, no. 256, (oct.-dic., 1999), págs. 15-28, [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/432/480>>.

¹⁹ ALONSO, M.C. y LUXÁN, M.P. Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción: experiencia española. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 1995. 146 p.

prensado que se usó como parámetro variable, y los valores utilizados fueron: 15,6 MPa, 31,2 MPa, 46,8 MPa y 62,4 MPa , la operación de secado se realizó en una estufa a una temperatura de 110 ± 10 °C durante 24 horas para la eliminación del agua del material hasta alcanzar una humedad que esté en equilibrio con el aire que lo rodea. Por último, en la cocción intervienen una serie de parámetros, como son: temperatura máxima de cocción, que, de acuerdo con la bibliografía, los valores utilizados fueron: 900 °C, 950 °C, 975 °C, 1.000 °C y 1.100 °C; el tiempo de permanencia a la temperatura elegida fue de 2 horas, siendo la atmósfera del horno, oxidante; la velocidad de calentamiento, T C/min y la de enfriamiento, 1** C/min.

Finalizando el proceso de fabricación de los bloques con adición de ceniza volante se procedió a realizar el ensayo de laboratorio como lo era la resistencia a la compresión, la absorción de agua, la eflorescencia y la densidad de la mezcla, entre otras.

Según el artículo de Edison Gil, *Síntesis de arcilla aniónica a partir de ceniza volante y a su aplicación en la remoción de cromo VI*,²⁰ se evidencia que hubo dos etapas, la primera etapa consistía en mezclar arcilla aniónica con ceniza volante que como bien se sabe es un material de desecho proveniente de los hornos de combustión del carbón; y la otra etapa consistió en realizar el procedimiento de cromo VI empleando la arcilla como absorbente. A su vez, la muestra de ceniza volante utilizada en este estudio fue de las calderas de textil de Fabricato en la ciudad de Medellín a las cuales se le realizaron diferentes ensayos, con el fin de saber cuáles eran sus propiedades , donde se evidenció que la ceniza volante estaba constituida por partículas esféricas con un diámetro promedio malla 100, al igual se realizó la difracción de rayos x de este material donde se evidenció que el material es cristalino y que tiene presencia de cuarzo y de mulita, por otro lado el ensayo de difracción de rayos x para la arcilla aniónica presenta dolomita, calcita, brucita y hidrocalcita determinando así la caracterización del material.

Los resultados obtenidos en este artículo evidencian que la absorción de la arcilla sintética tuvo un valor de 1,9738 mg/g, así mismo el cromo VI proviene de los efluentes líquidos de la industria y que este se puede eliminar mediante la aplicación de arcilla aniónica sintética, igualando estas propiedades con la utilización de ceniza volante, esperando con esto a la contribución del desarrollo sostenible.²¹

²⁰ GIL, Edison. Síntesis de arcilla aniónica a partir de ceniza volante y su aplicación en la remoción de cromo VI. En: Revista Universidad EAFIT, vol. 34, no. 112 (1998), págs. 73-80, [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1097/989>>.

²¹ PÉREZ CANDELA, Manuel, MARTÍN-MARTÍNEZ, José M. y TORREGROSA MACIÁ, Rosa. Chromium (VI): removal with activated carbons. En: Water Research, vol. 29, no. 9 (sep., 1995), págs. 2174-2180

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, se evidencia una amplia importancia en la producción de materiales de construcción con la utilización de residuos, producto de la industrialización que se evidencia hoy día. Es por esta razón, que se hace necesario el presente estudio en el cual se espera conocer y comparar cual es el comportamiento físico y mecánico que tienen los bloques de arcilla macizos sin adición y los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante.

Es pertinente recalcar que el uso de la ceniza volante puede mejorar notablemente las características intrínsecas del bloque macizo de arcilla con el mejoramiento de la resistencia a la compresión, absorción de agua, tasa inicial de absorción y los límites de Atterberg; este mejoramiento a su vez incurre en la reducción de explotación de materia prima y la utilización de energía necesaria para la cocción de bloques macizos de arcilla durante su proceso de fabricación.

Con esta investigación se dará a conocer cuál es el comportamiento que se adquiere al realizar una mezcla de arcilla con adición de ceniza volante en diferentes dosificaciones y así evidenciar si finalmente se logra un mejoramiento en la resistencia a la compresión del bloque macizo de arcilla y conocer si es de mayor confiabilidad en la utilización de procesos constructivos. Así mismo, la adición de ceniza puede disminuir la contracción y el coeficiente de saturación de los bloques con adición, mejorando notablemente las propiedades del material y ayudando en la utilización de residuos para innovar en materiales de construcción futuramente sostenibles.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento físico y mecánico que tienen los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante respecto a los bloques de arcilla maciza sin adición.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar las propiedades índices del suelo fino (arcillas) y las propiedades físicas de la ceniza volante conocidas como granulometría, límites de atterberg, azul de metileno, difracción de rayos x.
- ✓ Determinar las propiedades físicas y mecánicas de bloques de arcilla sin adicción y bloques de arcilla con adición de ceniza volante en proporciones de 15%, 20% y 25% realizando los laboratorios de resistencia a la compresión, Modulo de rotura o resistencia a la flexión, absorción de agua y tasa inicial de absorción.
- ✓ Comparar los resultados obtenidos de los bloques de arcilla sin adicción y los bloques de arcilla con adición de ceniza volante.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

El proyecto pretende considerar la incorporación de materiales ambientalmente sostenibles para el desarrollo de procesos, técnicas y tecnologías dentro del campo de la ingeniería civil; el concepto a realizar, es la adición de diferentes porcentajes de ceniza volante al bloque convencional de arcilla para lograr eficiencia en los aspectos energéticos y económicos durante el proceso de producción del material adicionando a este el residuo de ceniza volante proveniente de la obtención de energía en centrales termoeléctricas.

5.1.1 Bloque macizo. Los bloques macizos son pequeñas piezas cerámicas²² en forma de paralelepípedo, formadas por tierras arcillosas, moldeadas, comprimidas y sometidas a cocción. Este material puede utilizarse en toda clase de construcciones por ser su forma regular y de fácil manejo.

Los bloques macizos se utilizan en muros, suelos, pavimentos y construcciones de obras civiles en general, es el material de construcción más antiguo creado por el hombre; gracias a la facilidad de moldeo de este material cerámico, es posible obtener piezas con diversidad de formas.

5.1.2 Características de los bloques macizos. Las características generales que deben cumplir los bloques macizos son:

✓ Estar bien moldeado y cumplir con la geometría del bloque que debe ser homogénea donde las caras del ladrillo deben ser planas, los lados deben ser paralelos y los bordes y ángulos deben ser de 90°, produciendo un sonido rígido al golpearlo con un martillo para verificar que este bien cocido y para ver que no tenga fisuras.

✓ Debe ser poroso para que el mortero se adhiera al ladrillo.

✓ No debe contener sales solubles para no propiciar la eflorescencia.

✓ Debe estar bien cocido, ya que al estar mal cocido queda duro y pierde resistencia por las fisuras.

5.1.3 Propiedades de los bloques macizos. Son propiedades físicas relacionadas a la estética del material:

✓ Color: depende de su composición química de la materia prima y de la intensidad del quemado. De todos los óxidos comúnmente encontrados en las arcillas, el hierro tiene el mayor efecto sobre el color.

²² MORENO G., Franco. El ladrillo en la construcción. Barcelona: CEAC, 1981. p. 19.

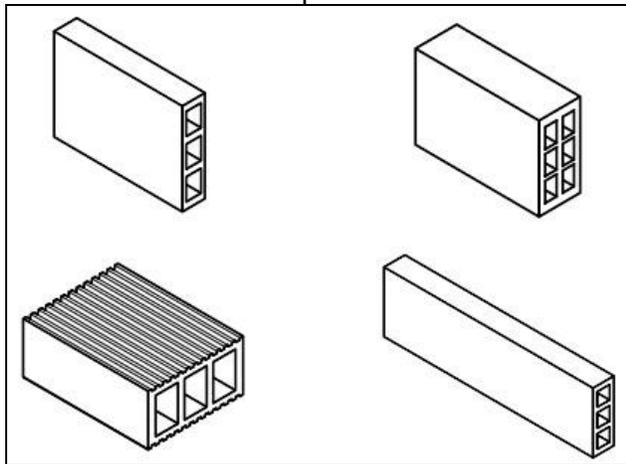
✓ Textura: es el efecto en la superficie o la apariencia que presenta la unidad como resultado de la forma de elaboración.

5.1.4 Clasificación de los bloques. De acuerdo con sus propiedades descritas en la Norma Técnica Colombiana NTC-4205²³ unidades de mampostería de arcilla cocida, ladrillos y bloques cerámicos se describen los tipos de unidades de ladrillos.

Existen tres tipos básicos de unidades de mampostería no estructural de arcilla cocida, según la disposición de sus perforaciones y del volumen que éstas ocupen:

✓ Perforación horizontal (PH): Unidades cuyas celdas o perforaciones son paralelas a la cara o superficie en que se asientan en el muro. El porcentaje máximo de huecos o perforaciones es del 75 % de la sección bruta que las contiene.²⁴

Figura 1. Perforaciones horizontales en bloques



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural. NTC 4205-2. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. p.3.

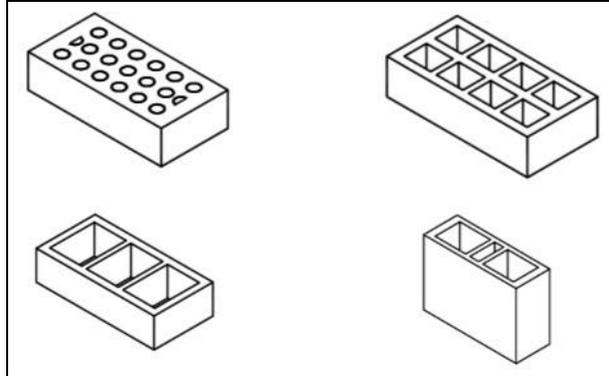
✓ Perforación vertical (PV): unidad cuyas celdas o perforaciones son perpendiculares a la cara o superficie en que se asientan en el muro. El área neta de las celdas o perforaciones, medida en cualquier sección perpendicular a sus

²³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000, p. 1.

²⁴ Ibíd. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural. NTC 4205-2. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. p. 3.

ejes, no puede ser superior al 65 % del área bruta en esa misma sección. Tienen usos no estructurales.²⁵

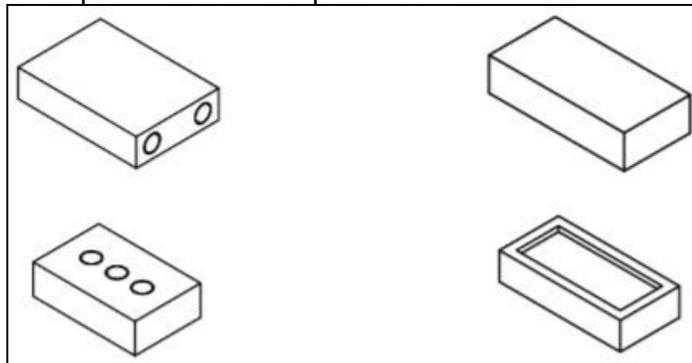
Figura 2. Perforaciones verticales en bloques



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 3: mampostería de fachada. NTC 4205-3. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. p. 4.

✓ Macizos (M): mampuestos aligerados con pequeñas perforaciones que ocupan menos del 25 % de su volumen o, también, que no contienen ninguna perforación.²⁶

Figura 3. Perforaciones permitidas en bloques macizos



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 3: mampostería de fachada. NTC 4205-3. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. p. 5.

Para la presente investigación se realizaron bloques macizos, es por esto que el bloque en estudio no cuenta con ningún porcentaje de perforación y es totalmente rígido, sin embargo, en los bloques se utilizan las siguientes iniciales según el tipo

²⁵ *Ibíd.*, Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205. Op. Cit., p. 1.

²⁶ *Ibíd.*, p. 1.

a que correspondan (PV, PH o M), y si están separadas por un guion con la letra I o E, significa que es interior o exterior.

5.1.5 Materia prima del ladrillo arcilla. Las arcillas constituyen la principal materia prima para la fabricación de cerámicos de construcción. Éstas aparecen en todo tipo de formación rocosa, desde la más antigua a la más reciente, y en formaciones ígneas y sedimentarias de todo tipo.²⁷ Como consecuencia de ello, sus características físicas, químicas y mineralógicas varían ampliamente, incluso entre las capas de un mismo depósito arcilloso. Acoplado con otros parámetros de mezcla, tales como concentración de álcali, relación sólido y líquido, y proporciones de reactivos alcalinos.

5.1.6 Composición química de la arcilla. En estado natural la arcilla está compuesta por minerales de arcilla con silicatos de aluminio e hidratos, se forman a través de la degradación natural de las rocas ígneas, feldespatos, o en depósitos aluviales o eólicos.

La composición química de la arcilla pura es $Al_2 O_3 \cdot 2Si O_2 \cdot 2H_2O$.

5.1.7 Propiedades de la arcilla. El comportamiento de la arcilla utilizada para la conformación de la mezcla para ladrillos.

✓ Plasticidad: Es la principal propiedad de las arcillas, esta hace que la arcilla sea la materia prima adecuada para la fabricación de bloques y que infiera en la combinación con porcentajes adecuados de agua para la elaboración de formas moldeadas que sean capaces de generar productos cerámicos con formas que favorezcan los procesos constructivos.

✓ Contracción: Propiedad de las arcillas que produce una disminución en las dimensiones del material por pérdida de humedad tras realizar el proceso de moldeado. Existen dos tipos de contracciones, las cuales se pueden llevar a cabo tras realizar un determinado proceso:

- Contracción por aire, que tiene lugar después que se ha formado la unidad, pero antes de que sea secada al horno.

- Contracción por fuego, que se produce durante el proceso de quemado.

✓ Porosidad: La porosidad de las arcillas varía de un tipo a otro. Esta propiedad depende mucho del tamaño de grano que tenga la arcilla. Si la arcilla tiene un tamaño de grano grande la porosidad será mayor que la de una arcilla con un tamaño de grano pequeño.

²⁷ BARBA, A., et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica, 1997. p. 91.

5.1.8 Proceso de fabricación de bloques. El proceso de elaboración de un ladrillo se compone de las siguientes fases:

✓ Extracción de la materia prima: se extrae y transporta la arcilla, la materia prima necesaria para la fabricación de bloques desde la zona de extracción hasta los lugares de producción.

✓ Maduración: antes de incorporar la arcilla al ciclo productivo, esta se somete a una serie de tratamiento de trituración, homogenización y reposo expuesta a los elementos, con la finalidad de obtener una adecuada consistencia y uniformidad de las características físicas y químicas deseadas.

✓ Tratamiento mecánico previo: consiste en una serie de operaciones cuya finalidad es la de purificar y refinar la materia prima. Los instrumentos utilizados en dicha fase son los siguientes:

- Depósito de materia prima procesada: se deposita el material en silos especiales y techados donde el material se homogeniza definitivamente tanto física como químicamente.

- Humedecimiento: se retira la arcilla de los silos y se transporta a un laminado refinador para posteriormente mover a un mezclador humedecido, en el cual se agrega agua para obtener la humedad precisa.

- Moldeado: consiste en pasar la arcilla a través de una boquilla para conseguir la forma del objeto deseado. Este proceso se realiza en caliente, utilizando vapor saturado a aproximadamente 130°C y a presión reducida. Con ello se obtiene una humedad más uniforme y una masa más compacta.

- Secado: es una de las fases más delicadas del proceso de producción, ya que de ella depende, en gran parte, el buen resultado y calidad del material. El secado tiene la finalidad de eliminar el agua agregada en la fase de moldeado para así poder pasar a la fase de cocción.

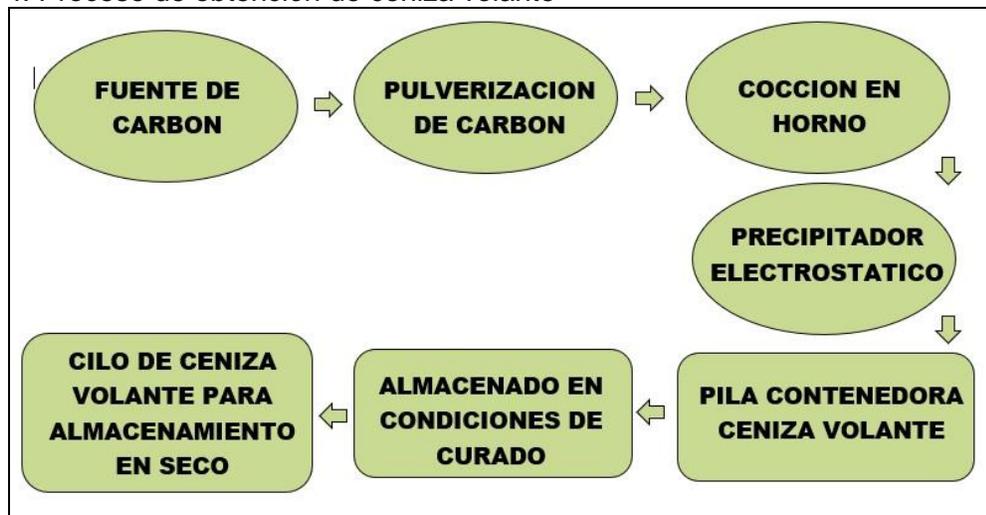
- Cocción: se realiza en hornos de túnel de hasta 120m de longitud donde la temperatura de cocción oscila entre 900°C y 1000°C. En el interior del horno la temperatura varía de forma continua y uniforme. Durante este proceso se produce la sintetización, lo que determina la resistencia del ladrillo.

- Almacenaje: antes del embalaje, se procede a la formación de paquetes sobre pallets, lo cual permitirá facilitar su transporte con carretillas. El embalaje consiste en envolver los paquetes con cintas de plástico o metal, con la finalidad de poder ser depositados en lugares de almacenamiento y facilitar su transporte.

5.1.9 Impactos ambientales de la industria ladrillera. Uno de los principales impactos que genera la actividad de fabricación de ladrillos es la afectación de la calidad del aire por la emisión de humos procedentes de los hornos y la morfología del terreno donde se explota la materia prima afectando el paisaje con la configuración del terreno, lo que a su vez genera deforestación y erosión.

5.1.10 Ceniza volante. Las cenizas volantes son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas. Los productos de esta combustión se subdividen en cenizas volantes y de hogar. Los primeros, son residuos volátiles obtenidos a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera. Su diámetro varía entre 1 y 150 μm .²⁸

Figura 4. Proceso de obtención de ceniza volante



Fuente: autores.

5.1.11 Características de la ceniza volante.

✓ Color: Es de color gris a negro debido a que se produce directamente de la combustión de carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno, cuando es clara la ceniza tiene mayor contenido de cal y entre más oscura tiene altos contenidos de carbón.

✓ Mineralogía: La identificación y cuantificación del contenido de fases cristalinas se determina mediante el ensayo de difracción de rayos X, Generalmente contiene

²⁸ OSSA M., Mauricio y JORQUERA S., Héctor. Cementos con cenizas volantes. *En*: Materiales de Construcción, vol. 34, no. 193, (ene.-mar., 1984), págs. 3-17, [en línea] [citado: 17 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/956/1013>>.

pequeñas cantidades de cal (normalmente inferior al 15%) y una superior combinación de sílice, aluminio y hierro.

Por medio de la actividad puzolánica, las cenizas volantes se combinan químicamente con agua y la cal formando componentes cementicios adicionales que producen un hormigón más denso y con mayor resistencia.

La conversión de la cal soluble en componentes cementicios reduce la cantidad de poros de entrada de agua, al mismo tiempo, la reacción química reduce la cantidad de cal susceptible de ser atacada por ácidos débiles, sales o sulfatos.

5.1.12 Composición química de la ceniza. Las partículas de la ceniza volante están compuestas de Si O₂ y oscila entre 34% y 62% del total de la masa del material.

5.2 MARCO TEÓRICO

El ladrillo a través de la historia ha adquirido una gran importancia a nivel mundial, ya que es un elemento formado de tierra arcillosa que, mediante un proceso de moldeo, secado y cocción, adquiere altas propiedades de resistencia a la compresión, es por esta razón que los ladrillos de arcilla son un material indispensable en la industria de la construcción a nivel mundial. Pues son un elemento primordial en los procesos constructivos debido a su forma y a su fácil manejo. Es por esta razón que durante el proceso de fabricación de los bloques macizos de arcilla en estudio se adicionarán diferentes porcentajes de ceniza volante con el fin de implementar un mejoramiento en las propiedades mecánicas del material. Siendo la ceniza volante un polvo fino gris subproducto de la combustión de carbón pulverizado generado por centrales termoeléctricas.

Teniendo en cuenta que la explotación de materia prima es uno de los procesos que genera mayor impacto ambiental, la extracción y preparación de arcillas utilizadas principalmente para la elaboración de productos cerámicos utilizados en la industria de la construcción, son uno de los mayores detonantes. Pues la fabricación de ladrillos, tejas, tubos, baldosas, entre otros, son grandes generadores de residuos los cuales no son reutilizados en su totalidad e incrementan los índices de contaminación ambiental ocasionados por la industria.

Es por esta razón que, los conceptos de construcción sostenible y el desarrollo de materiales reciclables se vienen incorporando a los procesos constructivos en el país desde hace relativamente poco tiempo, dado que se deben optimizar los recursos naturales que plantean innovadoras formas de construcción; cabe señalar que se tiende a cambiar la forma en que manejamos los residuos de procesos industriales, de modo que contribuya con el desarrollo sostenible del país que lleva consigo al mejoramiento del medio ambiente y por ende tiene como

propósito de mejoramiento la calidad de vida de las personas y el desarrollo urbanístico.

Es preciso afirmar que el concepto de desarrollo debe incluir todos los aspectos de la vida humana y social, y no estar limitado al crecimiento económico²⁹. Es por esta razón que el desarrollo va de la mano con la investigación y la tecnología, en este caso la implementación de nuevas tecnologías en materiales constructivos, utilizando los residuos de la industria termoeléctrica “ceniza volante” con el fin mejorar las propiedades de los bloques macizos convencionales y mitigar el daño al medio ambiente.

Por otra parte, el carbón contenido en la ceniza volante³⁰, aparte de rebajar el valor puzolánico del conjunto, tiene un poder considerable de adsorción sobre los agentes del hormigón, lo que obliga a tener que aumentar sensiblemente la dosificación de éstos, con objeto de conseguir un determinado contenido de aire ocluido.

La reactividad de la ceniza volante a temperatura ordinaria con la cal en presencia de agua, reside en la fase vítrea. En la reacción se forman principalmente silicatos y aluminatos hidratados de calcio, si bien también se pueden formar compuestos de magnesio. Se han identificado mediante rayos X, en los sistemas fraguados, hidratos del grupo de la tobermorita (silicato hidratado de calcio), etringita [sulfoaluminato hidratado de calcio ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 30\text{—}32\text{ H}_2\text{O}$)], y un sulfoaluminato de menor contenido en SO_3 ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaSO}_4\cdot 12\text{—}13\text{ H}_2\text{O}$). Se cree que la formación de etringita puede tener lugar sin adición de cal. Es por esto que se atribuye a esta circunstancia la tendencia a endurecer la ceniza volante húmeda apilada.

Sin embargo el suelo empleado en la fabricación de las unidades ecológicas de suelo cemento es conformado por tierra arcillosa (65%), cemento (20%), arena fina (10%) y agua (5%), las tierras más adecuadas para la fabricación de las unidades son aquellas que cumplen con las siguientes características.

- ✓ Aquellas que pasen por el tamizado de 4.8 mm al 100%.
- ✓ Aquellas que pasen por el tamizado de 0.075 mm de 10% al 50%.
- ✓ Límite de liquidez menor o igual al 45%.
- ✓ Índice de plasticidad menor o igual al 18%.

²⁹ PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO DE LA INDUSTRIA. En: Revista Mercados de la Construcción. (nov., 2010), p. 127-128.

³⁰ LÓPEZ RUIZ, Álvaro. La utilización de las cenizas volantes según el reciente simposio de Pittsburgh. En: Materiales de Construcción, vol. 17, no. 128, (oct.-dic., 1967), pág. 24, [en línea] [citado: 20 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: file:///C:/Users/supervisor/Downloads/1645-3165-1-PB.pdf>.

En conclusión, la arcilla es un componente muy importante para la fabricación de unidades de ladrillos utilizados en procesos constructivos por sus propiedades aglomerantes, ya que mejoran su resistencia inicial y facilita su manejo; es por esto que los suelos arcillosos con propiedades diferentes a las antes descritas provocan fisuras luego del secado de la materia prima, causando deficiencias en el material fabricado, debido a esto se hace necesaria la presente investigación con el fin de evaluar el comportamiento de bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante teniendo en cuenta sus propiedades anteriormente descritas y los posibles beneficios que se podrían obtener con estas.

5.3 MARCO LEGAL

Para garantizar la veracidad de la investigación realizada, se relaciona la normatividad del procedimiento propuesto para la fabricación de bloques de arcilla convencionales y bloques de arcilla con adición de ceniza volante. En esta norma se establecen los requisitos que deben cumplir los bloques utilizados como unidades de mampostería, la fabricación de bloques de arcilla está regida por la Norma Técnica Colombiana de mampostería estructural y en ella se encuentra los requisitos establecidos para aceptar o rechazar los ladrillos fabricados a partir de materia prima la cual debe contener características específicas que son probadas mediante ensayos de laboratorios de la Norma Invias, así mismo el contenido de la Norma Técnica Colombiana especifica los requisitos ambientales que debe cumplir la industria ladrillera.

Las Normas Técnicas Colombianas que soportan los procesos realizados en la presente investigación son:

Tabla 1. Ensayos de caracterización de material

ENSAYO	NORMA
Análisis granulométrico por medio del hidrómetro.	INV. E – 123 - 13
Determinación del límite líquido de los suelos.	INV. E – 125 - 13
Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.	INV. E – 126 - 13
Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales.	INV. E – 235 - 13
Difracción de rayos x (DRX)	

Fuente: autores.

Tabla 2. Ensayos de prueba a los bloques macizos

ENSAYO	NORMA
Ensayo de resistencia a la compresión	NTC-4017
Ensayo de módulo de rotura o resistencia a la flexión	NTC-4017
Ensayo de absorción de agua	NTC-4017
Ensayo de tasa inicial de absorción	NTC-4017

Fuente: autores.

5.3.1 Análisis granulométrico por medio del hidrómetro I.N.V. E – 123 - 13. La norma determina cuantitativamente la distribución de tamaños de las partículas de las fracciones finas de los suelos, la distribución de partículas más grandes de 75 μm (retenidas en el tamiz No 200) se determina por tamizado, en tanto que la distribución de las partículas más pequeñas que 75 μm se determina por un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro.³¹

5.3.2 Determinación del límite líquido de los suelos I.N.V. E – 125 – 13. Esta norma determina el límite líquido de los suelos, que es el contenido de humedad en porcentaje cuando este se halla justo en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.³²

5.3.3 Límite plástico e índice de plasticidad de suelos I.N.V.E – 126 - 13. Esta norma permite determinar el límite plástico mediante el proceso mostrado en esta, que es el contenido más bajo de agua, en el cual el suelo permanece en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, donde el material está en estado plástico.³³

5.3.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13. Esta norma es utilizada para indicar el procedimiento para la determinación de material potencialmente dañino presente en la fracción fina de un agregado mediante la determinación del valor de azul de metileno, La solución de Azul de Metileno es titulada en pequeños incrementos en un recipiente que contiene agua destilada y la muestra de material menor del tamiz de 75 mm (No 200).

Después de cada incremento se retira del recipiente una pequeña cantidad del agua con la muestra, empleando una varilla agitadora de vidrio y se deja caer en forma de gota sobre un papel filtro. Cuando la muestra de agregado no pueda

³¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INVE – 123 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

³² Ibíd. Determinación del límite líquido de los suelos. INVE – 125 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

³³ Ibíd. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. INVE – 126 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

absorber más Azul de Metileno se forma un anillo azul en el papel filtro. En este momento se procede a cuantificar la cantidad de solución de Azul de Metileno añadida y a calcular el valor de Azul de Metileno (mg/g miligramos de Azul por gramo de suelo).³⁴

5.3.5 Difracción de rayos X (DRX). El Difractómetro cuenta con tubos de generación de rayos X con ánodos de Cu (Cobre), Mo (Molibdeno) y Fe (Hierro) para los ensayos. Permite obtener información sobre las fases y estructura cristalina de todo tipo de materiales en polvo, película delgada y en bloque. Adicional a ello, a través del procesamiento de los datos de los difracto gramas se puede obtener información de parámetros cristalográficos y de orientación preferencial de los planos de reflexión.³⁵

5.3.6 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017 2005. Este ensayo tiene como objeto determinar la capacidad de resistencia que tiene un espécimen de arcilla que contengan altura y anchos completos de la unidad tal como se usa en el muro o en el enladrillado, pero con una longitud igual a la mitad de la longitud de la pieza entera ± 25 mm; y se someten a carga en la misma posición que ocuparían en su aplicación.³⁶

5.3.7 Ensayo de módulo de rotura NTC-4017 2005. Este ensayo tiene como objeto determinar el módulo de rotura que tiene un espécimen de arcilla, en el cual se debe tener un soporte con barras solidad de acero de diámetro $25,4\text{mm} \pm 1,0$ mm cuyo centro debe estar colocado a $12,5$ mm $\pm 2,0$ mm de cada borde del espécimen.³⁷

5.3.8 Ensayo de absorción de agua NTC-4017 2005. Este ensayo tiene como objeto determinar el porcentaje total de absorción de agua de un espécimen de arcilla luego de ser dejado en inmersión total en agua durante 24 horas continuas.³⁸

5.3.9 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC-4017 2005. Este ensayo tiene como objeto determinar el porcentaje de absorción de agua de un espécimen de arcilla luego de ser colocado por una cara en inmersión en una lámina de agua de 2 cm de altura durante 1 minuto continuo.³⁹

³⁴ *Ibíd.* Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales. INVE – 235 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

³⁵ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Departamento de Física. Difracción de Rayos X [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://goo.gl/xPuDLO>>.

³⁶ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. p. 6.

³⁷ *Ibíd.*, p. 3-4.

³⁸ *Ibíd.*, p. 9.

³⁹ *Ibíd.*, p. 14.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo debido a que está basada en el uso de técnicas para conocer diferentes ámbitos de la muestra, planteando una alternativa para la utilización de ceniza volante en bloques macizos de arcilla y obteniendo de los ensayos realizados la recolección de datos, con el fin de lograr un análisis comparativo de la propuesta planteada con la elaboración convencional.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es experimental porque es un proceso en el cual se tuvo la necesidad de realizar cálculos matemáticos y procesos de elaboración sistematizados con ayuda de la realización de ensayos de laboratorio en el cual se manipulan tanto variables dependientes como independientes. Razón por la cual se requiere de un control específico de estas variables con el fin de obtener y garantizar resultados de mayor confiabilidad.

6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Las variables por definir son las independientes, las dependientes y las intervinientes. Las variables independientes son las manipulables, las variables dependientes son las que miden el efecto o causa de la primera y las variables intervinientes son las que están presentes en el objeto de investigación y que su variación es capaz de intervenir en el estudio realizado.

En la siguiente tabla se relacionan las variables que intervienen en la presente investigación:

Tabla 3. Definición y operacionalización de las variables

	VARIABLE	INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
VARIABLE INDEPENDIENTE (X)	Dosificación de ceniza volante	% Porcentaje	Cantidades de adición de ceniza volante de 15, 20 y 25 %	Peso (gr)
VARIABLE DEPENDIENTE (Y)	Comportamiento mecánico del ladrillo.	Resistencia a la Compresión	Ensayo de resistencia a la compresión, registrando los valores de resistencia máximos alcanzados por cada espécimen.	Esfuerzo (MPa)
		Ensayo de Modulo de rotura	Ensayo de módulo de rotura, registrando los valores de flexión máximos alcanzados por cada espécimen.	Esfuerzo (MPa)
VARIABLE INFLUYENTE	Granulometría por hidrómetro	Tamaños de las partículas.	Distribución de tamaños de las partículas de las fracciones finas	% de fracciones finas
	Límite líquido de los suelos	Contenido de humedad	Valor máximo obtenido de limite líquido en fracciones de suelo fino	Contenido de humedad
	Límite plástico de los suelos	Contenido de humedad	Valor máximo obtenido de limite plástico en fracciones de suelo fino	Contenido de humedad
	Difracción de rayos x	Cantidad de partículas de material	Valor de partículas de material que contiene la muestra de suelo	% Partículas

Fuente: autores.

6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

6.4.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos por el método del hidrómetro INV E – 123 – 13⁴⁰.

6.4.1.1 Técnica. Para realizar este ensayo por el método del hidrómetro es pertinente aclarar que está basado en el principio de sedimentación de partículas de suelo en agua, para esto es necesario tomar datos de densidad de sólidos en la suspensión del material por un periodo de 24 horas.

6.4.1.2 Instrumentos.

✓ Hidrómetro. Conforme a los requisitos establecidos en la norma, se usó el hidrómetro 151 H de la norma ASTM E 100, graduado para leer, la gravedad específica de la suspensión o los gramos por litro de suspensión de acuerdo con la escala que tenía grabada.

✓ Cilindro de vidrio para sedimentación. De unos 457 mm (18") de alto y 63.5 mm (2½") de diámetro, y marcado para un volumen de 1000 ml a 20° C (68° F). El diámetro interior es tal, que la marca de 1000 ml se encuentre a 360 ± 20 mm (14 ± 1.0") del fondo, en el interior del cilindro.

✓ Termómetro de inmersión. Con apreciación de 0.5° C (0.9° F).

✓ Cronómetro o reloj.

✓ Horno. Capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta 110 ± 5° C (230 ± 9° F).

✓ Baño de agua o cuarto de temperatura constante. Se utiliza para mantener la suspensión de suelo a temperatura constante durante el análisis del hidrómetro, evitándose de esta forma las correcciones por temperatura.

✓ Vaso de precipitados (Beaker). Con una capacidad de 250 ml.

✓ Recipientes. Recipientes apropiados, hechos de material no corrosible y que no estén sujetos a cambio de masa o desintegración a causa de repetidos calentamientos y enfriamientos.

✓ Varilla de vidrio. Una varilla de vidrio apropiada para agitar la muestra.

✓ Cepillo y brocha. Para limpiar las mallas de los tamices.

⁴⁰ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INVE – 123 – 13. Op. cit.

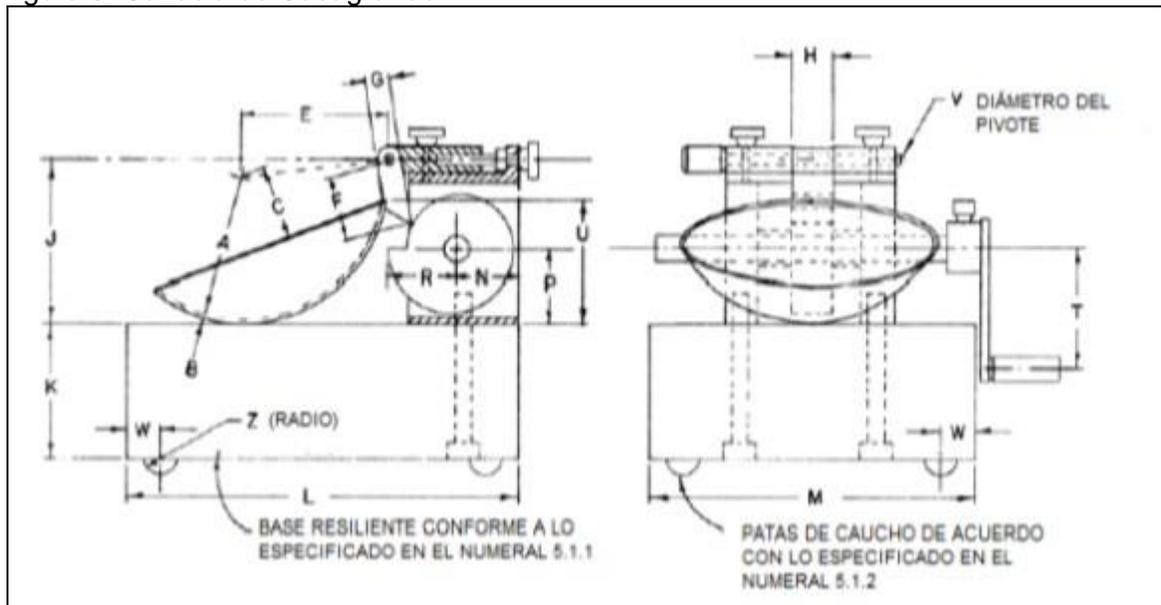
6.4.2 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13.⁴¹

6.4.2.1 Técnicas. Para realizar este ensayo se aclara que será por el método multipunto, que por lo general es más preciso que el de un solo punto. Se recomienda que aquel se emplee en los casos donde los resultados puedan ser objeto de discusión o cuando se requiera una buena precisión. Se tomaron las muestras del material tanto de la arcilla como de la ceniza volante.

6.4.2.2 Instrumentos.

✓ Aparato del límite líquido. Dispositivo mecánico, consiste en una cazuela de bronce, suspendida de un soporte diseñado para controlar su caída sobre la superficie de un bloque de material resiliente, que sirve como base del aparato.

Figura 5. Cazuela de Casagrande



Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del límite líquido de los suelos. INVE – 125 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

- ✓ Base. Bloque de un material que presente un rebote resiliente entre 77 y 90%.
- ✓ Patas de caucho. Para soportar la base, diseñadas para suministrar aislamiento dinámico de la base con respecto a la superficie de trabajo.
- ✓ Cazuela (copa) de bronce, con una masa de 185 a 215 g incluyendo el soporte de la copa.

⁴¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del límite líquido de los suelos. INVE – 125 – 13. Op. cit.

- ✓ Leva. Diseñada para elevarla copa de manera suave y continúa hasta su altura máxima, sobre una distancia correspondiente a una rotación de la manija de, al menos, 180°.
- ✓ Soporte. Construido de manera que permita el ajuste conveniente y seguro de la altura de caída de la cazuela a 10 mm (0.394”).
- ✓ Ranurador. Herramienta plana hecha de plástico o de un metal no corrosivo.
- ✓ Calibrador. Bloque metálico para ajustar la altura de caída libre de la cazuela. No debe ser menos a 10 mm (3/8”) de ancho y sin biseles o curvaturas.
- ✓ Recipientes para la determinación de la humedad. Recipientes pequeños, hechos de un material resistente a la corrosión, con tapas de ajuste de precisión. Se pueden usar latas de aluminio o de acero inoxidable de 25.4 mm (1”) de altura por 50.8 mm (2”) de diámetro.
- ✓ Balanza. Con legibilidad de 0.01 g.
- ✓ Espátula. Una espátula de hoja flexible de unos 75 a 100 mm (3 a 4”) de longitud y 20 mm (3/4”) de ancho.
- ✓ Horno. Un horno termostáticamente controlado para el secado de las muestras, capa de mantener temperaturas de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).

6.4.3 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13.⁴²

6.4.3.1 Técnicas. Para el desarrollo de este ensayo se tomaron muestras de suelo y ceniza volante con el fin de determinar el límite plástico y el índice de plasticidad de las muestras. Sin embargo, es pertinente aclarar que las muestras para la elaboración de este ensayo son las mismas del material preparado para la determinación del límite líquido.

6.4.3.2 Instrumentos.

- ✓ Placa de vidrio esmerilado-De tamaño suficiente para formar cilindros de suelo (rollos) en el ensayo.
- ✓ Aparato de enrollamiento para determinar el límite plástico (opcional) – Un aparato hecho de acrílico.

⁴² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. INVE – 126 – 13. Op. cit.

- ✓ Papel para el aparato de enrollamiento- Papel mate que impida la adhesión de materias extrañas al suelo (fibras, fragmentos de papel, etc) durante el proceso de enrollado. Este papel deberá adherirse firmemente a las placas superior e inferior.
- ✓ Espátula – De hoja flexible, de unos 10 a 13 cm (4 a 5”) de longitud y 2 cm (3/4”) de ancho.
- ✓ Cápsula para evaporación-De porcelana, o similar, de 115 mm (4 ½”) de diámetro, para mezcla y almacenamiento de las muestras de suelo.
- ✓ Balanza- de 100 g de capacidad, con legibilidad a 0.01 g.
- ✓ Cápsulas para la determinación de humedad.
- ✓ Botella plástica- Con un dispositivo adaptado en su boca para aplicar agua en forma de rocío.
- ✓ Horno- Termostáticamente controlado, regulable a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ($230 \pm 9^{\circ}\text{F}$).
- ✓ Tamiz- No 40
- ✓ Agua- Se puede emplear agua destilada o desmineralizada.

6.4.4 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13.⁴³

6.4.4.1 Técnicas. Esta norma indica el procedimiento para determinar el valor de azul de metileno de la fracción que pasa el tamiz de 4.75 mm (No 4) de la mezcla total de agregados.

6.4.4.2 Instrumentos.

- ✓ Bureta-Con una capacidad de, por lo menos, 50 ml con graduaciones de 0.1.
- ✓ Papel de Filtro Whatman No 20.
- ✓ Varilla de vidrio-De aproximadamente 250 mm (10”) de largo y 8mm (0.3”) de diámetro.
- ✓ Agitador de paletas- Con velocidad de rotación variable y regulable hasta 600 ± 60 rpm con tres o cuatro paleas agitadoras de 75 ± 10 mm de diámetro.

⁴³ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales. INVE – 235 – 13. Op. cit.

- ✓ Balanza- De 500 g de capacidad, con una precisión de ± 0.1 % de la masa de la muestra de ensayo.
- ✓ Cronómetro- con una precisión de 1 segundo.
- ✓ Tamiz de ensayo- con aberturas de 4.75 mm (No 4)
- ✓ Tres vasos de precipitados-De vidrio o de plástico, con una capacidad aproximada de 1 litro.
- ✓ Matraz volumétrico-con capacidad de 1 litro.
- ✓ Horno-Con ventilación forzada, termostáticamente controlado, capaz de mantener la temperatura a $110 \pm 5^\circ \text{C}$ ($230 \pm 9^\circ \text{F}$).
- ✓ Agua destilada o desmineralizada.
- ✓ Espátula y escobilla.
- ✓ Desecador.

6.4.5 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017 2005.⁴⁴

6.4.5.1 Técnicas. Esta norma indica el procedimiento para determinar el valor de resistencia a la compresión en unidades de mampostería o ladrillos que sean macizos, semimacizos o adoquines, los especímenes de ensayo deben ser unidades secas que contengan la altura y el ancho completos de la unidad tal como se usa en el muro o en el enladrillado.

6.4.5.2 Instrumentos. Máquina de ensayo de resistencia a la compresión con una precisión de ± 1.0 % sobre el rango provisto de carga.

6.4.6 Ensayo de módulo de rotura NTC-4017 2005.

6.4.6.1 Técnicas. Esta norma indica el procedimiento para determinar el valor del módulo de rotura en unidades de mampostería o ladrillos que sean macizos, semimacizos⁴⁵ o adoquines, los especímenes de ensayo deben ser unidades secas que contengan la altura y el ancho completos de la unidad tal como se usa en el muro o en el enladrillado preferiblemente su lado plano hacia abajo.

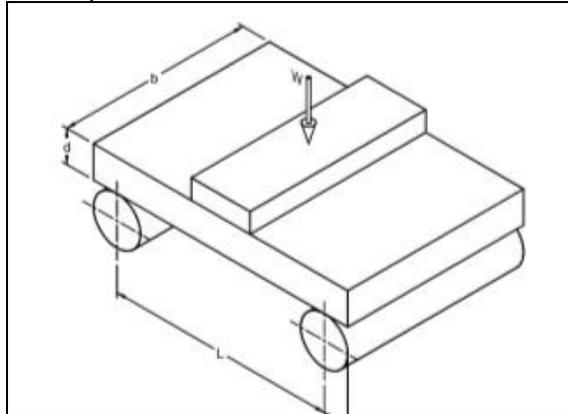
⁴⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Op. cit., p. 6.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 4.

6.4.6.2 Instrumentos.

- ✓ Máquina de ensayo de módulo de rotura o resistencia a la flexión.
- ✓ Soportes barras sólidas de acero de diámetro 25,4 mm \pm 1,0 mm cuyo centro debe estar colocado a 12,5 mm \pm 2,0 mm de cada borde del espécimen.

Figura 6. Postura espécimen para módulo de rotura



Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. p. 4.

6.4.7 Ensayo de absorción de agua NTC-4017 2005.⁴⁶ Técnicas. Esta norma indica el procedimiento para determinar el valor de absorción de agua de unidades de mampostería o ladrillos que sean macizos, semimacizos o adoquines luego de ser dejados en inmersión total en agua durante 24 horas continuas.

6.4.7.1 Instrumentos.

- ✓ Piscina para muestras de concreto o bloques de arcilla.
- ✓ Balanza- Con Kg de capacidad, con una precisión de \pm 0.1 % de la masa de la muestra de ensayo.

6.4.8 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC-4017 2005.⁴⁷

6.4.8.1 Técnicas. Esta norma indica el procedimiento para determinar el valor de absorción de agua de unidades de mampostería o ladrillos que sean macizos, semimacizos o adoquines luego de ser colocado por una cara en inmersión en una lámina de agua de 2 cm de altura durante 1 minuto continuo.

⁴⁶ Ibíd., p. 9.

⁴⁷ Ibíd., p. 14.

6.4.8.2 Instrumentos.

- ✓ Recipiente bandejas o contenedores de por lo menos 200 mm de longitud por 150 mm de ancho y nivelada cuando se ensaye con un nivel de burbuja.
- ✓ Cronómetro con indicación de tiempo en segundos y con precisión de 1s.
- ✓ Balanza- Con una capacidad no inferior a 3.000 g de capacidad y sensibilidad de 0,5 g.

6.5 FASES DE INVESTIGACIÓN

✓ FASE 1. Caracterización de las propiedades del suelo fino (arcilla) y propiedades físicas de la ceniza volante.

- Actividad 1.1 Secado de los materiales en el horno a temperatura constante por 24 horas.
- Actividad 1.2 Realizar el ensayo de granulometría por hidrómetro de la arcilla y ceniza volante para conocer el tamaño de las partículas.
- Actividad 1.3 Realizar el ensayo de límite líquido de los suelos para determinar el valor del límite líquido de la arcilla y ceniza volante.
- Actividad 1.4 Realizar el ensayo de límite plástico e índice de plasticidad de los suelos para determinar el valor en la arcilla y la ceniza volante.
- Actividad 1.5 Realizar el ensayo de valor de azul de metileno en agregados finos para determinar el valor de material orgánico en la arcilla y la ceniza volante.
- Actividad 1.6 Realizar el ensayo de difracción de rayos x (DRX) de la arcilla y ceniza volante para determinar las fases y porcentaje de contenido amorfo, éste será realizado en el laboratorio certificado del IGAC.

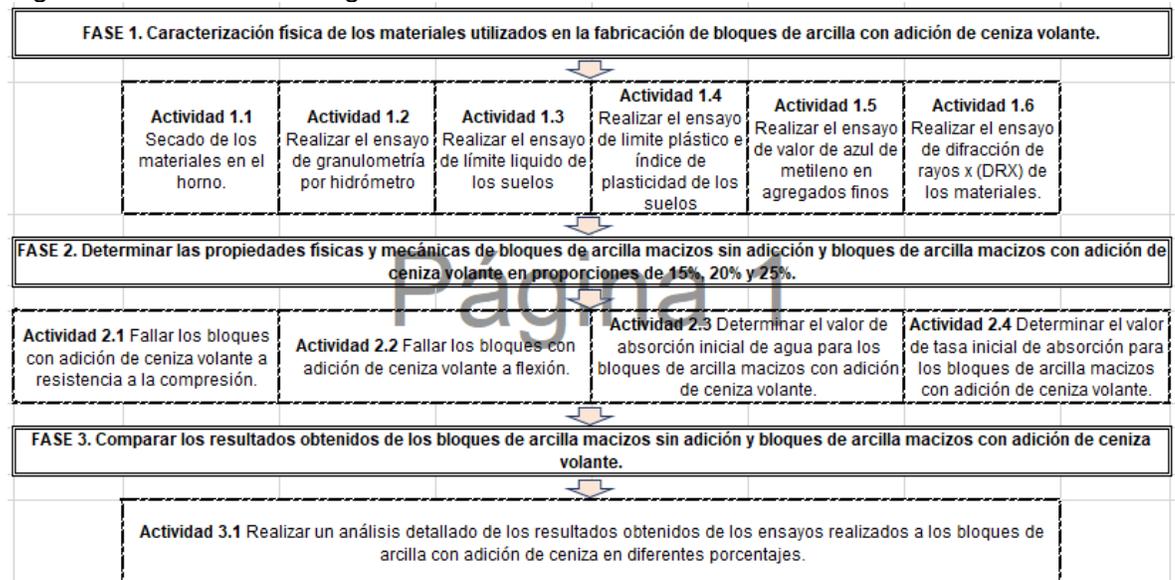
✓ FASE 2. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de bloques de arcilla macizos sin adicción y bloques de arcilla macizos con adicción de ceniza volante en proporciones de 15%, 20% y 25%.

- Actividad 2.1 Fallar los bloques con adicción de ceniza volante a resistencia a la compresión en la máquina universal con sus respectivos porcentajes de adicción, registrando los resultados obtenidos.

- Actividad 2.2 Fallar los bloques con adición de ceniza volante a flexión en la máquina universal con sus respectivos porcentajes de adición, registrando los resultados obtenidos.
 - Actividad 2.3 Determinar el valor de absorción inicial de agua para los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante.
 - Actividad 2.4 Determinar el valor de tasa inicial de absorción para los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante.
- ✓ FASE 3. Comparar los resultados obtenidos de los bloques de arcilla macizos sin adición y bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante.
- Actividad 3.1 Realizar un análisis detallado de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los bloques de arcilla con adición de ceniza en diferentes porcentajes.

En la figura 7 relacionada a continuación se ilustra en forma gráfica las fases de investigación:

Figura 7. Fases de Investigación



Fuente: autores.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ARCILLA

7.1.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos por el método del hidrómetro INV E – 123 – 13. Se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua, cuando un espécimen se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Por simplicidad, se supone que todas las partículas son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, este análisis por hidrómetro es efectivo para separar las fracciones de suelo hasta un tamaño de aproximadamente 0.5 μm .⁴⁸

El ensayo de granulometría por hidrómetro se realiza a suelos que contengan tamaño de granos pequeños como lo es la arcilla. Para poder determinar este ensayo nos basamos de la Norma Invias, Título E 124.

El ensayo hidrométrico tiene como objetivo obtener una curva granulométrica de una muestra de suelo fino. Para realizar la curva granulométrica se debe obtener el porcentaje de suelo en suspensión y el diámetro de las partículas. Sin embargo, a los resultados obtenidos se les debe realizar las correcciones relacionadas a continuación:

7.1.2 Corrección de menisco. La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado, se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. El hidrómetro utilizado para esta prueba fue el numero 152 H, dándonos como valor 1 g/litro para la corrección de menisco.⁴⁹

7.1.3 Corrección de defloculante o cero. La adición de un agente de floculante produce aumento en la densidad del líquido y obliga a realizar una corrección a la lectura del hidrómetro observado. Para esta prueba se le aplicó defloculante conocido como HEXAMETAFOSFATO DE SODIO. A continuación, se muestra la fórmula para calcular la corrección de defloculante.⁵⁰

$$Cd = T + Cm \pm Ct$$

Donde:

⁴⁸ DAS, Braja M. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México: International Thomson Editores, 2001. p. 96.

⁴⁹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. I.N.V. E – 124 – 07. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2007. Numeral 7.2

⁵⁰ Ibíd., Numeral 7.4

T = Lectura del hidrómetro en agua con agente de floculante
Cm = corrección por menisco

Ct= corrección de temperatura

7.1.4 Corrección de temperatura. Se le realiza corrección por temperatura a todos los valores obtenidos con el hidrómetro utilizando la fórmula que se presenta a continuación. Cabe aclarar que el valor de esta corrección puede ser negativo o positivo debido a la temperatura de la suspensión utilizada durante el ensayo.⁵¹

$$Ct = - 4.85 + 0.25 t$$

En la realización de este ensayo, se requirió de una suspensión compuesta de agua y de suelo, el agua utilizada fue una solución de 40 gramos de Hexametafostato de sodio que equivalen a 125 ml por 1 litro de agua teniendo una temperatura de 20°C; por otro lado, para la preparación de la masa se requieren 50 gramos del material (Arcilla) pasados por tamiz No. 200.⁵²

Luego de tener la solución y la muestra tamizada se procede a realizar la mezcla donde se coloca los 50 gramos del material en los 125 ml de solución en un cilindro, se agita y se deja en suspensión por 24 horas, tal como se evidencia en la Figura 8 Ensayo de granulometría por hidrómetro, luego de haber transcurrido un día, un minuto antes de comenzar el ensayo se toma el cilindro y se tapa con la mano agitando la suspensión con el objetivo de remover todos los sedimentos del fondo, esto realizándolo por un minuto y se deja la suspensión en un lugar estable para comenzar a tomar las lecturas. Estas fueron tomadas en un tiempo establecido de 1, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180 y 1440 minutos.⁵³ En la Tabla 4. Datos del ensayo de hidrometría para la arcilla, se evidencia los datos iniciales para el cálculo de los resultados del laboratorio.

⁵¹ *Ibíd.*, Numeral 7.3

⁵² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INVE – 123 – 13. Op. cit.

⁵³ *Ibíd.*

Figura 8. Ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: autores.

Tabla 4. Datos del ensayo de hidrometría para la arcilla

HORA	TIEMPO (Min)	LECTURA DEL HIDROMETRO (gr/litro)
9:33 a. m.	1	41,3
9:35 a. m.	2	35
9:40 a. m.	5	33
9:55 a. m.	15	25
10:25 a. m.	30	21
11:25 a. m.	60	17
12:25 p. m.	120	16
1:25 p. m.	180	15
2:25 p. m.	240	14
3:25 p. m.	300	13
9:33 p. m.	720	12
9:33 a. m.	1440	11

Fuente: autores.

Tabla 5. Valores para correcciones de resultados para la arcilla

Lectura Hidrómetro con defoculante	t'	6
Corrección por temperatura	Ct	-0,1
Corrección por menisco	Cm	1
Corrección por defoculante	Cd	6,9
Temperatura	T	19
Densidad de solidos	Gs	2,5
Corrección gravedad específica	a	1,03
Peso del suelo	Ws	50

Fuente: autores.

Con los datos iniciales relacionados anteriormente se procedió a calcular el tamaño de las partículas en la muestra de arcilla, arrojando los resultados que se evidencian en la Tabla 6. Resultados ensayo hidrometría para arcilla.

Tabla 6. Resultados ensayo hidrometría para arcilla

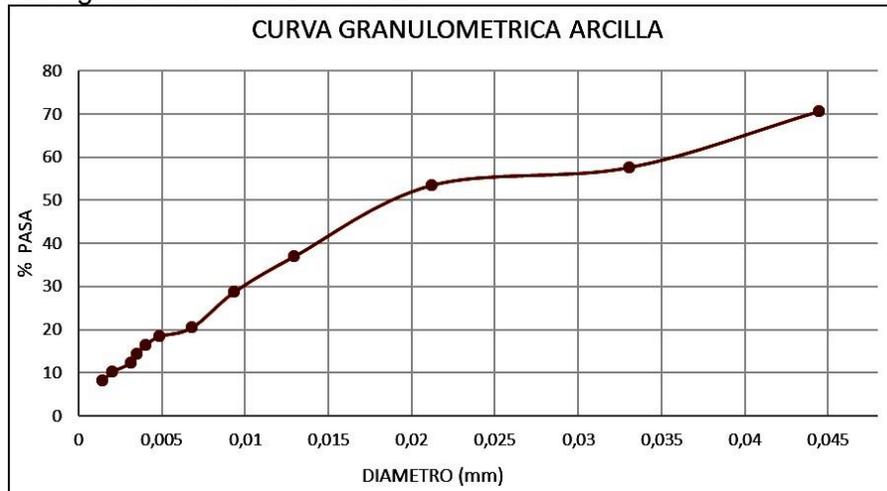
HORA	TIEMPO (Min)	LECTURA DEL HIDROMETRO (gr/litro)	T °C	Rcp	% Pasa	R	L	K	D
9:33 a. m.	1	41,3	19	34,3	70,658	42,3	9,4	0,01449	0,044425
9:35 a. m.	2	35	19	28	57,68	36	10,4	0,01449	0,033042
9:40 a. m.	5	33	19	26	53,56	34	10,7	0,01449	0,021197
9:55 a. m.	15	25	19	18	37,08	26	12	0,01449	0,01296
10:25 a. m.	30	21	19	14	28,84	22	12,5	0,01449	0,009353
11:25 a. m.	60	17	19	10	20,6	18	13,3	0,01449	0,006822
12:25 p. m.	120	16	19	9	18,54	17	13,5	0,01449	0,00486
1:25 p. m.	180	15	19	8	16,48	16	13,7	0,01449	0,003998
2:25 p. m.	240	14	19	7	14,42	15	13,8	0,01449	0,003475
3:25 p. m.	300	13	19	6	12,36	14	14	0,01449	0,00313
9:33 p. m.	720	12	19	5	10,3	13	14,2	0,01449	0,002035
9:33 a. m.	1440	11	19	4	8,24	12	14,3	0,01449	0,001444

Fuente: autores.

El hidrómetro se basa en la Ley de Stokes, que relaciona la velocidad de caída de una partícula esférica con su diámetro, la curva granulométrica hace referencia únicamente a la fracción fina de la muestra. Para este ensayo, se realizó el procedimiento de granulometría por hidrómetro.

Asimismo, se realizó la prueba con un agente dispersante conocido como Hexametastato de Sodio. Esto con el fin de separar las partículas del suelo fino que en este caso sería Arcilla permitiendo realizar los cálculos adecuados para el diámetro de las partículas

Figura 9. Curva granulométrica de la arcilla



Fuente: autores.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el ensayo de granulometría por hidrómetro para la arcilla se puede evidenciar que el tamaño de partículas contenidas está entre 0,04442 mm y 0,00144 mm, valores menores a la apertura del tamiz N° 200 de 0,075 mm, lo que nos da confiabilidad en los resultados obtenidos en el laboratorio. En la Figura 9. Curva granulométrica de la arcilla se evidencia el tamaño de las partículas obtenidas como resultado del ensayo.

A continuación, se realizó el ensayo de granulometría por hidrómetro para la ceniza volante en la Tabla 7. Datos del ensayo de hidrometría para ceniza volante se evidencia los datos iniciales para el cálculo de los resultados del laboratorio.

Tabla 7. Datos del ensayo de hidrometría para ceniza volante

HORA	TIEMPO (Min)	LECTURA DEL HIDROMETRO (gr/litro)
9:18 a. m.	1	41
9:20 a. m.	2	38
9:25 a. m.	5	35
9:40 a. m.	15	32
10:10 a. m.	30	30
11:10 a. m.	60	28
12:10 p. m.	120	27
1:10 p. m.	180	26
2:10 p. m.	240	25
3:10 p. m.	300	24
9:18 p. m.	720	23
9:18 a. m.	1440	20

Fuente: autores.

Tabla 8. Valores para correcciones de resultados para la ceniza volante

Lectura Hidrómetro con defoculante	t'	6
Corrección por temperatura	Ct	-0,1
Corrección por menisco	Cm	1
Corrección por defoculante	Cd	6,9
Temperatura	T	19
Densidad de solidos	Gs	2,6
Corrección gravedad específica	a	1,01
Peso del suelo	Ws	50

Fuente: autores.

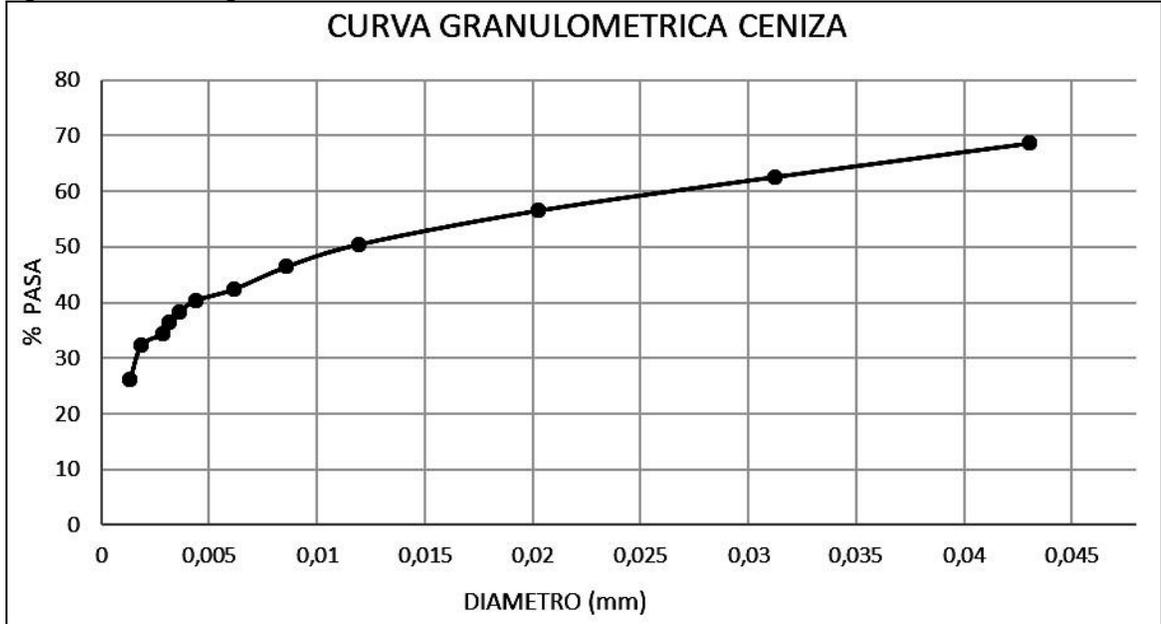
Con los datos iniciales relacionados anteriormente se procedió a calcular el tamaño de las partículas en la muestra de ceniza volante, arrojando los resultados que se evidencian en la Tabla 9. Resultados ensayo hidrometría para ceniza volante.

Tabla 9. Resultados ensayo hidrometría para ceniza volante.

HORA	TIEMPO (Min)	LECTURA DEL HIDROMETRO	T °C	Rcp	% Pasa	R	L	K	D
9:18 a. m.	1	41	19	34	68,68	42	9,4	0,01403	0,043015
9:20 a. m.	2	38	19	31	62,62	39	9,9	0,01403	0,031215
9:25 a. m.	5	35	19	28	56,56	36	10,4	0,01403	0,020234
9:40 a. m.	15	32	19	25	50,5	33	10,9	0,01403	0,01196
10:10 a. m.	30	30	19	23	46,46	31	11,2	0,01403	0,008572
11:10 a. m.	60	28	19	21	42,42	29	11,5	0,01403	0,006142
12:10 p. m.	120	27	19	20	40,4	28	11,7	0,01403	0,004381
1:10 p. m.	180	26	19	19	38,38	27	11,9	0,01403	0,003607
2:10 p. m.	240	25	19	18	36,36	26	12	0,01403	0,003137
3:10 p. m.	300	24	19	17	34,34	25	12,2	0,01403	0,002829
9:18 p. m.	720	23	19	16	32,32	24	12,4	0,01403	0,001841
9:18 a. m.	1440	20	19	13	26,26	21	12,9	0,01403	0,001328

Fuente: autores.

Figura 10. Curva granulométrica de la ceniza volante



Fuente: autores.

De acuerdo con los resultados obtenidos por el ensayo de granulometría por hidrómetro para la ceniza volante se puede evidenciar que el tamaño de partículas contenidas está entre 0,04301 mm y 0,00132 mm, valores menores a la apertura del tamiz N° 200 de 0,075 mm, lo que nos da confiabilidad en los resultados obtenidos en el laboratorio. En la Figura 10. Curva granulométrica de la ceniza volante se evidencia el tamaño de las partículas obtenidas como resultado del ensayo.

7.1.5 Determinación de los Límites de Atterberg. Se realizó el ensayo sobre la muestra de arcilla y ceniza volante para obtener el límite líquido (LL) y plástico (LP), para obtener el valor del límite líquido se realizó el ensayo de Casagrande, el cual consiste en agregarle agua destilada a la muestra mezclándola hasta homogenizarla, se incorpora la mezcla homogénea en la máquina de Casagrande, luego se separa en dos mitades con un acanalador y finalmente se gira la manija para darle golpes a la muestra.

7.1.6 Determinación del límite líquido de los suelos INV E – 125 – 13. Este ensayo se basa en la determinación del límite líquido de la fracción fina de los suelos, límite que es el contenido de humedad en porcentaje cuando este se halla justo en el término entre el estado líquido y el estado plástico.⁵⁴ En la Tabla 10. Resultados ensayo del límite líquido para arcilla y Tabla 11. Resultados ensayo del límite líquido para ceniza volante se evidencian los resultados obtenidos del ensayo.

⁵⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación del límite líquido de los suelos. INVE – 125 – 13. Op. cit.

Tabla 10. Resultados ensayo del límite líquido para arcilla.

LIMITE LIQUIDO			
MATERIAL	ARCILLA		
N° RECIPIENTE	L82	L101	L14
N°GOLPES	33	25	16
P1	35,15	31,97	28,28
P2	28,09	25,88	24,78
P3	19,01	18,58	18,47
PESO AGUA	7,06	6,09	3,5
% AGUA	20,09	19,05	12,38
CONTENIDO DE HUMEDAD	79,91	80,95	87,62
LL	82,64	80,95	83,02

Fuente: autores.

Tabla 11. Resultados ensayo del límite líquido para ceniza volante.

LIMITE LIQUIDO			
MATERIAL	CENIZA VOLANTE		
N° RECIPIENTE	A133	A103	40
N°GOLPES	33	25	17
P1	46,17	50,5	54,09
P2	30,71	37,03	41,46
P3	13,3	13	12,75
PESO AGUA	15,46	13,47	12,63
% AGUA	33,48	26,67	23,35
CONTENIDO DE HUMEDAD	66,52	73,33	76,65
LL	68,79	73,33	73,16

Fuente: autores.

7.1.7 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos INV E 126-13. Esta norma permite determinar el límite plástico de la fracción fina de los suelos mediante la realización del laboratorio en el cual se el contenido más bajo de agua para que la muestra sea moldeable para permanecer en estado plástico. El índice de plasticidad de un suelo es el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, donde el material está en estado plástico.⁵⁵ En la Tabla 12. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para arcilla y Tabla 13. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para ceniza volante se evidencian los resultados obtenidos del ensayo.

⁵⁵ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. INVE – 126 – 13. Op. cit.

Tabla 12. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para arcilla.

LIMITE PLASTICO		
MATERIAL	ARCILLA	
N° RECIPIENTE	L74	L24
P1	25,83	26,23
P2	20,24	20,37
P3	19,48	18,8
PESO AGUA	5,59	5,86
% AGUA	21,64	22,34
CONTENIDO DE HUMEDAD	78,36	77,66

Fuente: autores.

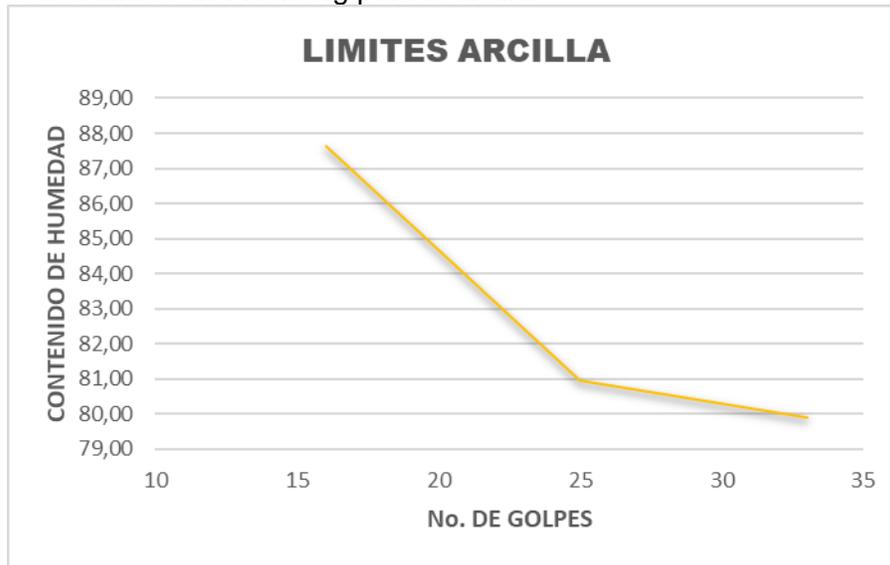
Tabla 13. Resultados ensayo del límite plástico e índice de plasticidad para ceniza volante.

LIMITE PLASTICO		
MATERIAL	CENIZA VOLANTE	
N° RECIPIENTE	A133	A103
P1	46,17	47,5
P2	30,71	37,03
P3	13,3	13
PESO AGUA	15,46	10,47
% AGUA	33,48	22,04
CONTENIDO DE HUMEDAD	66,52	77,96

Fuente: autores.

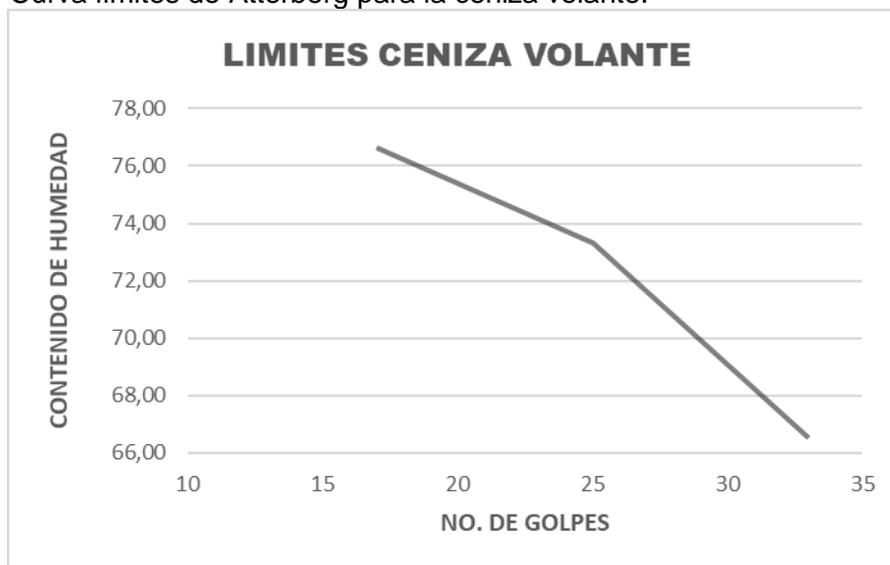
Luego de la realización de los ensayos de límites de Atterberg se lograron obtener las gráficas evidenciadas en la Figura 11. Curva límites de Atterberg para la arcilla y Figura 12. Curva límites de Atterberg para la ceniza volante relacionadas a continuación.

Figura 11. Curva límites de Atterberg para la arcilla.



Fuente: autores.

Figura 12. Curva límites de Atterberg para la ceniza volante.



Fuente: autores.

Así mismo con base en los resultados obtenidos de los ensayos relacionados anteriormente se logró determinar los límites de Atterberg para los materiales de estudio arcilla y ceniza volante tal como se evidencia en la Tabla 14. Resultados de límites de Atterberg para arcilla y Tabla 15. Resultados de límites de Atterberg para ceniza volante.

Tabla 14. Resultados de límites de Atterberg para arcilla.

LIMITES DE ATTERBERG PARA ARCILLA					
LIMITE LIQUIDO		LIMITE PLASTICO		INDICE DE PLASTICIDAD	
LL	80,95	LP	78,01	IP	2,94

Fuente: autores.

Tabla 15. Resultados de límites de Atterberg para ceniza volante.

LIMITES DE ATTERBERG PARA CENIZA VOLANTE					
LIMITE LIQUIDO		LIMITE PLASTICO		INDICE DE PLASTICIDAD	
LL	73,33	LP	72,24	IP	1,09

Fuente: autores.

Según los resultados obtenidos para la obtención de los límites de Atterberg para las muestras en estudio la arcilla tiene un límite líquido (LL) de 80.95 % y un índice de plasticidad de 78%, por lo que se puede concluir que es una arcilla de alta plasticidad según el sistema de clasificación unitario de suelos (USCS), a su vez los resultados de la muestra de ceniza volante nos determinan un límite líquido (LL) de 73.32 % y un índice de plasticidad de 72.23%, lo que indica que la ceniza volante absorbe el agua en porcentajes similares a la arcilla, la arcilla y la ceniza volante son materiales con una plasticidad muy alta. Propiedad que tienen los materiales de deformarse sin que se rompan, lo que es ideal para la realización de los ladrillos ya que los dos materiales se comportan modo similar.

7.1.8 Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales I.N.V.E – 235-13.⁵⁶ El ensayo de azul de metileno se emplea para estimar la cantidad de arcilla dañina y materia orgánica presente en una muestra, este ensayo se basa en la Norma Invías Título E 235, al realizar este ensayo se tomó 50 gramos de arcilla procediendo a tamizar por la malla No 200. Consiguiente a esto, se coloca 10 gramos de muestra pasante en un vaso volumétrico tipo Griffin de 500 ml añadiéndole a este 30 ml de agua destilada y batiendo la muestra hasta formar una lechada.

Obteniendo la lechada, se agrega con la bureta 0,5 ml de solución de azul de metileno agitando sobre un minuto la mezcla, luego de esto con la varilla agitadora de vidrio se extrae una gota de lechada dejándola caer al papel filtro observando que reacción tiene este. Se debe formar un anillo azul en el papel, al no formarse nada se deberá incrementar la cantidad de solución hasta llegar a formar la aureola azul. Cabe recordar que cada vez que se agregue la cantidad de solución se deberá agitar. Se realizaron dos intentos en el ensayo. A continuación, en la Tabla 16. Resultados de valor de azul de metileno para la arcilla y Tabla 17. Resultados de valor de azul de metileno para la ceniza volante se muestran los datos obtenidos durante la realización y del ensayo:

⁵⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales. INVE – 235 – 13. Op. cit.

Tabla 16. Resultados de valor de azul de metileno para la arcilla.

INTENTOS	MUESTRA	AGUA (ml)	ANILLO AZUL
1	10 GRAMOS	5	NO CUMPLE
2	10 GRAMOS	10	NO CUMPLE
3	10 GRAMOS	15	NO CUMPLE
4	10 GRAMOS	20	NO CUMPLE
5	10 GRAMOS	25	NO CUMPLE
6	10 GRAMOS	30	NO CUMPLE
7	10 GRAMOS	35	NO CUMPLE
8	10 GRAMOS	40	NO CUMPLE
9	10 GRAMOS	45	NO CUMPLE
10	10 GRAMOS	50	NO CUMPLE
11	10 GRAMOS	55	NO CUMPLE
12	10 GRAMOS	60	NO CUMPLE
13	10 GRAMOS	65	CUMPLE

Fuente: autores.

El valor de azul de metileno cumple al aplicar 65 ml al papel filtro utilizado en la prueba. Al aplicar esta cantidad de agua con el líquido de prueba se forma la aureola esperada como resultado de la muestra según la norma.

Tabla 17. Resultados de valor de azul de metileno para la ceniza volante.

INTENTOS	MUESTRA	AGUA (ml)	ANILLO AZUL
1	10 GRAMOS	5	NO CUMPLE
2	10 GRAMOS	10	NO CUMPLE
3	10 GRAMOS	15	NO CUMPLE
4	10 GRAMOS	20	NO CUMPLE
5	10 GRAMOS	25	NO CUMPLE
6	10 GRAMOS	30	NO CUMPLE
7	10 GRAMOS	35	NO CUMPLE
8	10 GRAMOS	40	NO CUMPLE
9	10 GRAMOS	45	NO CUMPLE
10	10 GRAMOS	50	NO CUMPLE
11	10 GRAMOS	55	CUMPLE

Fuente: autores.

El valor de azul de metileno cumple al aplicar 55 ml al papel filtro utilizado en la prueba, ya que al aplicar esta cantidad de agua con el líquido de prueba se forma la aureola esperada como resultado de la muestra según la norma.

7.1.9 Ensayo de Difracción de rayos X (DRX). La difracción de rayos-x es un método de alta tecnología no destructivo para el análisis de una amplia gama de materiales, incluso fluidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores.⁵⁷ La aplicación fundamental de la Difracción de Rayos X es la identificación cualitativa de la composición mineralógica de una muestra cristalina.

La difracción de rayos x (DRX), es una técnica que sirve para determinar la estructura detallada de un material, en este caso la arcilla y la ceniza volante; este ensayo se realizó en el laboratorio nacional de suelos del INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZZI (IGAC) bajo el código M-08 análisis mineralógico muestra total por Drx, los resultados obtenidos en el laboratorio se relacionan en la Tabla 18. Constitución de mineralogía de las muestras.

Tabla 18. Constitución de mineralogía de las muestras.

IGAC												FECHA DE REALIZACIÓN	
RESULTADOS MINERALOGIA MUESTRA TOTAL POR DRX M-08												AAAA-MM-DD	
LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS												2018-07-06	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO CAMILA CASTILLO FONSECA										No. SOLICITUD		3043_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO / Bogotá D.C. - Bogotá, D.C.										No. DE LABORATORIO		MM1-30517-MM1-30518	
SUPLEMENTO DE RESULTADOS DE FECHA DIRECCIÓN DEL CLIENTE CARRERA 65 #4B-48										IDENTIFICACIÓN CAMPO		ARCILLA-CENIZA VOLANTE	
# Lab.	Id Campo (Perfil)	Profundidad (cm)	Caolinita	Clorita	Cristobalita	Cuarzo	Dolomita	Feldespatos	Goetita	Halita	Hematita	Micas	Montmorillonita (Esmectitas)
MM1-30517	ARCILLA	-	+	-	Tr	++++	-	-	-	+	-	-	Tr
MM1-30518	CENIZA VOLANTE	-	+	Tr	-	++++	Tr	Tr	Tr	-	Tr	Tr	-
EQUIPOS UTILIZADOS													
Difractómetro de Rayos X (M105)													
OBSERVACIONES													
Las micas corresponden al mineral Moscovita													

Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Resultados mineralogía muestra total por DRX [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet : <URL : http://www2.igac.gov.co/igac_web/faqs_user/faqs.jsp?id_categoria=22>.

Para la arcilla se analiza que el material está compuesto por más del 50 % de Cuarzo (SiO₂), al igual presenta aproximadamente de un 5 % a un 15 % de Caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), lo cual hace que el material presente un comportamiento menos expansivo y que puede estar asociada a la materia prima favoreciendo el proceso de fabricación de los bloques. Por otro lado, se encuentra de un 5 % a un 15% de Halita (NaCl), material no influyente en el proceso de fabricación de bloques, finalmente se presenta menos de un 5% de trazas compuestas por montmorillonita que es un tipo de filosilicato con capacidad de hinchamiento cuando entra en contacto con el agua.

De igual forma para la ceniza volante, se encontró que el material está compuesto por más del 50% de Cuarzo (SiO₂) y con presencia de un 5 % a un 15% de Caolinita (Al₂Si₂O₅(OH)₄), pero a su vez cuenta con más contenido de trazas en diferentes materiales como: Clorita, Dolomita (CO₃)₂, Feldespatos, Goetita,

⁵⁷ SIDOR.COM. La difracción de rayos X en la industria siderúrgica [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.sidor.com/noticias-sidor/noticias/104-noticiencias/896-la-difraccion-de-rayos-x-en-la-industria-siderurgica>>.

Hematita (Fe_2O_3) y Micas ($\text{AC}_{2-3}\text{T}_4\text{O}_{10}\text{X}_2$) siendo estas últimas material mineralógico que corresponde al mineral Moscovita materiales que hacen parte de la corteza terrestre.

7.2 ELABORACIÓN DE LOS BLOQUES MACIZOS CON ADICION DE CENIZA VOLANTE

7.2.1 Sintetización del material para realización de bloques de arcilla con adición de ceniza volante. Esta fase corresponde a la Sinterización del material de arcilla con dosificaciones de ceniza volante, se siguió un mismo diseño para los tres porcentajes con el fin de tener control de las variables producidas en laboratorio y lograr optimizar la mezcla para cada dosificación teniendo en cuenta la manejabilidad de los materiales. Este proceso se describe a continuación:

✓ Pesar las cantidades de material tanto de arcilla como de ceniza volante con el fin de lograr unificar el material y luego llegar a realizar una aglomeración del material conjunto con adición de agua tal como se evidencia en la Figura 13. Dosificación de arcilla ceniza volante.

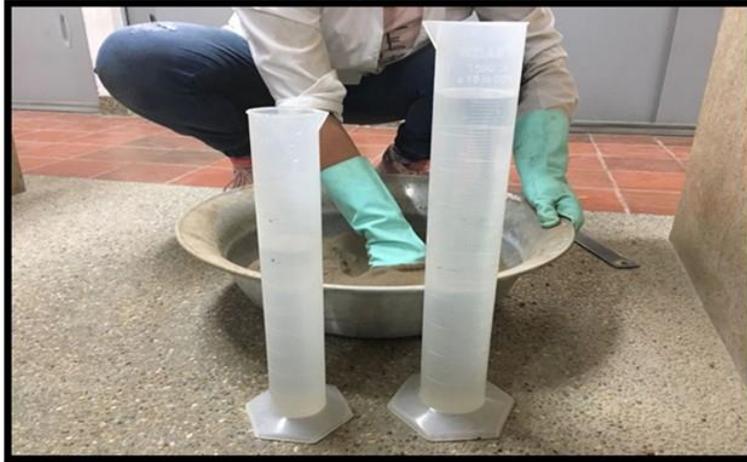
Figura 13. Dosificación de arcilla ceniza volante.



Fuente: autores.

✓ Se procede a mezclar en un recipiente las cantidades anteriormente dosificadas para crear una aglomeración con agua como se evidencia en la Figura 14. Aglomeración del material con agua.

Figura 14. Aglomeración del material con agua.



Fuente: autores.

✓ En la mezcladora se procede a agregar el contenido de arcilla con adición de ceniza volante, se mezcla a velocidad (139RPM) por 1 minuto y medio.

✓ Luego de tener 1 minuto y medio transcurrido en la mezcladora con el raspador se procede a retirar todo el material adherido en el fondo durante 30 segundos.

✓ Luego de esto, se mezcla nuevamente el material a velocidad (285 RPM), durante 1 minuto como se evidencia en la Figura 15. Mezcla del material aglomerado.

Figura 15. Mezcla del material aglomerado.



Fuente: autores.

✓ Luego de la aglomeración del material, este se compactó en moldes de dimensiones de 25 cm de largo X 12 cm de ancho y 6 cm de alto (Figura 16) y se aseguró el llenado uniforme de los moldes, evitando así la presencia de vacíos en el material.

De acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente, se procedió a la fabricación de los bloques macizos con adición de ceniza volante, para cada dosificación se realizaron 20 especímenes realizando así en total 60 bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25% como se evidencia en la Figura 17. Bloques de arcilla macizos retirados del molde y expuestos a temperatura ambiente.

Figura 16. Moldes para los bloques.



Fuente: autores.

Figura 17. Bloques de arcilla macizos retirados del molde y expuestos a temperatura ambiente.



Fuente: autores.

7.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión NTC-4017.⁵⁸ Esta norma indica el procedimiento para la Resistencia a la compresión de unidades de mampostería o ladrillos ya sean macizos, semimacizos o adoquines, los cuales deben ser secos que contengan la altura y el ancho completos conforme a las medidas de bloques convencionales.

Para este ensayo se determinó el valor máximo de resistencia a la compresión de quince bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25% contando con cinco unidades por cada porcentaje tal como se recomienda en la norma NTC 4017. A partir de esto se obtuvieron los resultados de la Tabla 19. Resultados obtenidos de resistencia a la compresión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.

Tabla 19. Resultados obtenidos de resistencia a la compresión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.

RESISTENCIA AL COMPRESION BLOQUES CON ADICION			
No. Bloque	% CENIZA	Fuerza KN	Esfuerzo Mpa
1	15	319	11,29
2	15	318	11,26
3	15	317	11,22
4	15	320	11,33
5	15	320	11,33
6	20	488	17,28
7	20	489	17,31
8	20	487	17,24
9	20	488	17,28
10	20	490	17,35
11	25	789	27,93
12	25	788	27,90
13	25	787	27,86
14	25	790	27,97
15	25	790	27,97

Fuente: autores.

⁵⁸ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Op. cit., p. 6.

Tabla 20. Resultados obtenidos de resistencia a la compresión para bloques convencionales.

RESISTENCIA AL COMPRESION BLOQUES CONVENCIONALES			
No. Bloque	% CENIZA	Fuerza KN	Esfuerzo Mpa
1	0	710	25,14
2	0	708	25,07
3	0	711	25,17
4	0	709	25,10
5	0	709	25,10

Fuente: autores.

Luego de la realización del ensayo de resistencia a la compresión de los bloques de arcilla con adición de ceniza volante, se obtuvieron resultados en forma ascendente respecto a sus porcentajes de adición, pues podemos darnos cuenta de que a mayor adición de ceniza volante se obtuvieron mayores valores de resistencia a la compresión siendo el valor máximo obtenido 790 KN fuerza ejercida por la maquina universal para un resultado de 27,92 MPa de esfuerzo recibidos por el espécimen ensayado. Valor óptimo esperado para nuestra investigación pues se tiene como referencia bloques convencionales de ladrillera Santafé que obtuvieron un valor mínimo de resistencia de 708 KN fuerza ejercida para un resultado de 25,07 MPa de esfuerzo obtenido por el espécimen.

7.2.3 Módulo de rotura o resistencia a la flexión NTC 4017.⁵⁹ Esta norma indicia el procedimiento para el ensayo de módulo de rotura o resistencia a la flexión de unidades de mampostería o ladrillos ya sean macizos, semimacizos o adoquines los especímenes de ensayo deben ser unidades secas que contengan la altura y el ancho completos de la unidad tal como se usa en el muro o en el enladrillado preferiblemente su lado plano hacia abajo.

Para este ensayo se determinó el valor máximo de módulo de rotura o resistencia a la flexión de quince bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25% contando con cinco unidades por cada porcentaje tal como se recomienda en la norma NTC 4017. A partir de esto se obtuvieron los resultados de la Tabla 21. Resultados obtenidos de módulo de rotura o resistencia a la flexión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.

⁵⁹ Ibíd., p. 3-4.

Tabla 21. Resultados obtenidos de módulo de rotura o resistencia a la flexión para bloques de arcilla con adición de ceniza volante en porcentajes de 15%, 20% y 25%.

MODULO DE ROTURA BLOQUES CON ADICION			
No. Bloque	% CENIZA	Fuerza KN	Esfuerzo Mpa
1	15	0,36	0,013
2	15	0,37	0,013
3	15	0,35	0,012
4	15	0,37	0,013
5	15	0,38	0,013
6	20	1,33	0,047
7	20	1,34	0,047
8	20	1,34	0,047
9	20	1,32	0,047
10	20	1,35	0,048
11	25	1,66	0,059
12	25	1,66	0,059
13	25	1,64	0,058
14	25	1,65	0,058
15	25	1,67	0,059

Fuente: autores.

Tabla 22. Resultados obtenidos de módulo de rotura o resistencia a la flexión para bloques convencionales.

MODULO DE ROTURA BLOQUES CONVENCIONALES			
No. Bloque	% CENIZA	Fuerza KN	Esfuerzo Mpa
1	0	4,46	0,16
2	0	2,00	0,07
3	0	3,86	0,14
4	0	3,65	0,12
5	0	1,95	0,07

Fuente: autores.

Luego de la realización del ensayo de módulo de rotura de los bloques de arcilla con adición de ceniza volante, se obtuvieron resultados en forma ascendente respecto a sus porcentajes de adición, pues podemos darnos cuenta de que a mayor adición de ceniza volante se obtuvieron mayores valores de resistencia a la compresión siendo el valor máximo obtenido 1,67 KN fuerza ejercida por la máquina para un resultado de 0,059 MPa de esfuerzo recibidos por el espécimen ensayado. Este resultado es un valor óptimo pues es un valor referencia teniendo en cuenta que es un bloque macizo con utilización para mampostería, razón por la cual es poco probable que en algún momento el bloque tenga que fallar a flexión,

sin embargo, se ve reflejado que el bloque con adición de 25 % de ceniza volante cumple muy de cerca un valor obtenido durante el ensayo a los bloques convencionales de 0,07 MPa.

7.2.4 Ensayo de absorción de agua NTC 4017. Este ensayo tiene como objetivo determinar la capacidad de absorción de agua de un material relacionando la masa de la pieza en seco y la masa saturada en agua e inmersión; asimismo, se define como el cociente entre el peso de agua que absorbe y su propio peso cuando está seco.

Este ensayo se realizó con bloques de arcilla sin adición de ceniza volante y con bloques de arcilla con adición de ceniza volante. Principalmente se pesan los ladrillos obteniendo el peso seco de estos, enseguida de esto se sumergen en una piscina durante 24 horas; pasado este tiempo, se extraen del agua los ladrillos, se secan superficialmente y se vuelven a pesar. Esto con el fin de obtener el peso húmedo de cada bloque. A continuación, tenemos la fórmula para saber el valor de absorción de cada bloque, todo esto basado en la NTC 4017.⁶⁰

Figura 18. Fórmula para obtención de absorción NTC4017.

$$\% \text{ ABSORCION} = \frac{W_{SS} - W_S}{W_S} * 100$$

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. Numeral 8.3.2.1.

Donde:

Ws= Peso seco

Wss= Peso húmedo

% = Porcentaje de absorción

⁶⁰ *Ibíd.*, p. 9.

Tabla 23. Datos del ensayo de absorción de agua para bloques con adición de ceniza volante.

UNIDAD		GRAMOS	GRAMOS
BLOQUE FABRICADO	% ADICION	PESO SECO	PESO HUMEDO
1	15	1949,8	2431,6
2	15	1945,7	2428,5
3	15	1952,3	2432,1
4	15	1951,5	2433,8
5	15	1947,8	2430,3
6	20	2020,1	2488,2
7	20	2017,4	2486,4
8	20	2023,1	2491,7
9	20	2019,6	2489,5
10	20	2021,3	2487,3
11	25	2060,5	2509,0
12	25	2063,4	2512,4
13	25	2058,9	2507,3
14	25	2057,6	2508,7
15	25	2061,2	2511,3

Fuente: autores.

Tabla 24. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques con adición de ceniza volante.

BLOQUE FABRICADO	% ADICION	% ABSORCION	PROMEDIO
1	15	24,71	24,72
2	15	24,81	
3	15	24,58	
4	15	24,71	
5	15	24,77	
6	20	23,17	23,18
7	20	23,25	
8	20	23,16	
9	20	23,27	
10	20	23,05	
11	25	21,77	21,81
12	25	21,76	
13	25	21,78	
14	25	21,92	
15	25	21,84	

Fuente: autores.

Tabla 25. Datos del ensayo de absorción de agua para bloques convencionales.

UNIDAD		GRAMOS	GRAMOS
BLOQUE CONVENCIONAL	% ADICION	PESO SECO	PESO HUMEDO
1	0	3352,5	3658,2
2	0	3351,8	3658,4
3	0	3353,4	3655,7
4	0	3352,1	3657,3
5	0	3353,9	3659,6
6	0	3365,7	3654,4
7	0	3366,2	3653,9
8	0	3366,6	3655,2
9	0	3364,8	3735,6
10	0	3365,1	3723,4
11	0	3370,3	3701,4
12	0	3369,9	3702,1
13	0	3370,5	3701,7
14	0	3371,2	3703,2
15	0	3369,7	3701,3

Fuente: autores.

Tabla 26. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques convencionales.

BLOQUE CONVENCIONAL	% ADICION	% ABSORCION	PROMEDIO
1	0	9,12	9,10
2	0	9,15	
3	0	9,01	
4	0	9,10	
5	0	9,11	
6	0	8,58	9,47
7	0	8,55	
8	0	8,57	
9	0	11,02	
10	0	10,65	
11	0	9,82	9,84
12	0	9,86	
13	0	9,83	
14	0	9,85	
15	0	9,84	

Fuente: autores.

Primordialmente determinar el porcentaje de absorción en los bloques o en agregados es de gran importancia pues es una de las propiedades índices más significativas de muchos materiales; asimismo, con este se puede saber cuál es la capacidad que tiene dicho material para absorber agua y establecer correlaciones con el comportamiento que tiene el material.

Al realizar el ensayo con los bloques de arcilla sin adición de ceniza volante, podemos darnos cuenta de que el porcentaje de absorción de estos ladrillos está en un rango promedio de un 9.10% a un 9,84% tal como se evidencia en la Tabla 26. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques convencionales.

En los bloques de arcilla con adición de ceniza volante se obtiene que para una adición del 15% el bloque tiene una capacidad de absorción promedio del 24.72%, para una adición del 20% de ceniza volante tiene una capacidad de absorción promedio de 23.18% y para finalizar con la adición del 25% de ceniza volante el bloque tiene una capacidad promedio de adición del 21.81% tal como se evidencia en la Tabla 24. Resultados del ensayo de absorción de agua para bloques con adición de ceniza volante.

7.2.5 Ensayo de tasa inicial de absorción NTC 4017. Es la capacidad de absorción capilar que tienen las unidades secas, medida durante 1 min; se expresa en g/cm²/min, el ensayo para su obtención está especificado en la NTC 4017. Esta norma recomienda los requisitos mínimos de pre-humedecimiento de las unidades, para su colocación con la tasa inicial de absorción⁶¹.

Para este ensayo se determinó el área de la superficie del material que está en contacto con el agua colocándolo sobre una superficie nivelada, se procede a realizar el espécimen del ensayo a utilizar son 5 cantidades iguales a la original. A partir de esto se obtiene la masa seca y la masa húmeda, teniendo en cuenta que para determinar la tasa inicial de absorción es la diferencia entre la masa inicial y la masa final sobre el área calculada de la muestra. A partir de esto se obtuvieron los resultados que se evidencian en Tabla 27. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques con adición de ceniza volante y en la Tabla 28. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques convencionales.

⁶¹ *Ibíd.*, p. 14.

Tabla 27. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques con adición de ceniza volante.

TASA INICIAL DE ABSORCION - BLOQUE CON ADICION DE CENIZA VOLANTE							
MUESTRA	POCENTAJE DE CENIZA	PESO INICIAL	PESO FINAL 1 min	Ab %	PESO FINAL 24H	CS	TIA
1	15	1985,6	2102,8	5,90	2431,60	3,81	0,27
2	15	1984,1	2101,2	5,90	2428,50	3,80	0,27
3	15	1982,4	2104,4	6,15	2432,10	3,69	0,28
4	15	1983,7	2103,6	6,04	2433,80	3,75	0,28
5	15	1986,3	2102,3	5,84	2430,30	3,83	0,27
6	20	1983,3	2069,9	4,37	2488,20	5,83	0,20
7	20	1980,3	2067,5	4,40	2486,40	5,80	0,20
8	20	1985,2	2068,3	4,19	2491,70	6,10	0,19
9	20	1982,7	2069,4	4,37	2489,50	5,85	0,20
10	20	1981,5	2068,8	4,41	2487,30	5,79	0,20
11	25	1998,0	2075,1	3,86	2509,00	6,63	0,18
12	25	1997,2	2073,8	3,84	2512,40	6,73	0,18
13	25	1999,4	2074,5	3,76	2507,30	6,76	0,17
14	25	1998,3	2073,4	3,76	2508,70	6,80	0,17
15	25	1997,8	2075,2	3,87	2511,30	6,63	0,18

Fuente: autores.

Tabla 28. Resultados del ensayo de tasa inicial de absorción para bloques convencionales.

TASA INICIAL DE ABSORCION - BLOQUE CONVENCIONAL							
MUESTRA	POCENTAJE DE CENIZA	PESO INICIAL	PESO FINAL 1 min	Ab %	PESO FINAL 24H	CS	TIA
L1	LADRILLERA	3349,0	3389,7	1,22	3658,20	7,60	0,09
L2	LADRILLERA	3348,7	3390,2	1,24	3658,40	7,46	0,10
L3	LADRILLERA	3349,2	3388,9	1,19	3655,70	7,72	0,09
L4	LADRILLERA	3348,8	3389,5	1,22	3657,30	7,58	0,09
L5	LADRILLERA	3349,3	3390,1	1,22	3659,60	7,61	0,09
L6	LADRILLERA	3572,9	3616,4	1,22	3654,40	1,87	0,10
L7	LADRILLERA	3573,5	3616,9	1,21	3653,90	1,85	0,10
L8	LADRILLERA	3572,1	3615,8	1,22	3655,20	1,90	0,10
L9	LADRILLERA	3571,8	3615,5	1,22	3735,60	3,75	0,10
L10	LADRILLERA	3573,3	3617,1	1,23	3723,40	3,43	0,10
L11	LADRILLERA	3374,3	3418,7	1,32	3701,40	7,37	0,10
L12	LADRILLERA	3374,9	3417,6	1,27	3702,10	7,66	0,10
L13	LADRILLERA	3375,3	3419,2	1,30	3701,70	7,44	0,10
L14	LADRILLERA	3374,2	3417,4	1,28	3703,20	7,62	0,10
L15	LADRILLERA	3375,1	3418,2	1,28	3701,30	7,57	0,10

Fuente: autores.

Comparando los ladrillos con adición de ceniza volante y los convencionales, se presentan los porcentajes de la tasa de inicial de absorción los cuales aumentan aproximadamente en un 1%, este valor es poco representativo en comparación con los bloques convencionales, sin embargo en la absorción reflejada en los diferentes porcentajes de adición de ceniza volante, podemos evidenciar que al adicionar más ceniza disminuye la absorción de agua en aproximadamente un 4% por cada 5 % de ceniza adicionada.

7.2.6 Comparación de costos bloques macizos con adición de ceniza volante y bloques macizos convencionales.

Tabla 29. Presupuesto para 1500 bloques de arcilla sin adición.

ANALISIS DE COSTOS PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE BLOQUES DE ARCILLA MACIZOS CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE					
PRESUPUESTO PARA 1500 UNIDADES					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	V / UNITARIO	V / TOTAL
1	MATERIA PRIMA				\$ 135.200,00
1.01	ARCILLA	KG	4000,00	\$ -	\$ 135.200
1.02	CENIZA VOLANTE	KG	0,00	\$ -	\$ 0
2	MANO DE OBRA				\$ 242.000
2,1	OPERARIOS	DIA	4,00	\$ 38.000,00	\$ 152.000
2,2	CONDUCTORES	DIA	2,00	\$ 45.000,00	\$ 90.000
3	COSTOS DE PRODUCCION				\$ 40.200
3,1	TRANSPORTE DE MATERIALES	KG	4000,00	\$ -	\$ 40.200
4	FABRICACION EN PLANTA				\$ 95.357
4,1	CARBON	KG	4000,00		\$ 15.357
4,2	MOLIENDA DEL MATERIAL	KG	4000,00		\$ 80.000
TOTAL COSTO DIRECTO					\$ 512.757,00

Fuente: autores.

Tabla 30. Presupuesto para 1500 bloques de arcilla con adición de ceniza volante en 25%.

ANALISIS DE COSTOS PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO Y MECÁNICO DE BLOQUES DE ARCILLA MACIZOS CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE					
PRESUPUESTO PARA 1500 UNIDADES CON ADICION DE CENIZA AL 25%					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UN	CANTIDAD	V / UNITARIO	V / TOTAL
1	MATERIA PRIMA				\$ 101.400,00
1.01	ARCILLA	KG	3000,00	\$ -	\$ 101.400
1.02	CENIZA VOLANTE	KG	1000,00	\$ -	\$ 0
2	MANO DE OBRA				\$ 242.000
2,1	OPERARIOS	DIA	4,00	\$ 38.000,00	\$ 152.000
2,2	CONDUCTORES	DIA	2,00	\$ 45.000,00	\$ 90.000
3	COSTOS DE PRODUCCION				\$ 30.150
3,1	TRANSPORTE DE MATERIALES	KG	3000,00	\$ -	\$ 30.150
4	FABRICACION EN PLANTA				\$ 95.357
4,1	CARBON	KG	4000,00		\$ 15.357
4,2	MOLIENDA DEL MATERIAL	KG	4000,00		\$ 80.000
TOTAL COSTO DIRECTO					\$ 468.907,00

Fuente: autores.

El material residual generado por central termoeléctrica en la aplicación como propuesta de mejoramiento en el proceso de fabricación de bloques de arcilla macizos permite una reducción en costos de aproximadamente el 7% de lo que actualmente necesita una ladrillera. Una vez realizado el transporte de material residual, la central termoeléctrica también tendría un ahorro en costos destinados para la disposición final de los residuos del producto, en cuanto al proceso de explotación de materia prima también se evidencia disminución en gastos e impactos ambientales.

En este sentido, la implementación de ceniza volante en la fabricación de bloques de arcilla macizos, permitirá la disminución del impacto ambiental causado por la inadecuada disposición final de residuos de central termoeléctrica y la disminución de explotación de materia prima en ladrilleras.

El ahorro generado se considera desde una perspectiva económicamente sostenible, ya que permite reducir costos asociados a explotación de materia prima (arcilla y ceniza volante) y transportes y traslados (volquetas a las plantas) en el reciclaje de ceniza volante como utilización de material para la fabricación de bloques de arcilla macizos.

En este orden de ideas, el ahorro está representado durante el proceso de fabricación del bloque macizo con adición de ceniza volante el cual promete ser un material industrialmente sostenible y favorable para la industria teniendo en cuenta que se podría generar un incremento en el valor de venta, esto con base en los resultados obtenidos con sus propiedades de resistencia.

8. CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización física de los materiales de la investigación, donde se evidenció que la arcilla tomada de la sabana de Bogotá y la ceniza volante tomada de la central termoeléctrica Termozipa son fuente potencial para la creación de materiales constructivos o unidades de mampostería con adición de ceniza volante, puesto que el tamaño de las partículas obtenidas de la caracterización de los materiales es óptimo; de igual forma y debido a la constitución mineralógica de los materiales trabajados, es importante recalcar que no se encontraron minerales que afecten químicamente la fabricación de unidades de arcilla con adición de ceniza volante, lo cual permitiría una gran utilización de estas fuentes de materia prima para materiales utilizados en procesos constructivos.

Debido a la sintetización manual y básica del material a utilizar para la fabricación de los bloques de arcilla con adición de ceniza volante, se evidenció que el secado de estas mezclas aglomerantes es mayor al tiempo de secado promedio de unidades de mampostería realizados en ladrilleras lo cual aumentó el tiempo de producción de las unidades ensayadas.

Luego de realizar los ensayos mecánicos de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante, se determinó que el mejor porcentaje de adición de ceniza volante utilizado y recomendado para la fabricación de bloques macizos de arcilla fue de 25 %, esto con base en que se obtuvieron valores mayores de resistencia a la compresión con un valor de 27,92 MPa respecto a bloques convencionales con un valor de 25,07 MPa y a su vez superando este valor la resistencia de un concreto Portland fallado a los 21 días donde su resistencia es de 21 MPa. En cuanto a los valores obtenidos para módulo de rotura son valores muy cercanos, pues con los bloques de arcilla macizos con adición de ceniza volante se obtuvo un valor de resistencia a la flexión de 0,06 MPa en comparación con valores obtenidos en bloques macizos convencionales donde se obtuvo en dos muestras un valor de 0,07 Mpa dato que no es representativo teniendo en cuenta que el bloque está fabricado para utilización de mampostería estructural, lo cual indica que es utilizado en muros estructurales para que falle a compresión y no a flexión por lo cual es recomendable la utilización de estas unidades de mampostería con adición de ceniza volante en procesos constructivos. Siendo la ceniza volante un material reutilizable que promete ser apropiado en la creación de materiales constructivos puesto que actualmente es un recurso no aprovechado ni dispuesto adecuadamente por las centrales termoeléctricas.

9. RECOMENDACIONES

La investigación realizada contribuye a posibles investigaciones futuras sobre el aprovechamiento de otro tipo de residuo generado por centrales termoeléctricas en la fabricación de materiales de construcción sostenibles, mejorando con esto la disposición de materiales residuales y contribuyendo al mejoramiento de la calidad del medio ambiente con la disminución de explotación de materias primas utilizadas industrialmente en la fabricación de materiales de construcción.

Es por esta razón que a partir de la investigación realizada se promueven las siguientes recomendaciones a investigaciones futuras:

- ✓ Evaluar la durabilidad del bloque macizo de arcilla con adición de ceniza volante a través del tiempo y ataques químicos presentados, se sugiere la realización de un murete con exposición de por lo menos 3 meses a la intemperie.
- ✓ Evaluar la capacidad de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión del bloque macizo de arcilla con adición de ceniza volante secado a temperatura ambiente de por lo menos dos meses.
- ✓ Evaluar volumétricamente la porosidad que presenta el bloque de arcilla macizo con adición de ceniza volante.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, Angie y ESPINOSA, Bryan. Análisis de la resistencia a la compresión de mezclas de concreto con adición de ceniza volante de Termopaipa [en línea] [citado: 20 de octubre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14479/4/Documento%20Ceniza%20volante%20TERMOPAIPA.pdf>>.

ALONSO, M.C. y LUXÁN, M.P. Aplicaciones de las cenizas volantes en el campo de la construcción: experiencia española. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 1995. 146 p.

AYESTA, M., GARCÍA, Ma. P., BLANCO, F. y AYALA, J. Obtención de ladrillos cara vista a partir de cenizas volantes de la Central Térmica del Narcea (Asturias). En: Materiales de Construcción, vol. 49, no. 256, (oct.-dic., 1999), págs. 15-28, [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/432/480>>.

BARBA, A., et al. Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica, 1997. 291 p.

BORRACHERO, M. V., PAYÁ, J. MONZÓ, J., BONILLA, M. y GIRBÉS, I. Evolución de las resistencias mecánicas de sistemas ternarios cemento/ceniza volante/ceniza de lodo de depuradora: efectos puzolánicos complementarios. [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.upv.es/pms2002/Comunicaciones/038_PAYA.PDF>.

CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL CARBÓN. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Centro de Investigaciones del Carbón, 1996. 103 p.

DAS, Braja M. Fundamentos de ingeniería geotécnica. México: International Thomson Editores, 2001. 594 p.

GIL, Edison. Síntesis de arcilla aniónica a partir de ceniza volante y su aplicación en la remoción de cromo VI. En: Revista Universidad EAFIT, vol. 34, no. 112 (1998), págs. 73-80, [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1097/989>>.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. NTC 4205. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000. 12 p.

----- Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla. NTC 4017. Bogotá D.C.: El Instituto, 2005. 27 p.

------. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 1: mampostería estructural. NTC 4205-1. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. 19 p.

------. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural. NTC 4205-2. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. 12 p.

------. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 3: mampostería de fachada. NTC 4205-3. Bogotá D.C.: El Instituto, 2009. 20 p.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Resultados mineralogía muestra total por DRX [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www2.igac.gov.co/igac_web/faqs_user/faqs.jsp?id_categoria=22>.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro. I.N.V. E – 124 – 07. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2007.

------. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INVE – 123 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

------. Determinación del límite líquido de los suelos. INVE – 125 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

------. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. INVE – 126 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

------. Normas de ensayo de materiales para carreteras. Bogotá: INVÍAS, 2014.

------. Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales. INVE – 235 – 13. Bogotá D.C.: INVÍAS, 2014.

INSTITUTO TECNOLÓGICO GEO MINERO DE ESPAÑA. Manual de reutilización de residuos de la industria minera, siderometalúrgica y termoeléctrica. Madrid: Instituto Tecnológico Geominero de España, 1995. 308 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Cement technology roadmap 2009: Carbon emissions reductions up to 2050 [en línea] [citado: 25 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Cement.pdf>>.

KUMAR, Mehta. Reducing the environmental impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. En: Concrete International, vol. 21, no. 11, (oct., 2007), págs. 61-66 [en línea] [citado: 15 de noviembre, 2017]. Disponible en

Internet: <URL:
<http://maquinamole.net/EcoSmartconcrete.com/docs/trmehta01.pdf>>.

LÓPEZ RUIZ, Álvaro. La utilización de las cenizas volantes según el reciente simposio de Pittsburgh. En: *Materiales de Construcción*, vol. 17, no. 128, (oct.-dic., 1967), págs. 21-42, [en línea] [citado: 20 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <file:///C:/Users/supervisor/Downloads/1645-3165-1-PB.pdf>>.

MORENO G., Franco. *El ladrillo en la construcción*. Barcelona: CEAC, 1981. 204 p.

OSSA M., Mauricio y JORQUERA S., Héctor. Cementos con cenizas volantes. En: *Materiales de Construcción*, vol. 34, no. 193, (ene.-mar., 1984), págs. 3-17, [en línea] [citado: 17 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/956/1013>>.

PÉREZ CANDELA, Manuel, MARTÍN-MARTÍNEZ, José M. y TORREGROSA MACIÁ, Rosa. Chromium (VI): removal with activated carbons. En: *Water Research*, vol. 29, no. 9 (sep., 1995), págs. 2174-2180.

PERSPECTIVAS DE CRECIMIENTO DE LA INDUSTRIA. En: *Revista Mercados de la Construcción*. (nov., 2010), p. 126-145.

ROJAS PULIDO, Leonardo. Fabricación y evaluación del desempeño de quince ladrillos refractarios elaborados con ceniza volante producto de la combustión del carbón en las calderas de la central Termozipa a diferentes temperaturas, de acuerdo a la norma ASTM C 113 (Standard Test Method for Reheat Change of Refractory Brick) [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4795/1/RojasPulidoLeonardo2015.pdf>>

SIDOR.COM. La difracción de rayos X en la industria siderúrgica [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.sidor.com/noticias-sidor/noticias/104-noticiencias/896-la-difraccion-de-rayos-x-en-la-industria-siderurgica>>.

SÍNTESIS DE ZEOLITAS A PARTIR de cenizas volantes de centrales termoeléctricas de carbón [en línea] [citado: 28 de septiembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6982/03CAPITULO1.pdf?sequence=3>>.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Departamento de Física. Difracción de Rayos X [en línea] [citado: 13 de noviembre, 2017]. Disponible en Internet: <URL: <https://goo.gl/xPuDLO>>.

VALDEZ, Pedro L, DURÁN, Alejandro, RIVERA, Jorge y JUÁREZ, César. Concretos fluidos con altos volúmenes de ceniza volante. En: Ciencia UNAL, vol. 10, no. 1, (mar., 2007), págs. 49-57.