

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE
CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE SOMETIDAS A LA
EXPOSICIÓN DE SULFATOS**

PRESENTADO POR:

NOMBRE: MARIA CAMILA ARRIETA TORDECILLA CÓDIGO:506205

NOMBRE: CRISTIAN ARMANDO PINZÓN BOGOTÁ CÓDIGO: 505001

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2019**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE
CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE SOMETIDAS A LA
EXPOSICIÓN DE SULFATOS**

PRESENTADO POR:

NOMBRE: MARIA CAMILA ARRIETA TORDECILLA CÓDIGO:506205

NOMBRE: CRISTIAN ARMANDO PINZÓN BOGOTÁ CÓDIGO: 505001

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO CIVIL

DOCENTE ASESOR:

ING. INGRID MARYLIN SILVA ROJAS.

INGENIERÍA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERÍA

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

BOGOTÁ

2019

5



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Sin Obras Derivadas — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios después de esta etapa que culmina, en la que se ha aprendido y disfrutado, pero también en la que se tuvo dificultades y grandes sacrificios es más que necesario, pues estoy segura que sin la fe y la confianza que tengo puesta en Él no estaría próxima a subir un escalón más en las metas que me he propuesto para mi vida.

Agradecer de igual manera a mi familia, especialmente a mis padres, Julia y Carlos, mi hermana Daniela y mi tía Ángela, que me han guiado en todo este camino desde el principio y me han aconsejado y apoyado cuando tuve dudas y caídas durante este proceso. Por eso estoy segura de que este logro lo sentirán como propio. Gracias a ustedes por tanto apoyo y confianza incondicional en todo momento.

De igual manera, dar las gracias a todos mis compañeros y amigos de la universidad, de los cuales también recibí ayuda y colaboración infinita en todo momento. A los profesores de la universidad que día a día se esforzaron por transmitir su conocimiento y dejar huella con sus enseñanzas, no solo como futura ingeniera profesional sino también como persona. Y finalmente agradecer a la familia Torres Pradilla por su apoyo y confianza incondicional en mis conocimientos y capacidades desde el inicio de mi carrera como profesional. Gracias

María Camila Arrieta Tordecilla

Gracias a Dios por permitir lograr dar un gran paso en mi vida, mis padres, Gloria y Víctor, que siempre estuvieron dándome ánimos y luchando porque hoy este en este punto de mi vida, aportándome su sabiduría y paciencia para soportar los momentos difíciles que esta vida conlleva así mismo dándome lo necesario para poder ser mejor persona cada día. Son todo para mí y este logro es mas de ustedes que mío, porque sin ustedes no estaría hoy en esta etapa de mi vida. A mis hermanas que siempre estuvieron cuidándome y dándome su mejor compañía en los momentos más difíciles de este proceso. Vamos por más logros juntos.

Mis amigos de la universidad que me enseñaron diferentes formas de ver las cosas, siempre me brindaron su apoyo y me alentaron cuando los caminos parecían más difíciles de sobrellevar, mis profesores que siempre estuvieron guiándome y aconsejándome en las decisiones que no eran fáciles de tomar, a todos muchas gracias porque cada detalle que compartieron conmigo hoy lo estoy reflejando en este logro cumplido.

Cristian Armando Pinzón Bogotá

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D. C. 30 de noviembre de 2019

CONTENIDO

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE SOMETIDAS A LA EXPOSICIÓN DE SULFATOS	4
TÍTULO	14
ALTERNATIVA	14
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN	14
RESUMEN	15
1. INTRODUCCIÓN	16
2. ANTECEDENTES	18
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	23
3.1. Descripción del problema	23
3.2. Formulación del problema	24
4. JUSTIFICACIÓN	25
5. MARCO REFERENCIAL	27
5.1. Marco teórico	27
5.1.1. Concreto	27
5.1.2. Componentes del Concreto	27
5.1.3. Características y Funciones de los Componentes del Concreto	28
5.1.4. Propiedades del Concreto	28
Trabajabilidad:	29
Compactibilidad:	29
Movilidad:	29
Segregación:	30
Contracción:	30
5.1.5. Ceniza volante.	30
Características y Propiedades de la ceniza volante:	32
Características físicas:	32
Características químicas:	33
5.1.6. Termoeléctricas	34

Termoeléctrica Paipa (Paipa-Boyacá)	34
Termoeléctrica Sochagota (Sogamoso-Boyacá)	37
Termoeléctrica Tasajero San Cayetano (San Cayetano-Norte de Santander)	38
5.1.7. Aditivos	40
Aditivos inclusores de aire	41
Aditivos de control de la hidratación	41
Inhibidores de corrosión	41
Aditivos reductores de retracción	41
Aditivos colorantes	41
5.1.8. Sulfatos en el concreto	42
5.2. Marco conceptual	43
5.3. Marco legal	44
6. OBJETIVOS	45
6.1. Objetivo general	45
6.2. Objetivos específicos	45
7. DELIMITACIÓN	46
7.1. Alcance	46
7.2. Tiempo	46
7.3. Limitaciones	46
8. METODOLOGÍA	47
8.1. Tipo de investigación.	47
8.2. Fuentes de información	47
8.2.1. Fuentes Primarias	47
8.2.2. Fuentes Secundarias	47
8.3. Diseño metodológico	47
8.3.1. Etapa I.	47
8.3.2. Etapa II	47
8.3.3. Etapa III	48
8.3.4. Etapa IV	49
9. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	50

9.1. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos NTC 77	50
9.2. Caracterización del cemento. NTC 121	54
9.2.2. Tiempo de fraguado (inicial y final). NTC 118	56
9.2.3. Resistencia a la compresión. NTC 220	56
9.3. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. NTC 176	58
9.4. Gravedad específica y absorción de agregados finos. NTC 237	59
9.5. Diseño de la mezcla de concreto	60
9.5.1. Contenido de aire y determinación de agua	61
9.5.2. Relación agua material cementante	62
9.5.3. Estimación de agregado grueso	62
9.5.4. Pesos en m ³	63
9.6. Elaboración de especímenes de concreto y curado NTC-550	64
9.7. Exposición de muestras de concreto a sulfatos	66
9.7.1 Inmersión de cilindros a sulfatos	66
10. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS	68
11. DETERMINACIÓN DE LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS SOBRE LOS ESPECIMENES DE CONCRETO	81
12. CONTENIDO DE SÍLICE EN LA MEZCLA DEL CONCRETO	84
13. CONCLUSIONES	88
14. RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características y funciones de los componentes	28
Tabla 2. Propiedades físicas de la ceniza volante	33
Tabla 3. Características físicas de la ceniza Termopaipa	35
Tabla 4. Composición química de la ceniza Termopaipa	36
Tabla 5. Granulometría ceniza Termopaipa	36
Tabla 6. Características físicas ceniza Termosochagota	37
Tabla 7. Composición química de la ceniza Termopaipa	38
Tabla 8. Granulometría de la ceniza Termosochagota	38
Tabla 9. Características físicas de la ceniza Termotasajero	39
Tabla 10. Características químicas de la ceniza Termotasajero	40
Tabla 11. Granulometría ceniza Termotasajero	40
Tabla 12. Normas para medir presencia de sulfatos en el concreto	49
Tabla 13. Requisitos de gradación	52
Tabla 14. Granulometría agregado fino	52
Tabla 15. Granulometría agregado grueso	53
Tabla 16. Requisitos del cemento portland	55
Tabla 17. Parámetros obtenidos cemento Tequendama	57
Tabla 18. Densidad y gravedad específica agregado grueso	59
Tabla 19. Densidad y gravedad específica de agregado fino	60
Tabla 20. Determinación de agua y aire	61
Tabla 21. Valores para diseño de la mezcla	61
Tabla 22. Relación agua/cemento	62
Tabla 23. Factores para la determinación de agregado grueso	63
Tabla 24. Peso unitario suelto y apisonado grava y arena	63
Tabla 25. Resumen pesos	64
Tabla 26. Cantidades en m ³	64
Tabla 27. Cantidades en m ³	65
Tabla 28. Porcentaje en peso de ceniza sustituida	65
Tabla 29. Matriz experimental	68
Tabla 30. Nomenclatura de probetas de concreto	69
Tabla 31. Variables de muestras para 7 días de curado	69
Tabla 32. Variables de muestras para 14 días de curado	70
Tabla 33. Variables de muestras para 28 días de curado	71
Tabla 34. Variables de muestras para 56 días de curado	72
Tabla 35. Matriz Experimental para el análisis de exposición a sulfato de magnesio	81
Tabla 36. Porcentaje de contenido de sílice en la composición del cemento	85
Tabla 37. Porcentaje de contenido de sílice en la composición de las cenizas empleadas	85
Tabla 38. Contenido de sílice en las muestras de concreto a 56 días de curado ..	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del Concreto	28
Figura 2. Proceso de obtención ceniza volante	31
Figura 3. Esquema de equipos para la producción de ceniza volante	32
Figura 4. Agregado fino y agregado grueso	51
Figura 5. Tamices para granulometría.....	51
Figura 6. Granulometría agregado fino.....	53
Figura 7. Gráfica granulometría agregado grueso	54
Figura 8. Agregado grueso caracterización.....	58
Figura 9. Cilindros de concreto	65
Figura 10. Cilindros con sustitución de ceniza	66
Figura 11. Inmersión de cilindros	67
Figura 12. Cilindros con sulfatos de magnesio	67
Figura 13. Falla 7 días.....	70
Figura 14. Falla 14 días.....	71
Figura 15. Falla 28 días.....	72
Figura 16. Falla 56 días.....	73
Figura 17. Resistencia a la compresión ceniza Termosochagota	74
Figura 18. Resistencia a la compresión ceniza Termotasajero	75
Figura 19. Resistencia a la compresión ceniza Termo Paipa.....	76
Figura 20. Resistencia para adición del 6%	77
Figura 21. Resistencia para adición del 8%	78
Figura 22. Resistencia para adición del 10%	79
Figura 23. Cilindros expuestos a sulfato de magnesio	82

PERIODO 2019-I

PROGRAMA ACADÉMICO Ingeniería Civil

ESTUDIANTE. María Camila Arrieta Tordecilla **CÓDIGO** 506205

ESTUDIANTE. Cristian Armando Pinzón Bogotá **CÓDIGO** 505001

DIRECTOR SUGERIDO Ingrid Marylin Silva Rojas

TÍTULO

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MUESTRAS DE CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE SOMETIDAS A LA EXPOSICIÓN DE SULFATOS

ALTERNATIVA

Teniendo en cuenta el Acuerdo 213, Art. 2, la asignatura Trabajo de Grado, escogió la alternativa numeral 2.4. "Trabajo de investigación".

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Comportamiento de los Materiales

RESUMEN

El trabajo de investigación presenta el desarrollo de la metodología para establecer el porcentaje de adición más óptimo de ceniza volante (Termopaipa, Termosochagota, Termotasajero) en la mezcla de concreto con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, más específicamente, su resistencia a la compresión, y a la vez su durabilidad, exponiendo el concreto adicionado a la acción del sulfato.

Como primer paso se establecieron los porcentajes de adición de ceniza volante. Estos porcentajes se escogieron a partir de la bibliografía consultada como parte fundamental del anteproyecto en la que fue necesario obtener información del estado del arte sobre el uso de la ceniza volante en el concreto.

Posteriormente, se realizaron las mezclas y la fundida de especímenes de concreto necesarios para realizar los ensayos de compresión y de exposición a sulfatos. Todos los procedimientos de caracterización de material, diseño y fundida de mezcla, desencofrado y curado, ensayo de compresión y ensayo de exposición a sulfatos, se realizaron en las instalaciones de los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia.

La importancia de este trabajo de investigación se basa en la identificación de los beneficios e implementación de los materiales alternativos en la construcción como un posible alivio frente a factores como: disminución en costos de obra e impacto ambiental negativo sin dejar de lado los parámetros y estándares de seguridad y calidad que puedan verse reflejados en la durabilidad y resistencia de las obras realizadas.

1. INTRODUCCIÓN

El ámbito de la construcción es un campo de la ingeniería civil que se encuentra en constante dinámica con el fin de encontrar mejores materiales, prácticas y técnicas que permitan lograr resultados óptimos. Estos resultados pueden reflejarse en obras terminadas que presenten altos estándares de calidad y seguridad, que además logren reducir costos y generar el beneficio de la economía.

Es de conocimiento general, que el concreto es uno de los principales materiales empleados en la construcción, material que se viene estudiando desde hace tiempo con el fin de mejorar sus características y propiedades, tanto físicas como químicas. El cemento, que es su principal componente, también se ha estudiado cuidadosamente con el fin de encontrar alternativas que permitan disminuir la cantidad de material, ahorrar energía en su proceso de elaboración, y evitar los productos de desecho y procesos contaminantes. Basado en las necesidades anteriormente mencionadas, algunos estudios lograron encontrar las adiciones minerales derivadas de otros procesos industriales, que actúan como material cementante suplementario¹.

Para el correcto funcionamiento del concreto deben asegurar su durabilidad Y resistencia ya que, por ser un elemento con mucha exposición a agentes externos como el medio ambiente, sulfatos, bacterias, entre otros factores, debe contar con calidad y capacidad para resistir las condiciones de servicio con un menor costo de mantenimiento durante su vida útil proyectada. La durabilidad se entiende como “la capacidad para poder evitar a través del tiempo, ataques de componentes químicos, abrasión u otro proceso que pueda deteriorarlo”². La exposición de concreto al ataque de los sulfatos es uno de los principales agentes de deterioro en el concreto, deterioro producido por una reacción química en los componentes del cemento. Esta reacción química puede producir fenómenos de expansión y agrietamiento del concreto, así como también puede conducir a la pérdida de resistencia y de las propiedades elásticas del mismo³.

¹ LEON VELEZ, Álvaro. Efecto de las adiciones minerales en el concreto [en línea]. 360enConcreto. Colombia. 26 de Enero de 2015, párr. 1. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-adiciones-minerales-en-el-concreto>

² Lafarge. Concreto “Durabilidad”: Simposio y organismo [diapositivas]. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC. México. Octubre de 2009. Diapositiva 2. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: http://www.imcyc.com/50/simposi09/empresa_organismo/mesa3/5M3_LafargeVillanueva.pdf

³ LONDOÑO, Cipriano. Concretos Resistentes a sulfatos [en línea]. 360enConcreto. Colombia. 13 de Diciembre de 2013, párr. 2. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/concretos-resistentes-a-sulfatos>

En el desarrollo del siguiente documento se pretende evaluar el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto adicionado con ceniza volante proveniente de tres termoeléctricas diferentes en distintos porcentajes teniendo en cuenta que el uso de ceniza volante puede reducir costos en la elaboración de mezclas, mejorar la resistencia a la compresión del concreto y dar un mejor uso a los desechos de estas termoeléctricas que generan importantes cantidades de ceniza que representa un problema ambiental.⁴

⁴ RIVERA, Raymundo. RIVERA TORRES, Jorge. Concreto de alta resistencia, muy económico, durable y sustentable [en línea]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Nuevo León, México. Marzo del 2000, p.8. [consultado: 24 de abril de 2019]. Disponible en internet: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_11/88.PDF

2. ANTECEDENTES

El concreto se define como una mezcla de cemento, grava, arena, aditivos y agua, que cuando alcanza el estado sólido presenta una resistencia a los esfuerzos. Dichos aditivos se agregan al concreto con el fin de mejorar las propiedades más fundamentales del material, su resistencia, durabilidad y trabajabilidad, que se ha convertido en una de las necesidades más prioritarias en la fabricación del concreto⁵. Un tipo de adición que se acerca a solucionar la necesidad descrita, es la ceniza volante, la cual surge de la producción de energía eléctrica a través de la utilización de carbón mineral en centrales termoeléctricas. Con esta adición se han realizado en los últimos años diferentes estudios con el fin de describir las características que presenta el concreto cuando se utiliza ceniza volante para determinar los diferentes beneficios cuando se varía su dosificación⁶.

A lo anterior, se puede agregar que el uso de la ceniza volante como adición mineral al concreto en reemplazo del cemento, resulta una alternativa favorable ya que es abundante, económica y versátil, preserva recursos naturales y disminuye la necesidad de tener que eliminar las cenizas en rellenos sanitarios.

El uso de la ceniza volante como aditivo mineral ha despertado el interés de realizar diferentes estudios a nivel mundial y nacional, en los que destacan sus propiedades, comportamiento observado y resultados obtenidos.⁷

De acuerdo al estudio realizado por Ossa M et al, realizado en Chile, comprobaron el uso de la ceniza volante para dos casos: como sustituto en un porcentaje del cemento en la masa y como una adición para mejorar las propiedades del hormigón. Para la sustitución, se comprobó que al realizar la sustitución de las cenizas volante

⁵ VALENCIA, Plinio; QUINTANA Cristian. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO SIMPLE Y EL CONCRETO CON ADICIÓN DE FIBRA DE ACERO AL 12% Y 14%. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Bogotá, Colombia. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil, 2016. p. 15. [consultado el 20 de marzo de 2019]. Disponible en internet: Repositorio Educativo Digital.

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/6378/5/Trabajo%20de%20grado%20Fibra%20de%20Acero.pdf>

⁶ ROA PARRA, Oscar Rodolfo. LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE "CENIZAS VOLANTES". [en línea]. Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Topográfico. Bogotá, Colombia. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Topografía, 2016. p. 60 [consultado el 20 de marzo de 2019]. Disponible en internet: Repositorio Educativo Digital

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5069/1/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf>

⁷ MOLINARI, Javier. Reportes y artículos de la AMCI (Asociación mexicana de Concretos independientes) referentes al tema concretos con cenizas volantes. Artículo, Mejorando el concreto con ceniza volante. 2004. [Consultado 20 de marzo del 2019].

en porcentajes de 10 a 30 % de masa, el agua necesaria para la mezcla no aumenta y en algunos casos puede disminuir. Entre otras diferentes conclusiones del estudio se encontró que la resistencia en las edades tempranas, menores a los 28 días presentan una disminución referente al hormigón sin contenido de ceniza volante, pero para edades superiores a los 28 días, la resistencia puede llegar a ser igual o superior que al hormigón con porcentajes de sustitución del 0% de la masa; La variación del volumen no presentó cambios significativos que puedan afectar al hormigón; la reducción en el calor de hidratación y el porcentaje de permeabilidad; se refleja un aumento en la cantidad de aditivo para un porcentaje adecuado de incorporación de aire; que los cambios de volumen no son significativamente afectados; que se reducen el calor de hidratación y la permeabilidad; que aumenta la cantidad de aditivo necesario para una determinada incorporación de aire; y finalmente, la reducción en la reacción de expansión que se produce por los componentes álcali-árido.

Para la adición de las cenizas volantes en el hormigón, se comprobó que para cantidades de 15 y 30 % se mejora considerablemente la trabajabilidad y se logran mayores resistencias en todas las edades, comparadas con un hormigón sin adición de cenizas volante⁸.

En el año 2015, en Brasil, se realizó un estudio con la finalidad de medir el potencial puzolánico de la ceniza volante como sustituto parcial en la mezcla de concreto, en el que resaltan que el uso de cemento va en aumento y su producción ha generado distintos problemas ambientales como la emisión de gases de efecto invernadero en un 5%, por lo que se hace necesario buscar alternativas que reduzcan el impacto generado en la fabricación del cemento.

La ceniza volante aparece entonces como una posible solución, logrando disminuir y mitigar los efectos anteriormente mencionados, con la ventaja de que posee una gran disponibilidad, concluyendo que la ceniza volante en las edades más tempranas no logra alcanzar la resistencia deseada. Sin embargo, a partir de los 28 días se nota un crecimiento importante en la curva de resistencia del concreto. Recomiendan la ceniza volante como adición en estructuras de gran tamaño y en contacto con el agua como tanques de almacenamiento, represas y bloques de cimentación.⁹

⁸ OSSA, Mauricio; JORQUERA, Héctor. Cementos con cenizas volantes. En: Materiales de Construcción. Universidad de Chile. Marzo, 2004 No 193. p. 4 [consultado el 12 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/956/1013>

⁹ Andressa Bianca da Costa. Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento. [en línea]. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como parte dos requisitos para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil. Rio Grande do Sul, Brasil. CENTRO

A nivel nacional, se realizó una investigación en la Universidad de Antioquia, en el que se elaboraron distintos tipos de concreto autocompactante con diferentes porcentajes de sustitución por ceniza volante y escoria. Se logró determinar que el uso de los desechos de la combustión (ceniza y escoria) en el diseño del concreto autocompactante proporciona características factibles, tanto en su estado fresco como en el endurecido. Dentro de las propiedades que se evaluaron, se encontró la resistencia a la compresión, absorción, porosidad, trabajabilidad y tracción indirecta.

Para la ceniza volante se obtuvo que por de su contenido de inquemados, es necesario aumentar las cantidades de agua para obtener un adecuado concreto autocompactante, sin embargo, lo anterior no afecta sus propiedades mecánicas y puede ser perfectamente usado en estructuras

Con la adición de la ceniza volante en el concreto en porcentajes de 40 y 50 % de masa, se obtuvieron resistencias elevadas desde 40 MPA hasta una resistencia de 90 MPA.

Los concretos con autocompactantes exhibieron valores en un rango de 10% a 13% de volumen de poros permeables. Finalmente, el estudio pudo concluir que es probable obtener concretos autocompactantes de importantes atributos y propiedades utilizando mayores proporciones de escoria y ceniza volante en reemplazo de cemento portland¹⁰.

En la universidad Militar Nueva Granada se realizó otro estudio con ceniza volante, en el cual la ceniza volante de la termoeléctrica de Termopaipa, se utilizó para una sustitución del 10, 20 y 30 % de masa de los componentes del concreto como el cemento o arena triturada, para poder comparar los diferentes resultados que podrían presentarse. Determinados los resultados se logra concluir que el asentamiento y el volumen del concreto disminuyen cuando se hace la sustitución de un porcentaje de la masa de la arena por ceniza, diferente a cuando se realiza la sustitución de la masa de cemento por ceniza, todo esto comparado con una muestra patrón con un porcentaje de sustitución del 0%. La sustitución de cemento por ceniza mostró que se producen resistencias menores, lo que no sucede cuando se sustituye arena por ceniza. Este mismo comportamiento se observa en relación con el módulo de elasticidad del material. También se concluyó a partir del estudio, que la trabajabilidad no se ve afectada cuando se reduce el asentamiento, siendo

UNIVERSITÁRIO UNIVATES. Curso de engenharia civil. 2015. p.68. [consultado el 25 de agosto de 2019]. Disponible en internet: <file:///C:/Users/Camila/Downloads/2015AndressaBiancadaCosta.pdf>

¹⁰ SILVA, Yimmy; DELVASTO Silvio. CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN. En: Revista Colombiana de Materiales. Universidad de Antioquia. Mayo, 2014. No.5, p. 1 [consultado el 14 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <https://aprendeonline.udea.edu.co/revistas/index.php/materiales/article/view/19249>

así más fluida una mezcla con la sustitución de ceniza por cemento que la de ceniza por arena.

Con respecto a la sustitución de ceniza por cemento, se reflejó una disminución de la masa unitaria de la mezcla en comparación con la sustitución de ceniza por arena, por consiguiente, se logra concluir que la ceniza volante reduce favorablemente la masa por metro cúbico de concreto, en comparación con el concreto patrón¹¹.

Un artículo de investigación de la Universidad Nacional, comprobó el efecto de la ceniza volante como adición en probetas de concreto, con porcentajes de adición de 10%, 20% y 30% con la particularidad de que la ceniza volante utilizada posee un alto porcentaje de inquemados (materia orgánica) con el fin de evaluar y analizar el comportamiento mecánico a compresión normalizado bajo la ASTM C39, absorción capilar y durabilidad (permeabilidad a cloruros) normalizado bajo la C132. Los resultados determinaron que, para la resistencia a compresión aumento, sin tener en cuenta el porcentaje de adición, sin embargo, para edades tempranas la resistencia a la compresión no supero la de la muestra patrón, lo que indica una baja reactividad. De igual forma, se determinó que a mayor porcentaje de adición de ceniza volante se presenta una pérdida gradual de la resistencia.¹²

La baja resistencia en edades tempranas se asocia con la lenta velocidad de hidratación, mientras que el incremento de la resistencia en edades tardías se asocia con la actividad puzolánico de la ceniza (formación de aluminatos y silicatos de calcio hidratados). El efecto inversamente proporcional de la adición de ceniza versus la resistencia a la compresión se presenta debido a que la ceniza se caracteriza como una adición mineral, se produce una disminución en el contenido de cal (CaO) el cual impide la formación del gel CSH (silicato cálcico hidratado). Este gel es cementante es el responsable de proporcionar al concreto sus propiedades de adherencia y resistencia al realizar la mezcla del concreto.¹³

¹¹ SANTAELLA, Luz Elena Santaella; SALAMANCA, Rodrigo. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO CON BAJOS PORCENTAJES DE CENIZA VOLANTE (TERMOPAIPA IV) Y AGUA CONSTANTE. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 2004. p. 6. [consultado el 12 de marzo de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101402>

¹² VALDERRAMA, Claudia; TORRES, Janeth; MEJIA, Ruby. CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES DE ALTO NIVEL DE INQUEMADOS. En *ingeniería e investigación*. [En línea]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, abril 2011, vol.31, nro1, p 39-46. [Consultado el 16 de noviembre de 2109]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/643/64321170005.pdf>. E-ISSN: 0120-5609

¹³GUITIERREZ, Oscar; PINEDA, Janeth; VERA, Enrique. Efecto de la incorporación de ceniza volante y escoria de horno alto en el comportamiento electroquímico de concretos de cemento comercial. En *Revista de Metalurgia*. [En línea]. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica, octubre-diciembre de 2015, vol.51, nro.4. [Consultado el 16 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1365>. ISSN-L:0034-8570

En Colombia la empresa AHINCO S.A. ha realizado diferentes participaciones en proyectos que han contemplado la utilización de ceniza volante en grandes porcentajes, ya que dicha empresa tiene una ardua labor en el desarrollo de concretos con algunos residuos industriales como lo es la ceniza volante¹⁴, Algunos de ellos son:

- Centro cívico de Antioquia Plaza de la libertad (Medellín, Antioquia).
- Centro comercial San Nicolás (Rionegro, Antioquia).
- Edificio Torre Porvenir (Medellín Antioquia).

¹⁴ AHINCO S.A. [consultado el 20 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.ahinco.com.co/index.php/quienes-somos>

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Descripción del problema

La eficiencia de una estructura está fuertemente ligada a la calidad que puede brindar los materiales que se empleen para su elaboración. El concreto representa un porcentaje importante en una construcción, por lo que su versatilidad y desarrollo en tecnologías de fabricación han logrado satisfacer necesidades y solucionar problemas a los que se han ido presentando en el uso de dicho material.¹⁵

En este sentido, el concreto es el resultado de una mezcla de diferentes tipos de materiales como lo son el cemento, agregados finos (arena) y agregados gruesos (grava) y agua. Dicha mezcla de concreto, en condiciones normales funciona perfectamente y después de cierto tiempo es capaz de resistir grandes esfuerzos, pero si se presenta un elevado contenido de cemento portland podría ser susceptible de fisuras no estructurales, y más específicamente, fisuración por contracción plástica debido a la contracción del fraguado en tiempos futuros¹⁶.

Debido a la fuerte exposición con el medio ambiente a la que se encuentra el concreto, uno de sus problemas más comunes en condiciones normales es el ataque de sulfatos y cloruros los cuales interfieren con la durabilidad del material. La acción de sulfatos, se presenta cuando el concreto está expuesto a aguas subterráneas, lagos, pozos o suelos que contienen iones sulfatos, que reaccionan con los componentes del cemento generando una expansión y pérdida de cohesión en el concreto. Esta expansión se ve evidenciada en una pérdida progresiva de la resistencia y agrietamientos, los cuales transforman el concreto en un material más permeable permitiendo la entrada de otros agentes externos que incrementan el deterioro en menor tiempo al esperado¹⁷.

En consecuencia, el sector constructivo exige nuevos, mejores materiales y nuevas técnicas que superen las propiedades y limitaciones que ya existen, por lo que se proponen nuevos tipos de concretos que logren maximizar sus propiedades. Para

¹⁵ CEBALLOS ARANA. Martin A. El concreto, material fundamental para la infraestructura. [en línea] En: Revista Ciencia y Tecnología en Concreto. México. Agosto de 2016, p. 24 [consultado: 24 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/agosto2016/experto.pdf>

¹⁶ Sánchez De Guzmán. Diego. Tecnología del concreto y del mortero. [en línea]. 5 ed. Bogotá, Colombia: Bhandar Editores LTDA. 2006. p. 19 [consultado: 21 de abril de 2019]. Disponible en Internet <https://books.google.com.co/books?id=EWq-QPJhsRAC&printsec=frontcover&dq=resistencia+del+concreto&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjodXsvtTkaHvSI6wKHbNLAVsQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=true>

¹⁷ Aguirre, A.M. Mejía de Gutiérrez R. Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. [en línea]. En: Materiales de Construcción. Universidad del Valle. Enero – Marzo 2013, vol. 63, p. 10. [consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en Internet: [file:///C:/Users/Camila/Downloads/1270-1666-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Camila/Downloads/1270-1666-1-PB%20(1).pdf). ISSN: 0465-2746. E-ISSN: 1988-3226

tal fin, a la mezcla de concreto se le puede añadir aditivos químicos y adiciones como escorias de alto horno, humo de sílice, o ceniza volante.

Por lo anterior, se pretende realizar muestras de concreto con sustitución de ceniza volante proveniente de tres diferentes termoeléctricas, además de medir en dichas muestras el ataque químico de los sulfatos, con el fin de evaluar y analizar en qué condiciones presenta una mejor durabilidad y resistencia a la compresión.

3.2. Formulación del problema

¿Qué tipo de ceniza volante, ya sea proveniente de Termosochagota, Termopaipa o Termotasajero, y qué porcentaje de adición logra generar un aumento en la resistencia a la compresión y mejorar la durabilidad del concreto?

4. JUSTIFICACIÓN

La ceniza volante como adición ofrece a la mezcla de concreto una mejora notable en su durabilidad, ya que esta adición modifica la microestructura del concreto volviéndolo más impermeable, lo que impide el paso de agentes externos, y de ataques de sales disueltas como los cloruros y los sulfatos, así como logra reducir el calor de hidratación del cemento y la fisuración por efectos térmicos. En cuanto a la resistencia, la adición de ceniza volante puede ser dosificada en porcentajes desde el 5% hasta el 65% de masa para producir la resistencia y la velocidad de ganancia de resistencia que sea requerida¹⁸.

Además de que la ceniza volante como adición puede brindar una solución para poder alcanzar un aumento de la resistencia y durabilidad, también aparece como una solución a problemas ambientales. Uno de ellos en cuanto a la producción de cemento, que en los últimos 40 años ha tenido un aumento de 60 millones de toneladas. Esta producción de cemento genera un porcentaje importante de CO₂, uno de los principales gases generadores del efecto invernadero, situación que contribuye al calentamiento global. Otro problema ambiental es la cantidad de ceniza volante que sobra de las termoeléctricas, pues una planta de 500 MW (Megavatios) es capaz de producir al menos 500 toneladas de desechos diarios, lo que requiere al menos 300 hectáreas de espacio para su disposición. Por eso, el uso como adición en el concreto representa una alternativa de disposición de desechos más amigable con el medio ambiente¹⁹.

Por la gran cantidad de ceniza que se produce en las termoeléctricas, se puede considerar que el acceso a este tipo de adición no es limitado, condición que puede verse como una ventaja, para ser tenido en consideración para su uso en la construcción.

Por lo anterior, se pretende realizar muestras de concreto con sustitución de tres cenizas volantes de diferentes termoeléctrica en diferentes porcentajes de peso por el cemento utilizado en las mezclas, además de medir en dichas muestras el ataque

¹⁸ National Ready Mixed Concrete Association. Concreto en la práctica. ¿Qué, Por qué y cómo? Adiciones al cemento [en línea]. [consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP30es.pdf>

¹⁹ FONSECA BARRERA, Leonardo Augusto. Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos [en línea]. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales. Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Área Curricular de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, 2016. p. 101. [consultado: abril 22 de 2019]. Disponible en Internet: http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

químico de los sulfatos con el fin de evaluar y analizar en qué condiciones presenta una mejor durabilidad y resistencia a la compresión.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. Marco teórico

5.1.1. Concreto

Es el resultado de la elaboración de una mezcla de cemento, agua, y agregados finos y gruesos, que al lograr la solidificación se convierte en un material resistente para la elaboración de diferentes construcciones, también es conocido como hormigón, que se ve construido cuando es compactado en sitios específicos²⁰.

5.1.2. Componentes del Concreto

Ciertamente se ha conocido que los agregados están compuestos por dos tipos: finos y gruesos, las características de los agregados finos están definidas por ser partículas de hasta 9,5 milímetros, tales como la arena natural o en su defecto artificial. Por otro lado, los agregados gruesos están determinados por la retención de sus partículas en la malla con abertura de 1,18 milímetros que representa al tamiz no. 16, estas partículas pueden ser de hasta 150 milímetros, muy superiores a los agregados finos comúnmente para las mezclas se utiliza un agregado grueso entre los valores de 19 milímetros y 25 milímetros²¹.

²⁰ KUMAR MEHTA, Povindar. Concreto: estructura, propiedades y materiales. [Impreso] 1 ed. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2002. [Consultado 10 de marzo de 2019].

²¹ Portland cement association. How Concrete is Made. Washington DC, 2018. [Consultado 12 de marzo de 2019]. www.cement.org.

5.1.3. Características y Funciones de los Componentes del Concreto

Figura 1. Componentes del Concreto



Fuente: Portland cement association. *How Concrete is Made*. Washington DC, 2018. [Consultado 12 de marzo de 2019]. www.cement.org.

Tabla 1. Características y funciones de los componentes

COMPONENTES	CARACTERÍSTICAS	FUNCIONES
CEMENTO	Fraguar al contacto con el agua	Aglutinar
AGUA	Libre de agentes contaminantes	Hidratar agregados y cemento
AIRE	Forma de burbujas en la mezcla	Puede impermeabilizar controlándose adecuadamente
AGREGADOS	Densos, resistentes a desgastes mecánicos	Forman un esqueleto resistente dentro del concreto, controlan la retracción por fraguado.
ADITIVOS	Componentes orgánicos	Reductores de agua, inclusores de aire retardantes de fraguado, acelerantes de fraguado

Fuente: SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. *Tecnología del concreto y del mortero*. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 2001. P. 19-21 [Consultado 12 de marzo del 2019].

5.1.4. Propiedades del Concreto

El concreto presenta diferentes estados, en cada uno de éstos sus propiedades varían de acuerdo al control de sus ingredientes, la temperatura, por ejemplo, en estado fresco las propiedades más importantes son la manejabilidad, la viscosidad, temperatura.

Iniciando con el calor de hidratación como una propiedad térmica generada por la reacción de contacto entre el agua y el cemento, esta propiedad genera en la mezcla

una serie de cristales endurecidos que conglomeran la mezcla generando en ella una resistencia mecánica durante el proceso de hidratación.²²

A continuación, se describe las características de cada una de las propiedades principales del concreto:

Trabajabilidad:

Es una de las características donde se determina el esfuerzo que se requiere para realizar el mezclado, el cambio de sitio y la compactación del concreto. Sus características de poseer una mayor o menor trabajabilidad son relativas, ya que depende de cómo se lleve a cabo el proceso manual y de las propiedades mecánicas que pueden presentar los componentes del concreto, ya que estarán sujetas a condiciones del lugar y del uso que se le dé en la compactación²³.

Estabilidad:

Se determina como el desplazamiento que se refleja en el concreto sin contemplar las fuerzas externas que se ejercen sobre él. Se puede calcular a través de la exudación y la segregación, analizada por medio de comparaciones que evalúan las características entre varios diseños, siendo el de valores mínimos el más óptimo.

Compactibilidad:

Es la característica que tiene el concreto para compactarse, esta característica se puede evaluar mediante métodos que comparan el tiempo que puede necesitar para lograr una compactación total, esto puede evaluarse a través de la relación entre la densidad suelta del concreto sin compactar y la densidad del concreto compactado²⁴.

Movilidad:

Es la capacidad que posee el concreto para ser desplazado ejerciendo una fuerza externa sobre él. Se determina a través de la cohesión, la viscosidad y la resistencia al corte, la cohesión se determina por la capacidad de adherencia entre el cemento

²² Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material - N.P. Rajamane , J. Annie Peter, P.S. Ambily - Concrete Composites Laboratory, Structural Engineering Research Centre, CSIR Campus, Taramani, Chennai 600113, Tamil Nadu, India – October 2006.

²³ Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. Cengiz duran atiY civil engineering department, Cukurova University, 01330, Balcalı-Adana, Turkey. July 2004.

²⁴ SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 2001. P. 19-21[Consultado 12 de marzo del 2019].

y los agregados, la viscosidad está determinada por la fricción que posee en las capas del cemento, y la resistencia al corte se obtiene gracias al desplazamiento que realizan los agregados dentro de la pasta de cemento.

Segregación:

Las densidades que poseen cada uno de los componentes del concreto y sus respectivas diferencias, hacen que se las partículas con mayor densidad descendan, dado esto el agregado grueso quedará suspendido en la matriz del concreto.

Exudación:

Es una propiedad que permite que parte del agua se separe de la mezcla y se muestre en la superficie de la mezcla, esto se ve determinado a las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar.

Contracción:

Es el resultado que se da por la pérdida de humedad. Dado esto se puede producir una expansión en el concreto, si después de haber pasado el proceso de secado o estar parcialmente secado, se expone a humedad o se sumerge en agua²⁵.

5.1.5. Ceniza volante.

La ceniza volante (puzolana) es el residuo generado por las plantas o termoeléctricas de carbón. Es un residuo bastante fino que es capaz de ser transportado por el gas que se produce del horno, su composición es principalmente por SiO₂ (óxido de silicio) y Al₂O₃ (óxido de aluminio). Dichos residuos de gran finura han sido altamente empleados durante el último medio siglo ya que después de ciertos estudios, se determinó que este material funciona para el desarrollo de la resistencia en porcentajes que pueden ir desde el 10% hasta el 30%. Funcionan en la elaboración de concreto estructural, hasta en una estabilización del suelo con uso de ceniza ²⁶ .

²⁵ CAICEDO CASSO, Eduard Andrés. MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby. GORDILLO SUAREZ, Marisol. AGREDO TORRES, Janneth. Reusing a residue of the oil industry (FCC) in the production of building elements, Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana, 2015.Vol 19 No 1. [Consultado 12 marzo de 2019].

²⁶ VALBUENA LEGUÍZAMO, Humberto. Petrografía de concretos hidráulicos con adición de ceniza volantes de TERMOPAIPA. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ciencias. 2006. [consultado 15 de marzo de 2019].

Proceso de elaboración de la ceniza

Figura 2. Proceso de obtención ceniza volante



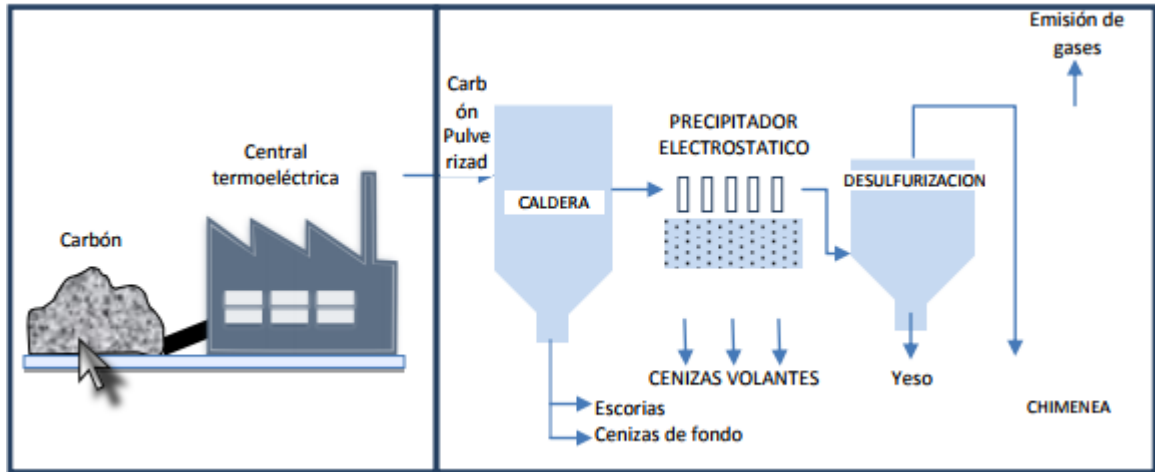
Fuente: elaboración propia

Dado que las cenizas volantes dependen del proceso de carbón sus propiedades químicas y físicas (temperatura, combustión, entre otros.) pueden variar dependiendo del origen del carbón. Se considera un material heterogéneo

El proceso de obtención de la ceniza volante inicia con la pulverización del carbón mediante la utilización de molinos, pulverizado el carbón, se procede a realizar la inyección al horno, que se realiza por medio de una corriente de aire a una alta velocidad, una vez el carbón pulverizado se encuentre en el horno se quemará a una temperatura de 1500 °c. Es importante tener en cuenta que el proceso de combustión no ocurre por completo ya que así se obtendrá la ceniza volante.²⁷

²⁷ ROA PARRA, Oscar Rodolfo. LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE "CENIZAS VOLANTES". [en línea]. Trabajo presentado como requisito para optar Al título de Ingeniero Topográfico. Bogotá, Colombia. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Topografía, 2016. p. 46 [consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en internet: Repositorio Educativo Digital <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5069/1/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf>

Figura 3. Esquema de equipos para la producción de ceniza volante



Fuente: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5069/1/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf>

Características y Propiedades de la ceniza volante:

Cada ceniza volante depende de distintos factores, su composición no resulta ser igual entre las muchas cenizas volantes que se pueden obtener a través de diferentes termoeléctricas o plantas, debido a esto es de suma importancia saber los componentes de la ceniza que se va a trabajar con el fin de obtener resultados más efectivos. Entre los factores más representativos que influyen en las características de la ceniza volante se tiene la composición química de los componentes incombustibles del carbón, el grado de pulverización del mismo, el tipo de caldera, la temperatura de combustión, entre otros.²⁸

Características físicas:

Una de las características más destacables en la ceniza volante, es su tamaño ya que este puede diferir notablemente a la hora de ser tratado con cemento o en algunos casos con hormigón. Otros de los factores que determinan la caracterización física de la ceniza son, la porosidad, el contenido de humedad que en algunos casos puede contener. La tabla... muestra las características físicas más representativas.²⁹

²⁸Ibíd., p. 54

²⁹Ibíd., p. 51

Tabla 2. Propiedades físicas de la ceniza volante

Propiedad física	Rango de Valores
Aspecto Externo	Polvo fino grisáceo
Tamaño de Partícula	1-200µm de diámetro
Superficie Especifica	0.2-25 m ² /g
Densidad	0.5-0.8 g/cm ³
Peso específico	1.9-2.8 g/cm ³
Punto de fusión	950-1150°C
Absorción de líquido	20-30% de agua

Fuente: <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5069/1/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf>

Características químicas:

La composición química de la ceniza volante se relaciona directamente con el tipo de carbón del que es originario, ya que este puede contener altos porcentajes de CaO, que regularmente están por debajo del 5% a diferencia de otras cenizas que pueden contener más del 20 % de CaO. Entre otros principales compuestos químicos de la ceniza volante se encuentra dióxido de sílice (SiO₂), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido férrico (Fe₂O₃), conteniendo también otros óxidos, como óxido cálcico (CaO), óxido magnésico (MgO), óxido de titanio (TiO₂), óxido de sodio (Na₂O), óxido de potasio (K₂O), trióxido de azufre (SO₃), entre otros.³⁰

Características mineralógicas:

La formación de cenizas volantes viene dada por una fase vítrea, la cual puede ocupar mayormente la composición de la ceniza y por una fase cristalina. Dado que en su composición se pueden identificar varios constituyentes cristalinos, su origen y el porcentaje de contenido, están relacionados al proceso que genera la ceniza en la planta o termoeléctrica de la que se obtenga, ya que en algunos casos el aire donde están situadas influye considerablemente en su generación.

Para la determinación del contenido de la fase vítrea se puede realizar el procedimiento de difracción de rayos x.³¹

Clasificación de la ceniza volante:

Según lo estipulado por la norma ASTM C – 618 (Estándar Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete) las cenizas volantes se pueden clasificar en dos tipos, ceniza volante

³⁰ *Ibid.*, p. 54

³¹ SANTAELLA, Luz Elena. CARACTERIZACION FISICA QUIMICA Y MINERALOGICA DE LAS CENIZAS VOLANTE. En *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. [en línea]. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada, julio de 2001, nro.10, p. 47-62. [consultado: 18 de noviembre de 2019]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/911/91101007.pdf> E-ISSN:0134-9170

clase C y ceniza volante clase F, esta clasificación toma en cuenta su composición química de óxidos, la cual contempla la cantidad de silicio, hierro y aluminio.

Ceniza volante clase F:

Este tipo de cenizas se caracterizan por ser de una combustión de carbones bituminosos, poseen propiedades puzolánicas, su contenido de calcio es menor al 15% y puede ser de material de sílice, silíceo, ferroso y aluminoso.³²

Ceniza volante clase C:

Esta ceniza será producida por la combustión de carbón sub bituminoso, sus cantidades de cal serán mayores al 15% y menores al 30%. A diferencia de la ceniza clase F, la ceniza volante clase C posee propiedades cementantes que con el contacto del agua produce endurecimiento, también posee propiedades puzolánicas.³³

5.1.6. Termoeléctricas

Termoeléctrica Paipa (Paipa-Boyacá)

Es una central de energía ubicada en Paipa-Boyacá, esta central opera a base de vapor con carbón bituminoso pulverizado, su capacidad neta es de 321 MW, distribuyendo su producción en cuatro unidades cada una con diferente capacidad neta, siendo así la central de energía más grande de Colombia. Capaz de proveer de material para la fabricación de cemento de la planta de Sogamoso.

Es fundamental conocer las características tanto físicas como químicas de la ceniza volante, ya que para cada termoeléctrica su composición cambia, a pesar de que, para este caso, todas las cenizas a estudiar provienen de la combustión de carbón bituminoso.

En la tabla... se muestran las principales características físicas de la ceniza de Termopaipa. La densidad fue determinada bajo la Norma Técnica Colombiana NTC 221: Método de ensayo para determinar la densidad del Cemento hidráulico

Para determinar la forma de la ceniza se utilizaron microscopios especializados para visualizar este tipo de material.

El contenido de humedad se determinó por medio de la norma ASTM C-311 secando las muestras de ceniza en el horno a una temperatura de hasta 110°C, ya que a esta temperatura se considera que la muestra se encuentra altamente seca.

Finalmente para hallar el porcentaje de inquemados, se tomó la muestra anteriormente sometida a temperatura de 110°C y se somete nuevamente a

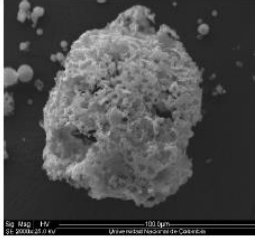
³² ROA, Op.cit., p. 50.

³³ *Ibíd.*, p. 50.

temperaturas de 750°C calcinando la masa. Este procedimiento se realizó bajo la norma ASTM C-114³⁴

En la tabla 3 se muestran las características de la ceniza volante Termopaipa después de aplicado el procedimiento anteriormente mencionado.

Tabla 3. Características físicas de la ceniza Termopaipa

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS C. V. TERMOPAIPA		
CARACTERÍSTICA	VALOR	UNIDAD
DENSIDAD	2.07	g/cm ³
FORMA		-
CONTENIDO DE HUMEDAD	1.5	%
PORCENTAJE DE INQUEMADOS	10.18	%

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

La composición química de la ceniza volante también juega un papel fundamental en la interpretación de esta como adición. En la tabla 4 se muestra la composición química de la ceniza volante hallada por medio de una difracción de rayos X

³⁴ FONSECA, Leonardo. EMPLEO DE CENIZA VOLANTE COLOMBIANA COMO MATERIAL CEMENTICIO SUPLEMENTARIO Y SUS EFECTOS SOBRE LA FIJACIÓN DE CLORUROS EN CONCRETOS. [en línea]. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería - Ciencia y Tecnología de Materiales. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, 2016, p. 102-113. [Consultado: 18 noviembre de 2019]. Disponible en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

Tabla 4. Composición química de la ceniza Termopaipa

Termoeléctrica Termopaipa	
Elemento	Contenido (%)
SiO ₂	49.180
Al ₂ O ₃	18.941
Fe ₂ O ₃	4.395
K ₂ O	1.497
TiO ₂	1.063
SO ₃	.858
CaO	.792
P ₂ O ₅	.587
MgO	.511
Na ₂ O	.449

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

Finalmente, la granulometría de la ceniza permite identificar el tamaño promedio de la partícula, factor que influye directamente en la reacción de la ceniza volante con el concreto. Según el estudio de la universidad nacional, al retirar las partículas con un diámetro mayor a 45 µm, la resistencia mecánica puede aumentar. La tabla 5 muestra los valores de la granulometría correspondientes a la ceniza de Termopaipa.³⁵

Tabla 5. Granulometría ceniza Termopaipa

GRANULOMETRIA C.V. TERMPOPAIPA		
VARIABLE	VALOR	UNIDAD
DIAMETRO (0.1)	4.533	µm
DIAMETRO (0.2)	28.197	µm
DIAMETRO (0.3)	84.664	µm
UNIFORMIDAD	0.899	-
AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA	0.703	m ² /g

Fuente: http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

³⁵ *Ibíd.*, p. 112.

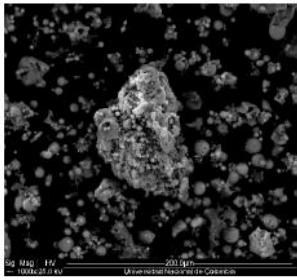
Termoeléctrica Sochagota (Sogamoso-Boyacá)

Es una central de energía ubicada en el municipio de Paipa- Boyacá, tiene una capacidad neta de 160 MW, su energía es a base de carbón bituminoso, la producción de su energía cumple con los estándares de protección ambiental, producción de ruido, protección del medio ambiente y fuentes de abastecimiento de agua. Su ubicación permite abastecer de material para la producción de cemento para la planta de fabricación de La Calera³⁶

La anterior descripción del procedimiento para la determinación de la ceniza volante de Termopaipa aplica para la determinación de las características de las cenizas de las otras dos termoeléctricas.

En la tabla 6 se encuentran las características físicas de la ceniza volante de Termosochagota, con su respectivo valor y unidad.

Tabla 6. Características físicas ceniza Termosochagota

CARACTERISTICAS FISICAS C. V. TERMOCHAGOTA		
CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
DENSIDAD	2.12	g/cm3
FORMA		-
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.3	%
PORCENTAJE DE INQUEMADOS	5.47	%

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

En la tabla 7 se encuentran las características químicas de la ceniza volante de Termosochagota, con su respectivo valor y unidad.

³⁶ *Ibíd.*, p. 102.

Tabla 7. Composición química de la ceniza Termopaipa

Termoeléctrica Termosochagota	
Elemento	Contenido (%)
SiO ₂	51.361
Al ₂ O ₃	20.679
Fe ₂ O ₃	5.667
K ₂ O	1.467
TiO ₂	1.109
SO ₃	.752
CaO	1.273
P ₂ O ₅	.517
MgO	.539
Na ₂ O	.358

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

La tabla 8 muestra los valores de la granulometría correspondientes a la ceniza de Termosochagota

Tabla 8. Granulometría de la ceniza Termosochagota

GRANULOMETRIA C.V. TERMPSOCHAGOTA		
VARIABLE	VALOR	UNIDAD
DIAMETRO (0.1)	4.11	µm
DIAMETRO (0.2)	25.282	µm
DIAMETRO (0.3)	98.075	µm
UNIFORMIDAD	1.27	-
AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA	0.802	m ² /g

Fuente: http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

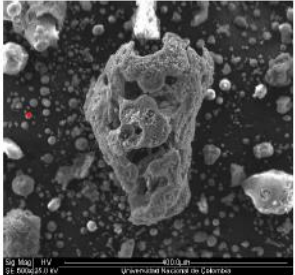
Termoeléctrica Tasajero San Cayetano (San Cayetano-Norte de Santander)

Es una central de energía ubicada en la vereda puente Zulía en el municipio de San Cayetano-Norte de Santander, utiliza un turbogenerador de vapor, su energía es a base de carbón bituminoso pulverizado, tiene una capacidad neta de 163 Mw, su protección al medio ambiente se ve reflejado en la utilización de precipitadores electrostáticos y una chimenea con altura de 90 metros.³⁷

³⁷ *Ibíd.*, p. 102.

En la tabla 9 se encuentran las características físicas de la ceniza volante de Termotasajero, con su respectivo valor y unidad.

Tabla 9. Características físicas de la ceniza Termotasajero

CARACTERISTICAS FISICAS C. V. TERMOTASAJERO		
CARACTERISTICA	VALOR	UNIDAD
DENSIDAD	2.14	g/cm ³
FORMA		-
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.55	%
PORCENTAJE DE INQUEMADOS	13.63	%

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

En la tabla 10 se encuentran las características químicas de la ceniza volante de Termotasajero, con su respectivo valor y unidad.

Tabla 10. Características químicas de la ceniza Termotasajero

Termoeléctrica Termotasajero	
Elemento	Contenido (%)
SiO ₂	42.450
Al ₂ O ₃	23.370
Fe ₂ O ₃	8.576
K ₂ O	.963
TiO ₂	1.117
SO ₃	1.247
CaO	.668
P ₂ O ₅	.169
MgO	.391
Na ₂ O	.239

Fuente: Basado en http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

La tabla 11 muestra los valores de la granulometría correspondiente a la ceniza de Termotasajero.

Tabla 11. Granulometría ceniza Termotasajero

GRANULOMETRIA C.V. TERMPOTASAJERO		
VARIABLE	VALOR	UNIDAD
DIAMETRO (0.1)	7.025	µm
DIAMETRO (0.2)	49.721	µm
DIAMETRO (0.3)	202.573	µm
UNIFORMIDAD	1.25	-
AREA SUPERFICIAL ESPECIFICA	0.408	m ² /g

Fuente: http://bdigital.unal.edu.co/53975/1/74374320_2016.pdf

5.1.7. Aditivos

Los aditivos en Colombia se rigen según la norma técnica colombiana NTC-1299 “concreto. Aditivos químicos para concreto”. Estos materiales son ingredientes del

concreto, que son adicionados a la mezcla de concreto como los otros materiales antes o durante del proceso de preparación.³⁸

Aditivos inclusores de aire

Los aditivos inclusores de aire se usan para mejorar la durabilidad del concreto, ya que, al añadir burbujas de aire en este, se mejora su resistencia y se previene la aparición de descascaramiento. Esta inclusión de aire en el concreto es muy efectiva en concretos expuestos a cambios de temperatura constantes.³⁹

Aditivos de control de la hidratación

Estos aditivos se componen de dos partes, una de ellas se encarga de detener la hidratación de los componentes cementantes, denominada estabilizador. La otra parte, llamada activador, restablece la función de hidratación que se impidió con la parte estabilizadora. A manera de ejemplo para entender su funcionamiento, estos aditivos son capaces de suspender el fraguado durante la noche, o durante largos periodos de transporte de un lugar a otro.⁴⁰

Inhibidores de corrosión

Estos aditivos son empleados principalmente en estructuras que se encuentran en contacto constante con ambientes expuestos a sales de cloro. Los aditivos inhibidores de la corrosión detienen químicamente la reacción de corrosión.⁴¹

Aditivos reductores de retracción

Este tipo de aditivos es usado en estructuras en las que sea necesario disminuir las fisuras y las deformaciones, ya sea por la durabilidad o por su aspecto. Estas estructuras incluyen tableros de puentes, losas de entrepiso, entre otras.

Aditivos colorantes

Son aditivos que se encargan de dar un color diferente al característico del concreto. Estos aditivos pueden ser provenientes de materiales naturales o sintéticos, y se aplican ya sea para mejorar su aspecto o por razones de seguridad. Según la norma, la adición no debe exceder el 10% de la masa de cemento, y para adiciones del 6% o menos, no existen efectos que alteren las propiedades del cemento, sin

³⁸ SILVA, Omar Javier. Generalidades y tipos de aditivos para el concreto [en línea]. 360 en concreto. Colombia, Bogotá. 1 de abril del 2016. Pg. 1. [Consultado 16 de marzo del 2019]. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-y-tipos-de-aditivos-para-el-concreto>

³⁹ Ibíd.

⁴⁰ Ibíd.

⁴¹ Ibíd.

embargo, para cualquier porcentaje de adición se debe revisar que las propiedades del aditivo.⁴²

Aditivos minerales finamente divididos

Esta clase de aditivos son materiales que se reducen en su tamaño para que puedan ser agregados al concreto antes de realizar el proceso de mezcla, con el fin de poder mejorar y en algunos casos cambiar diferentes propiedades del concreto cuando se encuentra en estado plástico o en el momento que alcanza su dureza⁴³.

5.1.8. Sulfatos en el concreto

El ataque de los sulfatos al concreto es una de las causas que más influyen en la durabilidad del material. Este afecta directamente al Aluminato Tricálcico (C₃A) que es un componente químico encontrado en el cemento, donde su porcentaje de contenido se encuentra entre el 7% y 15%, su presencia en el cemento ayuda a que se dé una rápida hidratación en la mezcla y se pueda producir una alta resistencia en edades tempranas⁴⁴.

La presencia de sulfatos se encuentra generalmente en aguas subterráneas, y en zonas áridas en las arenas y en rocas carbonatadas de origen sedimentario. El sulfato más agresivo y dañino para el concreto es el sulfato de magnesio, ya que actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento.

El ataque del sulfato en el concreto se presenta como una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

Para lograr un concreto resistente a este ataque, se han determinado dos características fundamentales para un concreto durable:

- Garantizar la disminución de la permeabilidad y la porosidad del concreto, la cual se logra disminuyendo la relación agua-cemento sin olvidar que esta relación también influye en la fisuración por contracción del concreto
- Disminuir la reacción de los sulfatos con el aluminato tricálcico, la cual se logra teniendo en cuenta el tipo de cemento utilizado en la mezcla, teniendo en cuenta que existen cementos con alta resistencia a los sulfatos, lo que

⁴² Ibíd.

⁴³ Sika Colombia S.A.S. Concreto: Aditivos para el concreto [en línea]. 2010. <https://col.sika.com/dms/getdocument.get/269d0f31-fb62-3538-bcca-0b37aad65e17/BROCHURE%20ADITIVOS%20PARA%20CONCRETO.pdf>

⁴⁴ <http://personales.upv.es/fbardisa/Pdf/Composici%C3%B3n%20Cementos.PDF>

indica que en su composición hay menos presencia de aluminato tricálcico, lo que evitará la reacción más fuerte con los sulfatos.⁴⁵

5.2. Marco conceptual

- **Asentamiento (Ensayo):** Resultado del ensayo de manejabilidad de una mezcla de concreto.
- **Durabilidad:** La durabilidad es la capacidad que tienen las estructuras de concreto reforzado de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones, las cuales están previstas en su diseño estructural.⁴⁶
- **Endurecimiento:** Desarrollo o ganancia de resistencia y otras propiedades de una mezcla cementicia, como resultado de la hidratación, después del fraguado final.
- **Esfuerzo:** Fuerza por unidad de área.⁴⁷
- **Fraguado:** El proceso debido a reacciones químicas, que ocurre después de la adición del agua de mezclado, y que produce un gradual desarrollo de rigidez de una mezcla cementicia.
- **Permeabilidad:** Se puede definir como la cantidad de agua o alguna otra solución química que pasa a través de una masa de concreto.
- **Resistencia a la compresión:** Es una característica mecánica del concreto, el cual por medio de una prensa hidráulica se aplica una carga sobre la superficie superior del cilindro dando como resultado un esfuerzo aplicado para llegar a su estado límite de falla.⁴⁸

⁴⁵ GARZÓN PIRE, William. Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregados reciclados. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Magister en Construcción. Bogotá, Colombia. Maestría en Construcción 2013. p. 15. [consultado el 22 de abril de 2019]. Disponible en internet: <http://bdigital.unal.edu.co/9496/1/garzonpirewilliam.2013.pdf>

⁴⁶ WINSLOW Y LIN. Percolation and pore structure in mortar and concrete. Cement and Concrete research. 2002.[Consultado el 15 de marzo de 2019].

⁴⁷ Dosificación de Hormigones [online]. Universidad de Cantabria, Santander, España. 22 de julio del 2014].

⁴⁸ NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo Rene. Tecnología del concreto 2010: Materiales diseño y mezcla. Tomo 1. Colombia, Bogotá. 2010 [Consultado 15 de marzo de 2019]

5.3. Marco legal

En Colombia, el ente regulador para la elaboración de Mezclas de concreto está determinado por la NTC, al igual que para la resistencia de materiales que se rige por la ATSM ratificada en E.E.U.U. A continuación, se enlistan las normas más importantes que se podrán tener en cuenta en el desarrollo de la investigación.

ASTM C1218M: Método de ensayo normalizado para cloruros solubles en agua en mortero y concreto.

ASTM C618: Especificación estándar para ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en el hormigón.

NTC 396: Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.

NTC 454: Toma de muestras en el concreto Fresco.

NTC 550: Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra.

NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros normales.

NTC 890: Ingeniería civil y Arquitectura. Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por medio de su resistencia a la penetración.

NTC 1028: Ingeniería civil y Arquitectura. Determinación del contenido de aire en concreto fresco. Método Volumétrico.

NTC 1032: Ingeniería civil y Arquitectura. Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. Método de Presión.

NTC 1377: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio.

NTC 3459: Concretos. Agua para la elaboración de concreto.

NTC 5551: Durabilidad de estructuras de concreto.

NSR-10 Título C: Concreto Estructural

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico de muestras de concreto adicionadas con ceniza volante procedentes de las termoeléctricas (Termo Tasajero, Termo Paipa Termo Sochagota) sometidas a la exposición de Sulfatos de Magnesio

6.2. Objetivos específicos

- Evaluar la resistencia a la compresión en muestras de concreto con reemplazo de cemento por ceniza volante en porcentajes de peso 0%, 6%, 8% y 10% proveniente de las termoeléctricas Termo Tasajero, Termo Sochagota y Termo Paipa
- Determinar la expansión, pérdida de peso y fisura miento como factor determinante de la durabilidad de muestras en concreto con reemplazo de cemento por ceniza volante en porcentajes de peso 0%, 6%, 8% y 10% expuesto a la solución de sulfato de magnesio ($MgSO_4$), a la edad de 56 días.
- Analizar los resultados de la resistencia a la compresión obtenidos en las muestras de concreto adicionadas con ceniza volante y determinar cuál de ellas tiene un mejor comportamiento al sulfato de magnesio

7. DELIMITACIÓN

7.1. Alcance

A través de ensayos de laboratorio y análisis de resultados obtenidos se pretende determinar cuál es la ceniza volante (Termotasajero, Termopaipa, Termosochagota) y en qué porcentaje de adición (6%, 8%, 10%) ofrece al concreto mejores propiedades mecánicas, específicamente en cuanto a su resistencia a la compresión y su durabilidad. Lo anterior se desarrollará teniendo en cuenta las edades de curado del concreto desde los 7 días hasta los 56 días.

7.2. Tiempo

Para la realización de este proyecto se utilizó un total de ocho meses, en los cuales los primeros tres meses se realizó el desarrollo del anteproyecto, donde se formuló la problemática que quería resolver, los 5 meses restantes se llevó a cabo la elaboración del trabajo estipulado, realizando pruebas de laboratorio y comparando los diferentes resultados obtenidos.

7.3. Limitaciones

- La cantidad de muestras de concreto, pues para poder realizar un análisis estadístico con promedios y correlaciones y obtener resultados más verídicos, es necesario tener un mínimo de tres muestras de concreto y debido al espacio reducido para realizar el curado se dificultó elaborar una mayor cantidad de probetas para la investigación.
- Accesibilidad a los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia.
- Tiempo de exposición de muestras a los agentes externos (cloruros y sulfatos).

8. METODOLOGÍA

8.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación es experimental, donde se realizan prácticas de laboratorio usando cilindros de concreto con distintas características, los cuales, después de una comparación y análisis de resultados se puede establecer las mejores condiciones del material, en cuanto propiedades mecánicas y más específicamente en cuanto a resistencia y durabilidad del concreto

8.2. Fuentes de información

Para el desarrollo de la metodología se tienen en cuenta las siguientes fuentes de información

8.2.1. Fuentes Primarias

Como fuente de información primaria, se tiene en cuenta las normas NTC, ASTM, aplicables para el estudio de agregados y diseño de mezclas de concreto, resultados y ensayos de laboratorios.

8.2.2. Fuentes Secundarias

Para las fuentes secundarias, se usan documentos como manuales, guías, libros y trabajos de grado relacionados con el tema.

8.3. Diseño metodológico

8.3.1. Etapa I.

Para esta primera etapa se recopiló toda la información acerca de los estudios e investigaciones en torno a la ceniza volante como adición en el concreto y sus efectos en las propiedades de la resistencia y la durabilidad, tanto a nivel nacional como internacional y se identificaron otras posibles ventajas de su uso frente al cuidado del medio ambiente. A partir de dichas referencias bibliográficas se estableció el aporte de la investigación a este tema, así como la continuación en el estudio del tema.

8.3.2. Etapa II

En esta etapa de la investigación se procede a elaborar los cilindros de concreto con y sin adición de ceniza volante. La ceniza volante será obtenida después de su proceso de producción, se obtendrá directamente de cada termoeléctrica escogida para el desarrollo de la investigación.

Se procede al desarrollo del diseño que se emplea para el mezclado de los materiales a utilizar en la elaboración y fundición de los especímenes, con los diferentes porcentajes de 0, 6, 8, y 10% de sustitución en peso de ceniza volante por cemento utilizada para la mezcla. Todo este procedimiento explicado se llevará a cabo en las instalaciones de la Universidad Católica de Colombia.

Se establecieron los porcentajes de adición de 6, 8 y 10% debido a que en la mayoría de referencias consultadas se trabajan con adiciones de ceniza volante entre el 10% y el 70%, por lo que se espera evaluar y estudiar el efecto causado en el concreto con porcentajes menores a los que ya se han estudiado en otras investigaciones.

8.3.3. Etapa III

Realizado el desencofrado de los especímenes, se realiza la inmersión de las muestras en un tanque lleno de agua con temperaturas entre 23°C y 25°C. Las muestras deben mantener las mismas condiciones de inicio (temperatura, dimensiones del tanque y contenido de agua) para no afectar su curado, se inicia el conteo de los días a los que se realizara el ensayo a compresión (7, 28, 14, 56 días) respectivamente para cada uno de los cilindros, tanto los adicionados con ceniza volante como los convencionales sin adición. Después de cumplido el respectivo tiempo de curado se procede a realizar el ensayo mencionado.

Se elaboran un total de 40 muestras adicionadas con ceniza volante, además de 10 muestras de concreto convencional sin ningún tipo de adición los cuales se denominan muestra patrón o testigo para posteriormente realizar la comparación de la resistencia a la compresión. De igual forma, se elaboraron 9 cilindros más, adicionados con cada porcentaje por cada tipo de ceniza. Estas muestras se utilizaron para la inmersión en la solución de sulfato y realizar la caracterización necesaria para concluir sobre su durabilidad.

Después de tener identificado cada cilindro, se procede a medir su diámetro y altura con un calibrador y a registrar su peso. Inmediatamente se procede a aplicar la carga axial sobre el cilindro de concreto hasta que alcance su máxima resistencia a la compresión o su falla última.

Para determinar el efecto de sulfatos en las muestras de concreto se tienen en cuenta las siguientes normas:

Tabla 12. Normas para medir presencia de sulfatos en el concreto

ASTM C452	Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate
ASTM C1012	Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution
NTC 3330	Cementos. Método de ensayo para determinar el cambio longitudinal de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfatos

Fuente: elaboración propia

Es importante aclarar que, las normas anteriormente mencionadas indican que las probetas deben de ser de 25x25x 285 mm, sin embargo, debido a limitaciones de los laboratorios, las muestras para estos ensayos tendrán un diámetro de 100mm y una altura de 65 mm. El tiempo también presenta una limitación para este ensayo pues las muestras requieren ser evaluadas hasta 15 semanas y posteriormente cada 4, 6, 9, y hasta 12 meses, por lo que hubo que ajustar el ensayo para los tiempos de entrega del trabajo de investigación.

8.3.4. Etapa IV

Al finalizar las pruebas de laboratorio, con la recopilación de datos que se obtuvo se inicia la elaboración del análisis y comparación con los informes experimentales, de lo que fue el resultado de las cenizas volante determinando cual resulta más óptima como parte de la adición para el concreto de sulfato de magnesio.

9. CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Para garantizar la calidad y gradación de los agregados finos y gruesos que se usan en concretos, la normativa colombiana establece una serie requisitos y parámetros que los materiales deben cumplir. Dichos requisitos y parámetros se medirán en las muestras elaboradas para la investigación. A lo anterior se le conoce comúnmente como caracterización del material, la cual es garantía de que las muestras elaboradas tienen las mismas características del material que se usa normalmente en el desarrollo de estructuras en concreto.

La caracterización del material incluye los siguientes procesos, los cuales se encuentran normalizados y contienen el desarrollo paso a paso para obtener los resultados:

- **Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos. NTC 77**
- **Caracterización del cemento**
- **Gravedad específica y absorción de agregados finos. NTC 237**
- **Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. NTC 176**
- **Diseño de la mezcla a través del método ACI**
- **Elaboración de probetas: cilindros para curado NTC 550**

9.1. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos NTC 77

El desarrollo de este ensayo permitirá identificar la cantidad correcta de distribución de material por medio de tamizaje.

El proceso adecuado del ensayo se realiza después de obtener una muestra del material seco pesada, pasando por diferentes tamices con diámetros de abertura cada vez menores, reteniendo cantidades del material pesado, para así determinar su caracterización y poder realizar una curva granulométrica como lo determina la norma⁴⁹

En la tabla 13, se presentan los requisitos solicitados por la norma para garantizar una gradación del material adecuado, y en la figura 4 y 5 se muestra el material utilizado para el procedimiento y los respectivos tamices usados para el análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos.

⁴⁹ NTC 174(instituto colombiano de normas técnicas y certificación. Ingeniería civil y arquitectura método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC 77. Bogotá: Icontec,1994. p.2)

Figura 4. Agregado fino y agregado grueso

Tipo de agregado	Imagen
1. Agregado fino	
1. Agregado grueso	

Fuente: Propia

Figura 5. Tamices para granulometría



Fuente: Propia

Tabla 13. Requisitos de gradación

Requerimiento de agregados							
GRAVAS				ARENAS			
ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA		ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)	Límite Inferior	Límite Superior	(mm)	(Denom. Estándar)	Límite Inferior	Límite Superior
12.5	1/2"	100%	100%	38	1 1/2"	100%	100%
9.5	3/8"	100%	100%	25	1"	95%	100%
4.76	N° 4	85%	100%	19	3/4"	60%	80%
2.38	N° 8	60%	80%	12.5	1/2"	25%	60%
1.19	N° 16	45%	65%	9.5	3/8"	13%	35%
0.6	N° 30	30%	55%	4.76	N° 4	0%	10%
0.3	N° 50	15%	35%	2.38	N° 8	0%	5%
0.15	N° 100	2%	14%	0.075	N° 200	0%	2.00%
0.075	N° 200	0%	7%				

Fuente. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. *Concretos. Especificaciones De Los Agregados Para Concreto. NTC-174. Bogotá: ICONTEC, 2000. p. 8*

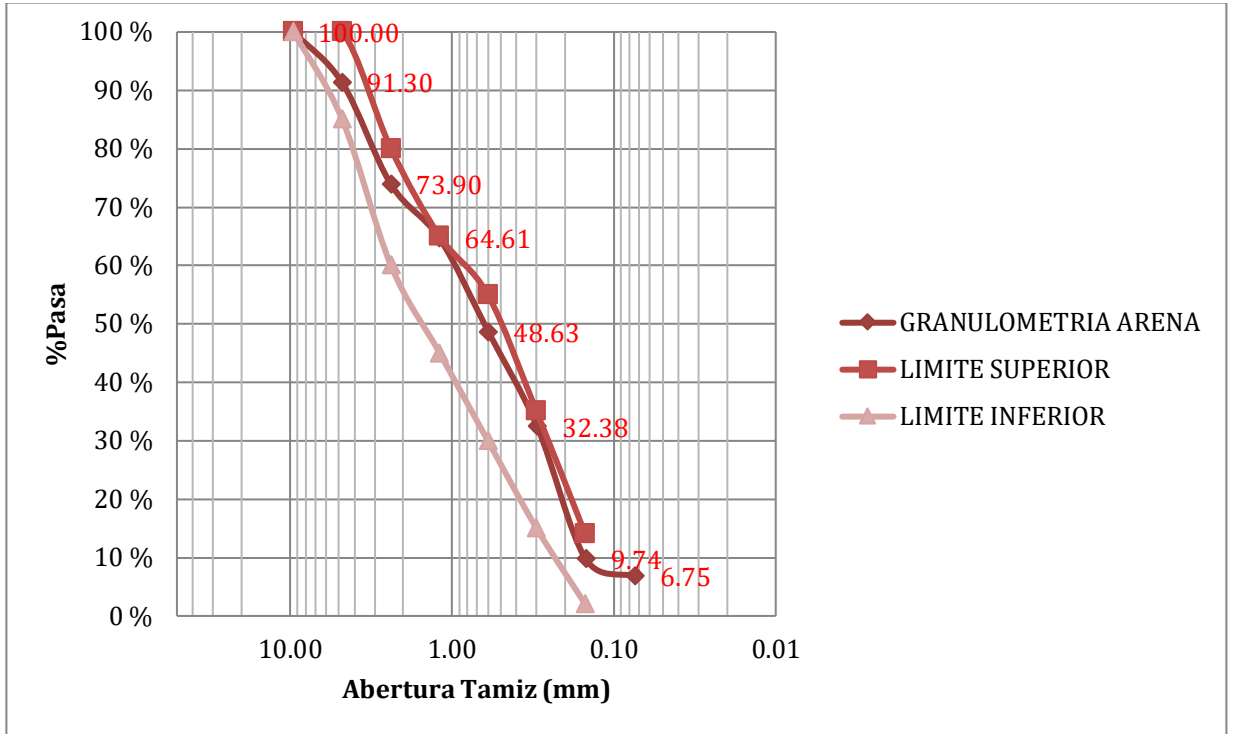
Tomando en cuenta las especificaciones de la norma y comparando con los datos obtenidos, los porcentajes que pasan en la gradación del material tanto fino como grueso cumplen en el rango de los valores máximos y mínimos instaurados en la norma NTC-174, material apto para mezcla de concreto, obteniendo un módulo de finura 2,80 (Véase tabla 14 y figura 6).

Tabla 14. Granulometría agregado fino

GRANULOMETRIA ARENA					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	%Retenido	% Retenido acumulado	%Pasa
3/8	9.52	0	0.0	0.0	100.00
N°4	4.76	172.8	8.7	8.7	91.30
N°8	2.38	345.6	17.4	26.1	73.90
N°16	1.19	184.4	9.3	35.4	64.61
N°30	0.595	317.5	16.0	51.4	48.63
N°50	0.297	322.6	16.2	67.6	32.38
N°100	0.149	449.7	22.6	90.3	9.74
N°200	0.074	59.4	3.0	93.3	6.75
Fondo		134	6.7	100.0	0.00
		1986	100.0		
Módulo de finura		2.8	m3		

Fuente: elaboración propia

Figura 6. Granulometría agregado fino



Fuente: elaboración propia

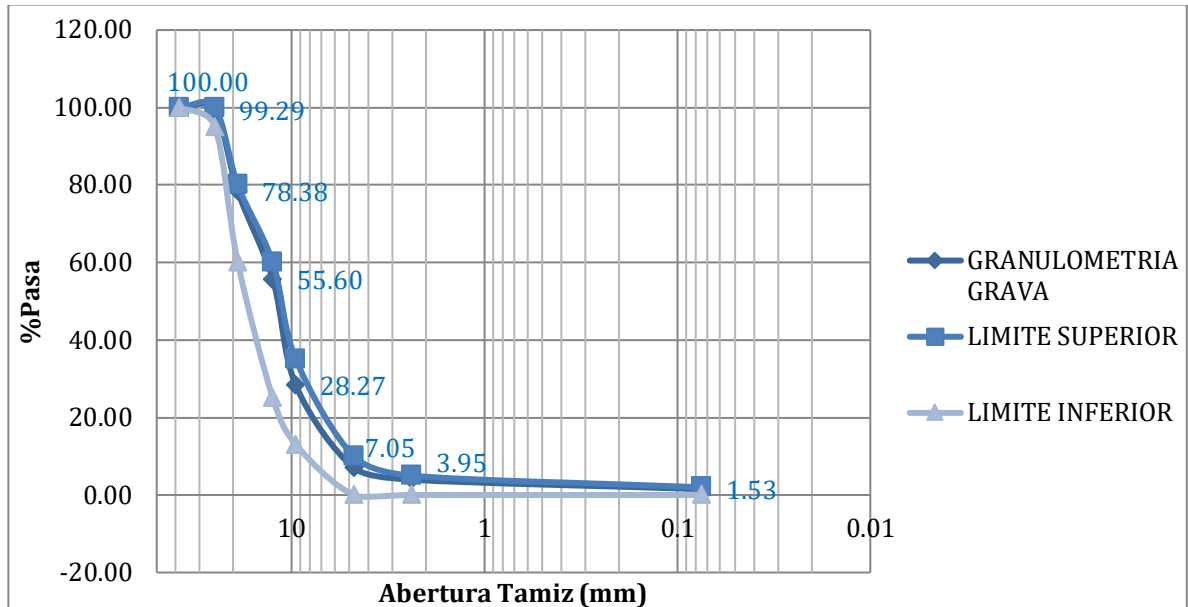
Del mismo modo se realizó la granulometría para la grava, la cual presentó resultados óptimos comparados con los requeridos por la norma NTC- 174, material apto para la mezcla de concreto, dando un máximo de tamaño nominal de 1". (Véase tabla 15 y figura 7).

Tabla 15. Granulometría agregado grueso

GRANULOMETRIA GRAVA					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	%Retenido	% Retenido acumulado	%Pasa
1 1/2"	38	0	0.0	0.0	100.00
1"	25	24.6	0.7	0.7	99.29
3/4"	19	727.9	20.9	21.6	78.38
1/2"	12.5	793.2	22.8	44.4	55.60
3/8"	9.5	951.4	27.3	71.7	28.27
N° 4	4.76	738.7	21.2	92.9	7.05
N° 8	2.38	107.9	3.1	96.0	3.95
N° 200	0.075	84.5	2.4	98.5	1.53
Fondo		53.1	1.5	100.0	0.00

Fuente: elaboración propia

Figura 7. Gráfica granulometría agregado grueso



Fuente: elaboración propia

9.2. Caracterización del cemento. NTC 121

La caracterización del cemento es un aspecto de gran importancia a la hora de diseñar una mezcla de concreto, pues este debe cumplir con unos requisitos mínimos normalizados para garantizar calidad y seguridad. Un cemento de mala calidad puede tener consecuencias bastante negativas como la pérdida de la funcionalidad estructural⁵⁰.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el cemento Tequendama, al cual se le aplicaron los distintos ensayos normalizados para obtener sus principales características físicas

Dentro de las propiedades más relevantes del cemento que se estudian para verificar que cumpla con los estándares de calidad se encuentra:

⁵⁰PERILLA, Jorge. CORTES, Edwin. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECANICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I. Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero civil. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería Civil, 2014. p.1. [consultado: 14 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11044/ESTUDIO%20COMPARATIVO%20DE%20LAS%20CARACTERISTICAS%20FISICO%20MECANICAS%20DE%20CUATRO%20CEMENTOS%20COMERCIALES%20PORTLAND%20TIPO%20I.pdf;jsessionid=6F730E0535B13EA56AF0A5B69D084EED?sequence=1>

- Superficie específica o Finura del cemento. NTC 33 o NTC 597
- Tiempo de fraguado (inicial y final). NTC 118
- Resistencia a la compresión. NTC 220
- Estabilidad

Todos los cementos portland que tengan finalidad en construcción deben cumplir con los siguientes requisitos enunciados en la tabla 16 mostrada a continuación:

Tabla 16. Requisitos del cemento portland

	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Finura, superficie específica en m ² /kg						
- Ensayo por medio de permeabilidad al aire, mínimo.	280	280	280	-	280	280
Estabilidad	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Expansión en autoclave, máximo, %						
Tiempo de fraguado (Métodos alternativos).						
- Ensayo por agujas de Vicat: Tiempo inicial, en minutos, no debe ser menor de	45	45	45	45	45	45
Tiempo final, en horas, no debe ser mayor de	8	8	8	8	8	8
Resistencia a la compresión en Mpa (aprox. kgf/cm ²).						
La resistencia a la compresión de cubos de mortero hechos con una parte de cemento y 2,75 partes de un arena gradada normalizada para este ensayo, preparados y probados de acuerdo con la NTC 220, no debe ser menor que los valores indicados abajo, para cada edad.						
1 d		-	-	10,0 (100)		
3 días	8,0 (80)	12,5 (125)	10,5 (105)	21,0 (210)	-	8,5 (85)
7 días	15,0 (150)	19,5 (195)	17,5 (175)	-	7,0 (70)	15,5 (155)
28 días	24,0 (240)	-	-	-	17,5 (175)	21,0 (210)

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTO PÓRTLAND. ESPECIFICACIONES FÍSICAS Y MECÁNICAS. NTC-121. Bogotá: ICONTEC, 1982. p. 2

9.2.1. Superficie específica o Finura del cemento. NTC 33 o NTC 597

La superficie específica o finura del cemento tiene como objeto medir la superficie específica de las partículas de cemento por unidad de masa. Cementos con partículas más finas tienen mayor superficie específica. Este valor puede ser expresado en m²/kg o en unidades de cm²/g. La finura del cemento es un parámetro que se relaciona con el calor y velocidad de hidratación ya que a mayor finura del cemento se presenta una mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia. La finura del cemento también permite identificar

las impurezas presentes en el cemento, factor que también puede generar una disminución en la resistencia en el concreto⁵¹.

Para determinar el valor de finura del cemento se utiliza el ensayo de permeabilidad al aire con el equipo de Blaine, donde se hace pasar una cantidad definida de aire por una muestra preparada en una determinada forma, la cantidad de aire que pasa es función del tamaño y de la distribución de tamaños de las partículas.

9.2.2. Tiempo de fraguado (inicial y final). NTC 118

El tiempo de fraguado se conoce como el paso del estado plástico a un estado rígido en la pasta de cemento y se puede distinguir dos tiempos de fraguado. El tiempo de fraguado inicial corresponde al tiempo desde que se adiciona el agua hasta que su temperatura aumenta a un valor máximo, posterior a esto, pierde casi que toda su plasticidad. A esa pérdida de la plasticidad de la pasta de cemento se le conoce como tiempo de fraguado final. La norma NTC 118 Establece el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat.

Durante el ensayo se debe dejar caer la aguja de 1 mm en la pasta de cemento y medir la penetración cada 15 minutos, hasta que se obtenga 25 mm o menos en el valor de penetración obtenida. A medida que la penetración de la aguja disminuye se puede determinar su tiempo de fraguado, ya sea inicial o final según lo descrito en el párrafo anterior. El tiempo de fraguado inicial puede ocurrir entre dos y cuatro horas, mientras que el fraguado final puede suceder entre cuatro y ocho horas.⁵²

9.2.3. Resistencia a la compresión. NTC 220

La resistencia a la compresión del cemento resulta clave a hora de realizar una mezcla, pues esta resistencia será transmitida al mortero y el concreto elaborado con el cemento, y su importancia radica principalmente en la posible estimación de la resistencia del concreto, aunque esta sea incierta debido a factores como los agregados, mezcla del concreto, procedimientos de construcción y las condiciones en las que se desarrolle la obra.

El ensayo consiste en realizar un mortero, con 2,75 partes de arena 1 parte de cemento. La cantidad del agua debe ser aquella que produzca una fluidez de 110 \pm 5 en 25 golpes con la mesa de flujo. Los moldes usados para el ensayo deben tener medidas de 50 mm. El mortero se coloca en los moldes en dos capas de aproximadamente 25 mm, es decir, la mitad del molde, para luego apisonar con 32

⁵¹ Ibid., p. 30.

⁵² Norma Técnica Colombiana INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT. NTC 128. [en línea]. Bogotá D.C.: El instituto 1998. p. 5

golpes y continuar con la siguiente y última capa. Después de fundida la mezcla en los moldes, estos deben llevarse a la cámara húmeda por 24 horas. Durante el tiempo anterior a la falla, los cubos de ensayo deben sumergirse en agua con cal hasta el momento de la falla. Para la falla debe tenerse en cuenta que las superficies sobre las que se va a ejercer presión sean las que estuvieron en contacto con las paredes del molde y que dichas superficies se encuentren sin curvaturas y lo más plana posible.

Las edades de ensayo de compresión normalizadas son: 3, 7 y 28 días. La resistencia será igual al cociente entre la máxima carga total y el área de la superficie cargada⁵³.

Finalmente, aplicando los ensayos descritos en los anteriores numerales se obtienen los siguientes resultados de caracterización para el cemento utilizado (véase tabla 17).

Tabla 17. Parámetros obtenidos cemento Tequendama

Cemento Tequendama		
Parámetros	Cemento	Cumple
Densidad (gr/cm3)	2.78	-
Finura (cm2/g)	4220	SI
Consistencia normal	0.28	-
Fraguado inicial (min)	160	SI
Fraguado final (min)	440	SI
Expansión autoclave (%)	0.6	SI
Resistencia a 3 días (MPa)	7	NO
Resistencia a 7 días (MPa)	13	NO
Resistencia a 28 días (MPa)	20	NO

Fuente: elaboración propia

Comparando los resultados obtenidos con los parámetros de la norma NTC 121, se concluye que el cemento Tequendama cumple con los tiempos de fraguado mínimos (tanto fraguado inicial como fraguado final), la finura o superficie. Sin embargo, en cuanto a la resistencia a la compresión, tuvo valores por debajo de los normalizados en las tres edades de falla. Aunque es poco preciso dar un pronóstico de la resistencia a la compresión del concreto basándose en la resistencia a la

⁵³ Norma Técnica Colombiana. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 60 mm x 60.8mm de lado. NTC 220. [en línea]. Bogotá D.C.: El instituto 2004. Todo el documento.

compresión del cemento, existe una posibilidad de que pueda generar efectos negativos en dicha propiedad.

9.3. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. NTC 176

En este ensayo se toma la muestra de agregado grueso “grava” y se sumerge en agua durante 24 horas, con el fin de saturar los poros, “una vez pasado el tiempo estimado se remueve el contenido de agua y se seca la superficie de las partículas, posteriormente se calcula su masa. La masa de la muestra es determinada y sumergida en agua, una vez finalizado este proceso la muestra se seca al horno y se determina su masa nuevamente. Se usan las masas obtenidas y se hace uso de las fórmulas adecuadas para el cálculo de tres tipos de densidad y la absorción.⁵⁴

Figura 8. Agregado grueso caracterización



Fuente: Propia

⁵⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso NTC-176. Bogotá. Icontec. 1995. Todo el documento

Tabla 18. Densidad y gravedad específica agregado grueso

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION DE AGREGADOS GRUESOS			
PRUEBAS	No. 1	No. 2	PROMEDIO
A - Peso material seco (gr)	1524.1	1672.7	1598.40
B - Peso en aire S.S.S. (gr)	1480.9	1627.5	1554.20
C - Peso en agua S.S.S. (gr)	942	1031.3	986.65
GS. BULK	2.544	2.537	2.54
GS.BULS SSS= B/(B-C)	2.618	2.608	2.61
GS. APARENTE=A/(A-C)	2.748	2.73	2.74
ABSORCIÓN= (B-A)/A*100 (%)	2.9	2.8	2.85

Fuente: elaboración propia

Obtenidos los resultados se puede evidenciar la densidad de la grava a utilizar para el diseño de mezclar que se realizará será de 2,61 g/cm³ y absorción de 2,85%.

9.4. Gravedad específica y absorción de agregados finos. NTC 237

Se toma una muestra de agregado fino y se sumerge en agua por un tiempo de 24 horas para lograr saturar los poros. “terminado el tiempo se remueve el agua y se seca la superficie de las partículas, donde se determina la humedad superficial del material con el ensayo del cono especificado en la norma NTC-237, donde se apisona con un pistón 25 veces distribuyéndolos en la superficie y se levanta el cono verticalmente. Una vez el agregado fino se asienta se pasa a llenar el picnómetro parcialmente con agua, adicionalmente se introduce dentro del picnómetro 500 g ± 10 g de agregado saturado y superficialmente seco, se vuelve adicionar agua hasta llenar el 90% de la capacidad, se gira, invierte y agita el picnómetro para eliminar

todas las burbujas de aire finalizado el proceso anterior se procede a determinar la masa total del picnómetro, con la muestra y el agua.⁵⁵

Tabla 19. Densidad y gravedad específica de agregado fino

GRAVEDAD ESPECIFCA Y ABSORCION DE AGREGADOS FINOS			
PRUEBAS	No. 1	No. 2	PROMEDIO
A - Peso material seco (gr)	500.9	500.6	500.75
B - Peso del picnómetro lleno (gr)	650.8	666.9	658.85
C - Peso del picnómetro + muestra (gr)	958.1	974.7	966.4
S - Peso del material S.S.S. (gr)	489.4	489.1	489.25
GS. BULK= $A/(B+S-C)$	2.53	2.54	2.535
GS.BULS SSS= $S/(B+S-C)$	2.59	2.6	2.595
GS. APARENTE= $A/(B+A-C)$	2.69	2.7	2.695
ABSORCIÓN= $(S-A)/A*100$	2.3	2.4	2.35

Fuente: elaboración propia

Determinados los resultados se evidencia la densidad promedio de 2,6g/cm³ y una absorción 2,35% para el agregado fino.

9.5. Diseño de la mezcla de concreto

El diseño para la obtención de resultados se realizó por cálculos volumétricos ocupados por los diferentes materiales establecidos para una mezcla que tiene como consideración 28 Mpa, equivalente a una resistencia de 4000 psi, con un contenido natural de aire de 1.5% y 8 cm de revenimiento.

⁵⁵ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino NTC-237. Bogotá. Icontec. 1995. Todo el documento

9.5.1. Contenido de aire y determinación de agua

Para obtener un contenido adecuado de agua y aire es necesario el valor máximo nominal del agregado a utilizar, gracias a los ensayos realizados se pudo determinar un valor máximo nominal de 1", que proporciona una cantidad adecuada del agregado con y sin inclusión de aire.⁵⁶

Tabla 20. Determinación de agua y aire

Agua en Lt/m ³ de concreto para los tamaños máximos de agregados gruesos y consistencia indicados								
Asentamiento	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	205	200	185	180	160	155	145	125
3" a 4"	225	215	200	195	175	170	160	140
6" a 7"	240	230	210	205	185	180	170	--
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-8.

Tabla 21. Valores para diseño de la mezcla

Parámetro	Valor	Unidad
Tamaño Máximo Nominal	25	Mm
Contenido De Aire Estimado	1.5	%
Asentamiento	80	Mm
Agua De Diseño	325	lb/yd ³
	193	Lt/m ³

Fuente: elaboración propia

⁵⁶ AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-1

9.5.2. Relación agua material cementante

La relación de agua-cemento está determinada por la resistencia a compresión que se vaya a utilizar para el diseño de mezcla sin inductor de aire, el valor se escogerá para una resistencia de 4000 psi. (Véase la tabla 13). Se obtiene una relación de 0,57.

Tabla 22. Relación agua/cemento

Resistencia a la compresión a los 28 días (Mpa)	Relación agua - cemento	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
45	0.38	0.31
40	0.43	0.34
35	0.48	0.40
30	0.55	0.46
25	0.62	0.53
20	0.70	0.61
15	0.80	0.72

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-11*

9.5.3. Estimación de agregado grueso

El peso de agregado grueso por unidad de volumen se determina gracias al módulo de finura del agregado fino (Véase tabla 13) y el máximo tamaño nominal del agregado grueso. Se obtiene un coeficiente de 0,67.

Tabla 23. Factores para la determinación de agregado grueso

Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto para diversos módulos de finza del fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.80	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-12*

9.5.4. Pesos en m³

Tabla 24. Peso unitario suelto y apisonado grava y arena

CONDICIÓN	MATERIAL	
	ARENA	GRAVA 1"
	kg/m ³	kg/m ³
PESO UNITARIO SUELTO	1387	1284
PESO UNITARIO APISONADO	1651	1472

Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Resumen pesos

CONTENIDO DE MATERIAL EN UNA MUESTRA DE CONCRETO		
CONTENIDO DE AIRE	1.5	%
AGUA DE DISEÑO	193	L
a/c	0.57	-----
CANTIDAD DE CEMENTO	339	Kg
PESO DE GRAVA	986	Kg
PESO DE ARENA	857	Kg

Fuente: elaboración propia

Obtenidos los pesos para cada agregado que se utilizara se procede a calcular el valor para un metro cúbico de mezcla.

Tabla 26. Cantidades en m³

CANTIDAD DE MATERIAL EN UN METRO CUBICO		
CEMENTO	0.19525	m ³
AGUA	193	m ³
GRAVA	0.67	m ³
ARENA	0.62	m ³

Fuente: elaboración propia

9.6. Elaboración de especímenes de concreto y curado NTC-550

Dados los parámetros instaurados en la norma, se procede a realizar la elaboración de especímenes de concreto, se utilizará formaleta cilíndrica de 100 mm de diámetro y con una altura de 200mm, se colocará la mezcla de concreto en 3 capas de un volumen igual, apisonando cada capa en forma de espiral 25 veces con una varilla, una vez apisonada cada capa se golpeará 20 veces el molde del cilindro con el martillo de caucho sacando las burbujas de aire que hayan quedado atrapadas en la mezcla⁵⁷.

⁵⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes en concreto. NTC-550. Bogotá. Icontec. 2007. Todo el documento

Tabla 27. Cantidades en m3

Cantidad de material para especímenes de concreto					
Numero de cilindros	Volumen de cilindro (m3)	Material			
		Cemento (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (L)
1	0.00157083	0.53251137	1.433602	1.60793	0.3
4	0.00628332	2.13004548	5.734409	6.431732	1.2
16	0.02513328	8.52018192	22.93764	25.726928	4.9

Fuente: elaboración propia

Figura 9. Cilindros de concreto



Fuente: Propia

Se realiza la sustitución de cemento por ceniza volante de tres tipos de termoeléctricas en diferentes porcentajes (véase tabla 28).

Tabla 28. Porcentaje en peso de ceniza sustituida

Porcentaje de peso sustituido de cemento por ceniza volante en la muestra				
Material/Porcentaje	0%	6%	8%	10%
Cemento (g)	532.5114	501	490	479
Ceniza (g)	0	32	43	53

Fuente: elaboración propia

Figura 10. Cilindros con sustitución de ceniza



Fuente: Propia

9.7. Exposición de muestras de concreto a sulfatos

Uno de los criterios que se estudiará será la deformación que presentan las mezclas de concreto frente a la exposición de sulfatos, más específicamente, para el sulfato de magnesio, que resulta ser uno de los sulfatos en forma de sal más agresiva para el concreto. Estos ataques vienen condicionados desde varios aspectos como lo son el tipo de cemento, la calidad del entorno donde se encuentra el concreto, los suelos, aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de mar, cercanas a estructuras de concreto.

9.7.1 Inmersión de cilindros a sulfatos

La inmersión en sulfatos se hizo con las muestras de concreto a la edad de 56 días, con un porcentaje de sustitución del 6% de ceniza volante, los cuales presentaron la mayor resistencia en comparación con los otros porcentajes de sustitución, esto se realizó una vez cumplido los curados de cada cilindro.

La solución que se utilizó fue la de magnesio ($MgCl_2$) la cual resulta ser una de las soluciones de sulfato más agresivas. De acuerdo a la NTC 3330 se realizó la relación de agua – solución, la cual establece que por cada 900 ml de agua se tomará 50 gr de sulfato de magnesio. De acuerdo a lo establecido por esta norma se deben tomar mediciones semanalmente durante un mes, posteriormente se realizará el mismo procedimiento en los meses 4, 6, ,9 y 12 meses

Cada vez que se realice una inmersión se debe dejar por 24 horas y llevar a un horno a temperaturas altas comprendidas entre 105° - 130° dejándolas 24 horas para cumplir con un tiempo de secado de las muestras.

Debido a las limitaciones de disponibilidad y accesibilidad al laboratorio, no es posible realizar la cantidad de pruebas o mediciones, por lo que se disminuyen a 4 pruebas por un mes. Estas pruebas se realizan a unos cortes de los cilindros con dimensiones de 6,5x10cm, para un total de 4 cortes de cilindros utilizados. La inmersión se realizó en 7 litros de agua y 3500 gramos de sulfato de magnesio, sumergidos los cilindros por 24 horas, se llevan a un horno con temperaturas elevadas de 105° - 120° por 34 horas, este procedimiento se repite por 4 veces durante cada semana durante un mes⁵⁸.

Figura 11. Inmersión de cilindros



Fuente: Propia

Figura 12. Cilindros con sulfatos de magnesio



Fuente: Propia

⁵⁸INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Cementos. Método de ensayo para determinar el cambio longitudinal de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfatos. NTC-3330. Bogotá. Icontec. 2019. Todo el documento

10. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LAS MUESTRAS ELABORADAS

Uno de los aspectos a evaluar durante la presente investigación es la resistencia a la compresión, ensayo que consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen.⁵⁹ Después de aplicado el ensayo de resistencia a la compresión se procede a relacionar el valor obtenido de resistencia versus el tiempo de maduración.

En consecuencia, con lo anterior, se hace un análisis de la resistencia a la compresión del concreto evaluando su variación según el tipo de ceniza para determinar cuál se comporta mejor, y después, según el porcentaje de adición de ceniza. En la tabla 29 se puede observar la matriz de experimentos de la investigación, esta matriz se repite para cada una de las edades de curado de 7, 14, 28 y 56 días

Tabla 29. Matriz experimental

MATRIZ EXPERIMENTAL											
	UNIDAD	MUESTRA PATRON	C.V. 1				C.V. 2			C.V. 3	
Porcentaje de adición C.V	%	0% ADICION	6% ADICION	8% ADICION	10% ADICION	6% ADICION	8% ADICION	10% ADICION	6% ADICION	8% ADICION	10% ADICION
Cantidad de cilindros	UND	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cemento	Kg	2.130	0.501	0.490	0.479	0.501	0.490	0.479	0.501	0.490	0.479
Agregado	Kg	12.166	3.042	3.042	3.042	3.042	3.042	3.042	3.042	3.042	3.042
Ceniza	Kg	0.000	0.032	0.043	0.053	0.032	0.043	0.053	0.032	0.043	0.053
<i>C.V.=Ceniza volante</i>											
<i>C.V. 1=Ceniza de Termosachagota</i>											
<i>C.V. 2=Ceniza de Termotasajero</i>											
<i>C.V. 3=Ceniza de Termopaipa</i>											

Fuente: elaboración propia

⁵⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Ensayo de la resistencia a la compresión de especímenes de cilindros de concreto. NTC-673. Bogotá. Icontec. 2010. p.2.

Tabla 30. Nomenclatura de probetas de concreto

FALLA	TIPO DE CENIZA		
	C.V.1	C.V.2	C.V.3
7	6%	6%	6%
	8%	8%	8%
	10%	10%	10%
14	6%	6%	6%
	8%	8%	8%
	10%	10%	10%
28	6%	6%	6%
	8%	8%	8%
	10%	10%	10%
56	6%	6%	6%
	8%	8%	8%
	10%	10%	10%

Fuente: elaboración propia

Según la metodología descrita anteriormente, se obtuvieron los valores de peso, altura, diámetro y resistencia para la edad de 7 días de curado, los cuales se registran en la tabla 31. La figura 13 muestra el cilindro de concreto después de aplicarse el ensayo a la compresión, clasificando el tipo de falla identificado. El tipo de falla se relaciona directamente con factores como el tipo de refrentado, y la carga ejercida al momento del ensayo.

Tabla 31. Variables de muestras para 7 días de curado

Variables	TIEMPO DE CURADO 7 DIAS									
	Muestra patron	Tasajero	Sochagota	Paipa	Tasajero	Sochagota	Paipa	Tasajero	Sochagota	Paipa
		6%			8%			10%		
Peso (g)	3750.00	3648.00	3822.00	3814.00	2667.00	2635.00	2674.00	3648.00	3660.00	3739.00
Altura Promedio (in)	3.99	7.97	4.00	3.97	8.08	7.83	8.08	7.98	8.01	8.06
Diámetro Promedio (in)	8.01	3.99	8.00	8.00	4.00	3.93	18.00	3.96	3.93	3.99
Resistencia (PSI)	1942.87	1869.00	1693.86	1783.89	1187.90	1196.26	1313.95	975.25	1186.77	1290.69
Resistencia a la compresion normalizada (PSI)	80%	77.4%	70.1%	73.9%	49.2%	49.5%	54.4%	40.4%	49.1%	53.5%

Fuente: elaboración propia

Figura 13. Falla 7 días.

TIPO DE FALLA	CILINDRO FALLADO	DESCRIPCION
 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>		<p>La falla de corte, se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran cercanas al límite de tolerancia especificada</p>

Fuente: Propia

De igual forma, se obtuvieron los valores de peso, altura, diámetro y resistencia para la edad de 14 días de curado, los cuales se registran en la tabla 32. La figura 14 muestra el cilindro de concreto después de aplicarse el ensayo a la compresión, identificado respectivamente con el tipo de falla observado.

Tabla 32. Variables de muestras para 14 días de curado

Variables	TIEMPO DE CURADO 14 DIAS									
	Muestra patron	Tasajero 6%	Sochagota 6%	Paipa 6%	Tasajero 8%	Sochagota 8%	Paipa 8%	Tasajero 10%	Sochagota 10%	Paipa 10%
Peso (g)	2546.00	2664.00	2567.00	2662.00	3667.00	3660.00	3739.00	3713.00	3739.00	1290.69
Altura Promedio (in)	8.00	8.07	8.05	8.05	8.08	8.04	8.02	8.00	8.01	8.00
Diámetro Promedio (in)	3.98	4.00	3.96	3.96	3.98	3.97	3.97	3.97	3.98	3.96
Resistencia (PSI)	2225.14	2629.04	2302.62	2565.42	2121.86	2143.47	2174.11	1447.76	1387.12	1462.47
Resistencia a la compresion normalizada (PSI)	92%	108.9%	95.4%	106.2%	87.9%	88.8%	90.0%	60.0%	57.4%	60.6%

Fuente: elaboración propia

Figura 14. Falla 14 días

TIPO DE FALLA	CILINDRO FALLADO	DESCRIPCION
 <p>Tipo 4 Fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos; golpee suavemente con un martillo para distinguirla del Tipo 1</p>		<p>La falla de corte, se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentran cercanas al límite de tolerancia especificada</p>

Fuente: Propia

En la tabla 33 se registran los valores obtenidos de peso, altura, diámetro y resistencia para la edad de 28 días de curado. La figura 15 muestra el cilindro de concreto después de aplicarse el ensayo a la compresión junto con el tipo de falla identificado.

Tabla 33. Variables de muestras para 28 días de curado

Variables	TIEMPO DE CURADO 28 DIAS									
	Muestra patron	Tasajero 6%	Sochagota 6%	Paipa 6%	Tasajero 8%	Sochagota 8%	Paipa 8%	Tasajero 10%	Sochagota 10%	Paipa 10%
Peso (g)	3831.00	3826.00	3858.00	3739.00	3667.00	3660.00	3739.00	3716.00	3782.00	3716.00
Altura Promedio (in)	8.15	8.11	8.05	8.03	8.08	8.04	8.02	7.98	8.02	8.03
Diámetro Promedio (in)	3.98	3.97	3.98	3.96	3.98	3.97	3.95	3.98	4.00	3.99
Resistencia (PSI)	2414.75	3083.73	2909.01	2921.96	2332.98	2219.04	2319.52	2286.38	1902.72	1941.79
Resistencia a la compresion normalizada (PSI)	100%	127.7%	120.5%	121.0%	96.6%	91.9%	96.1%	94.7%	78.8%	80.4%

Fuente: elaboración propia

Figura 15. Falla 28 días.

TIPO DE FALLA	CILINDRO FALLADO	DESCRIPCION
 <p>Tipo 3 Fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados</p>		<p>La falla columnar, se observa en probetas que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencias en el material de refrentado o también por concavidad en una de las placas de carga</p>

Fuente: Propia

Finalmente, en la tabla 34, se registran los valores de peso, altura, diámetro y resistencia para la edad de 56 días de curado. En la figura 16 se muestra el cilindro de concreto después de aplicarse el ensayo a la compresión con su respectivo tipo de falla.

Tabla 34. Variables de muestras para 56 días de curado

Variables	TIEMPO DE CURADO 56 DIAS									
	Muestra patron	Tasajero 6%	Sochagota 6%	Paipa 6%	Tasajero 8%	Sochagota 8%	Paipa 8%	Tasajero 10%	Sochagota 10%	Paipa 10%
Peso (g)	3820.00	3822	3875	3866	3640.00	3640.00	3640.00	3710.00	3658.00	3690.00
Altura Promedio (in)	8.12	8.23	8.18	8.09	7.95	7.93	8.02	8.01	7.95	8.04
Diámetro Promedio (in)	3.98	3.98	3.97	3.95	3.96	3.95	3.94	3.96	4.00	3.98
Resistencia (PSI)	3585.2928	4594.76	4290.19	4353.7	2891.64	2888.84	2835.61	2464.64	2498.34	2629.46
Resistencia a la compresion normalizada (PSI)	148%	190.3%	177.7%	180.3%	119.7%	119.6%	117.4%	102.1%	103.5%	108.9%

Fuente: elaboración propia

Figura 16. Falla 56 días.

TIPO DE FALLA	CILINDRO FALLADO	DESCRIPCION
 <p data-bbox="479 577 544 598">Tipo 2</p> <p data-bbox="397 598 625 703">Conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, cono no bien definido en el otro extremo</p>		<p data-bbox="1096 451 1453 682">La falla de tipo columnar y cono, se observa en probetas que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias del material de refrentado, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.</p>

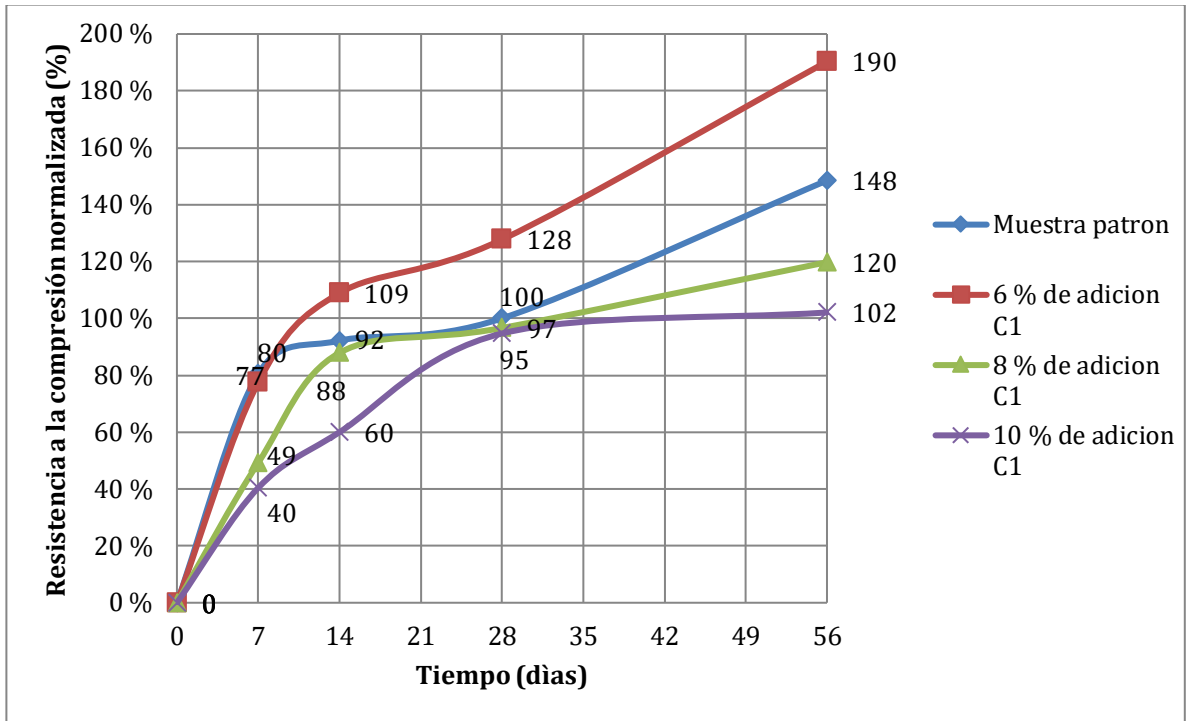
Fuente: Propia

Para realizar un análisis porcentual de los resultados obtenidos, se asume que la resistencia alcanzó su máximo valor a la edad de 28 días de curado. Esto con el fin de tomar esta resistencia como el 100% y a partir de este valor, hallar los valores de resistencia en porcentaje de todas las muestras de concreto. Se escoge esta edad de curado ya que es a esta edad donde comúnmente se espera alcanzar al menos el 90% de la resistencia total del concreto⁶⁰.

A partir de las tablas anteriores, se presentan las siguientes gráficas donde se hace una relación de la resistencia a la compresión normalizada (como se describe en el párrafo anterior) versus el tiempo de curado de cada una de las muestras de concreto por cada ceniza utilizada.

⁶⁰ OSORIO, Jesús David. Resistencia Mecánica del concreto y resistencia a la compresión. [blog]. Blog 360 en concreto. Bogotá. 28 de Junio de 2013. [Consultado: 15 de octubre de 2019]. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion>

Figura 17. Resistencia a la compresión ceniza Termosochagota

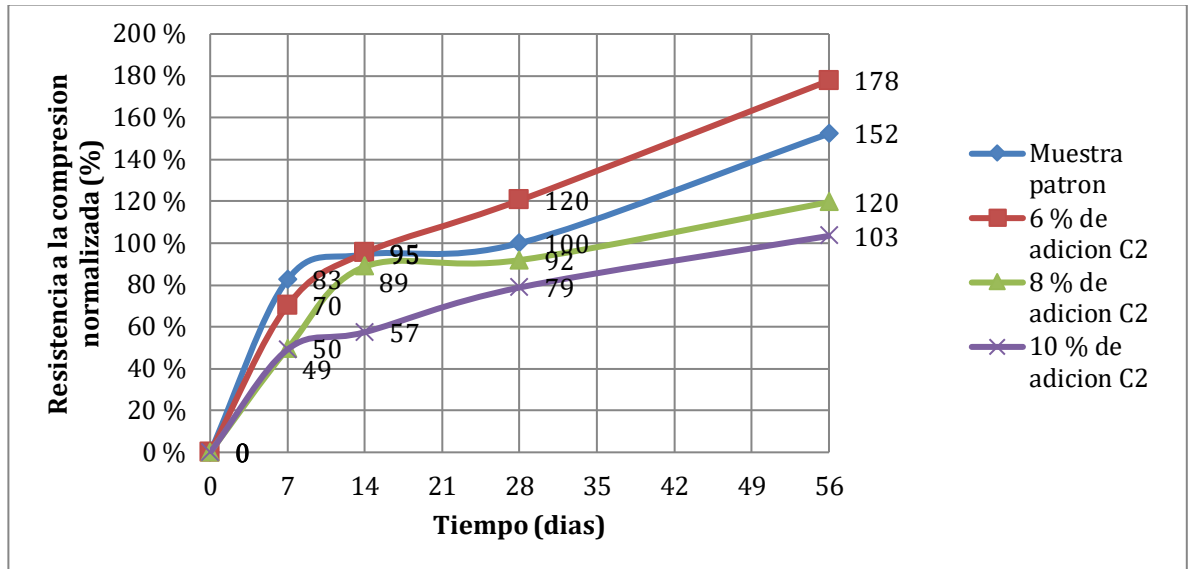


Fuente: elaboración propia

Como se observa en la figura 17, en las muestras adicionadas con ceniza Termo Sochagota al 6%, estas presentan un valor de incremento en la resistencia hasta del 28% para un tiempo de curado de 28 días, con respecto a la muestra patrón sin ningún tipo de adición.

Con los otros porcentajes de adición de ceniza volante no se obtienen resultados tan favorables, pues ninguno de los dos porcentajes logra superar la resistencia de la muestra patrón en ninguna de las edades de curado evaluadas. Para la adición del 8% de ceniza, el incremento máximo para 28 días es 97% y para la un 10% de adición, el incremento máximo es de 95%

Figura 18. Resistencia a la compresión ceniza Termotasajero

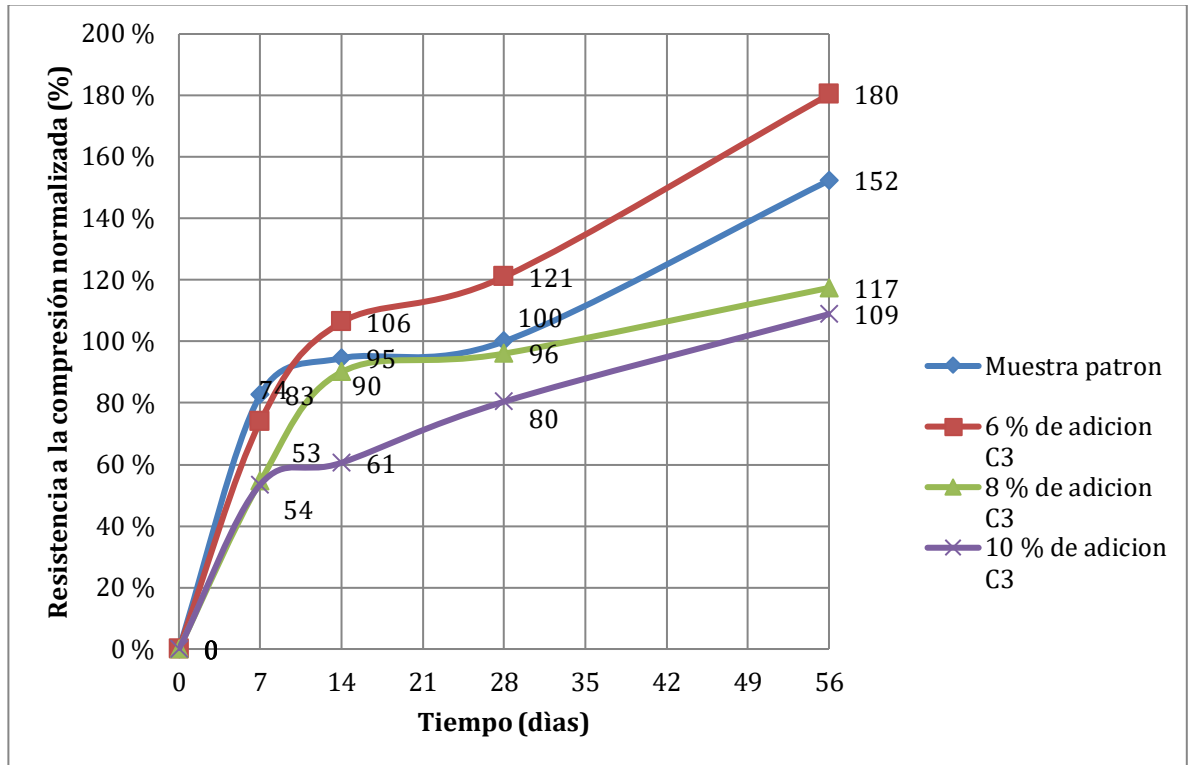


Fuente: elaboración propia

Según la figura 18, la ceniza número 2, correspondiente a la ceniza Termo Tasajero, adicionada a la mezcla de concreto al 6%, presenta un incremento en la resistencia de hasta 20% con respecto a la muestra patrón sin ningún tipo de adición.

Para los porcentajes de adición restantes, aunque existe un aumento progresivo de la resistencia, en ninguno de los dos casos logra obtener un incremento a la resistencia que sobrepase los porcentajes de la muestra patrón. Nuevamente, es con la adición del 8% que se obtienen mejores resultados con respecto al 10% de adición, con un incremento de hasta el 92% en el valor de la resistencia contra un incremento de solo 79%. Esta comparación porcentual de aumento en la resistencia se obtiene a los 28 días de curado.

Figura 19. Resistencia a la compresión ceniza Termo Paipa



Fuente: elaboración propia

Según la figura 19, la ceniza número 3, ceniza Termo Paipa, con un porcentaje de adición del 6% a la mezcla de concreto, presenta un valor de incremento en la resistencia de hasta el 21% con respecto a la muestra patrón sin ningún tipo de adición, para una edad de curado de 28 días.

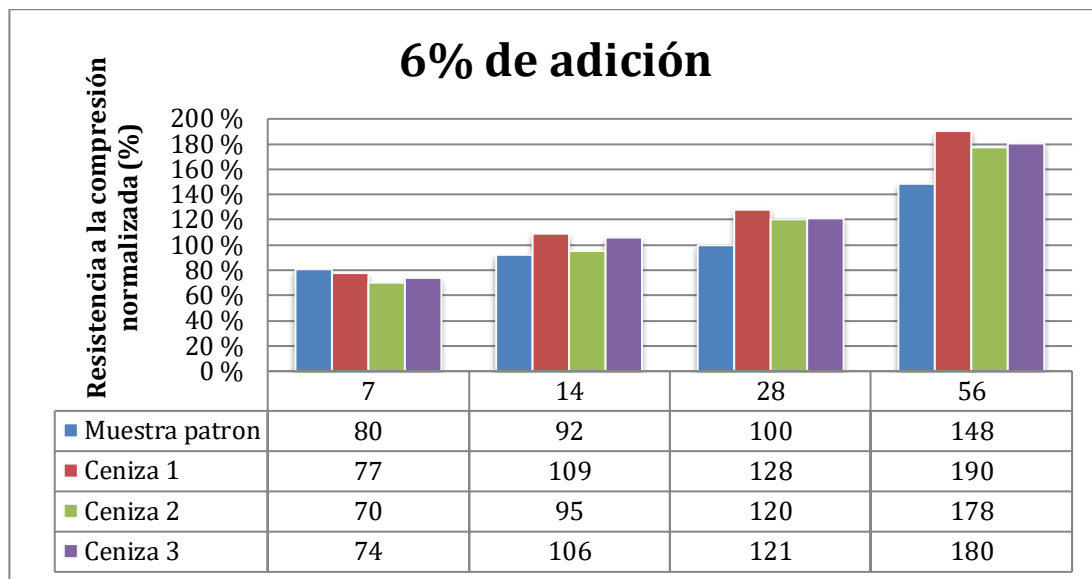
Se presentan los mismos comportamientos en las curvas de resistencia de la adición del 8 y 10% de los dos tipos de ceniza anteriormente analizados, y nuevamente, es la adición al 8% en la mezcla la que proporciona valores de resistencia mayores con respecto a la adición del 10%. El incremento de la resistencia para la adición del 8% es de 96% mientras que las muestras de concreto adicionadas al 10% tiene un valor máximo de 80%, teniendo en cuenta que estos valores corresponden un tiempo de 28 días

En todas las gráficas se presenta una tendencia de aumento a la resistencia a la compresión en los 56 días de curado, con lo que se puede inferir que en alguna de las edades más avanzadas (a partir de 72 días) es posible que las resistencias de

los concretos adicionados superen el valor de la resistencia de la muestra patrón, incluso en porcentajes de 8% y 10% de adición.

El análisis anterior se realizó para determinar el tipo de ceniza que obtuvo mejores resultados en la resistencia a la compresión. Sin embargo, también es objeto de esta investigación determinar con qué porcentaje de adición se obtienen resultados favorables en cuanto a resistencia, para después relacionarlo con el tipo de ceniza. (Véase 19, 20 y 21).

Figura 20. Resistencia para adición del 6%



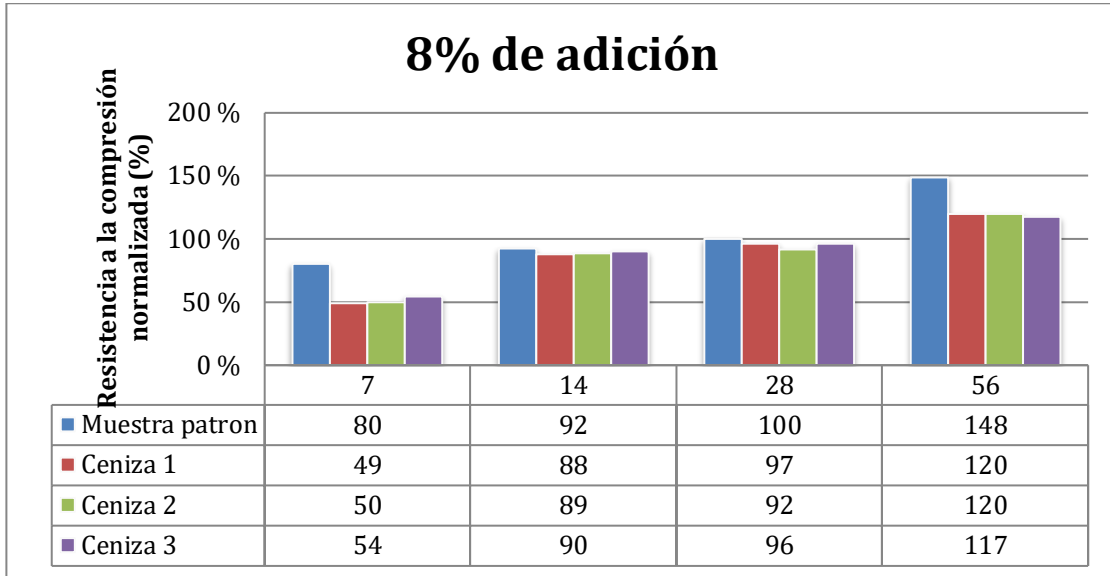
Fuente: elaboración propia

Según la figura 20, para el 6% de adición se infiere que funciona muy bien en cada una de las edades, pues en tres de los cuatro tiempos de curados que se evaluaron, la resistencia a la compresión aumento.

A los 14 días de curado se tiene un aumento máximo del 17% usando la ceniza tipo 1 en la mezcla de concreto, valor seguido por la ceniza 3 con un 14% de incremento y la ceniza 2 con un porcentaje de 3%.

Para 28 y 56 días de curado se evidencia nuevamente que, para el 6% de adición en la mezcla de concreto se registran los incrementos máximos comparados con la muestra patrón y los otros dos tipos de ceniza en la resistencia, lo que confirma que la ceniza que mejor se comporta en cuanto a resistencia es la ceniza c1 o Termo Sochagota.

Figura 21. Resistencia para adición del 8%



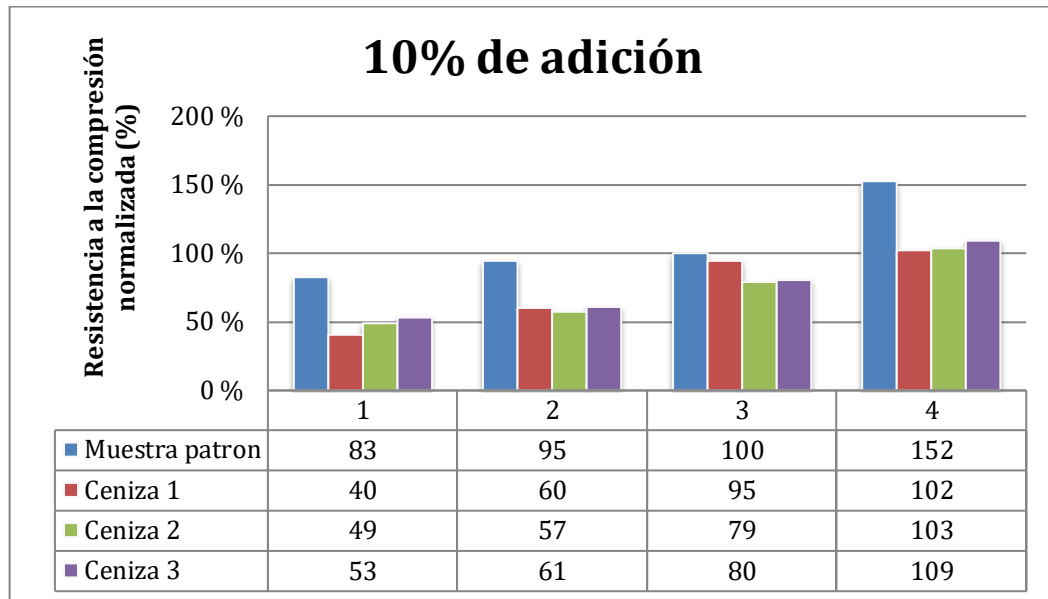
Fuente: elaboración propia

Observando los resultados obtenidos, para una adición del 8% de ceniza volante se tiene que la ceniza que trabaja mejor es la c3, la ceniza Termopaipa, pues en las 4 edades de curado presentó los valores más altos en cuanto a incremento en la resistencia, con porcentajes de 54, 90, 96 y 120% para cada una de las cuatro edades de curado respectivamente.

Sin embargo, los valores de incremento en la resistencia a la compresión, no superan a los valores obtenidos con mezclas adicionadas al 6%, por lo que se afirma nuevamente que el porcentaje con mejores resultados es el 6%.

Aunque la comparación entre resistencias se hace principalmente con el valor obtenido a los 28 días de curado por ser el valor con que se normalizo los resultados de resistencia, el comportamiento de la resistencia anteriormente expuesto también aplica para las edades de edades de 7,14 y 56 días de curado, es decir que en todas las edades el incremento fue mayor en muestras adicionadas al 6% que en muestras adicionadas al 8%.

Figura 22. Resistencia para adición del 10%



Fuente: elaboración propia

Analizando los resultados de la figura 22 se determina que el 10% de adición en la mezcla de concreto no se obtiene un aumento importante en la resistencia para ninguna de las tres cenizas en ninguna de las edades de curado. Se evidencia que no hay un tipo de ceniza que logre exceder, por lo menos, el porcentaje de la resistencia de la muestra patrón.

De acuerdo a los estudios de Fonseca [34] y de Valderrama [12], las resistencias aumentaron con los valores de adición más bajos en cada una de sus investigaciones. Para ambos estudios esta adición de ceniza a la mezcla de concreto fue del 10%. Para la investigación aquí expuesta, el porcentaje de adición más bajo fue del 6%, el cual obtuvo las mejores resistencias por cada ceniza. Sin embargo en un estudio en la ciudad de Puno, con el que se usaron adiciones entre el 2.5 y el 20% de ceniza volante, los resultados obtenidos coinciden con lo

anteriormente descrito, es decir, que a menor contenido de ceniza volante, mayores resistencias a la compresión⁶¹.

Para los estudios anteriormente mencionados, se concluyó que la resistencia en las primeras edades de curado es baja debido a una lenta velocidad de hidratación de la ceniza. Sin embargo, según el artículo de investigación de Huaquisto y Quispe para la universidad de Puno, Perú, la resistencia en edades tempranas fue superior incluso sobre la muestra patrón. Esta resistencia se obtuvo con los porcentajes más bajos, por lo que concluyeron que una adición apropiada para mejorar las propiedades mecánicas del concreto se encuentra entre 3 y 6%.

Comparando el trabajo de investigación de la universidad de Nacional del Altiplano de Puno Perú con el trabajo de investigación aquí desarrollado, los resultados son similares en cuanto a el aumento de su resistencia, pues a pesar de presentarse incrementos de esta propiedad en las edades tempranas, es a los 28 días que comienza a presentarse un aumento significativo en los porcentajes de resistencia. La diferencia entre los estudios radica en el uso de cenizas procedentes de distintas termoeléctricas, por lo que se analizan dos variables: el tipo de ceniza que obtuvo las mejores resistencias y luego el porcentaje de adición más favorable. De esta forma se determina el tipo de ceniza y el porcentaje más adecuado para mejorar el comportamiento mecánico de las muestras de concreto.

⁶¹ HUAQUISTO, Samuel; QUISPE, Belizario. Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. En: *Investigaciones Atloandinas*. [en línea]. Perú: Universidad Nacional del Altiplano de Puno Perú, abril-junio 2018, vol. 20, nro.2. p. 215-234. [Consultado: 16 de noviembre de 2019]. Disponible en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ria/v20n2/a07v20n2.pdf> E-ISSN: 2313-2957

11. DETERMINACIÓN DE LA ACCIÓN DE LOS SULFATOS SOBRE LOS ESPECIMENES DE CONCRETO

Una vez terminado el proceso, se toma los pesos y dimensiones correspondientes a los cilindros, para poder determinar la afectación que se presentó debido a la inmersión de los cilindros en la solución de sulfato de magnesio.

Tabla 35. Matriz Experimental para el análisis de exposición a sulfato de magnesio

Cilindros de 56 días expuestos a sulfato de magnesio						
Tipo	Peso 1 gr	Peso 2 gr	Peso 3 gr	Peso 4 gr	Peso 5 Gr	Promedio
Convencional 0%	1194	1170.22	1174.16	1169.99	1146.23	1170.92
C.V.1 6%	1197.5	1185.01	1190.03	1142.1	1147.16	1172.36
C.V.2 6%	1172.5	1157.76	1147.02	1158.91	1137.11	1154.66
C.V.3 6%	1179.5	1161.65	1151.43	1163.19	1138.04	1158.762
Tipo	Base 1 cm	Base 2 cm	Base 3 cm	Base 4 cm	Base 5 cm	Promedio
Convencional 0%	10	10.22	10.21	10.18	10.21	10.164
C.V.1 6%	10	10.24	10.2	10.23	10.27	10.188
C.V.2 6%	10	10.15	10.13	10.09	10.19	10.112
C.V.3 6%	10	10.13	10.17	10.010	10.22	2010.104
Tipo	Altura 1	Altura 2	Altura 3	Altura 4	Altura 5	Promedio
Convencional 0%	6.5	6.54	6.49	6.47	6.6	6.52
C.V.1 6%	6.5	6.58	6.5	6.51	6.58	6.534
C.V.2 6%	6.5	6.58	6.6	6.57	6.7	6.59
C.V.3 6%	6.5	6.58	6.6	6.5	6.62	6.56
C.V. 1.=Ceniza de Termosochagota						
C.V. 2=Ceniza de Termotasajero						
C.V. 3=Ceniza de Termopaipa						

Fuente: elaboración propia

Figura 23. Cilindros expuestos a sulfato de magnesio



Fuente: elaboración propia

Finalizado el proceso de inmersión, se procede a comparar entre los pesos y dimensiones, las cuales representan al antes de la inmersión de los cilindros en la solución y después de desarrollar todo el proceso de inmersión, obtenidos los datos necesarios, se evidencia una disminución del peso y un aumento de las dimensiones en cada uno de los cilindros al que se le realizó la prueba de inmersión.

La solución de sulfatos reacciona químicamente con los componentes de la mezcla para producir un mineral expansivo, Esta reacción se produce con los componentes químicos de Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio) y C3A (Aluminato tricálcico), produciendo una degradación del concreto debido a la expansión formada por la presencia de cristales que se forman por la presencia de sulfatos, la afectación de estos cristales se presenta a medida que transcurre el tiempo ya que su volumen se ve aumentado de tres a ocho veces mayor al volumen inicial, lo cual produce presiones muy elevadas dentro de la mezcla del concreto, estudios realizados han presentado en sus resultados que la adición de ceniza volante dentro de la mezcla de concreto, mejora su resistencia al ataque de soluciones de sulfatos, esto se debe a su bajo contenido de calcio (CaO) y porcentaje de inquemados que contiene la ceniza, ayudando a disminuir la porosidad parcialmente en la pasta del cemento. Por otro lado, se ha determinado que el remplazo de ceniza volante por cemento en

porcentajes elevados no produce el mismo resultado que si la ceniza volante se adiciona ya que la cantidad de inquemados que poseerá la muestra producirá una mayor permeabilidad en los poros, lo que permitiría el incremento del volumen de cristales formados por las soluciones de sulfatos.⁶²

Se toma los porcentajes de 0% y 6% de sustitución de ceniza volante por cemento para la exposición de la solución de sulfato de magnesio, debido a su poco porcentaje de inquemados para poder obtener unos resultados más adecuados a los estudios realizados por diferentes autores.

Para el cilindro convencional se ve un 4% de disminución del peso después de realizar la inmersión en la solución de sulfato de magnesio.

Para el cilindro con sustitución del 6% de ceniza Termo Sochagota se contempla una disminución del 4,2 % en el peso tomado antes de la inmersión en la solución de sulfato de magnesio.

Para el cilindro con sustitución del 6% de ceniza Termo Tasajero se contempla una disminución del 3,01% en el peso tomado antes de realizar el proceso de inmersión en la solución de sulfato de magnesio.

Para el cilindro con sustitución del 6% de ceniza Termo Paipa se contempla una disminución del 3,5% en el peso tomado antes de la inmersión en la solución de sulfato de magnesio.

Dado los resultados presentados en la inmersión de los cilindros con porcentajes del 0% y 6% se presentan una expansión del concreto y una disminución de su peso, esto se debe a que el cemento pierde cohesión y adherencia en la mezcla logrando así una reducción en la resistencia mecánica.

⁶² ROA PARRA, Oscar Rodolfo. LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE "CENIZAS VOLANTES". [en línea]. Trabajo presentado como requisito para optar Al título de Ingeniero Topográfico. Bogotá, Colombia. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Topografía, 2016. p. 46 [consultado el 18 de noviembre de 2019]. Disponible en internet: Repositorio Educativo Digital <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5069/1/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf>

12. CONTENIDO DE SÍLICE EN LA MEZCLA DEL CONCRETO

Teniendo en cuenta que el objeto de la investigación incluye el análisis de la durabilidad, específicamente, el ataque de sulfatos de magnesio al concreto, se relaciona la resistencia a la compresión versus el contenido de sílice de la mezcla (tanto las adicionadas con ceniza volante como las muestras patrón), esto con el fin de determinar el efecto de la presencia de ceniza volante en la mezcla de concreto, teniendo en cuenta que la ceniza volante también posee un porcentaje de sílice y que este elemento proporciona altos beneficios a la durabilidad del concreto, como la disminución de la porosidad⁶³, la cual somete al concreto a una exposición ambiental y otros daños fuertes, ocasionados por líquidos y gases, que logran penetrar la matriz del concreto en forma de dióxido de carbono, agua, oxígeno, cloruros, sulfatos, entre otros. El contenido de sílice en la mezcla combate esta porosidad disminuyendo la permeabilidad de los concretos. Entonces, la durabilidad en los concretos está determinada por la conservación de la estructura original, calidad y aspecto del material, cuando se expone a los ambientes para los que será diseñada la estructura⁶⁴.

Teniendo en cuenta lo anterior se esperaría entonces que la relación resistencia-contenido de sílice sea inversamente proporcional, pues si se disminuye la permeabilidad en el concreto, el efecto negativo de los sulfatos será mínimo y evitará incluso la fisura y hasta desprendimientos superficiales del material.⁶⁵

Se determinó medir únicamente la acción de los sulfatos ya que este tipo de ataque es el más agresivo para la composición del concreto, mientras que los otros agentes externos, a pesar de atacar de igual manera el concreto, los efectos son más críticos en el acero estructural.

En la tabla 37 se muestran los porcentajes de contenido de sílice de cada uno de los tipos de ceniza utilizadas de manera general, el cual se usó para determinar el porcentaje total presente en el diseño de muestras de concreto adicionadas.

De igual forma, se determinó el contenido de sílice presente en el cemento. Este porcentaje de sílice en el cemento se estableció a partir del cemento utilizado y teniendo en cuenta la tabla 36.

⁶³ ALLAUCA, Luis. AMEN, Hugo. Lung, Jessica. Uso de Sílice en hormigones de alto desempeño. [en línea]. Ecuador. p.4. [consultado: 15 de octubre de 2019].

⁶⁴ VELEZ, Ligia. Permeabilidad y Porosidad del concreto. Bogotá. P. 5 [consultado: 15 de octubre de 2019]

⁶⁵ Ibid., p. 6

Tabla 36. Porcentaje de contenido de sílice en la composición del cemento

Elemento y/o compuesto	Porcentaje en peso
CaO	64.040
SiO ₂	19.867
Al ₂ O ₃	4.216
Fe ₂ O ₃	2.781
SO ₃	1.989
MgO	.358
K ₂ O	.315
TiO ₂	.142
Na ₂ O	.086
P ₂ O ₅	.066
Sr	.054

Fuente: elaboración propia

Tabla 37. Porcentaje de contenido de sílice en la composición de las cenizas empleadas

Elemento y/o compuesto	Termopaipa	Sochagota	Tasajero
SiO ₂	49,18	51,361	42,45
Al ₂ O ₃	18,941	20,679	23,37
Fe ₂ O ₃	4,395	5,667	8,576
K ₂ O	1,497	1,467	0,963

Fuente: elaboración propia

El contenido de sílice en la mezcla se calculó para todas las muestras de concreto después de 56 días de curado, donde se hizo un promedio ponderado del porcentaje de sílice presente en el cemento y en la ceniza. Los resultados obtenidos de la relación resistencia-contenido de sílice se muestran en la tabla 38, donde se encuentra el tipo de ceniza con su respectivo contenido de sílice y su resistencia a los 56 días.

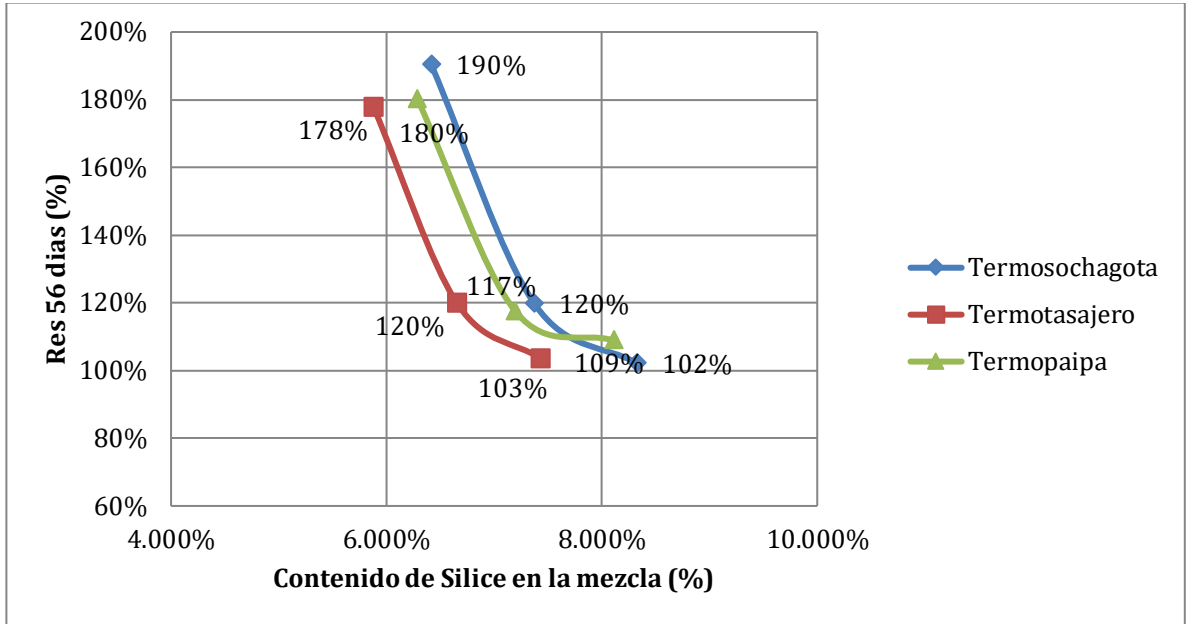
Tabla 38. Contenido de sílice en las muestras de concreto a 56 días de curado

Contenido de sílice					
Tipo de Ceniza	Porcentaje de adición	Contenido sílice Cemento	Contenido sílice ceniza	Contenido de Sílice en la mezcla (%)	Resistencia 56 días (%)
Convencional	0	0.19867	0	3.548%	148%
Termosochagota	6.00	0.19867	0.5136	6.417%	190%
	8	0.19867	0.5136	7.373%	120%
	10	0.19867	0.5136	8.330%	102%
Termotasajero	6.00	0.19867	0.4245	5.882%	178%
	8	0.19867	0.4245	6.660%	120%
	10	0.19867	0.4245	7.438%	103%
Termopaipa	6.00	0.19867	0.4918	6.286%	180%
	8	0.19867	0.4918	7.199%	117%
	10	0.19867	0.4918	8.111%	109%

Fuente: elaboración propia

Como se muestra en la figura 24, la resistencia en función del contenido de sílice arroja los resultados esperados, pues como se analizó anteriormente, la ceniza que presentó mejores resultados a la resistencia a la compresión fue la ceniza Termo Sochagota.

Figura 24. Gráfica de la relación resistencia-contenido de sílice



Fuente: elaboración propia

Además de lograr determinar el mejor comportamiento de la ceniza según su contenido de sílice, también se puede observar, que las otras dos cenizas (Termo Tasajero y Termo Paipa) resultan menos resistentes a los sulfatos, por lo que su resistencia no será la mejor, ya que como se muestra también en la figura 22, ambas curvas estuvieron por debajo de la curva de la ceniza Termo Sochagota, excepto en el caso de 10% de adición en la mezcla, adición que se determinó en análisis anteriores que no es favorable y no presenta ningún aumento considerable en la resistencia.

13. CONCLUSIONES

- Concluido el desarrollo de la investigación, se pudo observar que la ceniza que cumplió con cada uno de los objetivos propuestos, es la ceniza Termosochagota, ya que para cada uno de sus porcentajes de adición presento porcentajes de resistencia de 128%, 97% y 95% para la edad de 28 días. Dichos porcentajes no son superados por ningún otro tipo de ceniza volante empleada
- En cuanto a porcentaje de adición, que también era objeto importante de la investigación, se observó y concluyó que un 6% de adición de ceniza volante en muestras de concreto, obtuvo mejores resultados en cuanto al incremento en la resistencia, pues para todas las cenizas volantes, a una edad de curado de 28 días obtuvo porcentajes de incremento de 28% para C.V.1, 20% para C.V.2 y 21% para C.V.3
- En cuanto a propiedades de durabilidad de concreto, la ceniza Termo Sochagota, también presentó las mejores propiedades, ya que por su alto contenido de sílice (51,36%) proporciona al concreto una mayor resistencia a los ataques de sulfato, disminuyendo la porosidad y a la vez la permeabilidad, condiciones que permiten la entrada de agentes externos corrosivos y dañinos que atacan al concreto afectando su funcionalidad y calidad.
- De igual manera, se observa también que la ceniza que aportó menor incremento en la resistencia fue la ceniza Termotasajero. Sus resistencias de 120, 92 y 79% para las adiciones de 6, 8 y 10% respectivamente fueron las más bajas. Sucedió de igual forma para la ceniza Termopaipa, pues, aunque se obtuvieron valores aceptables de resistencia de 191, 96 y 80% para las adiciones de 6, 8 y 10% respectivamente, tampoco logró superar el efecto de la ceniza Termosochagota en la resistencia, sin embargo, tuvo mejores incrementos porcentuales que la ceniza Termotasajero.
- En cuanto a porcentajes de adición, el 10% de adición en las mezclas de concreto, es el porcentaje que obtuvo valores de resistencia más bajos. Para la C.V.1. el porcentaje de resistencia más alto que se obtuvo fue de 95%, para la C.V. 2, un porcentaje de 79% y para la C.V.3, un porcentaje de 80%. Estos resultados corresponden a la edad de 28 días de curado, y como se evidencia, en ninguno de los casos supera el 100% correspondiente a la resistencia de la muestra patrón.

- En cuanto a la procedencia de la ceniza, se puede determinar que la ceniza que no cumplió con los objetivos propuestos de la investigación es la Termotasajero, pues sus valores de resistencia fueron los más bajos en cada porcentaje de adición. Se obtuvieron resistencias de 120%, 92% y 79% para los porcentajes de adición de 6, 8 y 10%. Al comparar estas resistencias, se evidencia que su valor es el menor entre los otros dos tipos de ceniza volante.
- El comportamiento de la durabilidad en el concreto adicionando con ceniza volante está relacionado con el porcentaje de inquemados. Esto sugiere que a menor porcentaje de inquemados, la durabilidad y las propiedades mecánicas pueden incrementar. En este sentido, según la caracterización de la ceniza proveniente de Termosochagota, su porcentaje de inquemados del 5.47% también es un posible indicador de que esta ceniza es una buena opción como adición al concreto.
- El estudio e investigación de materiales alternativos en la construcción, como el uso de ceniza volante, permite que la ingeniería civil tenga un enfoque más ecológico y amigable con el medio ambiente, teniendo en cuenta que la ceniza volante como adición, soluciona el problema de las termoeléctricas de disposición de estos desechos y al ser reemplazado por cemento, se disminuye su producción, disminuyendo costos de obra y reduciendo emisiones de gases de efecto invernadero, específicamente CO₂, el cual se produce en grandes cantidades durante su elaboración.

14. RECOMENDACIONES

- Para tener unos resultados más acertados y confiables los cuales puedan tener un sustento probabilístico y estadístico, se recomienda realizar más de una muestra por porcentaje y por ceniza con el fin de poder calcular promedios y otras variables que representen resultados más seguros. Para esto se debe tener en cuenta factores como tiempos de laboratorio, disposición de equipos, entre otros, necesarios para poder elaborar una mayor cantidad de muestras de concreto para el estudio.
- Se recomienda la consideración de las mezclas adicionadas con porcentajes de ceniza volante para una edad de diseño mayor a los 28 días, ya que a partir de esta edad comienza el aumento significativo en la resistencia a la compresión.
- A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación, se recomienda utilizar ceniza volante como adición y no como sustituto de la mezcla de concreto, para poder mejorar las propiedades químicas en el concreto frente a la exposición de soluciones de sulfato.
- Se recomienda no realizar sustituciones de ceniza volante por cemento mayores al 6% en el diseño de mezclas de concreto, ya que esto disminuirá las propiedades del concreto desfavoreciendo su durabilidad en cuanto al ataque de sales y resistencia a la compresión. Esta recomendación se hace a partir de los resultados obtenidos durante la investigación y algunas bibliografías consultadas en las que los resultados obtenidos fueron similares a los presentados en el anterior informe.

BIBLIOGRAFÍA

1. LEON VELEZ, Álvaro. Efecto de las adiciones minerales en el concreto [en línea]. 360enConcreto. Colombia. 26 de Enero de 2015, párr. 1. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-adiciones>.
2. Lafarge. Concreto “Durabilidad”: Simposio y organismo [diapositivas]. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC. México. Octubre de 2009. Diapositiva 2. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.imcyc.com/50/simposi09/em>.
3. Lafarge. Concreto “Durabilidad”: Simposio y organismo [diapositivas]. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto AC. México. Octubre de 2009. Diapositiva 2. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.imcyc.com/50/simposi09/em>.
4. LONDOÑO, Cipriano. Concretos Resistentes a sulfatos [en línea]. 360enConcreto. Colombia. 13 de Diciembre de 2013, párr. 2. [consultado: 19 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/concretos-resistentes-a-sulfat>.
5. RIVERA, Raymundo. RIVERA TORRES, Jorge. Concreto de alta resistencia, muy económico, durable y sustentable [en línea]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Nuevo León, México. Marzo del 2000, p.8. [consultado: 24 de abril de 2019]. Disponible en i.
6. RIVERA, Raymundo. RIVERA TORRES, Jorge. Concreto de alta resistencia, muy económico, durable y sustentable [en línea]. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. Nuevo León, México. Marzo del 2000, p.8. [consultado: 24 de abril de 2019]. Disponible en i.
7. ROA PARRA, Oscar Rodolfo. LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE “CENIZAS VOLANTES”. [en línea]. Trabajo presentado como requisito para optar Al título de Ingeniero Topográfico. Bogotá, Colombia. Facultad de Medio Ambiente y Rec.
8. MOLINARI, Javier. Reportes y artículos de la AMCI (Asociación mexicana de Concretos independientes) referentes al tema concretos con cenizas volantes. Artículo, Mejorando el concreto con ceniza volante.2004.[Consultado 20 de marzo del 2019].
9. OSSA, Mauricio; JORQUERA, Héctor. Cementos con cenizas volantes. En: Materiales de Construcción. Universidad de Chile. Marzo, 2004 No 193. p. 4

[consultado el 12 de marzo de 2019]. Disponible en internet: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/m>.

10. Andressa Bianca da Costa. Potencial pozoalánico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento. [en línea]. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário UNIVATES, como par.

11. SILVA, Yimmy; DELVASTO Silvio. CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN. En: Revista Colombiana de Materiales. Universidad de Antioquia. Mayo, 2014. No.5, p. 1 [consultado el 14 de marzo de 2019].

12. SANTAELLA, Luz Elena Santaella; SALAMANCA, Rodrigo. COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO CON BAJOS PORCENTAJES DE CENIZA VOLANTE (TERMOPAIPA IV) Y AGUA CONSTANTE. En: Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 2004. p. 6. [consultado el 12 de marzo de 2019]. Disponible en.

13. AHINCO S.A. [consultado el 20 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.ahinco.com.co/index.php/quienes-somos>.

14. CEBALLOS ARANA. Martin A. El concreto, material fundamental para la infraestructura. [en línea] En: Revista Ciencia y Tecnología en Concreto. México. Agosto de 2016, p. 24 [consultado: 24 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <http://www.revistacyt.co>.

15. Sánchez De Guzmán. Diego. Tecnología del concreto y del mortero. [en línea]. 5 ed. Bogotá, Colombia: Bhandar Editores LTDA. 2006. p. 19 [consultado: 21 de abril de 2019]. Disponible en Internet <https://books.google.com.co/books?id=EWq-QPJhsRAC&printsec=fr>.

16. Aguirre, A.M. Mejía de Gutiérrez R. Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. [en línea]. En: Materiales de Construcción. Universidad del Valle. Enero – Marzo 2013, vol. 63, p. 10. [consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en I.

17. National Ready Mixed Concrete Association. Concreto en la práctica. ¿Qué, Por qué y cómo? Adiciones al cemento [en línea]. [consultado: 22 de abril de 2019]. Disponible en Internet: <https://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP30es.pdf>.

18. FONSECA BARRERA, Leonardo Augusto. Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos [en línea]. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en In.

19. KUMAR MEHTA, Povindar. Concreto: estructura, propiedades y materiales.[Impreso] 1 ed. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2002. [Consultado 10 de marzo de 2019].
20. Portland cement association. How Concrete is Made. Washington DC, 2018. [Consultado 12 de marzo de 2019]. www.cement.org.
21. Prediction of compressive strength of concrete with fly ash as sand replacement material - N.P. Rajamane , J. Annie Peter, P.S. Ambily - Concrete Composites Laboratory, Structural Engineering Research Centre, CSIR Campus, Taramani, Chennai 600113, Tamil N.
22. Strength properties of high-volume fly ash roller compacted and workable concrete, and influence of curing condition. Cengiz duran atiY civil engineering department, Cukurova University, 01330, Balcalı-Adana, Turkey. July 2004. .
23. SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 5 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 2001. P. 19-21[Consultado 12 de marzo del 2019].
24. CAICEDO CASSO, Eduard Andres. MEJIA DE GUTIERREZ, Ruby. GORDILLO SUAREZ, Marisol. AGREDO TORRES, Janneth. Reusing a residue of the oil industry (FCC) in the production of building elements, Bogota, Pontificia Universidad Javeriana, 2015.Vol 19 No 1. [Cons.
25. VALBUENA LEGUÍZAMO, Humberto. Petrografía de concretos hidráulicos con adición de ceniza volantes de TERMOPAIPA. Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ciencias. 2006. [consultado 15 de marzo de 2019].
26. CORONA ZAZUETA, Miguel Ángel. Concretos dosificados con cemento Pórtland y ceniza volante [online]. [Consultado: 13 de Julio de 2019]. .
27. G. M. IDORN. Proc. symposium n, "Effects of fly ash incorporation in cement and concrete". University Park, PA. Ed. S. Diamond. 2002. pp. 244-259, Materials Research Society. [Consultado 15 de marzo de 2019].
28. SILVA, Omar Javier. Generalidades y tipos de aditivos para el concreto [en línea]. 360 en concreto. Colombia, Bogotá. 1 de abril del 2016. Pg 1. [Consultado 16 de marzo del 2019]. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-y-tipos-de-aditivo>.
29. Sika Colombia S.A.S. Concreto: Aditivos para el concreto [en línea].2010.<https://col.sika.com/dms/getdocument.get/269d0f31-fb62-3538-bcca-0b37aad65e17/BROCHURE%20ADITIVOS%20PARA%20CONCRETO.pdf>.
30. GARZÓN PIRE, William. Estudio de durabilidad al ataque de sulfatos del concreto con agregados reciclados. [en línea]. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Construcción. Bogotá, Colombia. Maestría en Construcción 2013. p. 15. [consultado e.

31. WINSLOW Y LIN. Percolation and pore structure in mortar and concrete. Cement and Concrete research. 2002.[Consultado el 15 de marzo de 2019]. .
32. Dosificación de Hormigones [online]. Universidad de Cantabria, Santander, España. 22 de julio del 2014].
33. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo Rene. Tecnología del concreto2010: Materiales diseño y mezcla. Tomo 1. Colombia, Bogotá. 2010 [Consultado 15 de marzo de 2019].
34. NTC 174(instituto colombiano de normas técnicas y certificación. Ingeniería civil y arquitectura método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos. NTC 77. Bogotá: Icontec,1994.p.2).
35. PERILLA, Jorge. CORTES, Edwin. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS CARACTERÍSTICAS FISICO-MECANICAS DE CUATRO CEMENTOS COMERCIALES PORTLAND TIPO I. Trabajo de grado presentado para obtener el título de Ingeniero civil. Bogotá. Universidad Militar Nueva Granada. Fa.
36. Ibíd., p. 30. .
37. Norma Técnica Colombiana INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT. NTC 128. [en línea]. Bogotá D.C.: El instituto 1998. p. 5.
38. Norma Técnica Colombiana INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO MEDIANTE EL APARATO DE VICAT. NTC 128. [en línea]. Bogotá D.C.: El instituto 1998. p. 5.
39. Norma Técnica Colombiana. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 60 mm x 60.8mm de lado. NTC 220. [en línea]. Bogotá D.C.: El instituto 2004. Todo el documento. .
40. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y absorción del agregado grueso NTC-176. Bogotá. Icontec. 1995. Todo el documento .
41. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y absorción del agregado fino NTC-237. Bogotá. Icontec. 1995. Todo el documento.
42. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal. ACI 211.1-91. Michigan: Heavyweight, and Mass Concrete, 2002. p. 211.1-1.

43. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes en concreto. NTC-550. Bogotá. Icontec. 2007. Todo el documento.
44. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Cementos. Método de ensayo para determinar el cambio longitudinal de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfatos. NTC-3330. Bogotá. Icontec. 2019. Todo el documento.
45. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Ingeniería Civil y Arquitectura. Ensayo de la resistencia a la compresión de especímenes de cilindros de concreto. NTC-673. Bogotá. Icontec. 2010. p.2. .
46. OSORIO, Jesús David. Resistencia Mecánica del concreto y resistencia a la compresión. [blog]. Blog 360 en concreto. Bogotá. 28 de Junio de 2013. [Consultado: 15 de octubre de 2019]. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concr>.
47. ALLAUCA, Luis. AMEN, Hugo. Lung, Jessica. Uso de Sílice en hormigones de alto desempeño. [en línea]. Ecuador. p.4. [consultado: 15 de octubre de 2019].
48. VELEZ, Ligia. Permeabilidad y Porosidad del concreto. Bogotá-. P. 5 [consultado: 15 de octubre de 2019].
49. Ibíd., p. 6.