

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTADOS A
BASE DE CENIZAS VOLANTES COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO
PORTLAND.**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

NICOLÁS ALEJANDRO LÓPEZ CASTILLO
ANGIE NATHALIA HERNÁNDEZ MORA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2018

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CEMENTADOS A
BASE DE CENIZAS VOLANTES COMO USO ALTERNATIVO DEL CEMENTO
PORTLAND.**

**NICOLÁS ALEJANDRO LÓPEZ CASTILLO
ANGIE NATHALIA HERNÁNDEZ MORA**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero civil

Director

BRAYAN GERARDO AREVALO

Ingeniero civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C.

2018



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

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



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

hacer obras derivadas

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.

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 31 de octubre de 2018

A Dios por ser nuestro guía y darnos las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo.

A nuestros padres y familiares por estar siempre presentes y ayudando en cada momento.

A los ingenieros Carlos Slebi y Gerardo Arévalo por brindarnos su conocimiento y encaminarnos en el desarrollo de este trabajo.

A todos los docentes y personas que contribuyeron en nuestra enseñanza durante el tiempo de formación.

CONTENIDO

RESUMEN	13
GLOSARIO.....	15
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES	19
1.1. OBJETIVOS	19
1.1.1. General.....	19
1.1.2. Específicos	19
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	20
1.4. LIMITACIONES.....	20
2. ANTECEDENTES.....	22
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	22
2.1.1. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales con activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz	23
2.1.2. Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural.....	23
2.1.3. Geopolímeros para un desarrollo sustentable	23
2.1.4. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento	24
2.1.5. Obtención de áridos livianos a partir de escoria de alto horno activada mediante solución.....	24
2.1.6. Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento portland	25
3. MARCO DE REFERENCIA	26
3.1. MARCO TEÓRICO.....	26
3.1.1. Cemento Portland.....	26
3.1.1.1. Proceso productivo del Cemento Portland.....	26
3.1.1.2. Tipos de cemento Portland	28
3.1.1.3. Normatividad del Cemento Portland.....	29
3.1.2. Suelos cementados.....	30
3.1.2.1. Geopolimerización.....	31
3.1.3. Puzolanas	34
3.1.3.1. Clasificación	35

3.1.3.2.	Cenizas volantes	35
3.2.	MARCO CONCEPTUAL.....	36
3.2.1.	Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión (I.N.V. E – 402 – 13)	36
3.2.2.	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (I.N.V. E – 410 – 13) 36	
3.2.3.	Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre (I.N.V. E – 414 – 13).....	37
3.2.4.	Determinación de la resistencia de morteros de cenizas de carbón usando cubos de 50 mm de lado (NTC – 220)	37
4.	METODOLOGIA.....	38
4.1.	Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión (I.N.V.E. – 402 – 13)	42
4.1.1.	Cilindros de PVC (2”)	42
4.1.2.	Cilindros metálicos (4”).....	44
4.1.2.1.	Cilindros metálicos (4”) con relación A/C 0,50.....	44
4.1.2.2.	Cilindros metálicos (4”) con relación A/C 0,60.....	46
4.1.3.	Vigas metálicas.....	48
4.2.	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (I.N.V.E. – 410 – 13)	51
4.3.	Resistencia a flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre (I.N.V.E. – 415 – 13).....	53
4.4.	Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión usando cubos de 50 mm de lado (NTC – 220)	54
5.	RESULTADOS	58
5.1.	Cilindros de PVC (2”).....	58
5.2.	Cilindros metálicos (4”).....	59
5.2.1.	Cilindros metálicos de cenizas (4”) con relación A/C 0,50.....	59
5.2.2.	Cilindros metálicos de cenizas (4”) con relación A/C 0,60.....	60
5.2.3.	Cilindros metálicos convencionales (4”)	62
5.3.	Vigas metálicas.....	63
5.3.1.	Vigas metálicas de cenizas.....	63
5.3.2.	Vigas metálicas convencionales	65
5.4.	Morteros	66
5.4.1.	Morteros de cenizas curados a temperatura ambiente	67
5.4.2.	Morteros de cenizas curados en horno.....	69
5.4.3.	Morteros de cemento convencional.....	70

6. ANALISIS DE RESULTADOS	73
6.1. Cilindros	73
6.1.1. Cilindros curados a 7 días.....	75
6.1.2. Cilindros curados a 14 días	76
6.1.3. Cilindros curados a 28 días	77
6.2. Vigas.....	78
6.2.1. Vigas curadas a 7 días	79
6.2.2. Vigas curadas a 14 días	80
6.2.3. Vigas curadas a 28 días	81
6.3. Morteros	82
6.3.1. Morteros curados a 7 días	84
6.3.2. Morteros curados a 14 días	85
6.3.3. Morteros curados a 28 días	86
7. CONCLUSIONES	88
8. RECOMENDACIONES.....	90
9. TRABAJOS FUTUROS.....	91
BIBLIOGRAFIA	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del cemento Portland	38
Tabla 2. Composición química de las cenizas de carbón.....	39
Tabla 3. Primera iteración para las cenizas	39
Tabla 4. Segunda iteración para las cenizas.....	40
Tabla 5. Tercera iteración para las cenizas.....	40
Tabla 6. Cuarta iteración para las cenizas	41
Tabla 7. Composición final para las cenizas	41
Tabla 8. Granulometría de cilindros 50mm (2").....	42
Tabla 9. Diseño de mezcla de cilindros 50mm (2")	43
Tabla 10. Granulometría para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,50	45
Tabla 11. Diseño de mezcla para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,50	45
Tabla 12. Granulometría para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,60	47
Tabla 13. Diseño de mezcla para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,60	47
Tabla 14. Granulometría para vigas metálicas	49
Tabla 15. Diseño de mezcla para vigas metálicas	49
Tabla 16. Diseño de mezcla para morteros.....	55
Tabla 17. Resistencia a compresión en cilindros de 2"	58
Tabla 18. Resistencia a la compresión en cilindros de 4" con relación A/C 0,50 ..	60
Tabla 19. Resistencia a la compresión en cilindros de 4" con relación A/C 0,60 ..	61
Tabla 20. Resistencia a la compresión en cilindros de concreto convencional	63
Tabla 21. Módulo de rotura en vigas de cenizas de carbón	64
Tabla 22. Módulo de rotura en vigas de concreto convencional.....	66
Tabla 23. Resistencia a la compresión en morteros curados a temperatura ambiente.....	68
Tabla 24. Resistencia a la compresión en morteros de cenizas curados en horno	70
Tabla 25. Resistencia a la compresión en morteros de cemento	72
Tabla 26. Proyección de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,50	73
Tabla 27. Proyección de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,60	74
Tabla 28. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 7 días	75
Tabla 29. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 14 días	76
Tabla 30. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 28 días	77
Tabla 31. Proyección del módulo de rotura en vigas.....	78
Tabla 32. Módulo de rotura de vigas curadas a 7 días.....	79
Tabla 33. Módulo de rotura de vigas curadas a 14 días.....	80
Tabla 34. Módulo de rotura de vigas curadas a 28 días.....	81
Tabla 35. Proyección de la resistencia a compresión en morteros curados a T. ambiente.....	82

Tabla 36. Proyección de la resistencia a compresión en morteros curados en horno	83
Tabla 37. Resistencia a la compresión de morteros curados a 7 días	84
Tabla 38. Resistencia a la compresión de morteros curados a 14 días	85
Tabla 39. Resistencia a la compresión de morteros curados a 28 días	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas de fabricación del cemento portland	27
Figura 2. Proceso de geopolimerización. Paso 1	31
Figura 3. Proceso de geopolimerización. Paso 2	32
Figura 4. Proceso de geopolimerización. Paso 3	32
Figura 5. Proceso de geopolimerización. Paso 4	32
Figura 6. Proceso de geopolimerización. Paso 5	33
Figura 7. Proceso de geopolimerización. Paso 6a	33
Figura 8. Proceso de geopolimerización. Paso 6b	34
Figura 9. Proceso de geopolimerización. Paso 7	34
Figura 10. Cenizas de Carbón.....	38
Figura 11. Granulometría de cilindros 50mm (2").....	42
Figura 12. Mezcla de cenizas y elementos químicos	43
Figura 13. Cilindros de cenizas, diatomeas y metacaolín	44
Figura 14. Mezcla de material para cilindros metálicos.....	45
Figura 15. Preparación de granulometría para cilindros metálicos de 4"	46
Figura 16. Compactación de cilindro metálico.....	48
Figura 17. Trompo mezclador	50
Figura 18. Proceso de compactación de vigas.....	50
Figura 19. Resultado de viga compactada	51
Figura 20. Cilindro de concreto convencional sometido a carga	52
Figura 21. Cilindro de concreto de cenizas sometido a carga	52
Figura 22. Patrón de fallas	53
Figura 23. Viga de concreto convencional con carga aplicada.....	53
Figura 24. Viga de concreto de cenizas con carga aplicada	54
Figura 25. Arena de guamo.....	55
Figura 26. Mezcla de arena de guamo con cenizas	55
Figura 27. Proceso de compactación de morteros	56
Figura 28. Morteros enrasados	56
Figura 29. Mortero de cemento con carga aplicada	57
Figura 30. Mortero de cenizas con carga aplicada.....	57
Figura 31. Falla de cilindro de concreto de cenizas con relación A/C 0,50	59
Figura 32. Falla de cilindro de concreto de cenizas con relación A/C 0,60	61
Figura 33. Falla de cilindro de concreto convencional.....	62
Figura 34. Falla de viga de concreto de cenizas	64
Figura 35. Falla de viga de concreto de cenizas	65
Figura 36. Morteros de cenizas curados a temperatura ambiente	67
Figura 37. Falla de mortero de cenizas curado a temperatura ambiente	67
Figura 38. Mortero de cemento convencional sometido a carga	71
Figura 39. Falla de Mortero de cemento convencional.....	71

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Resistencia a la compresión con distintos métodos de mezcla	58
Gráfica 2. Resistencia a la compresión de cilindros de 4" con relación A/C 0,50..	60
Gráfica 3. Resistencia a la compresión de cilindros de 4" con relación A/C 0,60..	62
Gráfica 4. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto convencional	63
Gráfica 5. Módulo de rotura en vigas de cenizas de carbón.....	65
Gráfica 6. Módulo de rotura en vigas de concreto convencional	66
Gráfica 7. Resistencia a la compresión en morteros curados a temperatura ambiente.....	68
Gráfica 8. Morteros de cenizas curados en horno.....	69
Gráfica 9. Falla de morteros de cenizas curados en horno	69
Gráfica 10. Resistencia a la compresión en morteros curados en horno	70
Gráfica 11. Resistencia a la compresión en morteros de cemento	72
Gráfica 12. Línea de tendencia de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,50.....	74
Gráfica 13. Línea de tendencia de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,60.....	75
Gráfica 14. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 7 días.....	76
Gráfica 15. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 14 días.....	77
Gráfica 16. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 28 días.....	78
Gráfica 17. Línea de tendencia del módulo de rotura en vigas	79
Gráfica 18. Módulo de rotura de vigas curadas a 7 días	80
Gráfica 19. Módulo de rotura de vigas curadas a 14 días	81
Gráfica 20. Módulo de rotura de vigas curadas a 28 días	82
Gráfica 21. Línea de tendencia de la resistencia a compresión en morteros curados a T. ambiente.....	83
Gráfica 22. Línea de tendencia de la resistencia a compresión en morteros curados en horno	84
Gráfica 23. Resistencia a la compresión de morteros curados a 7 días.....	85
Gráfica 24. Resistencia a la compresión de morteros curados a 14 días.....	86
Gráfica 25. Resistencia a la compresión de morteros curados a 28 días.....	87

RESUMEN

El desequilibrio actual de la industria del cemento portland, ha conllevado a la búsqueda de materiales alternativos que integren parámetros competentes en su desarrollo, logrando obtener así materiales con un elevado rendimiento, bajos costos y un menor impacto ambiental; dando lugar a los denominados geopolímeros.

Con el objetivo de estudiar la factibilidad del uso de la puzolana natural existente en la Región Andina de Colombia como fuente de aluminosilicato en la síntesis de un material cementante, el presente documento consiste en la evaluación de un concreto a base de cenizas de carbón, que determina la composición química y estima las propiedades físicas como la resistencia mecánica, la trabajabilidad y moldeabilidad del material, así como también plantea un análisis comparativo entre el espécimen y el concreto convencional.

Para tal propósito, se llevó a cabo la caracterización del material a partir de ensayos, cuyos resultados revelan que si es utilizada como fuente de aluminosilicato pura, no se logra activar, para lo cual se estudia entonces la incorporación de cantidades considerables de fuentes como, óxido de calcio, que influyo en el alcance del 30% de la resistencia.

Por lo tanto, en las proporciones estudiadas no sería viable el uso de geopolímeros, no obstante, es el principio de un amplio estudio que a futuro podría representar una buena oportunidad para el sector de la construcción.

ABSTRACT

The current inalcance of the Portland cement industry has led to the search for alternative materials that integrate competent parameters in their development, thus obtaining materials with high performance, low costs and a lower environmental impact; giving rise to the so-called geopolymers.

In order to study the feasibility of using natural pozzolan in the Andina Region of Colombia as a source of aluminosilicate in the synthesis of a cementitious material, this document consists of the evaluation of a concrete based on coal ash, which determines the chemical composition and estimates the physical properties such as mechanical strength, workability and moldability of the material, as well as a comparative analysis between the specimen and conventional concrete.

For this purpose, the characterization of the material was carried out from tests, the results of which show that if it is used as a source of pure aluminosilicate, it is not possible to activate, for which the incorporation of considerable quantities of sources such as calcium oxide, which influenced the reach of 30% of the resistance.

Therefore, in the proportions studied, the use of geopolymers would not be viable, however, it is the beginning of a broad study that in the future could represent a good opportunity for the construction sector.

GLOSARIO

GEOPOLÍMEROS: Término usado para designar polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización. Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos.

ALUMINOSILICATO: Es un mineral que contiene óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice (SiO_2). Son aluminosilicatos el feldespato, las cloritas, los minerales de la arcilla, algún tipo de puzolana, etc.

PUZOLANAS: Son materiales silíceos o aluminio-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX. Hoy en día el cemento puzolánico se considera un eco material.

CENIZAS VOLANTES: Son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. Se utilizan como adiciones para hormigón.

DOSIFICACIÓN: Implica establecer las proporciones apropiadas de los materiales que componen el hormigón, a fin de obtener la resistencia y durabilidad requeridas, o bien, para obtener un acabado o adherencia correctos.

GRANULOMETRÍA: Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

MEZCLA: Es la agregación de varias sustancias o cuerpos que no se combinan químicamente entre sí. A cada una de las sustancias que conforman una mezcla se le llama componente, los cuales al estar juntos o separados conservan sus propiedades características, e intervienen en proporciones variables.

CURADO: Es el término que se utiliza para cuando se quiere evitar que el concreto (hormigón) recién vertido se seque demasiado rápido. Esto se hace porque el concreto, si se deja secar a su propio ritmo, no desarrollará el vínculo completo entre todos sus ingredientes.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: Esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. La resistencia a la compresión de un material que falla debido a la rotura de una fractura se puede definir, en límites bastante ajustados, como una propiedad independiente.

RESISTENCIA A FLEXION: Es una propiedad material que se manifiesta como esfuerzos ocurridos justo antes de ceder en una prueba de flexión. Con mayor

frecuencia se emplea la prueba flexional transversal, en la cual un espécimen de sección circular o rectangular se arquea hasta que se fractura.

FALLA: Una falla estructural se refiere a un colapso en el cual la estructura se rompe en pedazos. Sin embargo, en la mayoría de los casos el término incluye otras condiciones aparte del colapso, que pueden ser no tan drásticas y aun así llevar a pérdidas grandes.

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, alcanzando niveles de consumo de un metro cubico por persona al año. El concreto tiene como materia prima básica al cemento portland, material que se obtiene por la pulverización del clínker con la adición de sulfato de calcio (Cook, 1983). La producción de cemento Portland libera grandes cantidades de CO₂, pues el clínker, que resulta de la calcinación del carbonato de calcio y de un material silíceo, produce esta reacción. La generación de una tonelada de cemento, produce la emisión de 0,55 toneladas de CO₂, junto con la combustión del carbón combustible que libera 0,4 toneladas. Se dice entonces, que por una tonelada de cemento se libera una tonelada de dióxido de carbono. Como consecuencia, se ha logrado obtener a nivel mundial emisiones entre el 5% y el 7% de la totalidad de emisiones de CO₂, sólo por la industria cementera. Además, la fabricación de cemento portland en países industrializados y en desarrollo se ha incrementado en forma apreciable, volviéndolo uno de los productos más usados en la industria de la construcción, con el mayor aporte en materia de emisiones de CO₂ a lo largo de su ciclo de vida (Valenzuela, 2013).

Actualmente, para la búsqueda de materiales sustentables se cree necesario impulsar nuevas alternativas que integren dichos parámetros en su desarrollo, logrando obtener así materiales con un elevado rendimiento, bajos costos y un menor impacto ambiental. Esto podría involucrar a las industrias químicas, de hierro y de vidrio, promoviendo el uso de nuevas tecnologías que involucren materiales reciclables.

Por lo anterior, el estudio de concretos geopoliméricos ha pasado a ser un tema de gran importancia por tratarse de una alternativa real al concreto a base de cemento usado típicamente en la industria de la construcción. Los cementos geopoliméricos buscan ser una alternativa que apunta a resolver dichas problemáticas, pues para la fabricación de este cemento en particular, se requiere de una fuente de aluminosilicato, que debe poseer una elevada cantidad de sílice y alúmina, así como también de una solución alcalina, compuesta por una solución de hidróxido de sodio y de una solución de silicato de sodio. Dentro de los aluminosilicatos que se pueden utilizar como fuente, se encuentran las puzolanas naturales, la ceniza volante, las escorias producidas en las industrias metalúrgicas, meta caolín, entre otros (Bondar, 2010).

Dentro de los principales beneficios de los geopolímeros, destacan la utilización de menor cantidad de materias primas a base de calcio, así como las bajas temperaturas para su fabricación (750°C), las cuales son menores a aquellas que se alcanzan con los cementos Portland (1400°C). Como consecuencia, las emisiones de CO₂ disminuyen entre un 80% a un 90% para los cementos

geopoliméricos manufacturados en comparación con el actual cemento Portland (Valenzuela, 2013).

Este trabajo consta de la búsqueda de dosificaciones óptimas para lograr el cemento geopolimérico, a partir de las fuentes mencionadas anteriormente, variando parámetros tales como: cantidad de solución alcalina en la mezcla, composición de material fuente aluminosilicato, concentración molar de solución hidróxido de sodio, cantidad de solución hidróxido de sodio, temperatura de curado en horno, entre otros.

1. GENERALIDADES

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. General

Obtención y caracterización de reacción alcalino – sílice de materiales cementados a base de cenizas volantes como uso alternativo del cemento portland.

1.1.2. Específicos

- Determinar las dosificaciones de la materia prima mediante diferentes ensayos de laboratorio realizados en la Universidad Católica de Colombia.
- Evaluar propiedades físicas del material, como la resistencia mecánica, la trabajabilidad y moldeabilidad.
- Comparar los resultados obtenidos con los estándares ya establecidos en el cemento Portland.
- Evidenciar que su costo es más económico y apropiado desde el punto de vista estructural.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿Es posible sustituir el cemento Portland con un material cementado proveniente del suelo?

El crecimiento de una población, exige de más energía y recursos del medio para que se mantenga. Este sería el mismo fenómeno que se presenta en el sector de la construcción, que, para sustentar el desarrollo y bienestar de una sociedad civil, hace uso indiscriminado y poco consciente de los recursos.

El cemento Portland, principal conglomerante utilizado en el desarrollo de obras de infraestructura, tiene una producción que requiere de aproximadamente 3.600 millones de toneladas a nivel mundial y 11,5 millones a nivel nacional. Es decir, significa un valor importante cuando se tiene en cuenta que su elaboración es un proceso energéticamente costoso y contaminante (Sossa, 2012).

A partir de este hecho, se han desarrollado investigaciones que estudian la fabricación del cemento y sus componentes, buscando disminuir los aspectos negativos de la construcción frente al medio ambiente y a la sociedad, planteando la utilización de nuevos materiales amigables con nuestro entorno, que aseguren un proceso confiable, manejable, repetible y económicamente sustentable.

Las cenizas volantes en el concreto garantizan muchos beneficios. Se pueden resaltar las propiedades del concreto fresco a través de la disminución de agua, con mejor manejabilidad, una cohesión mejorada, una segregación reducida. Se reduce la temperatura pico durante el proceso de curado, lo que implica una disminución de agrietamientos térmicos. Para el concreto endurecido, tener ceniza volante dentro de su composición puede mejorar la durabilidad, se reduce la permeabilidad y genera una ganancia a largo plazo para el concreto (Sossa, 2012).

1.3. JUSTIFICACIÓN

Los residuos industriales son un problema ambiental que requieren de una pronta solución. Sin embargo, al detallar más acerca de este fenómeno, encontramos que muchos de estos materiales aún tienen propiedades físicas y químicas que se pueden aprovechar en el campo de la construcción, generando así una solución económica y que va en pro de la conservación del medio ambiente.

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina. El uso de estos materiales como fuente de aluminosilicato para formación de geopolímeros, es una potencial materia prima, pues contiene fases de silíceo y alúmina en mayor cantidad. No son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente y mezcladas con cal, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales en presencia de agua, como el cemento. Por esta razón, entre otras, las puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto (Bondar y otros, 2011).

La mayoría de materiales puzolánicos descritos aquí son generados a partir de procesos industriales y son producidos en grandes cantidades, constituyendo un problema de desperdicio, si permanecen sin utilizar. Incluso si no hubiera otros beneficios, sólo este aspecto justificaría un incremento del empleo de estos materiales.

1.4. LIMITACIONES

Debido a que las cenizas volantes son un material poco utilizado como componente de un suelo cementado, se debe realizar una búsqueda exhaustiva para obtenerla.

La carencia de algunos equipos en los laboratorios de la Universidad Católica de Colombia, generan un costo adicional, pues se requiere de instalaciones ajenas a esta, a los cuales se paga por su servicio.

Al contar con poco tiempo y teniendo en cuenta la realización de las prácticas, se deben organizar de una manera precisa todas las actividades a desarrollar, cumpliendo con un adecuado cronograma.

2. ANTECEDENTES

2.1. ESTADO DEL ARTE

En la actualidad y desde hace tiempo, se ha hecho necesario la búsqueda de materiales que sean sostenibles, con el paso de los años potencias como china y la india, incrementan cada vez más la producción de cemento y algunos países en desarrollo parecen tener la misma tendencia. Esto, se debe a que la fabricación del cemento tradicional libera emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y afecta directamente el calentamiento global y efecto invernadero, pues, por cada tonelada que se fábrica de cemento, se libera una tonelada de CO₂ (Cook, 1983).

Este proyecto le dará importancia a los suelos cementados, los cuales se caracterizan por ser formados a base de reacciones químicas entre una fuente de aluminosilicato y una solución alcalina. Lo interesante de este tipo de material es que libera un porcentaje menor de CO₂. Con esto, se busca implementar un nuevo material cementado sintetizado a partir de cenizas volantes y determinar si es viable emplearlo como un material alternativo del cemento Portland.

Durante la indagación acerca de esta nueva práctica, se han encontrado diversos artículos, ensayos y documentos de investigación, sobre los geopolímeros como alternativa del cemento Portland para la construcción de una obra, proyecto o actividad. Esta información ha contribuido en el desarrollo de este estudio, evidenciando los logros que se han obtenido al emplear prácticas parecidas que permitan el reemplazo de los materiales comúnmente utilizados. Entre los más relevantes, se permite mencionar el artículo, “concreto con geopolímeros para pistas aeroportuarias” que confirma la implementación de este nuevo material cementado.

Este artículo escrito en el año 2016 da a conocer la construcción del nuevo aeropuerto de Brisbane y sus pistas, ubicado en Queensland, Australia. En este documento se explica el proceso de producción, curado y la realización de juntas del pavimento para las aeropistas de este aeropuerto, gran parte elaboradas de concreto con geopolímeros. Con la construcción de este pavimento, el Brisbane West Wellcamp Airport se convierte en uno de los primeros aeropuertos que aplica innovación y sostenibilidad en concreto. Este artículo concluye que los geopolímeros son un material que debe ser considerado por los contratistas de construcción para este tipo de estructuras gracias a sus características y propiedades, como la alta resistencia a la tracción, flexión, su baja contracción y buena trabajabilidad (Asocreto, 2016).

2.1.1. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales con activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz

En la Universidad de Sevilla de España en el año 2016 se realizó un trabajo de investigación por parte del departamento de Ingeniería Química y Ambiental que consiste básicamente en la fabricación y producción de un nuevo geopolímero sintético menos contaminante que se pueda emplear como sustituto del cemento y a su vez su costo sea económicamente inferior. Los resultados muestran que los geopolímeros a partir de ceniza volante mejoran sus propiedades mecánicas, al aumentar las molaridades de las soluciones de ataque y al aplicar NaSil, soluciones de ataque con molaridades inferiores a 5, como 2.5M, generan geopolímeros pulverulentos; esta adición de NaSil produce el aumento de resistencia a compresión y reduce el tamaño de los poros (Lora, 2016).

2.1.2. Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural

En Santiago de Chile, más exactamente en la Universidad de Chile en septiembre de 2013 se realizó un trabajo de investigación con el objetivo de estudiar la factibilidad de uso de la puzolana natural existente como fuente de aluminosilicatos en la síntesis de geopolímeros, por otra parte se estudia la incorporación de cantidades variables de otras fuentes de aluminosilicatos tales como ceniza volante y escorias de alto horno provenientes de cemento Melón y Huachipato, ya que el bajo contenido de alúmina incide en las bajas resistencias de la puzolana Natural. Al concluir la investigación en los resultados experimentales, se observa que la puzolana sola, como fuente de aluminosilicato no logra activarse para obtener morteros con propiedades mecánicas satisfactorias. Por eso se le agregan proporciones de ceniza volante para aumentar su resistencia mecánica, a medida que se adiciona ceniza volante, su resistencia también aumenta, alcanzando resistencias a un día de 11.4 MPa a compresión y 2.2 MPa a flexo tracción (Valenzuela, 2013).

2.1.3. Geopolímeros para un desarrollo sustentable

En el estado de Querétaro, México, en febrero de 2011 se escribió un artículo en el que se recomienda empezar a utilizar nuevas tecnologías como el uso de materiales, procesos o métodos que reduzcan o elimine la contaminación. Ya que con la tecnología del geopolímero se es posible la reutilización de desechos industriales de meta caolín y otros aluminosilicatos para generar este nuevo material. Básicamente con estas nuevas tecnologías buscan recurrir a materiales

que gasten menos energía, agua u otros recursos. Se puede concluir que la tecnología del geopolímero es prometedora para ser aplicada en diferentes áreas; también se ha demostrado que manipulando el proceso de sintetizado de la pasa de geopolímero se puede obtener un material cerámico a temperaturas tan bajas como 30 y 90°C que sea ligero y traslucido, lo cual hace que el geopolímero sea empleado como base o sustrato (Villareal, 2011).

2.1.4. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento

En el año 2016 en Palmira, Colombia en la universidad Nacional de Colombia se desarrolló un trabajo de investigación donde se evalúa las características ambientales de los geopolímeros elaborados a partir de dos puzolanas volcánicas con el fin de determinar su potencial como remplazo del cemento portland.

Finalmente, balance ambiental comparativo entre los procesos productivos del cemento portland y el proceso de geopolimerización, se encuentra que, comparando con el cemento, las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero pueden reducirse significativamente, la tecnología de los geopolímeros impacta otras categorías ecológicas como el agotamiento abiótico, toxicidad humana, eco toxicidad del agua marina y terrestre, acidificación, eutrofización, entre otros (López, 2015).

2.1.5. Obtención de áridos livianos a partir de escoria de alto horno activada mediante solución

En Santiago de Chile, en el año 2014 se realizó una investigación para optar por el título de ingeniero civil que tiene como objetivo evaluar el comportamiento de hormigones obtenidos reemplazando la fracción gruesa del árido de un hormigón estructural típico, por el árido liviano geopolimérico mediante el ensayo de compresión y durabilidad. Se concluye que por medio del proceso de peletizado y a partir del uso del disco, se permite la producción a escala de laboratorio de áridos livianos geopoliméricos, aprovechando sobre el 80% de los insumos, minimizando el nivel de desechos (Moya, 2014).

2.1.6. Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento portland

En el año 2017, en la ciudad de Bogotá D.C. en la universidad Nacional de Colombia se realizó una investigación con el objetivo de evaluar las propiedades mecánicas y durabilidad de morteros geopoliméricos, sintetizados a partir de una escoria granulada de fabricación nacional y un activante industrial. Sus resultados muestran que la activación alcalina de la escoria es un proceso distinto a la hidratación del cemento portland, se establece la norma para un cemento convencional pueden no ser requeridos para este tipo de material. La polimerización de la escoria con el activante puede no depender necesariamente del calcio para su formación (Torres, 2017).

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1. MARCO TEÓRICO

La industria del cemento tiene un impacto ambiental negativo significativo, culpable de impactos que afectan la atmosfera, la vegetación, las aguas y el paisaje de las poblaciones en las que operan estas fábricas de cemento. Por esto es importante empezar a buscar un sustituto para este material, uno que contenga propiedades parecidas, que su costo sea igual o más económico que el que presenta el cemento, pero por, sobre todo, que el impacto que genere ambientalmente sea despreciable.

3.1.1. Cemento Portland

Tradicionalmente el cemento se ha considerado como el principal material de la construcción. La norma técnica colombiana NTC-31, lo define como un “material pulverizado que además de óxido de calcio contiene sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire”. Por lo anterior, presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, a través de un proceso de naturaleza química conocido como hidratación (Asocreto, 2016).

Entre las propiedades interesantes de este material se señalan: fraguado rápido y endurecimiento más lento, buena adherencia a otro tipo de materiales, y buena resistencia en general. Estas características son las responsables de que el cemento tenga un papel tan relevante en la vida moderna (Ficem, 2009).

3.1.1.1. Proceso productivo del Cemento Portland

De acuerdo con la federación interamericana del cemento, el proceso de fabricación del cemento comprende 10 etapas fundamentales y se presentan a continuación:

Figura 1. Etapas de fabricación del cemento portland



Fuente (Ficem, 2009)

- **Extracción de materias primas:** Durante esta fase se realiza la extracción de la roca caliza en la cantera, que se constituye como la principal materia prima para la elaboración del cemento.
- **Triturado:** Mediante dos trituradoras se reducen las rocas hasta alcanzar un tamaño apropiado para su adecuación en las siguientes etapas. Esta caliza triturada de calidad controlada, se dirige por cintas a un stock llamado escombrera. En la escombrera se extrae la piedra caliza por cinta y es conducida hacia las tolvas de molino de materia prima.
- **Pre homogenización y molienda:** La caliza se muele junto con otros componentes minoritarios para formar un polvo llamado harina cruda. En esta etapa los sistemas de muestreo neumáticos y los posteriores análisis con equipos de alta tecnología permiten mantener las especificaciones de calidad bajo control. La harina cruda obtenida, es transportada a los silos donde es homogeneizada y posteriormente transportada al horno.
- **Pre calentamiento:** La harina cruda ya homogeneizada, ingresa por la parte superior de la torre de intercambio de calor y desciende por la misma iniciándose los procesos de deshidratación y decarbonatación.

- **Pre calcinación:** En esta etapa el material baja en contracorriente con los gases calientes del horno, produciéndose la primera transformación llamada pre calcinación.
- **Clinkerización:** El material precalcinado ingresa al horno rotatorio, en el cual la temperatura asciende hasta alcanzar los 1450°C, generándose las reacciones químicas más importantes en el crudo y la formación del “Clinker”. En esta etapa proceden las reacciones de formación de los cuatro componentes principales del Clinker tales como: Silicato tricálcico (C3S), silicato dicálcico (C2S), aluminato tricálcico (C3A), y ferroaluminato tetracálcico (C4AF).
- **Enfriamiento y almacenamiento:** El Clinker que sale del horno es enfriado rápidamente con el aire frío para bajar su temperatura a 1000°C asegurando el estado vítreo. Posteriormente, el Clinker frío se almacena en un lugar adecuado para su uso.
- **Mezcla:** Una vez se extrae del parque del Clinker este material, se lleva a cabo un proceso de mezcla, y seguidamente es transportado a los silos que alimentan los molinos de cemento.
- **Molienda de cemento:** Hasta este lugar llegan el Clinker, el yeso y el componente mineral adecuado a la obtención del cemento portland. La molienda de clinker para cemento es uno de los procesos principales y, al mismo tiempo, el final de las operaciones tecnológicas en la fabricación del cemento. La manera como se realice esta etapa es decisiva para la calidad del cemento. No se trata de conseguir que el proceso de molienda llegue hasta una superficie específica demasiado grande, sino que el producto molido cumpla ciertas leyes relativas a la granulometría del producto, para obtener con ello las mejores condiciones para los procesos de endurecimiento.
- **Almacenado en silos:** El cemento se almacena en las torres denominadas silos, los cuales permiten alimentar las embolsadoras automáticas y el despacho a granel.

3.1.1.2. Tipos de cemento Portland

La norma ASTM 2012 clasifica el cemento Portland clasifica en cinco grupos, su uso es de acuerdo a la necesidad de construcción.

- **Tipo I:** El cemento portland tipo I es el normal, usado en la construcción de obras de hormigón en general, viviendas, edificaciones, estructuras etc. Se utiliza cuando las especificaciones de construcción, no indican el uso de otro tipo de cemento.
- **Tipo II:** El cemento Portland tipo II tienen una resistencia media a los ataques de sulfatos, con o sin calor moderado de hidratación, se usa en obras de construcción en general y en construcciones expuestas a la acción moderada de los sulfatos, o que requieren un calor de hidratación moderado, cuando así este consignado en las especificaciones de construcción, por lo general es el cemento utilizado en la realización de tuberías de hormigón y puentes. Su precio es muy similar al cemento portland tipo I.
- **Tipo III:** El Cemento Portland tipo III, alcanza una resistencia inicial alta, su resistencia a la compresión a los 3 días, es igual a la resistencia a la compresión en siete días de los cementos tipos I y II.

Es usado cuando se necesita un hormigón que debe ser desencofrado antes de los 28 días y recibirá cargas muy pronto, como en el caso de los elementos prefabricados o construcciones de emergencia.

- **Tipo IV:** El Cemento Portland tipo IV es usado cuando se necesita un bajo calor de hidratación sin producirse dilataciones durante la etapa de fraguado. El calor desprendido durante la hidratación se produce más lento. Es utilizado en estructuras de hormigón muy grandes, como los diques.
- **Tipo V:** El Cemento Portland tipo V es usado en la construcción de elementos y obras que necesiten una resistencia elevada al ataque concentrado de sulfatos y álcalis, como en las alcantarillas, canales de conducción e infraestructuras portuarias.

3.1.1.3. Normatividad del Cemento Portland

El cemento en Colombia se rige por la norma técnica colombiana NTC 121. También pueden ser consultadas las siguientes normas:

- **NTC 30:** Cementos Portland. Clasificación y nomenclatura.
- **NTC 31:** Cementos. Definiciones.
- **NTC 33:** Método para la determinación de la finura del cemento por medio del Aparato Blaine de permeabilidad al Aire.

- **NTC 107:** Cementos. Ensayos en autoclave para determinar la expansión del cemento.
- **NTC 108:** Cementos. Extracción de muestras.
- **NTC 109:** Cementos. Método para determinar los tiempos de fraguado del cemento hidráulico por medio de las Agujas de Gillmore.
- **NTC 117:** Método para determinar el calor de hidratación del cemento Portland.
- **NTC 118:** Método para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el Aparato de Vicat.
- **NTC 220:** Método para determinar la resistencia a la compresión de Morteros de Cemento hidráulico usando cubos de 50 mm, de lado.
- **NTC 297:** Falso fraguado del cemento Portland. Método de la pasta.
- **NTC 321:** Cemento Portland. Especificaciones químicas.
- **NTC 397:** Expansión potencial de morteros de cemento Portland expuestos a la acción de los sulfatos.
- **NTC 597:** Determinación de la finura del cemento Portland por medio del turbidímetro.

3.1.2. Suelos cementados

Los suelos cementados corresponden a los materiales formados por reacciones químicas entre una fuente de aluminosilicatos y una solución alcalina. Estos materiales, tienen características que en muchos aspectos son superiores a las del hormigón convencional de cemento, no obstante, predomina su uso como sustituto del cemento. Existe un amplio conocimiento sobre las propiedades de estos materiales en relación a su composición y procedimientos de fabricación y curado. En general, se acepta como características relevantes que estos presentan una gran resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a altas temperaturas, además, se destacan por presentar la ventaja de los bajos niveles de emisiones de CO₂ en su producción.

La reacción química que produce un suelo cementado se denomina "Geopolimerización". Esta reacción es llevada a cabo al poner material puzolánico

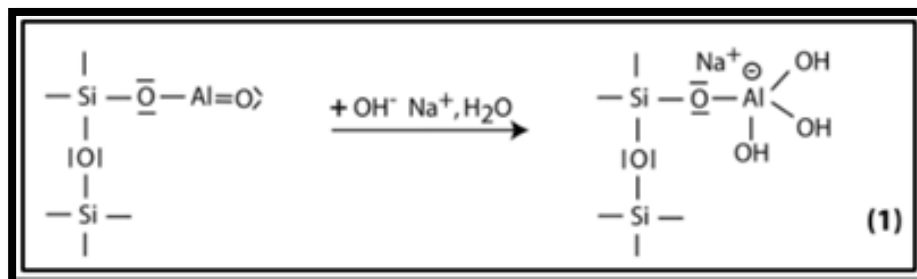
en contacto con una solución alcalina, lo cual tras reorientarse los iones en solución da como resultado la formación de cadenas poliméricas. A través del curado, en horno o a temperatura ambiente, los materiales resultantes de estas reacciones presentan una estructura amorfa tridimensional. El detalle de esta reacción química se expone más adelante (Cook, 1983).

3.1.2.1. Geopolimerización

La geopolimerización es la reacción química que da origen a los geopolímeros. El modelo más aceptado para describir la naturaleza de estas reacciones químicas fue propuesto por J. Davidovits el año 2011. La reacción se genera a partir de una fuente de aluminosilicatos activada mediante una solución alcalina. Los monómeros inorgánicos en solución dan origen a estructuras simples llamadas polisialatos, las cuales al reorganizarse forman cadenas con la misma estructura como elemento repetitivo (polímero) (Davidovits, 2011).

- Alcalinización y formación de Aluminio tetravalente en el grupo lateral sialato-Si-O-Al(OH)₃-Na.

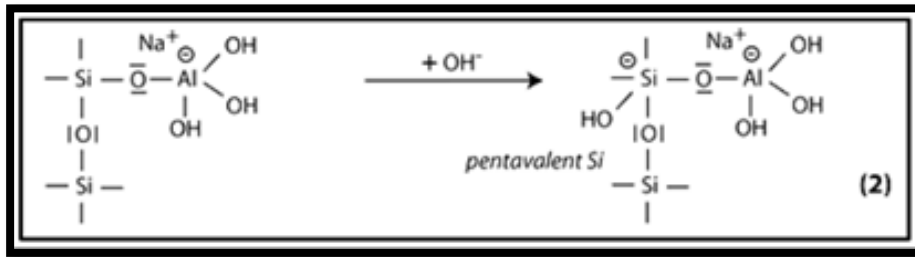
Figura 2. Proceso de geopolimerización. Paso 1



Fuente (Davidovits, 2011)

- Con la unión del ion hidroxilo OH al átomo de silicio, se inicia disolución alcalina y se extiende la esfera de valencia al estado pentavalente.

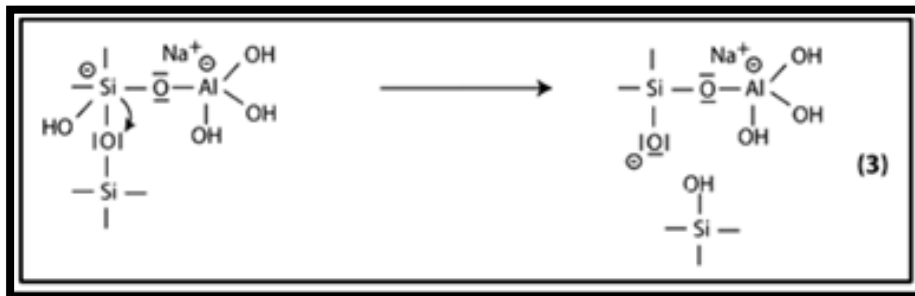
Figura 3. Proceso de geopolimerización. Paso 2



Fuente (Davidovits, 2011)

- La evolución posterior de la reacción, puede ser explicada por la escisión del oxígeno en el grupo siloxano Si-O-Si a través de la transferencia del electrón de Si a O, la formación de silanol Si-OH intermedio, por una parte, y siloxo básica Si-O en el otro lado.

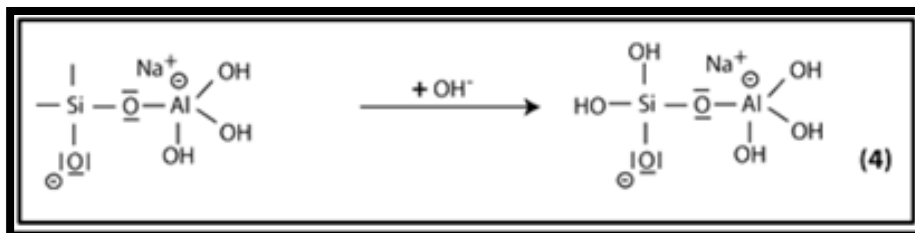
Figura 4. Proceso de geopolimerización. Paso 3



Fuente (Davidovits, 2011)

- Formación de más grupos silanol Si-OH y el aislamiento de la molécula ortosialato, la unidad primaria en la geopolimerización.

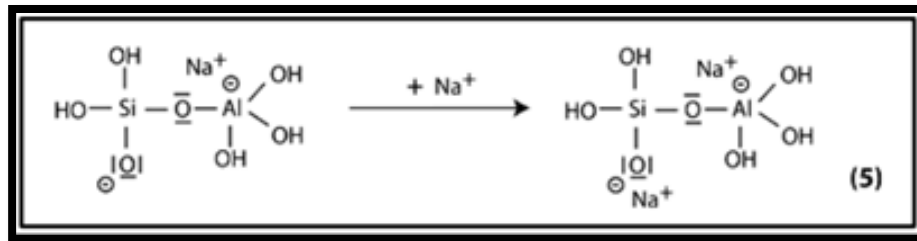
Figura 5. Proceso de geopolimerización. Paso 4



Fuente (Davidovits, 2011)

- Reacción de la siloxo básica Si-O con el catión de sodio Na⁺ y la formación de enlace terminal Si-O-Na.

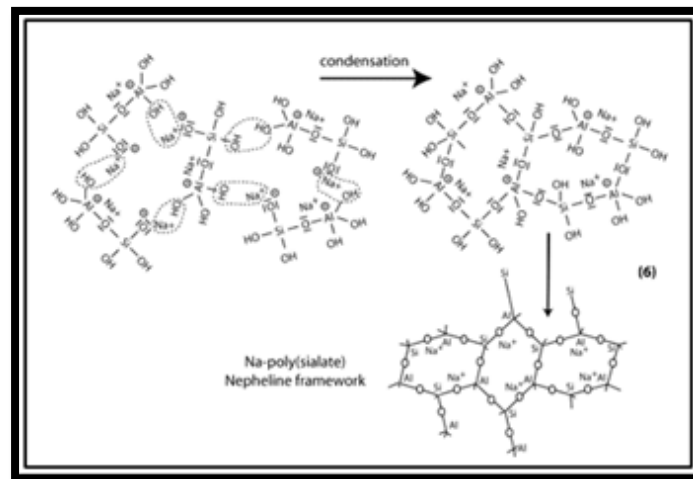
Figura 6. Proceso de geopolimerización. Paso 5



Fuente (Davidovits, 2011)

- Condensación entre moléculas orto sialato, grupos reactivos Si-O-Na y aluminio hidroxilo OH-Al, con producción de NaOH. Formando finalmente, una red de Na-poli (sialato), Nefelina.

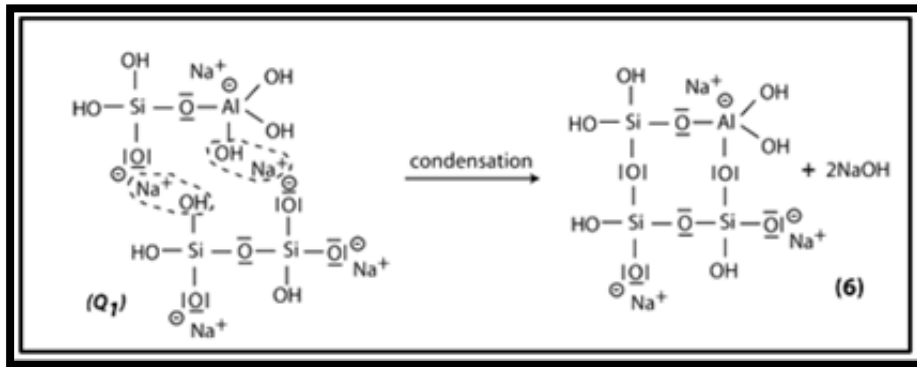
Figura 7. Proceso de geopolimerización. Paso 6a



Fuente (Davidovits, 2011)

- En presencia de vidrio soluble (Na-polisiloxonato) se produce una condensación entre di-siloxonato Q1 y las moléculas orto sialato, grupos reactivos Si-ONa, Si-OH e hidroxilo de aluminio OH-Al-, creación de estructura cíclica orto-sialatodisiloxo, mediante el cual el NaOH alcalino es liberado y vuelve a reaccionar.

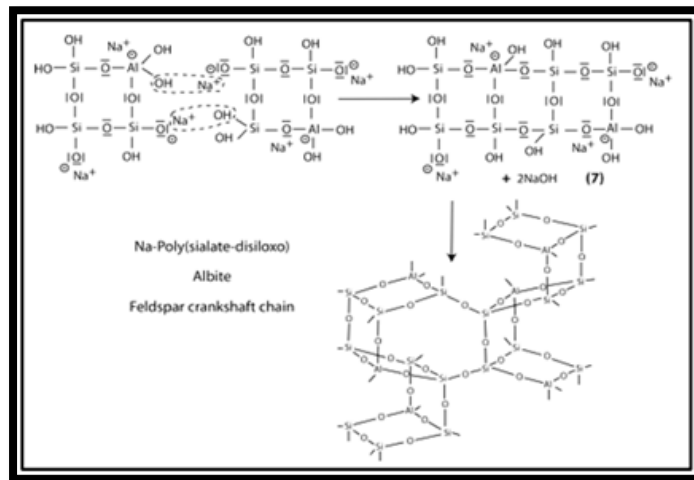
Figura 8. Proceso de geopolimerización. Paso 6b



Fuente (Davidovits, 2011)

- Más poli condensación en estructura albita Na-poli (sialato-disiloxo) con su típica estructura de cadena de feldespato.

Figura 9. Proceso de geopolimerización. Paso 7



Fuente (Davidovits, 2011)

3.1.3. Puzolanas

De acuerdo con la norma ASTM 618 (2003) una puzolana se define como un "material silíceo o silíceo y aluminoso que en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso, sino que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxidos de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementosas".

3.1.3.1. Clasificación

Básicamente hay dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales (Soares, 2008).

Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes.

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas volantes, escoria de altos hornos granulada y molida y ceniza de cascara de arroz.

3.1.3.2. Cenizas volantes

Las cenizas volantes son un residuo que se obtiene por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por flujos gaseosos de hornos alimentados por carbón pulverizado, como ocurre en las termoeléctricas. Son conocidas como una puzolana artificial que molidas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes (Zazueta, 1984).

En la ASTM C618 (2003) se describen algunas especificaciones físicas y químicas para la utilización de la ceniza volante como adición mineral en hormigones. En esta norma se hace una diferenciación entre dos tipos de cenizas volantes: Clase F, correspondiente a las cenizas con bajos contenidos en calcio y obtenidas por la combustión de carbón antracítico o bituminoso; Clase C, las cuales presentan carácter hidráulico con alto contenido en calcio, y se generan por la quema de carbón subbituminoso o lignito.

El grado de reactividad y composición de la ceniza volante depende fundamentalmente del tipo de carbón empleado, del proceso de transformación durante su combustión, tipo de horno o caldera, velocidad de enfriamiento y sistema de captación. La activación alcalina de cenizas volantes es un proceso químico por el que el componente vítreo de este subproducto industrial es transformado en un material cementoso compacto conocido como geopolímero.

Actualmente, existen un gran número de investigaciones sobre el grado de reacción, la composición química, la microestructura y prestaciones mecánicas de este material.

3.2. MARCO CONCEPTUAL

3.2.1. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión (I.N.V. E – 402 – 13)

Esta norma tiene por objeto establecer procedimientos para la elaboración y el curado de especímenes de concreto en el laboratorio bajo un estricto control de los materiales y de las condiciones de ensayo, usando concreto que puede ser compactado por apisonado o vibración, como se describe en la presente norma.

Esta norma proporciona requisitos normalizados para la preparación de materiales y mezclas de concreto, y para la elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayo bajo condiciones controladas (INVIAS, 2013).

Si la preparación de los especímenes se controla como lo indica esta norma, ellos se pueden emplear para desarrollar información útil con los siguientes propósitos:

- Dosificación de mezclas de concreto.
- Evaluación de diferentes mezclas y materiales.
- Correlaciones con resultados de ensayos no destructivos.
- Elaboración de especímenes con fines de investigación.

3.2.2. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (I.N.V. E – 410 – 13)

Este ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tanto cilindros moldeados como núcleos extraídos.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste.

Los resultados de este ensayo se pueden usar como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto; para el cumplimiento de especificaciones y como control para evaluar la efectividad de aditivos y otros usos similares (INVIAS, 2013).

3.2.3. Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre (I.N.V. E – 414 – 13)

Este método de ensayo se usa para determinar la resistencia a la flexión de especímenes preparados y curados de acuerdo con las normas INV E–402, INV E–418 o INV E–420. El resultado se calcula e informa como "módulo de rotura". La resistencia determinada puede variar si existen diferencias en el tamaño del espécimen, la preparación, la condición de humedad, el curado o las condiciones bajo las cuales se ha moldeado o aserrado la viga al tamaño de ensayo.

Los resultados de este método de ensayo se pueden emplear para determinar el cumplimiento de las especificaciones o como base para las operaciones de dosificación, mezcla y colocación del concreto.

El ensayo se usa, también, en la evaluación de concretos para la construcción de losas estructurales y para el diseño y el control de la construcción de pavimentos rígidos (INVIAS, 2013)

3.2.4. Determinación de la resistencia de morteros de cenizas de carbón usando cubos de 50 mm de lado (NTC – 220)

Este ensayo cubre la determinación del esfuerzo de compresión de morteros de cemento hidráulico, usando cubos de 50mm o (2") de lado.

La compresión se medirá sobre dos (2) cubos de 50mm o (2") compactados en dos (2) capas. Los cubos serán curados un día en los moldes y se desmoldarán y sumergirán en agua-cal hasta su ensayo. Las proporciones en masa para formar el mortero usado están compuestas de 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena normalizada. Los cementos Portland o los cementos Portland con incorporadores de aire son mezclados con una relación agua/cemento especificada para los demás cementos la cantidad de agua de amasado debe ser aquella que produzca una fluidez de 110 ± 5 en 25 golpes en la mesa de flujo (NTC, 2004).

4. METODOLOGIA

Para el desarrollo del proyecto de investigación “Obtención y caracterización de materiales cementados a base de cenizas volantes como uso alternativo del cemento portland” se realizaron investigaciones preliminares para determinar la caracterización del material, hallando dosificaciones correctas de ceniza volante y adiciones de materiales y químicos. De esta manera se dispuso a la realización de pruebas de laboratorio con el fin de determinar la resistencia mecánica a tracción y compresión de cilindros, vigas y cubos. Esto se hizo con el fin de comparar los resultados obtenidos con los del cemento portland convencional.

Figura 10. Cenizas de Carbón



Fuente (Hernández & López, 2018)

A modo general para realizar estas pruebas de laboratorio primero se investigó sobre la composición química del material a utilizar, esto con el fin de hacer una comparación con la composición del cemento convencional.

Tabla 1. Composición del cemento Portland

Componente	Cemento Portland
SiO ₂	20,2
Al ₂ O ₃	7,0
Fe ₂ O ₃	4,8
CaO	58,4
TiO ₂	-
K ₂ O	-
S	-
MgO	-
P ₂ O ₅	-
Na ₂ O	-

Fuente (Hernández & López, 2018)

Tabla 2. Composición química de las cenizas de carbón

Componente	Ceniza Volante
SiO ₂	53,7
Al ₂ O ₃	21,5
Fe ₂ O ₃	4,5
CaO	0,8
TiO ₂	1,0
K ₂ O	1,4
S	0,6
MgO	0,6
P ₂ O ₅	0,5
Na ₂ O	0,3
Otros	14,8

Fuente (Hernández & López, 2018)

Se realizó la comparación entre los componentes de cada material y se determinó que el porcentaje de CaO en las cenizas de carbón es muy bajo en comparación con el cemento portland. De esta manera se realizaron unas iteraciones para determinar la cantidad de Oxido de calcio a agregarle a las cenizas.

Tabla 3. Primera iteración para las cenizas

Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.
SiO ₂	-33,5	SiO ₂	53,7	SiO ₂	34,1
Al ₂ O ₃	-14,5	Al ₂ O ₃	21,5	Al ₂ O ₃	13,7
Fe ₂ O ₃	-2,7	Fe ₂ O ₃	7,5	Fe ₂ O ₃	4,8
CaO	57,6	CaO	58,4	CaO	37,1
TiO ₂	-1,0	TiO ₂	1,0	TiO ₂	0,6
K ₂ O	-1,4	K ₂ O	1,4	K ₂ O	0,9
S	-0,6	S	0,6	S	0,4
MgO	-0,6	MgO	0,6	MgO	0,4
P ₂ O ₅	-0,5	P ₂ O ₅	0,5	P ₂ O ₅	0,3
Na ₂ O	-0,3	Na ₂ O	0,3	Na ₂ O	0,2
Otros	-2,2	Otros	11,8	Otros	7,5

Fuente (Hernández & López, 2018)

De acuerdo con la primera iteración, nos da una cantidad de 57,6% de más de Oxido de calcio (CaO), seguidamente se da a continuación la segunda iteración.

Tabla 4. Segunda iteración para las cenizas

Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.
SiO ₂	-13,9	SiO ₂	34,1	SiO ₂	28,2
Al ₂ O ₃	-6,7	Al ₂ O ₃	13,7	Al ₂ O ₃	11,3
Fe ₂ O ₃	0,0	Fe ₂ O ₃	4,8	Fe ₂ O ₃	3,9
CaO	21,3	CaO	58,4	CaO	48,2
TiO ₂	-0,6	TiO ₂	0,6	TiO ₂	0,5
K ₂ O	-0,9	K ₂ O	0,9	K ₂ O	0,7
S	-0,4	S	0,4	S	0,3
MgO	-0,4	MgO	0,4	MgO	0,3
P ₂ O ₅	-0,3	P ₂ O ₅	0,3	P ₂ O ₅	0,3
Na ₂ O	-0,2	Na ₂ O	0,2	Na ₂ O	0,2
Otros	2,1	Otros	7,5	Otros	6,2

Fuente (Hernández & López, 2018)

Podemos observar que ya en esta segunda iteración el porcentaje de Oxido de calcio que se le debe agregar disminuye a un 21,3%, ya que las iteraciones convergen de manera correcta, se procede a realizar la tercera iteración.

Tabla 5. Tercera iteración para las cenizas

Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.
SiO ₂	-8,0	SiO ₂	28,2	SiO ₂	25,3
Al ₂ O ₃	-4,3	Al ₂ O ₃	11,3	Al ₂ O ₃	10,1
Fe ₂ O ₃	0,9	Fe ₂ O ₃	4,8	Fe ₂ O ₃	4,3
CaO	10,2	CaO	58,4	CaO	52,6
TiO ₂	-0,5	TiO ₂	0,5	TiO ₂	0,5
K ₂ O	-0,7	K ₂ O	0,7	K ₂ O	0,7
S	-0,3	S	0,3	S	0,3
MgO	-0,3	MgO	0,3	MgO	0,3
P ₂ O ₅	-0,3	P ₂ O ₅	0,3	P ₂ O ₅	0,2
Na ₂ O	-0,2	Na ₂ O	0,2	Na ₂ O	0,1
Otros	3,4	Otros	6,2	Otros	5,6

Fuente (Hernández & López, 2018)

En esta tercera iteración nos da un 10,2% de Oxido de calcio de más para agregarle a una muestra de cenizas de 100. Seguidamente se realiza la cuarta iteración.

Tabla 6. Cuarta iteración para las cenizas

Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.	Componente	Cen. Vol.
SiO ₂	-5,1	SiO ₂	25,3	SiO ₂	23,8
Al ₂ O ₃	-3,1	Al ₂ O ₃	10,1	Al ₂ O ₃	9,5
Fe ₂ O ₃	0,5	Fe ₂ O ₃	4,8	Fe ₂ O ₃	4,5
CaO	5,8	CaO	58,4	CaO	54,9
TiO ₂	-0,5	TiO ₂	0,5	TiO ₂	0,4
K ₂ O	-0,7	K ₂ O	0,7	K ₂ O	0,6
S	-0,3	S	0,3	S	0,3
MgO	-0,3	MgO	0,3	MgO	0,3
P ₂ O ₅	-0,2	P ₂ O ₅	0,2	P ₂ O ₅	0,2
Na ₂ O	-0,1	Na ₂ O	0,1	Na ₂ O	0,1
Otros	4,0	Otros	5,6	Otros	5,2

Fuente (Hernández & López, 2018)

Llegando así a unos porcentajes más aproximados posibles en cuanto a los del cemento portland, podemos determinar la cantidad de óxido de Calcio (CaO) que necesita las cenizas de carbón es 84,7g.

De esta manera, para una muestra de 100g de ceniza, se necesita agregar la siguiente cantidad de óxido de Calcio (CaO).

Tabla 7. Composición final para las cenizas

Componente	Cen. Vol.
SiO ₂	53,7
Al ₂ O ₃	21,5
Fe ₂ O ₃	7,5
CaO	84,7
TiO ₂	1,0
K ₂ O	1,4
S	0,6
MgO	0,6
P ₂ O ₅	0,5
Na ₂ O	0,3
Otros	11,8

Fuente (Hernández & López, 2018)

4.1. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión (I.N.V.E. – 402 – 13)

Este ensayo tiene como objetivo establecer el debido procedimiento para la elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio, usando materiales que pueden ser compactados por apisonado o vibración.

4.1.1. Cilindros de PVC (2")

Inicialmente se determinó hacer una prueba piloto con cilindros de PVC de 50 mm (2") de diámetro. Para la determinación de este ensayo, se tomó la siguiente granulometría y así el correcto diseño de mezcla.

Tabla 8. Granulometría de cilindros 50mm (2")

PARA 458g		
Tamiz	%	Cantidad (g)
1/2	5	22,9
3/8	27,5	126,0
N4	25	114,6
N10	11,5	52,7
N40	15	68,7
N80	5	22,9
N200	6	27,5

Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 11. Granulometría de cilindros 50mm (2")



Fuente (Hernández & López, 2018)

Tabla 9. Diseño de mezcla de cilindros 50mm (2")

Componente	Cantidad (g)
Cenizas	91,7
H2O	64,1
Arena	183,3
Agregado	275,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 12. Mezcla de cenizas y elementos químicos



Fuente (Hernández & López, 2018)

Una vez concluido el diseño de mezcla, se procede a pesar cada uno de los materiales en la balanza, en seguida se hace la pasta con la pala de manera que quede homogénea añadiendo cada uno de los componentes, y luego de que esta se encuentre bien mezclada, se agrega aceite mineral a los cilindros y vierte en ellos mezcla a 1/3 del cilindro, posteriormente se apisona con la varilla de compactación 25 veces para que esta quede bien distribuida, de la misma forma se dan otros 25 golpes con el chipote hasta que sobresalga el agua, así mismo se realiza el procedimiento para los otros 2/3 del cilindro. En último lugar, cuando la muestra sobresalga del cilindro, se enrasa para que quede sin vacíos en la parte superior.

Figura 13. Cilindros de cenizas, diatomeas y metacaolín



Fuente (Hernández & López, 2018)

Finalmente, se dejan durante tres días y después se sacan del molde para dejarlos curar a temperatura ambiente por un periodo de 7, 14 y 28 días para someterlos a cargas aplicadas en un tiempo determinado.

4.1.2. Cilindros metálicos (4")

Para la elaboración de este ensayo se realizó dos diferentes tipos de mezclas, en los cuales se varió la cantidad de agua agregada a las mezclas; para cada una de ellas se elaboró tres cilindros, los cuales se van a fallar a los 7, 14 y 28 días.

Es necesario recalcar que, para realizar el estudio del comportamiento de las propiedades mecánicas de las muestras a analizar, al mismo tiempo se elaboran tres cilindros convencionales con relación A/C de 0,50 y tres cilindros convencionales con relación A/C de 0,60, que serán sometidos a cargas aplicadas en lapsos de 7, 14 y 28 días, simultáneamente con los especímenes realizados a base de cenizas de carbón para permitir la comparación de datos.

4.1.2.1. Cilindros metálicos (4") con relación A/C 0,50

Inicialmente se hizo la granulometría de los agregados para determinar la cantidad de material a utilizar para la elaboración de un cilindro y así continuar con el diseño de mezcla del espécimen.

Tabla 10. Granulometría para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,50

PARA 3667g		
Tamiz	%	Cantidad (g)
1/2	5	183,35
3/8	27,5	1008,425
N4	25	916,75
N10	11,5	421,705
N40	15	550,05
N80	5	183,35
N200	6	220,02

Fuente (Hernández & López, 2018)

Siguiendo las indicaciones, se elaboró suficiente material para tres cilindros que serán sometidos a carga a los 7, 14 y 28 días respectivamente. Tomando como base la composición del cemento portland, el porcentaje de agua que tienen estas primeras muestras es la misma que contiene este material tradicional, ya que de este punto parte la variación de la composición de los especímenes que hacen parte nuestro estudio. Así, se obtuvo el siguiente diseño de mezcla:

Tabla 11. Diseño de mezcla para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,50

Componente	Cantidad (g)
Cenizas	733,3
H ₂ O	366,6
Arena	1466,7
Agregado	2200

Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 14. Mezcla de material para cilindros metálicos



Fuente (Hernández & López, 2018)

Siguiente al diseño de mezcla, se procede a incorporarlos teniendo en cuenta la debida cantidad de cada uno, que conjuntamente con el trabajo manual que se realiza la mezcla, la pasta formada presente homogeneidad y uniformidad en su constitución.

Para asegurar que el material no va a adherirse a los moldes metálicos, estos se embadurnan de aceite mineral y consecuentemente se vierte la composición a 1/3 del cilindro. Simultáneamente, se apisona con la varilla de compactación 25 veces para que esta quede bien distribuida, de igual modo se dan otros 25 golpes con el chipote hasta que sobresalga el agua, así mismo se realiza el procedimiento para los otros 2/3 del cilindro. Para terminar, cuando el material sobresalga del molde, se enrasa para que quede sin vacíos en la parte superior.

4.1.2.2. Cilindros metálicos (4") con relación A/C 0,60

Para la elaboración de los cilindros metálicos con relación A/C de 0,60, el procedimiento es semejante al aplicado en la realización de los cilindros metálicos con relación A/C de 0,50, diferenciándose en la cantidad de agua empleada para su respectivo diseño de mezcla.

En primer lugar, se indica la granulometría de los agregados para determinar la cantidad de material a utilizar para la elaboración de un cilindro y así continuar con el diseño de mezcla del espécimen.

Figura 15. Preparación de granulometría para cilindros metálicos de 4"



Fuente (Hernández & López, 2018)

Tabla 12. Granulometría para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,60

PARA 3667g		
Tamiz	%	Cantidad (g)
1/2	5	183,35
3/8	27,5	1008,425
N4	25	916,75
N10	11,5	421,705
N40	15	550,05
N80	5	183,35
N200	6	220,02

Fuente (Hernández & López, 2018)

De esta manera, para los tres cilindros se agregó 10% más de agua, dado que en la caracterización del material se evidenció que presenta un índice de absorción considerable, así, se obtuvo el siguiente diseño de mezcla.

Tabla 13. Diseño de mezcla para cilindros metálicos de 4" con relación A/C 0,60

Componente	Cantidad (g)
Cenizas	733,3
H ₂ O	403,7
Arena	1466,7
Agregado	2200

Fuente (Hernández & López, 2018)

Terminado el diseño de mezcla, se procede a pesar cada uno de los materiales en la balanza, consecuentemente se hace la pasta con la pala de manera que quede homogénea añadiendo cada uno de los componentes, después de que la muestra presente homogeneidad, adicionamos la cantidad suficiente de aceite mineral a los cilindros y se agrega mezcla a 1/3 del cilindro, posteriormente se apisona con la varilla de compactación 25 veces para que esta quede bien distribuida, luego se le dan otros 25 golpes con el chipote hasta que sobresalga el agua, así mismo se hace el procedimiento para los otros 2/3 del cilindro. Finiquitar el procedimiento, enrasando en la parte superior para que la muestra quede sin vacíos.

Figura 16. Compactación de cilindro metálico



Fuente (Hernández & López, 2018)

4.1.3. Vigas metálicas

Con el objetivo de obtener resistencias mayores respecto a las obtenidas anteriormente en la elaboración de cilindros y teniendo en cuenta que los resultados obtenidos en los especímenes que contenían una relación A/C de 0,50 fueron mayores respecto a los arrojados por los que contenían un relación A/C de 0,60, se resolvió tener en cuenta esta estructura para la elaboración del diseño de mezcla de las vigas en esta investigación.

Conforme a lo anterior, se determinó la siguiente granulometría de los agregados como primer paso para elaborar el diseño de mezcla adecuado para las vigas de prueba que se muestran en mayor proporción.

Tabla 14. Granulometría para vigas metálicas

PARA 24000g		
Tamiz	%	Cantidad (g)
1/2	5	1200
3/8	27,5	6600
N4	25	6000
N10	11,5	2760
N40	15	3600
N80	5	1200
N200	6	1440

Fuente (Hernández & López, 2018)

Debido a que las dimensiones de las vigas son mucho mayores y en este proceso se efectúan tres, la cantidad de material que requiere es considerable, por lo que en el diseño de mezcla se adiciona un porcentaje del 10% de cada agregado para cubrir las pérdidas.

Tabla 15. Diseño de mezcla para vigas metálicas

Componente	Cantidad (g)
Cenizas	4000
H2O	2000
Arena	8000
Agregado	16000

Fuente (Hernández & López, 2018)

De este modo, se procede a realizar la mezcla, para la cual es indispensable el uso del trompo mezclador eléctrico que asegura un resultado de mezcla más homogéneo y presto para ser compactado.

Figura 17. Trompo mezclador



Fuente (Hernández & López, 2018)

Para este proceso, como anteriormente se había efectuado el apisonado de los cilindros, se requiere el uso del martillo que funciona en áreas considerables y proporciona como resultado, un material más confinado; 25 golpes que se dan en forma de espiral y que con ayuda del chipote permiten que el agua rebose para finalmente poder enrasar.

Figura 18. Proceso de compactación de vigas



Fuente (Hernández & López, 2018)

Finalmente, se dejan durante tres días, consecuentemente se retiran del molde para dejarlas curar a temperatura ambiente por un periodo de 7, 14 y 28 días para someterlos a cargas aplicadas en un tiempo determinado.

Figura 19. Resultado de viga compactada



Fuente (Hernández & López, 2018)

A fin de, contrastar las características mecánicas del material cementante a base de cenizas volantes y el cemento tradicional, se elabora suficiente material para tres vigas convencionales, las cuales serán expuestas cargas en los tiempos mencionados anteriormente.

4.2. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (I.N.V.E. – 410 – 13)

Este método de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto, consiste principalmente en aplicar por medio de la prensa universal una carga axial de compresión a los cilindros, con una velocidad de carga constante hasta el momento de presenta la falla.

Inicialmente se coloca la platina inferior de acero a la base del cilindro, de igual manera la platina superior a la otra base del cilindro, colocado el cilindro con las platinas sobre la máquina de ensayo, se alinea el espécimen con el centro de empuje del bloque superior de la prensa.

Figura 20. Cilindro de concreto convencional sometido a carga



Fuente (Hernández & López, 2018)

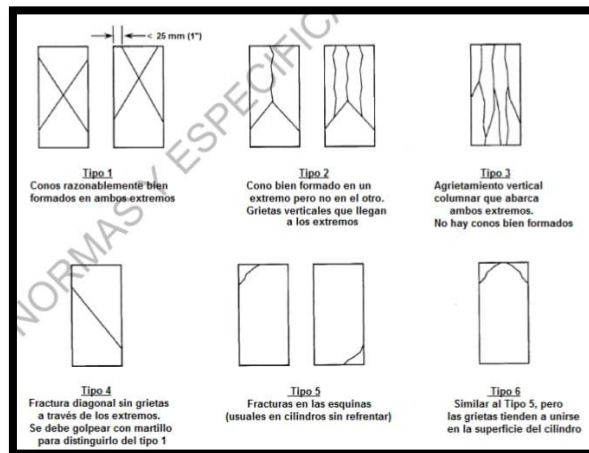
Figura 21. Cilindro de concreto de cenizas sometido a carga



Fuente (Hernández & López, 2018)

Se aplica la carga de compresión hasta que el indicador de carga señale que esta comienza a disminuir progresivamente y el cilindro muestre el patrón de fractura bien definido. Seguidamente se registra la máxima carga soportada por el cilindro durante el ensayo y se anota el patrón de falla de acuerdo a las figuras mostradas a continuación.

Figura 22. Patrón de fallas



Fuente (Hernández & López, 2018)

4.3. Resistencia a flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre (I.N.V.E. – 415 – 13)

De igual manera este tipo de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la flexión de concreto a base de cenizas de carbón, empleando una viga simplemente apoyada, cargada en los tercios de la luz libre.

Previamente se procede a dividir la viga en tres partes iguales para identificar los tercios al momento de fallar, seguidamente se le coloca a la prensa universal la base de acero con los apoyos para que luego sobre este se coloque la viga cuidadosamente.

Figura 23. Viga de concreto convencional con carga aplicada



Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 24. Viga de concreto de cenizas con carga aplicada



Fuente (Hernández & López, 2018)

La carga se debe aplicar de una manera continua sin cambios bruscos de velocidad, que incremente constantemente el esfuerzo sobre la cara en tensión de la viga, hasta que ocurra la rotura.

Una vez ocurrida la falla, se determinan las dimensiones de la sección transversal a través de una de las caras fracturadas. El ancho y alto se miden de manera que por cada una, se toma la dimensión en cada borde y otra en el centro de la sección transversal. Se usan las tres medidas en cada dirección para determinar los valores promedios del ancho y la altura.

4.4. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión usando cubos de 50 mm de lado (NTC – 220)

Este ensayo tiene como principal objetivo establecer el método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cenizas de carbón utilizando cubos de 50 mm de lado.

Inicialmente se realiza el diseño de mezcla, para determinar la cantidad de arena del guamo, cenizas y agua que se va a agregar.

Tabla 16. Diseño de mezcla para morteros

Componente	Cantidad (g)
Cenizas	180,46
H ₂ O	100,88
Arena	541,5

Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 25. Arena de guamo



Fuente (Hernández & López, 2018)

Para este proceso, como anteriormente se había efectuado en la elaboración de muestras para los cilindros y las vigas, siguiendo al diseño de mezcla, se procede a incorporar los teniendo en cuenta la debida cantidad de cada uno, que conjuntamente con el trabajo manual que se realiza la mezcla, la pasta formada presente homogeneidad y uniformidad en su constitución.

Figura 26. Mezcla de arena de guamo con cenizas



Fuente (Hernández & López, 2018)

A continuación se esparce cierta cantidad de aceite mineral alrededor de los moldes para evitar que el material se adhiera, en seguida se vierte el material a 1/3 de la base del cubo. Simultáneamente, se apisona con la varilla de compactación 25 veces para que esta quede bien distribuida, de igual modo se dan otros 25 golpes con el chipote hasta que sobresalga el agua, así mismo se realiza el procedimiento para los otros 2/3 del molde. Finalmente, cuando el material sobresalga del molde, se enrasa para que quede sin vacíos en la parte superior.

Figura 27. Proceso de compactación de morteros



Fuente (Hernández & López, 2018)

Igualmente, se prepara la cantidad idónea de mezcla de cemento tradicional para cubrir los moldes, que al mismo tiempo de los morteros realizados a base de cenizas volantes, soportarán cargas en tiempos fijados y permitirán la comparación del comportamiento de los especímenes.

Figura 28. Morteros enrasados



Fuente (Hernández & López, 2018)

Para determinar la resistencia de los morteros, en primer lugar se coloca la platina inferior de acero a la base del cubo, de igual manera la platina superior a la otra base del mismo, ubicado el cubo con las platinas sobre la máquina de ensayo, se alinea el espécimen con el centro de empuje del bloque superior de la prensa.

Seguidamente, por medio de la prensa universal, se aplica una carga axial de compresión a las muestras, con una velocidad de carga constante hasta el momento de presenta la falla.

Figura 29. Mortero de cemento con carga aplicada



Fuente (Hernández & López, 2018)

Figura 30. Mortero de cenizas con carga aplicada



Fuente (Hernández & López, 2018)

5. RESULTADOS

5.1. Cilindros de PVC (2")

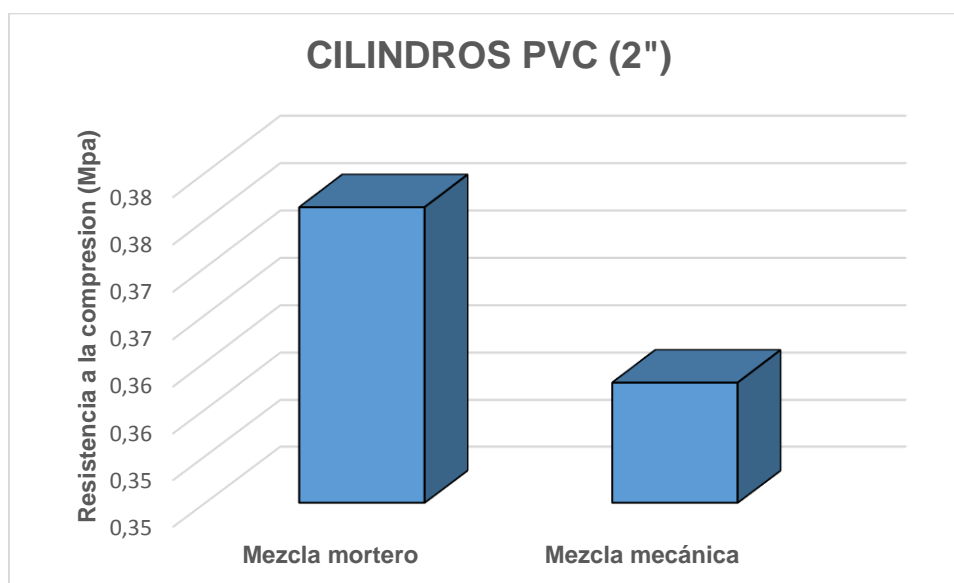
Con el objetivo de asegurar que los compuestos integrados a la mezcla de los especímenes se adecuen y conformen una pasta lo suficientemente homogénea para que responda a los esfuerzos conjuntamente, se emplearon dos métodos de amalgamado. En primer lugar se efectuó la combinación de las cenizas de carbón con oxido de calcio dosificadas apropiadamente y se usó el mortero para revolver ambos materiales uniformemente, así durante 40 minutos. El segundo método empleado para el estudio fue agregar la misma cantidad de cenizas de carbón y oxido de calcio con respecto al método anterior, a diferencia que la aleación de los componentes se llevara a cabo mecánicamente, es decir, agitar el molde para efectuar la unión del material y el reactivo, también durante 40 minutos. Consecuentemente los resultados obtenidos fueron siguientes:

Tabla 17. Resistencia a compresión en cilindros de 2"

Cilindro PVC (2")	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
Mezcla mortero	51,6	2091,2	0,787	0,38
mezcla mecánica	51,0	2042,8	0,731	0,36

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 1. Resistencia a la compresión con distintos métodos de mezcla



Fuente (Hernández & López, 2018)

De acuerdo con los resultados de resistencia a la compresión obtenidos para cada uno de los métodos de mezcla, el procedimiento empleado para los especímenes que van a realizarse (cilindros, vigas y morteros) es el sistema de mortero, pues el producto del análisis fue satisfactorio.

5.2. Cilindros metálicos (4")

5.2.1. Cilindros metálicos de cenizas (4") con relación A/C 0,50

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento de los cilindros compuestos por concreto a base de cenizas de carbón y que además su composición es caracterizada a partir de la relación A/C 0,50. Los resultados que se presentan en la carga máxima aplicada fueron dados por la maquina universal, en la que fueron fallados y los datos de la resistencia a la compresión fueron obtenidos a partir de la fórmula matemática planteada en la norma INVIAS 410-13.

Figura 31. Falla de cilindro de concreto de cenizas con relación A/C 0,50



Fuente (Hernández & López, 2018)

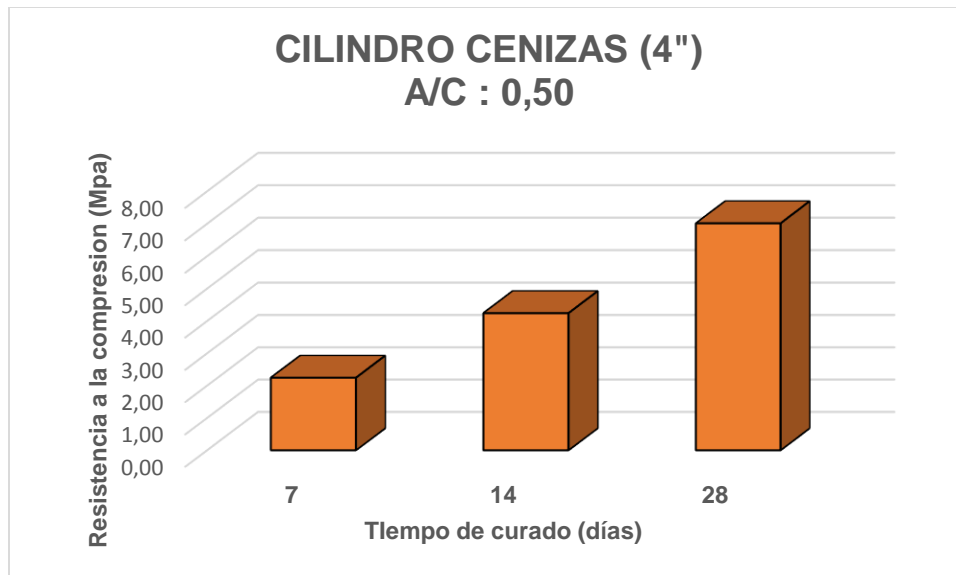
De esta manera se permite analizar el comportamiento de los especímenes según el tiempo de curado al que fueron expuestos y los resultados se presentan a continuación:

Tabla 18. Resistencia a la compresión en cilindros de 4" con relación A/C 0,50

Cilindro cenizas (4") - A/C 0,50	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	102,7	8283,8	18,6	2,25
14 días	101,6	8107,3	34,4	4,24
28 días	101,1	8027,7	56,3	7,01

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 2. Resistencia a la compresión de cilindros de 4" con relación A/C 0,50



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.2.2. Cilindros metálicos de cenizas (4") con relación A/C 0,60

La tabla 19, involucra el comportamiento de los cilindros compuestos por concreto a base de cenizas de carbón, pero que presentan una relación A/C 0,60, con la carga máxima aplicada a la que estuvieron sometidos y que además se vincula con la edad de los mismos.

Figura 32. Falla de cilindro de concreto de cenizas con relación A/C 0,60



Fuente (Hernández & López, 2018)

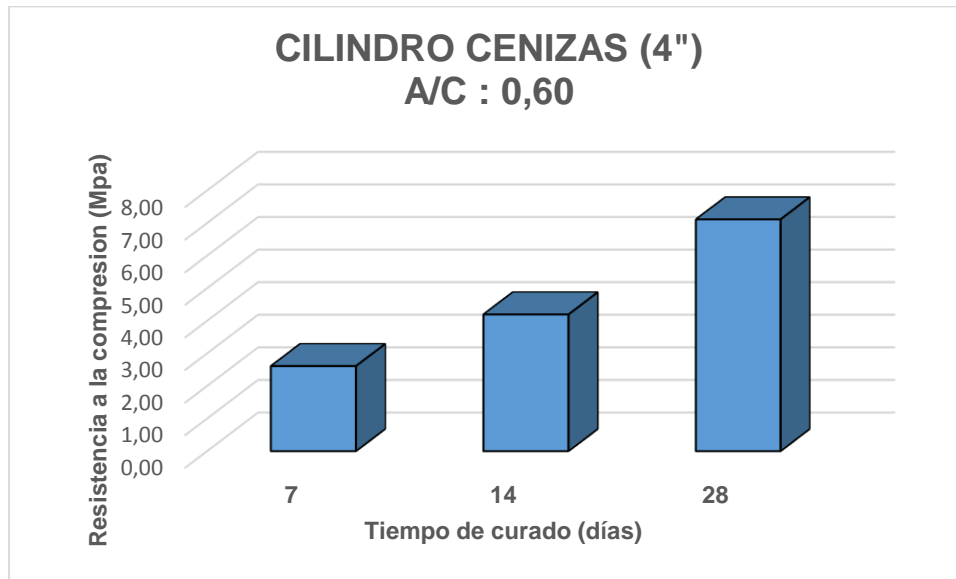
Del mismo modo es posible realizar la comparación analizar el comportamiento de los especímenes según el tiempo de curado al que fueron expuestos y los resultados se presentan a continuación:

Tabla 19. Resistencia a la compresión en cilindros de 4" con relación A/C 0,60

Cilindro cenizas (4") - A/C 0,60	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	102,9	8316,1	21,7	2,61
14 días	101,0	8011,8	33,6	4,19
28 días	101,2	8043,6	57,2	7,11

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 3. Resistencia a la compresión de cilindros de 4" con relación A/C 0,60



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.2.3. Cilindros metálicos convencionales (4")

La representación de los resultados de los esfuerzos que soportaron los cilindros de concreto convencional a los 7, 14 y 28 días respectivamente, se muestran a continuación:

Figura 33. Falla de cilindro de concreto convencional



Fuente (Hernández & López, 2018)

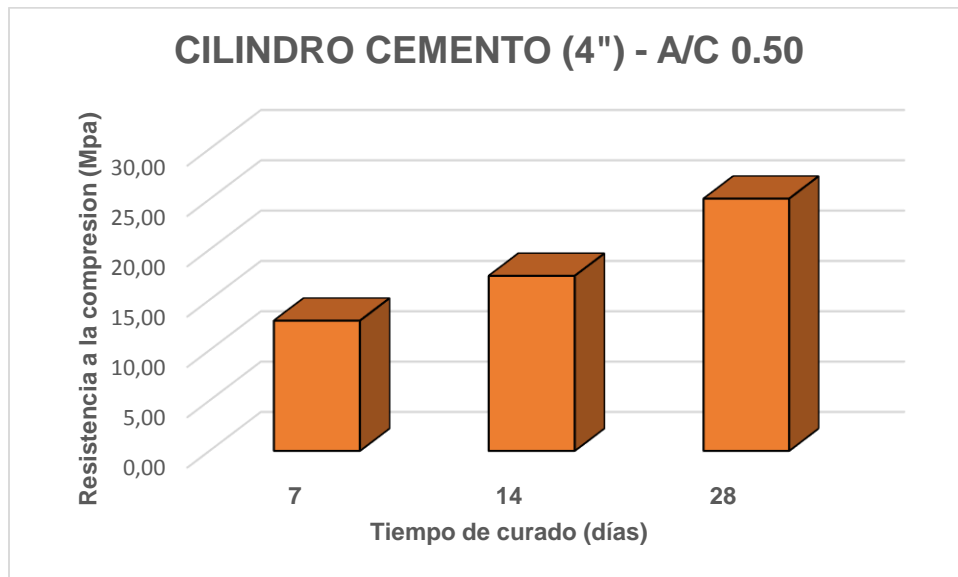
Tabla 20. Resistencia a la compresión en cilindros de concreto convencional

Cilindro cemento (4")- A/C 0.50	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	101,6	8107,3	104,9	12,94
14 días	101,2	8043,6	139,9	17,39
28 días	100,8	7980,1	200,0	25,06

Fuente (Hernández & López, 2018)

Los resultados que se obtienen en esta fase son claves para realizar la comparación del comportamiento de un material cementante a base de cenizas de carbón y el concreto tradicional y además permiten emprender el análisis que motivo a realizar esta investigación.

Gráfica 4. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto convencional



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.3. Vigas metálicas

5.3.1. Vigas metálicas de cenizas

En la tabla que enseñamos a continuación, se puede evidenciar el resultado del módulo de rotura para las vigas elaboradas a partir de cenizas de carbón que fueron sometidas a cargas aplicadas después de un tiempo de curado a 7, 14 y 28 días respectivamente.

Figura 34. Falla de viga de concreto de cenizas



Fuente (Hernández & López, 2018)

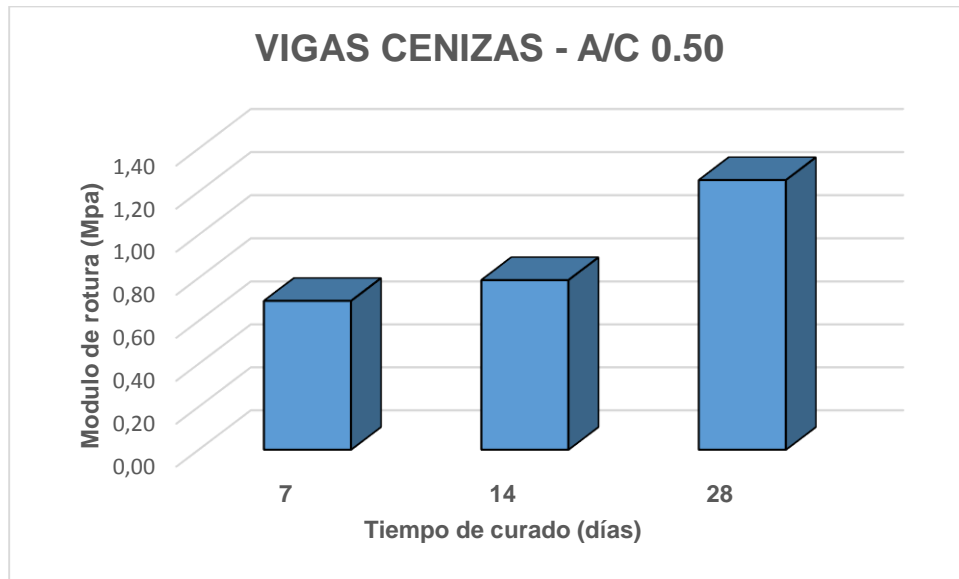
Cabe destacar que, en todos los especímenes, la viga fallo en el tercio medio, por esta razón la fórmula matemática para calcular el módulo de rotura es la misma para las tres muestras, 7, 14 y 28 días. Teniendo conocimiento de lo anterior, la expresión matemática empleada para calcular los esfuerzos en los especímenes fue extraída de la norma INVIAS 415-13.

Tabla 21. Módulo de rotura en vigas de cenizas de carbón

Viga cenizas- A/C 0.50	Ancho (mm)	Altura (mm)	Longitud libre entre apoyos (mm)	Carga máxima (KN)	Módulo de rotura (MPa)
7 días	148,3	146,5	420	3,5	0,69
14 días	155,0	157,2	420	4,8	0,79
28 días	152,9	150,6	420	6,9	1,25

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 5. Módulo de rotura en vigas de cenizas de carbón



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.3.2. Vigas metálicas convencionales

La demostración de los resultados de las cargas que soportaron las vigas de concreto convencional a los 7, 14 y 28 días respectivamente, se presenta en la tabla 22.

Figura 35. Falla de viga de concreto de cenizas



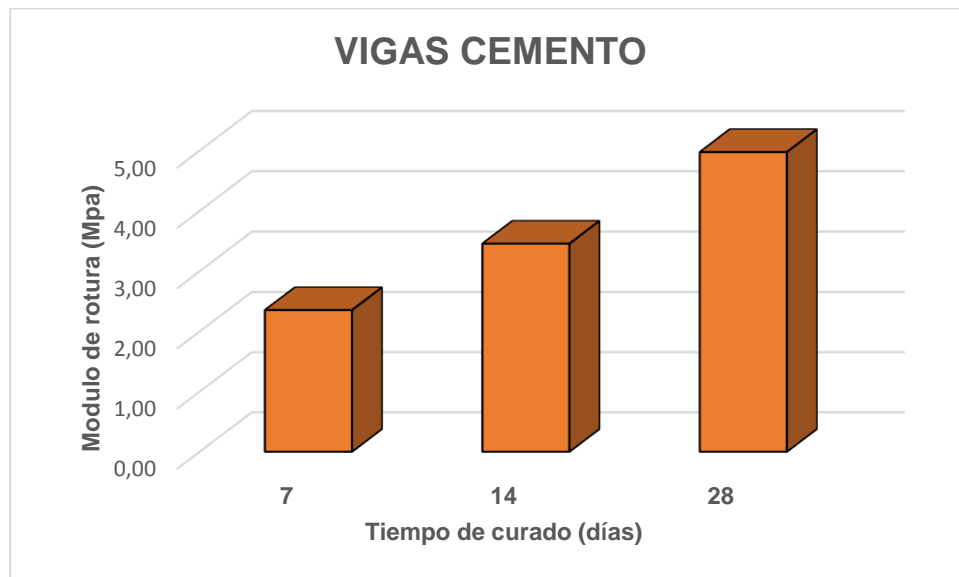
Fuente (Hernández & López, 2018)

Tabla 22. Módulo de rotura en vigas de concreto convencional

Viga cemento- A/C 0.50	Ancho (mm)	Altura (mm)	Long. Libre entre apoyos (mm)	Carga máxima aplicada (KN)	Módulo de rotura (MPa)
7 días	154,2	153,6	420	13,6	2,36
14 días	149,4	149,0	420	18,2	3,46
28 días	147,9	152,6	420	27,2	4,98

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 6. Módulo de rotura en vigas de concreto convencional



Fuente (Hernández & López, 2018)

A partir de los datos obtenidos los ensayos realizados a las vigas de concreto convencional, es posible hacer el análisis del comportamiento de los especímenes cuando se exponen a resistencia a flexión.

5.4. Morteros

Teniendo en cuenta que el curado es uno de los procesos más importantes en la fabricación del concreto, debido a que en esta fase cada uno de sus componentes empiezan a interactuar entre ellos para desarrollar las propiedades como trabajabilidad, resistencia y durabilidad, en esta fase de nuestro estudio se proponen dos métodos de curado para los especímenes a elaborar.

5.4.1. Morteros de cenizas curados a temperatura ambiente

Figura 36. Morteros de cenizas curados a temperatura ambiente



Fuente (Hernández & López, 2018)

Una vez compactadas las muestras en sus respectivos moldes, el proceso de curado consistió en dejar expuestos los especímenes a temperatura ambiente para llevar a cabo el secado del concreto a base de cenizas de carbón. El tiempo que los morteros estuvieron sometidos a este factor fue de 7, 14 y 28 días respectivamente.

Figura 37. Falla de mortero de cenizas curado a temperatura ambiente



Fuente (Hernández & López, 2018)

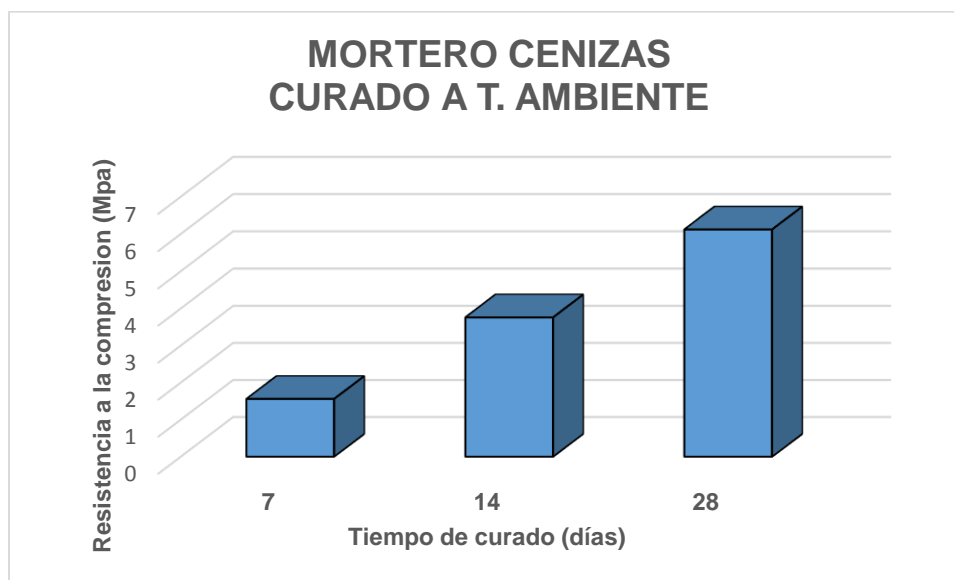
De esta manera, la tabla que se muestra posteriormente, contiene la información que respecta a los resultados obtenidos en la maquina universal en la que los especímenes fueron sometidos a cargas aplicadas y que constatan la resistencia a la compresión que los morteros soportaron.

Tabla 23. Resistencia a la compresión en morteros curados a temperatura ambiente

Mortero Cenizas (50mm) A/C 0.55	Lado (mm)	Arrea (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	50	2500	18,6	7,44
14 días	50	2500	9,4	3,76
28 días	50	2500	15,3	6,12

Fuente (Hernández & López, 2018)

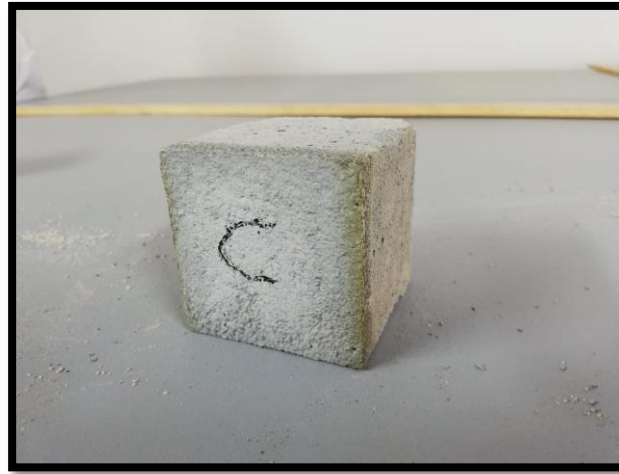
Gráfica 7. Resistencia a la compresión en morteros curados a temperatura ambiente



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.4.2. Morteros de cenizas curados en horno

Gráfica 8. Morteros de cenizas curados en horno



Fuente (Hernández & López, 2018)

Como en el proceso para elaborar los morteros a temperatura ambiente, estos especímenes tuvieron un proceso de curado, diferenciándose del ya mencionado, en que para llevar a cabo su fase de curado se llevaron a un horno y fueron sometidos a una temperatura de 400 °C durante dos horas. Este procedimiento se realizó para las muestras de 7, 14, y 28 días y se ejecutó el día anterior al que los cubos serían expuestos a cargas aplicadas para evaluar su resistencia.

Gráfica 9. Falla de morteros de cenizas curados en horno



Fuente (Hernández & López, 2018)

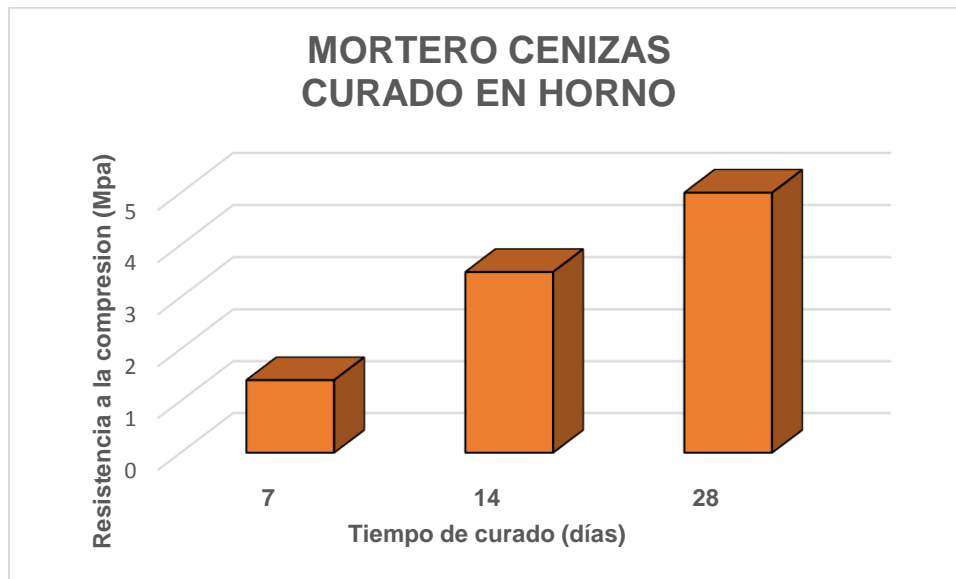
Se demuestra en la siguiente tabla la resistencia a la compresión que los morteros curados a una temperatura de 400 °C aguantaron:

Tabla 24. Resistencia a la compresión en morteros de cenizas curados en horno

Mortero Cenizas (50mm)- A/C 0.55	Lado (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	50	2500	18,6	7,44
14 días	50	2500	8,7	3,48
28 días	50	2500	12,5	5,00

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 10. Resistencia a la compresión en morteros curados en horno



Fuente (Hernández & López, 2018)

5.4.3. Morteros de cemento convencional

Consecuentemente, para abarcar el análisis de variables como, el curado del material cementante evaluado en la presente investigación, que influyen considerablemente en las propiedades mecánicas del mismo, se realizaron tres cubos de concreto convencional.

Figura 38. Mortero de cemento convencional sometido a carga



Fuente (Hernández & López, 2018)

De esta manera, se permite comparar los resultados obtenidos por los morteros elaborados de concreto a base de cenizas volantes con los métodos de curado empleados, como también con los resultados que se proyectan a continuación:

Figura 39. Falla de Mortero de cemento convencional



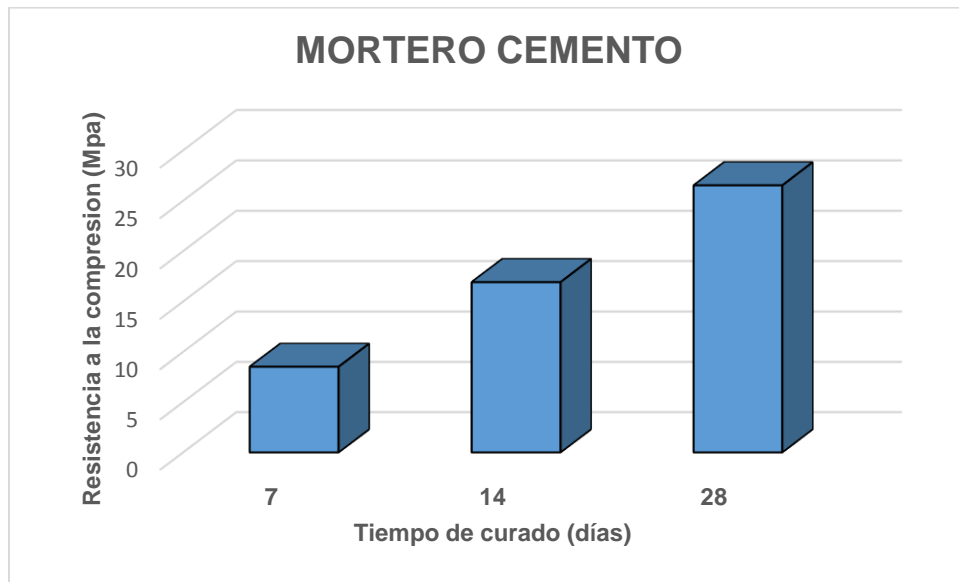
Fuente (Hernández & López, 2018)

Tabla 25. Resistencia a la compresión en morteros de cemento

Mortero Cemento (50mm)- A/C 0.55	Lado (mm)	Área (mm ²)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)
7 días	50	2500	18,6	7,44
14 días	50	2500	31,2	12,48
28 días	50	2500	63,7	25,48

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 11. Resistencia a la compresión en morteros de cemento



Fuente (Hernández & López, 2018)

6. ANALISIS DE RESULTADOS

Al evaluar los resultados de la investigación obtenidos a partir de la muestra de cenizas de carbón, fue conveniente comparar estos datos con los obtenidos en los especímenes de concreto portland convencional (cilindros, vigas y cubos). Para facilitar dichos datos se realizaron tablas y graficas que contienen la comparación de la carga máxima aplica, la resistencia a la compresión, el módulo de rotura y cada uno de los porcentajes de estos con respecto al concreto convencional para cada uno de los diferentes ensayos, en tiempos determinados de 7, 14 y 28 días.

6.1. Cilindros

Inicialmente se hicieron las respectivas tablas y graficas de tendencia de los cilindros de concreto a base de cenizas con relación A/C 0.50 y 0.60, hallando su respectiva ecuación de acuerdo a su tendencia y el coeficiente de determinación (r^2); esto con el fin de determinar a qué duración puede el material cementante lograr la resistencia esperado de acuerdo a los resultados de los cilindros de concreto convencional.

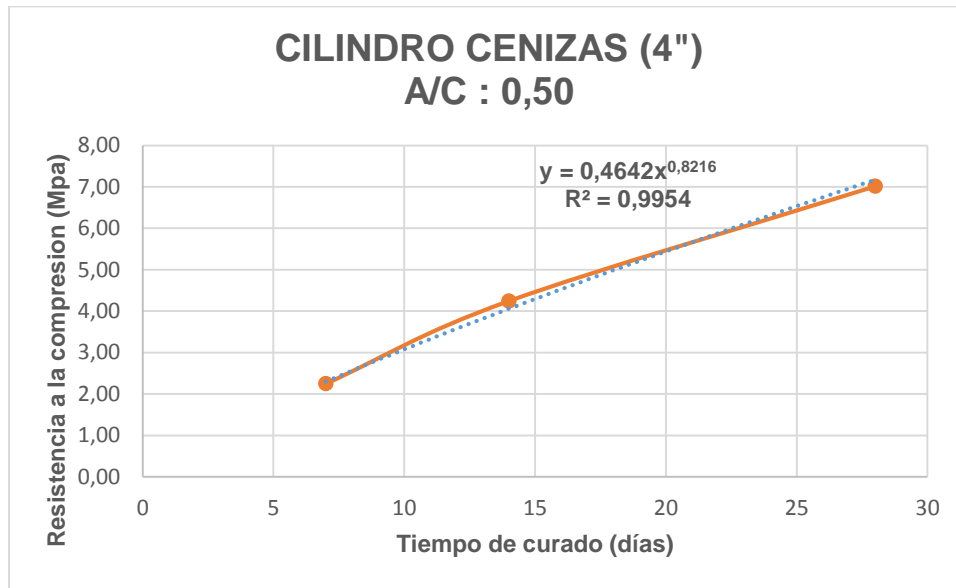
El coeficiente de determinación (r^2) de la siguiente grafica arrojó un valor cercano a 1, por tanto, la ecuación que mejor relaciono las variables es una potencial. En cuanto al tiempo esperado para que alcance la máxima resistencia, despejando de la ecuación la variable, nos dio como resultado un tiempo de 128 días, alcanzando así una resistencia a la compresión de 25 MPa.

Tabla 26. Proyección de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,50

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
7	2,25
14	4,24
28	7,01
128	Esperada (25,06)

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 12. Línea de tendencia de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,50



Fuente (Hernández & López, 2018)

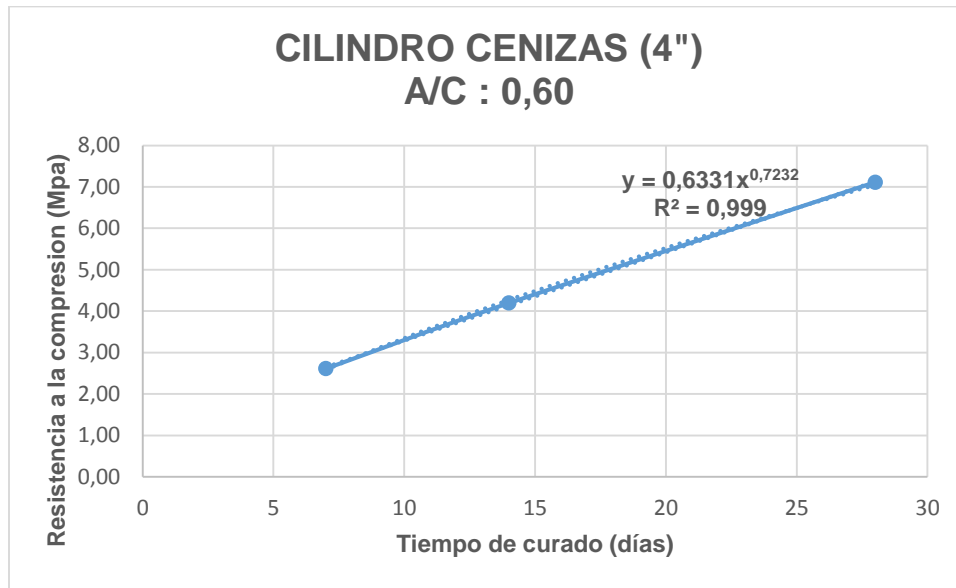
Para los cilindros con relación A/C 0.60, el coeficiente de determinación (r^2) arrojó un valor de 0.99, por tanto, la ecuación que mejor relaciono los datos fue la lineal. De esta manera se determinó el tiempo en el que alcanza la resistencia esperada a compresión despejando la variable de la ecuación, dando como resultado 162 días. Ya que los valores de resistencia a los días 7, 14 y 28 días del espécimen muestran un aumento lineal, el resultado del tiempo para que alcance el esfuerzo esperado aumenta con respecto a los cilindros con relación A/C 0.50.

Tabla 27. Proyección de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,60

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
7	2,61
14	4,19
28	7,11
162	Esperada (25,06)

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 13. Línea de tendencia de la resistencia a compresión de cilindros con relación A/C 0,60



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.1.1. Cilindros curados a 7 días

En la tabla 28, se evidencia que los cilindros de concreto a base de cenizas con un tiempo de curado de 7 días con relación A/C 0.50 tiene una resistencia a la compresión (2,25 MPa) menor que en los de relación A/C 0.60 (2,61 MPa); comparando con el resultado del cilindro de concreto convencional (12,94 MPa) podemos ver que los cilindros a base de cenizas de carbón alcanzan un porcentaje de resistencia entre 17,4% y 20,2%, siendo menor este porcentaje respecto a los datos convencionales.

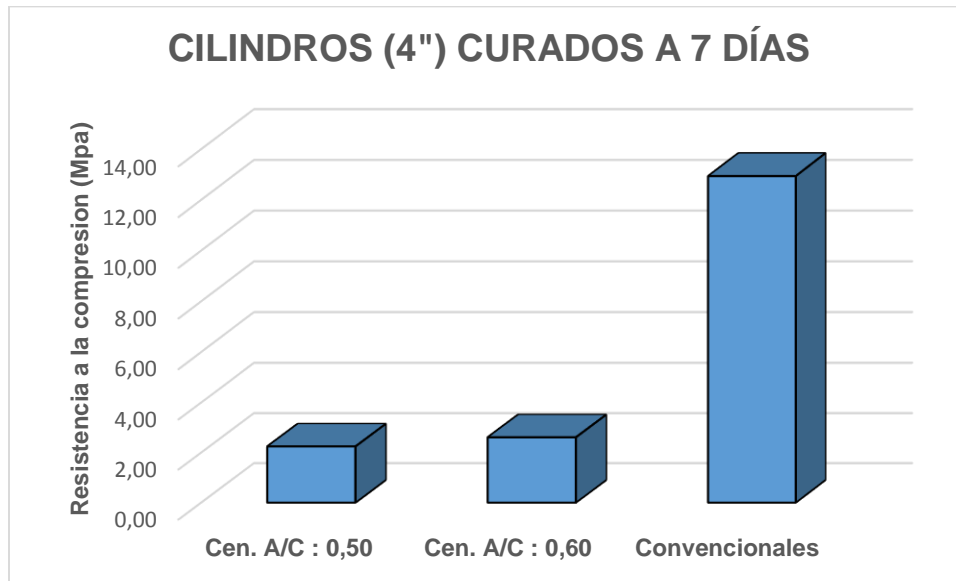
Cabe resaltar que el cilindro con relación A/C 0.60 tuvo una menor porosidad y mayor homogeneidad en comparación con el otro cilindro, esto se debió al porcentaje de agua agregado, ya que este tuvo una mejor manejabilidad al momento de la realización del espécimen.

Tabla 28. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 7 días

Cilindros (4")	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas A/C : 0,50	18,6	2,25	17,4
Cenizas A/C : 0,60	21,7	2,61	20,2
Convencionales A/C : 0,50	104,9	12,94	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 14. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 7 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.1.2. Cilindros curados a 14 días

En la tabla 27, se muestran los resultados de los esfuerzos a compresión de los cilindros de concreto de cenizas con relación A/C 0.50, relación A/C 0.60 y concreto convencionales curados a 14 días. Se puede evidenciar que hubo un mayor crecimiento en la resistencia a la compresión en el cilindro de relación A/C 0.50 (1.99 MPa) con respecto al dato obtenido en el curado a 7 días. También se muestra una mejoría de este (4.24 MPa) con respecto al valor del cilindro de relación A/C 0.60 (4.19 MPa).

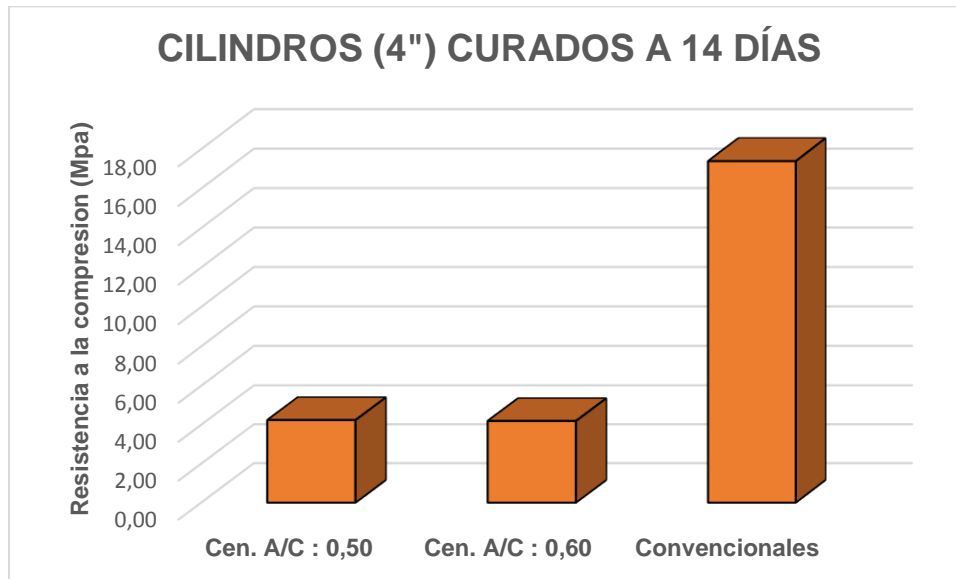
De igual manera, en comparación con el valor de la resistencia del cilindro de concreto convencional (17.39 MPa), alcanzan un mejor porcentaje cada uno de los especímenes, 24.4% y 24.1% respectivamente; evidenciando que, con el paso de los días, los cilindros de concreto de cenizas muestran un mayor aumento de porcentaje que el cilindro convencional con respecto a los que se curaron a 7 días.

Tabla 29. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 14 días

Cilindros (4")	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas A/C : 0,50	34,4	4,24	24,4
Cenizas A/C : 0,60	33,6	4,19	24,1
Convencionales A/C : 0,50	139,9	17,39	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 15. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 14 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.1.3. Cilindros curados a 28 días

En la tabla 28, se evidencia que los cilindros de concreto a base de cenizas con un tiempo de curado de 7 días con relación A/C 0.50 tiene una resistencia a la compresión (2,25 MPa) menor que en los de relación A/C 0.60 (2,61 MPa); comparando con el resultado del cilindro de concreto convencional (12,94 MPa) podemos ver que los cilindros a base de cenizas de carbón alcanzan un porcentaje de resistencia entre 17,4% y 20,2%, siendo menor este porcentaje respecto a los datos convencionales.

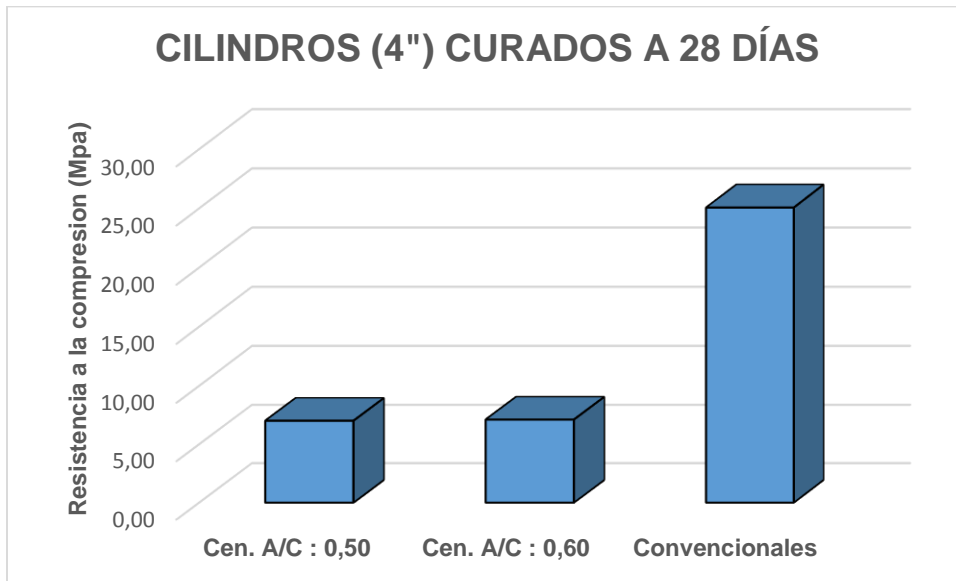
Cabe resaltar que el cilindro con relación A/C 0.60 tuvo una menor porosidad y mayor homogeneidad en comparación con el otro cilindro, esto se debió al porcentaje de agua agregado, ya que este tuvo una mejor manejabilidad al momento de la realización del espécimen.

Tabla 30. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 28 días

Cilindros (4")	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas A/C : 0,50	56,3	7,01	28,0
Cenizas A/C : 0,60	57,2	7,11	28,4
Convencionales A/C : 0,50	200,0	25,06	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 16. Resistencia a la compresión de cilindros curados a 28 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.2. Vigas

De igual manera que se hizo con los cilindros, se determinó el tiempo requerido para alcanzar el esfuerzo esperado en las vigas de concreto de cenizas, se determinó la ecuación correspondiente y su coeficiente de determinación (R^2) con valor de 1, por tanto, la ecuación que mejor relaciono las variables es una potencial.

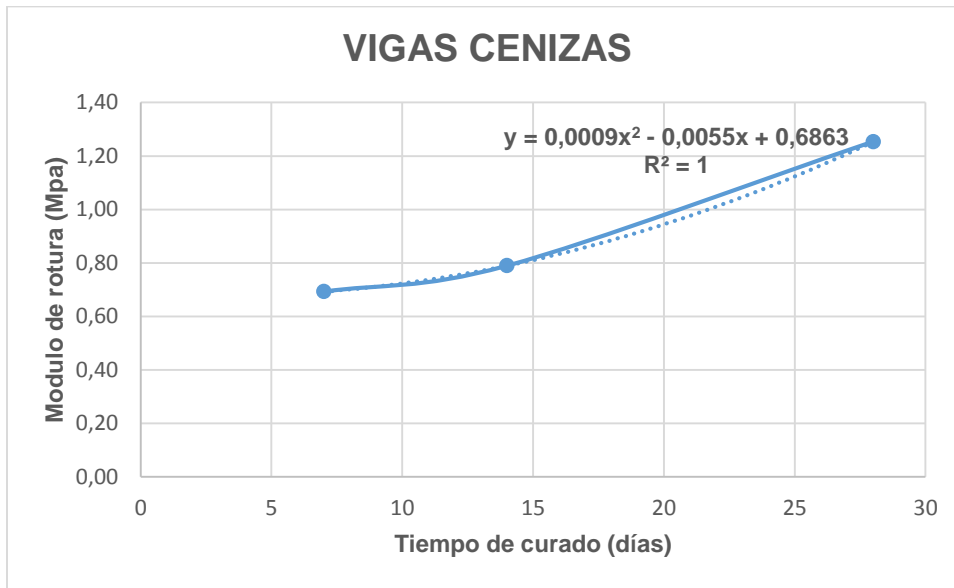
De acuerdo con la ecuación y la resistencia máxima que arrojo la viga de concreto convencional, se determinó que el tiempo requerido para alcanzar dicha resistencia es de 66 días, dado que la línea de tendencia muestra un aumento considerable a través del paso de los días, lo que en un concepto estructural no sería viable.

Tabla 31. Proyección del módulo de rotura en vigas

Tiempo de curado (días)	Módulo de rotura (MPa)
7	0,69
14	0,79
28	1,25
66	Esperada (4,98)

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 17. Línea de tendencia del módulo de rotura en vigas



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.2.1. Vigas curadas a 7 días

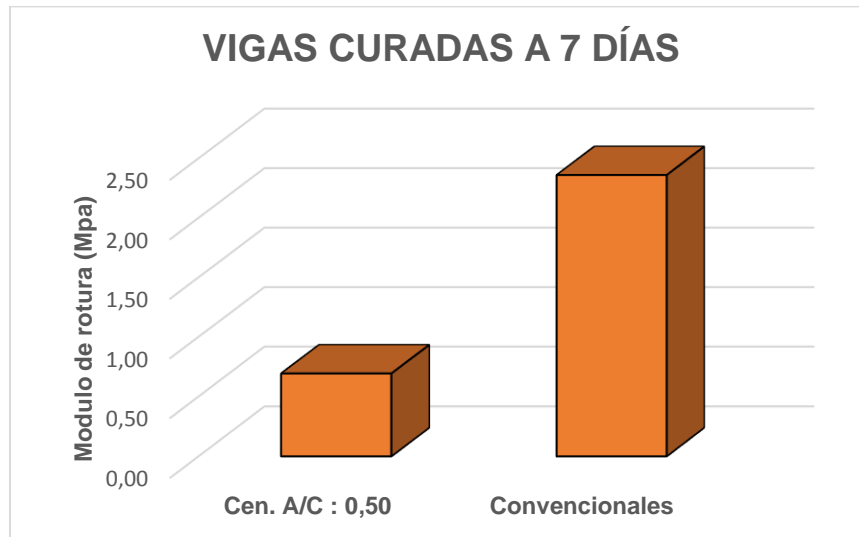
De acuerdo al diseño de mezcla determinado para efectuar las muestras del concreto a base de cenizas en forma de viga, se empleó la relación A/C 0,50 que como se muestra en la siguiente tabla, aguantó un 29,4% del orden de 0,69 MPa con respecto a la resistencia de las vigas de concreto convencional que soportaron 2.36 MPa al haber transcurrido 7 días.

Tabla 32. Módulo de rotura de vigas curadas a 7 días

Vigas	Carga máxima aplicada (KN)	Módulo de rotura (MPa)	Módulo de rotura (%)
Cenizas A/C : 0,50	3,5	0,69	29,4
Convencionales A/C : 0,50	13,6	2,36	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 18. Módulo de rotura de vigas curadas a 7 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.2.2. Vigas curadas a 14 días

Los resultados que se presentan en la siguiente tabla, contrastan el comportamiento de las vigas de concreto a base de cenizas volantes frente al trabajo que realizan las vigas de concreto convencional cuando estos especímenes son expuestos a cargas efectuadas para evaluar la resistencia y trabajabilidad de los mismos. De esta manera, se observa que al pasar 14 días de la elaboración de las muestras, los primeros obtuvieron un 22,8% en el módulo de rotura respecto al 100% del material convencional, en ese orden de 0,79 MPa y 3,36 MPa respectivamente.

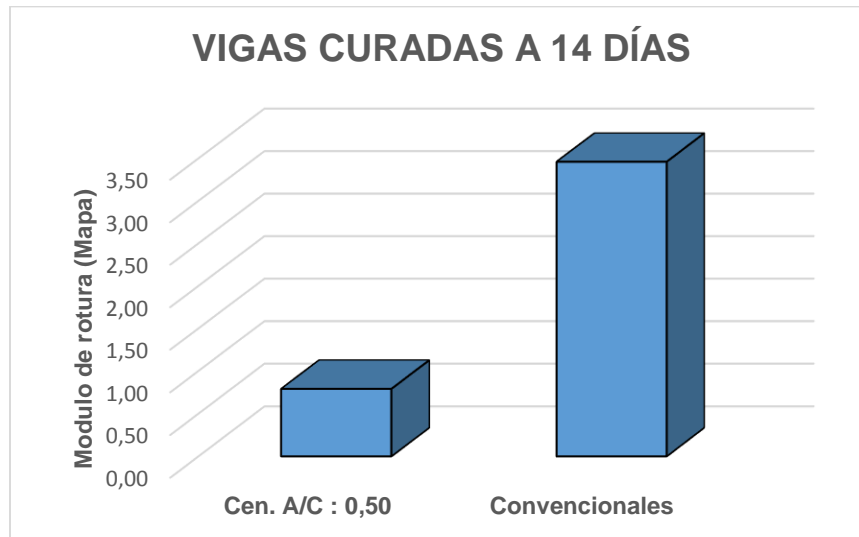
Es necesario recalcar que el porcentaje del módulo de rotura obtenido en la viga curada a 14 días fue menor respecto al resultado de la viga curada a 7 días, que según nuestro análisis puede deberse a que la primera viga presentaba menor porosidad al desencofrar, lo que puede ser clave al momento de enfrentarse a esfuerzos considerables, pues a mayor homogeneidad en su composición, mayor será su resistencia a la flexión.

Tabla 33. Módulo de rotura de vigas curadas a 14 días

Vigas	Carga máxima aplicada (KN)	Módulo de rotura (MPa)	Módulo de rotura (%)
Cenizas A/C : 0,50	4,8	0,79	22,8
Convencionales A/C : 0,50	18,2	3,46	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 19. Módulo de rotura de vigas curadas a 14 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.2.3. Vigas curadas a 28 días

En la tabla 34, se pueden encontrar los resultados arrojados por la prensa universal para referir a la carga soportada por viga de concreto a base de cenizas volantes y la viga de concreto convencional, donde la primera respondió tan solo el 25,2% respecto al comportamiento de la segunda.

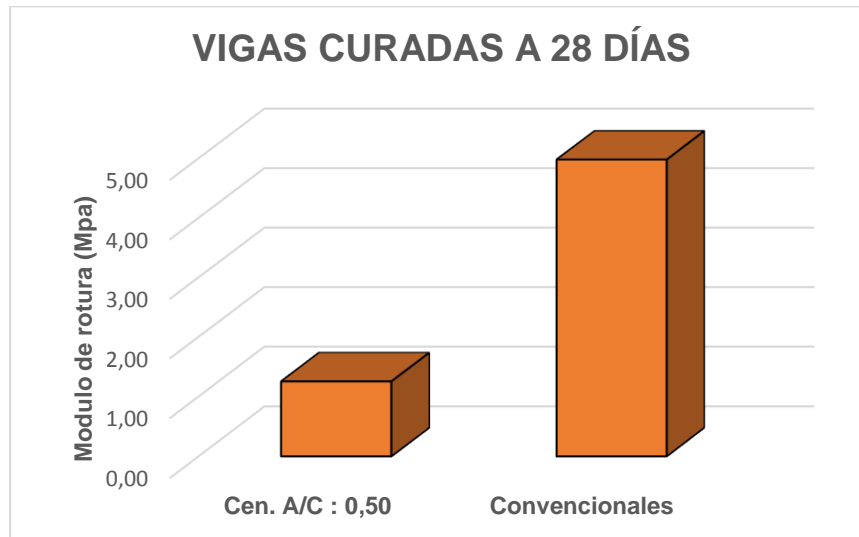
En cuanto al resultado de la viga curada a 28 días y la viga curada a 14 días, se evidencio un aumento de la resistencia del orden de 2,2%, sin embargo este valor fue menor al que se esperaba.

Tabla 34. Módulo de rotura de vigas curadas a 28 días

Vigas	Carga máxima aplicada (KN)	Módulo de rotura (MPa)	Módulo de rotura (%)
Cenizas A/C : 0,50	6,9	1,25	25,2
Convencionales A/C : 0,50	27,2	4,98	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 20. Módulo de rotura de vigas curadas a 28 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.3. Morteros

Finalmente se realizaron las tablas y graficas de línea de tendencia de la resistencia a la compresión para los morteros de cenizas. Se determinó la ecuación correspondiente y su coeficiente de determinación (r^2) con valor de 0.99 para los morteros curados a temperatura ambiente y 1 para los curados en horno.

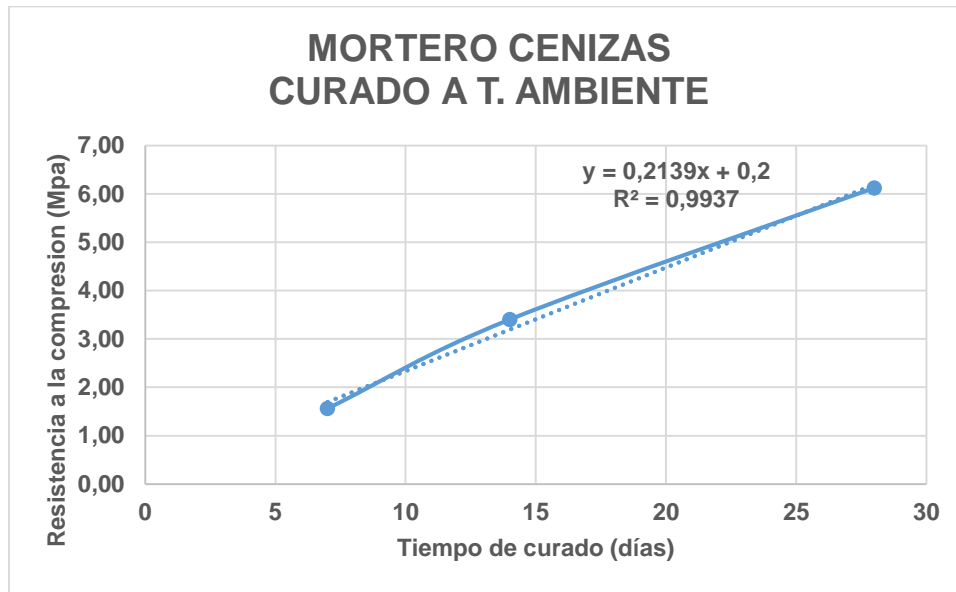
La ecuación que más se asemeja a la línea de tendencia es la lineal, de acuerdo con esta función y la resistencia a compresión que arrojo el mortero de cemento convencional a los 28 días, se determinó que el tiempo requerido para que los morteros de cenizas curados a temperatura ambiente puedan alcanzar dicha resistencia es de 125 días, los valores obtenidos de resistencia obtenidos a los 7, 14 y 28 días muestran un crecimiento lento, por tal motivo se demora en alcanzar dicha resistencia.

Tabla 35. Proyección de la resistencia a compresión en morteros curados a T. ambiente

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
7	2,61
14	4,19
28	7,11
125	Esperada (26,52)

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 21. Línea de tendencia de la resistencia a compresión en morteros curados a T. ambiente



Fuente (Hernández & López, 2018)

Para el caso de los morteros de cenizas curados en horno, la línea de tendencia que mejor se relacionó con los datos fue la lineal, dando como resultado un coeficiente de determinación (r^2) igual a 0.99.

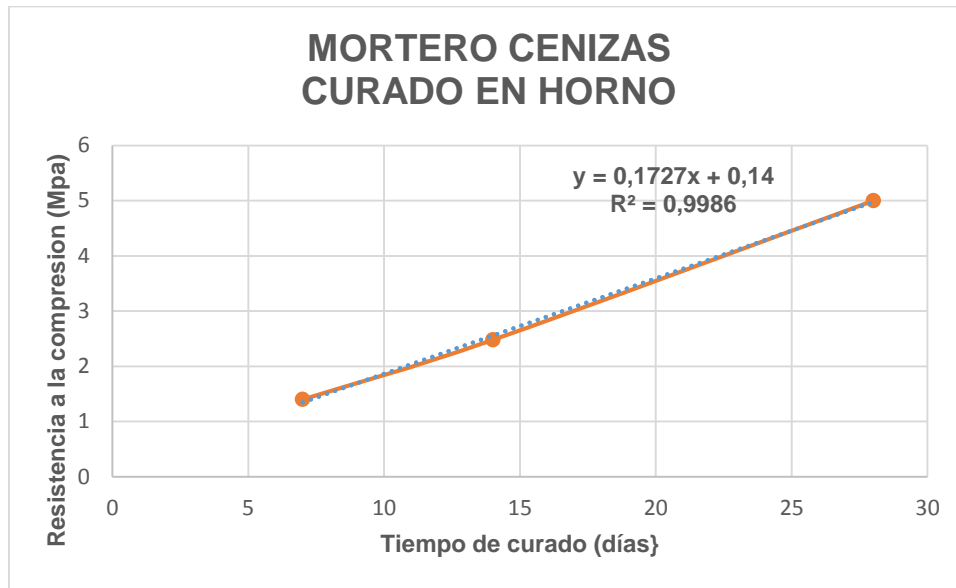
Con estos datos y los resultados de la resistencia máxima a compresión del mortero de cemento convencional, se determinó un tiempo mínimo para alcanzar dicha resistencia de 125 días. Los resultados de este mortero mostraron un mejor aumento a través de los días con respecto a los datos obtenidos en el mortero curados a temperatura ambiente, por esta razón el tiempo requerido es menor.

Tabla 36. Proyección de la resistencia a compresión en morteros curados en horno

Tiempo de curado (días)	Resistencia a la compresión (MPa)
7	2,61
14	4,19
28	7,11
152	Esperada (26,52)

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 22. Línea de tendencia de la resistencia a compresión en morteros curados en horno



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.3.1. Morteros curados a 7 días

La siguiente tabla, refleja el comportamiento de los morteros curados a temperatura ambiente y en horno, frente a la resistencia obtenida por los morteros convencionales. La relación A/C los especímenes es de 0,55.

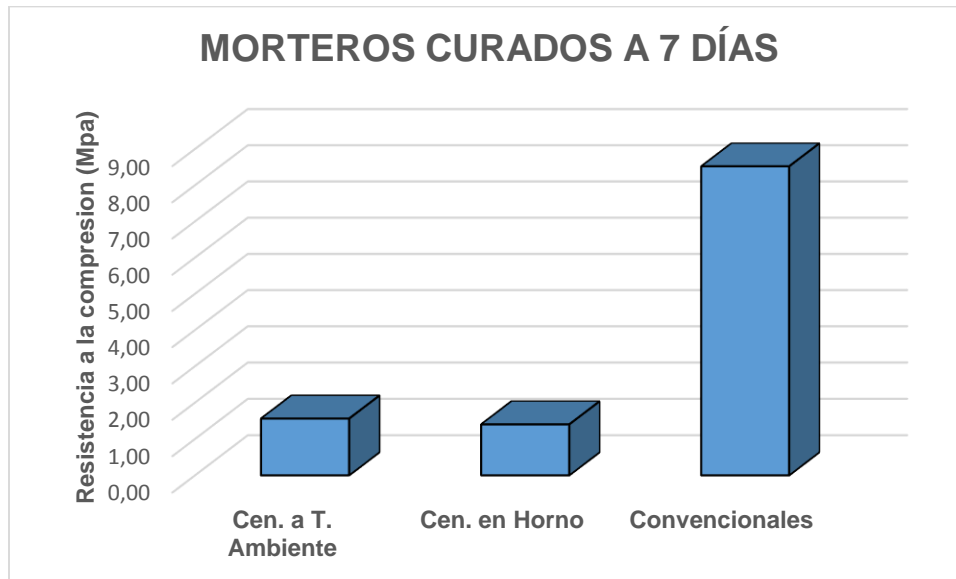
En este ensayo, se observó que los morteros de cenizas curados a temperatura respondieron mejor a cargas aplicadas, en contraste con los morteros de cenizas curados en horno, sin embargo, ninguno de estos valores fue superior a la resistencia de los morteros convencionales, que en este orden obtuvieron resistencias de 18,3% y 16,4% respectivamente.

Tabla 37. Resistencia a la compresión de morteros curados a 7 días

Morteros (50mm)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas a T. Ambiente A/C : 0,55	3,9	1,56	18,3
Cenizas en Horno A/C : 0,55	3,5	1,40	16,4
Convencionales A/C : 0,55	21,3	8,52	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 23. Resistencia a la compresión de morteros curados a 7 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.3.2. Morteros curados a 14 días

Como en el análisis de los morteros curados a 7 días, la resistencia mecánica de los morteros curados a temperatura ambiente demuestran dar una mejor respuesta cuando se somete a cargas aplicadas, pues soportaron 1,6% más que los morteros curados en horno, que obtuvieron resistencia del 20,6%.

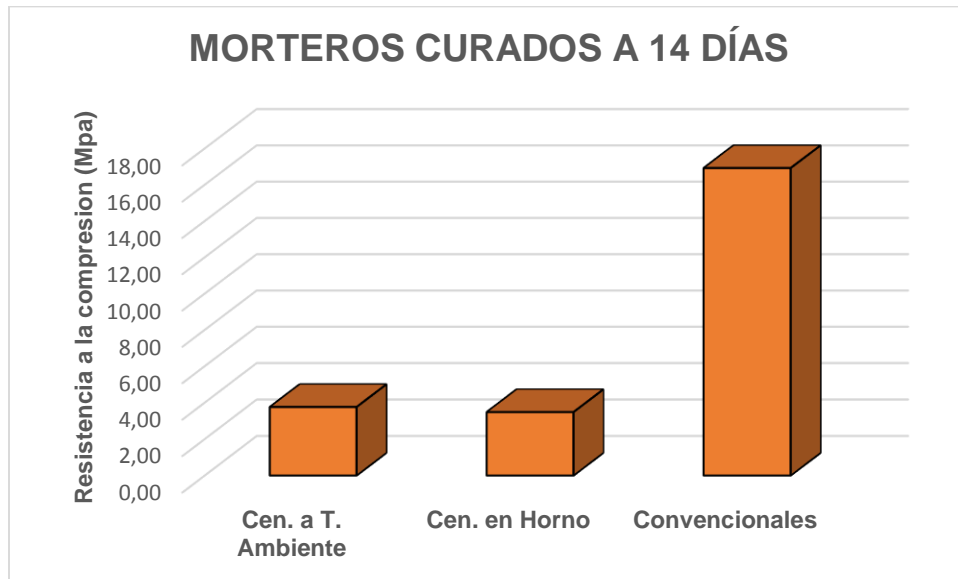
Con respecto a los resultados obtenidos en el análisis de los especímenes con un tiempo de curado menor, se puede evidenciar que las muestras aumentaron su resistencia coherentemente, pero la resistencia de los morteros convencionales sigue siendo mayor.

Tabla 38. Resistencia a la compresión de morteros curados a 14 días

Morteros (50mm)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas a T. Ambiente A/C : 0,55	9,4	3,76	22,2
Cenizas en Horno A/C : 0,55	8,7	3,48	20,6
Convencionales A/C : 0,55	42,3	16,92	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 24. Resistencia a la compresión de morteros curados a 14 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

6.3.3. Morteros curados a 28 días

Los especímenes curados a 28 días obtuvieron los siguientes resultados: los morteros de cenizas curados a temperatura ambiente soportaron 15,3 KN, los morteros de cenizas curados en horno tan solo 12,5 KN, mientras que los morteros convencionales aguantaron 66,3 KN, que en un orden porcentual, el primero representa el 23,1% y el siguiente 18,9 % frente al 100% de los últimos, respectivamente.

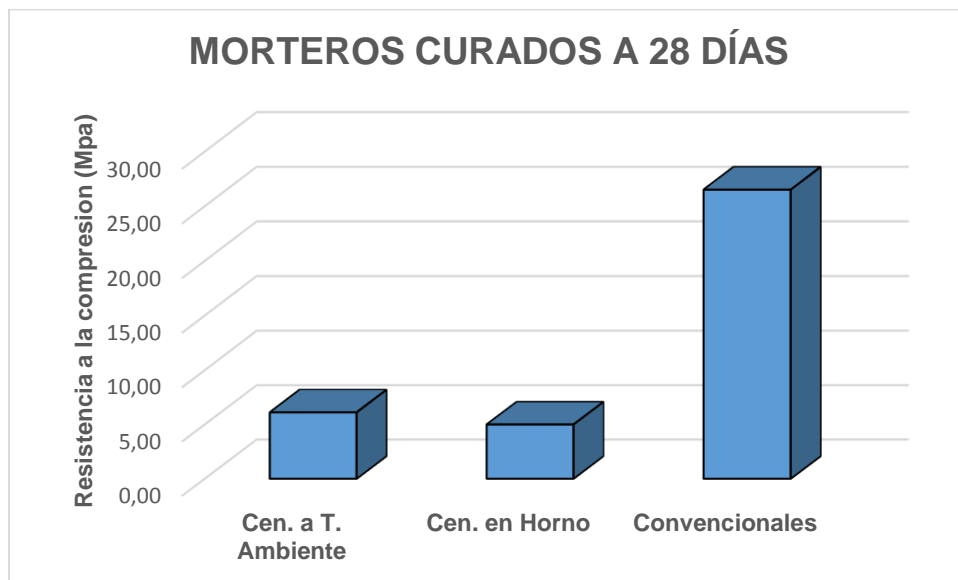
Puede evidenciarse que el mortero de cenizas curado a temperatura ambiente sigue presentando una diferencia notoria en la resistencia a compresión con respecto al mortero de cenizas curado en horno. En nuestro análisis podemos deducir que el material no desarrolla las mismas propiedades mecánicas cuando se somete a altas temperaturas, ya que como es el resultado de procesos de combustión, se estaría sobre calcinando.

Tabla 39. Resistencia a la compresión de morteros curados a 28 días

Morteros (50mm)	Carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (%)
Cenizas a T. Ambiente A/C : 0,55	15,3	6,12	23,1
Cenizas en Horno A/C : 0,55	12,5	5,00	18,9
Convencionales A/C : 0,55	66,3	26,52	100,0

Fuente (Hernández & López, 2018)

Gráfica 25. Resistencia a la compresión de morteros curados a 28 días



Fuente (Hernández & López, 2018)

7. CONCLUSIONES

El diseño de mezcla que se empleó para la elaboración de cada uno de los especímenes de concreto de cenizas de carbón se realizó a partir de la evaluación de la composición química del cemento, pues el análisis para determinar las dosificaciones de las fuentes de aluminosilicato que se adicionaron para su composición, se realizó a partir de las cantidades de sustancias que constituyen el cemento tradicional.

En la determinación, de los valores de las concentraciones iniciales de reactivos para las cenizas de carbón, se encontró que éstos eran considerables. Sin embargo, una vez estos son incorporados en la composición geopolimérica deteriora las características mecánicas del material, impidiendo dar una respuesta efectiva en sus esfuerzos.

Para evaluar las propiedades físicas del material cementante, se emplearon diferentes relaciones A/C en los diseños de mezcla de los especímenes, en los cuales fue posible determinar que, la relación A/C puede variar dependiendo del porcentaje de absorción del material que será estudiado. Con la relación A/C 0,60 el material presentó mayor manejabilidad respecto a la observada en las muestras con relación A/C 0,50, sin embargo, con relación A/C 0,55, que permitió inferir que, si es menor la cantidad de agua agregada, la resistencia mecánica del material aumentara considerablemente.

Conforme al desarrollo propuesto para investigación, se realizaron una serie de ensayos de laboratorio en la Universidad Católica de Colombia. Con el fin de comparar la resistencia mecánica a compresión y flexión de distintos especímenes elaborados a partir de cenizas volantes, frente al concreto tradicional. Así, se permitió analizar que la resistencia del material estudiado se encuentra en un rango del 20%-30% con respecto al 100% de resistencia del concreto convencional.

Es evidente en busca de nuevas tecnologías se busca recurrir a materiales que empleen menos energía, agua y recursos en general, así como métodos que protejan los recursos naturales mediante el uso eficiente de los mismos. Sin embargo, se determinó que el tiempo requerido para alcanzar la resistencia necesaria requerido por el material cementante a base de cenizas de carbón, es aproximadamente de 66 días, dado que la línea de tendencia muestra un aumento considerable a través del paso del tiempo, lo que en un concepto estructural no sería viable.

Con base en estos resultados se puede concluir que su uso como material alternativo del cemento Portland no representa mayores expectativas pero se propone como una buena oportunidad para el sector de la construcción, si se utiliza como un aditivo al cemento tradicional para mejorar algunas características y así reducir considerablemente la contaminación ambiental ocasionada por el mismo.

Si bien es cierto que, hay una gran influencia del operador al efectuar cualquier tipo de ensayo, tampoco hay certeza de que los resultados presentados son verídicos en su totalidad, pues posiblemente son condicionados por la sensibilidad del equipo o por cualquier error humano que se puede presentar en el momento de su realización. Los factores ya mencionados fueron notorios a lo largo de nuestra investigación, tanto que se generó una diferencia evidente en los resultados del material cementante evaluado en este estudio.

8. RECOMENDACIONES

El aspecto más importante en cualquier tipo de ensayo que se vaya a realizar, es el correcto manejo de los equipos, por eso, no está de más recomendar que tanto los cilindros, vigas y moldes para morteros se encuentren en excelente estado y en el caso de los materiales que se vayan a utilizar sean de buena calidad con su respectiva caracterización.

Debido a la cantidad de ensayos que se deben realizar para este tipo de proyectos, es conveniente contar con equipos de laboratorio certificados con sus correspondientes normas de seguridad, de igual forma un operario con alta experiencia en manejo de equipos y procedimiento de ensayos que pueda ser preciso para obtener resultados de buena confiabilidad, puesto que la variación y/o alteraciones en los errores en la toma de datos depende de él.

Como principal recomendación en este proyecto de investigación, se sugiere realizar un estudio más amplio para el concreto de cenizas de carbón, abarcando tanto propiedades químicas como físicas, ya que al día de hoy, solo se recomienda ser utilizado como aditivo al cemento para mejorar algunas características y así reducir las cantidades empleadas de este en las construcciones; puesto que al momento no se ha podido lograr la resistencia esperada para utilizar estas cenizas como material alternativo al cemento convencional.

9. TRABAJOS FUTUROS

Este proyecto sirve como soporte para nuevas investigaciones sobre materiales cementantes como uso alternativo del cemento portland convencional, haciendo así profundizaciones sobre variables tanto físicas como químicas, de igual manera se podrá utilizar esta investigación para incentivar a mejorar la toma de datos que conlleven a cualquier uso constructivo que se le quiera dar a las cenizas de carbón.

No obstante, el trabajo desarrollado en esta investigación ha hecho que surjan nuevas incógnitas que deben ser valoradas en trabajos futuros tales como analizar el material cementante con otros porcentajes de adición de la ceniza volcánica, diferentes a los estudiados en la presente investigación, esto con el fin de establecer cuál sería el porcentaje óptimo. También realizar más estudios ambientales sobre la utilización de estos nuevos materiales cementantes, esto con el fin de que si es favorable tener este tipo de materiales como uso alternativo del cemento para la disminución de contaminantes.

BIBLIOGRAFIA

Asocreto. 2016. Concreto con geopolímeros para pistas aeroportuarias. [En línea] 2016. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://www.asocretovirtual.com/noticreto-virtual/noticreto-139/Noticreto-139.pdf> .

Bondar y otros, otros. 2011. Effect of heat treatment on reactivity-strength of alkali-activated natural pozzolans. [En línea] 2011. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.]

Bondar, Dali y Lynsdale, CJ. 2010. Engineering properties of alkali activated natural pozzolan concrete. [En línea] 2010. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.]

Cook, James. 1983. Fly ash concrete - technical considerations. [En línea] 1983. [Citado el: 20 de Septiembre de 2018.]

Davidovits, Joseph. 2011. Geopolymer chemistry and applications, 3rd edition. [En línea] 2011. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.]

Ficem. 2009. Producción del cemento, proceso. [En línea] 2009. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://www.ficem.org/cemento/produccion-de-cemento/proceso.html>.

INVIAS. 2013. Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión. [En línea] 2013. [Citado el: 13 de 09 de 2018.] <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/normasINV-13.pdf>.

INVIAS. 2013. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. [En línea] 2013. [Citado el: 13 de septiembre de 2018.] <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/normasINV-13.pdf>.

INVIAS. 2013. Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre. [En línea] 2013. [Citado el: 13 de septiembre de 2018.] <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos/normasINV-13.pdf>.

López, Carolina Martínez. 2015. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial del cemento portland. [En línea] 2015. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] http://www.bdigital.unal.edu.co/49278/1/Carolina_Martinez_Lopez.pdf.

Lora, Alvaro Villamayor. 2016. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales con activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz. [En línea] 2016. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90737/fichero/TRABAJO+FIN+DE+GRADO+%C3%81LVARO+VILLAMOR+LORA.pdf>.

Moya, Braulio Enrique Burgos. 2014. Obtención de áridos livianos a partir de escoria de alto horno activada mediante solución. [En línea] 2014. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle>

NTC. 2004. Determinación de la resistencia de morteros de cenizas de carbón usando cubos de 50 mm de lado. [En línea] 2004. [Citado el: 13 de septiembre de 2018.] <https://www.mineducacion.gov.co/1621/NTC-220.pdf>.

Soares, P y Pinto, AT. 2008. Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros. [En línea] 2008. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.]

Sossa, Pedro Daniel Díaz. 2012. Estudio de factibilidad de obtención de hormigones geopoliméricos a partir de desechos minerales. [En línea] 2012. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.]

Torres, Arnold Giuseppe Gutiérrez. 2017. Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento portland. [En línea] 2017. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://www.bdigital.unal.edu.co/61987/1/79431541.2018.pdf> .

Valenzuela, Marcy Elizabeth. 2013. Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural. [En línea] 2013. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114679/cf-valenzuela_mh.pdf?sequence=1&isAllowed=y ..

Villareal, María Socorro Muñiz. 2011. *Geopolímeros para un desarrollo sustentable*. [En línea] 2011. [Citado el: 21 de Marzo de 2018.] <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/249/articulos/geopolimeros-para-un-desarrollo-sustentable.html> ..

Zazueta, Miguel Ángel Corona. 1984. Concretos dosificados con cemento portland y ceniza volante. [En línea] 1984. [Citado el: 21 de Marzo] de 2018.] <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capitulo2.pdf>.

Arango, J.D. 1993. Características generales y comportamiento geotécnico de las cenizas volcánicas en la Zona del Antiguo Caldas. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C.: Universidad de Los Andes.

Aranda, Alfonso. 2013. Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. vol. 23, p. 242–260.

Cheng, Ta-Wui. 2003. Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 2003. vol. 16, p. 205-210.