

**COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE  
MUESTRAS DE CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE CON  
PORCENTAJES INFERIORES AL 10%**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**ANDERSON ROBERT RAMÍREZ CORREDOR  
CÓDIGO: 503491  
JUAN DAVID PORTELA OSORIO  
CÓDIGO: 503846**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
MODALIDAD TRABAJO INVESTIGATIVO  
BOGOTÁ  
2018**

**COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE  
MUESTRAS DE CONCRETO ADICIONADAS CON CENIZA VOLANTE CON  
PORCENTAJES INFERIORES AL 10%**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**ANDERSON ROBERT RAMÍREZ CORREDOR**  
CÓDIGO: 503491  
**JUAN DAVID PORTELA OSORIO**  
CÓDIGO: 503846

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**  
**INGRID MARILYN SILVA ROJAS**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**MODALIDAD TRABAJO INVESTIGATIVO**  
**BOGOTÁ**  
**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

---

Presidente del Jurado

---

Presidente del Jurado

Bogotá. Octubre 31 de 2018.

## **DEDICATORIA**

A Dios  
A mi familia por su apoyo incondicional  
A mi mama por su paciencia y dedicación  
A la ingeniera Ingrid silva por su gran apoyo y paciencia  
A la universidad católica de Colombia por brindarnos su apoyo  
Y a todas esas personas que nos colaboraron en este proyecto.

GRACIAS

**Anderson Ramírez**

A Dios  
A mis padres y hermanos que me apoyaron en este proceso de aprendizaje en el que he crecido como persona y como profesional, sin ellos no hubiese sido posible superar cada uno de los obstáculos que se me presentaron en el camino que tuve que atravesar para llegar donde me encuentro el día de hoy. Gracias por su paciencia.  
A María Fernanda por ser mi motivación día a día  
A los amigos que me acompañaron en este proceso  
A la ingeniera Ingrid por su paciencia y dedicación  
A los docentes que me entregaron todos su conocimientos  
A la Universidad Católica de Colombia por abrirme sus puertas y permitirme formar como profesional.

GRACIAS

**Juan David Pórtela Osorio**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo queremos agradecerle a Dios por darnos salud, por llenarnos paciencia y perseverancia para poder lograr culminar esta etapa tan importante en nuestras vidas.

Por otra parte queremos agradecer a la ingeniera Ingrid Silva por su gran apoyo, por su paciencia y por brindarnos sus conocimientos a través de su amplia experiencia profesional, sin ella no hubiésemos podido encaminarnos hacia el objetivo final.

A los laboratoristas Hugo Rondón y Cesar Prada por habernos brindado su conocimiento y acompañamiento en las prácticas de laboratorio que fueron necesarias para la realización de este estudio.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>17</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
1.1 GENERAL.....	18
1.2 ESPECÍFICOS.....	18
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>19</b>
2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
<b>3. ANTECEDENTES</b> .....	<b>20</b>
3.1. DELIMITACIÓN.....	22
3.1.1. ALCANCE.....	22
3.1.2. TIEMPO.....	23
3.1.3. LIMITACIONES.....	23
<b>4. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>5. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>25</b>
5.1 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL CONCRETO.....	25
5.1.1 AGREGADOS.....	25
5.1.2 CEMENTO.....	25
5.1.3 ADITIVOS.....	26
5.1.4 AGUA.....	26
5.1.5 PUZOLANA.....	27
5.1.6 CENIZA VOLANTE.....	27
5.1.6.1 COLOR.....	27
5.1.6.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	28
5.1.6.3 DENSIDAD.....	28
5.1.6.4 FINURA.....	29
5.2 DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO.....	29
5.3 CARACTERÍSTICAS Y CONSIDERACIONES BÁSICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO.....	29
5.3.1 TRABAJABILIDAD.....	29

5.3.2 MANEJABILIDAD.....	30
5.3.3 RESISTENCIA Y DURABILIDAD .....	30
5.4 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO.....	31
5.4.1 RESISTENCIA.....	31
5.4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	31
5.4.3 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN .....	32
5.4.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA.....	32
5.5 OTROS ESTUDIOS DEL CONCRETO ENDURECIDO.....	33
5.5.1 RESISTENCIA AL CONCRETO MEDIANTE ESCLERÓMETRO O ÍNDICE DE REBOTE .....	33
5.5.2 VENTAJAS.....	33
5.5.3 DESVENTAJAS.....	33
5.5.4 ESCLERÓMETRO DIGITAL .....	33
5.5.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.....	34
5.5.6 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN .....	34
5.5.7 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO .....	35
5.5.8 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO .....	35
5.5.8.1 TIPOS DE FALLAS.....	36
5.6 PETROGRAFÍA DEL CONCRETO .....	37
5.6.1 UTILIDAD DE LA PETROGRAFÍA .....	38
5.6.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE ÓPTICA.....	38
5.7.3 PARTES MICROSCOPIO PETROGRÁFICO .....	¡Error! Marcador no definido.
<b>6. METODOLOGÍA .....</b>	<b>41</b>
<b>7. CARACTERIZACIÓN CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA-BOYACA .....</b>	<b>42</b>
7.1 FICHA TÉCNICA CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA-BOYACA .....	43
7.2 CLASIFICACIÓN CENIZA.....	44
<b>8. DISEÑO MEZCLA METODO A.C.I.....</b>	<b>45</b>
8.1 ASENTAMIENTO .....	45
8.2 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL .....	45
8.3 RELACIÓN AGUA-CEMENTO .....	46
8.4 CONTENIDO DE AIRE.....	46



8.5. ESTIMACIÓN DE AGUA .....	47
<b>9. CÁLCULOS DISEÑO DE MEZCLA.....</b>	<b>48</b>
9.1 CARACTERÍSTICAS.....	48
9.2 TIPO DE CAMISAS PARA MUESTRAS.....	48
9.2.1 DATOS MATERIAL SELECCIONADO “AGREGADOS”.....	49
9.2.2 VOLUMEN CILINDROS.....	49
9.2.3 CANTIDAD DE AGUA .....	49
9.3 CANTIDADES PARA EL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO .....	50
9.3.1 REMPLAZO DE CEMENTO PORTLAND POR CENIZA VOLANTE .....	51
<b>10. ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
10.1 RESISTENCIAS MÁXIMAS.....	52
<b>11. TIPOS DE FALLA OBTENIDOS .....</b>	<b>61</b>
<b>12. ANÁLISIS PETROGRÁFICO .....</b>	<b>80</b>
12.1 ANÁLISIS DE MUESTRAS CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.....	82
12.1.1 PRINCIPALES CONSTITUYENTES.....	82
12.1.2 VOLUMEN DE CONSTITUYENTES PRINCIPALES .....	90
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>93</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>96</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de ceniza termo-Paipa .....	42
Tabla 2. Composición de la ceniza volante .....	43
Tabla 3. Clasificación de la ceniza volante .....	44
Tabla 4. Rango de asentamiento .....	45
Tabla 5. Tamaño nominal según tipo de construcción .....	45
Tabla 6. Valores relación agua cemento .....	46
Tabla 7. Contenido de aire .....	46
Tabla 8. Material seleccionado para diseño de mezcla .....	49
Tabla 9. Cantidades de materiales para el diseño de mezcla .....	50
Tabla 10. Porcentajes de reemplazo de ceniza volante por cemento .....	51
Tabla 11. Medidas de cilindros convencionales sin adición de ceniza volante .....	52
Tabla 12. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras convencionales sin adición de ceniza volante. ....	52
Tabla 13. Medidas de los cilindros adicionados con 2% de ceniza volante. ....	53
Tabla 14. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 2% de ceniza volante. ....	54
Tabla 15. Medidas de los cilindros con 4% de ceniza volante .....	55
Tabla 16. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante. ....	55
Tabla 17. Medidas de los cilindros con 6% de ceniza volante .....	56
Tabla 18. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante. ....	56
Tabla 19. Medidas de los cilindros con 8% de ceniza volante .....	58
Tabla 20. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante. ....	58
Tabla 21. Medidas de los cilindros con 10% de ceniza volante. ....	59
Tabla 22. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante. ....	59
Tabla 23. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 7 días de curado. ....	61
Tabla 24. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 7 días de curado. ....	62
Tabla 25. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 7 días de curado. ....	62
Tabla 26. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 7 días de curado. ....	63
Tabla 27. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 7 días de curado. ....	63
Tabla 28. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 7 días de curado. ....	64
Tabla 29. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 14 días de curado. ....	64

Tabla 30. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 14 días de curado.	65
Tabla 31. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 14 días de curado.	65
Tabla 32. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 14 días de curado.	66
Tabla 33. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 14 días de curado.	66
Tabla 34. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 14 días de curado.	67
Tabla 35. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 28 días de curado.	67
Tabla 36. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 28 días de curado.	68
Tabla 37. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 28 días de curado.	68
Tabla 38. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 28 días de curado.	69
Tabla 39. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 28 días de curado.	69
Tabla 40. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 28 días de curado.	70
Tabla 41. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 56 días de curado.	70
Tabla 42. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 56 días de curado.	71
Tabla 43. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 56 días de curado.	71
Tabla 44. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 56 días de curado.	72
Tabla 45. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 56 días de curado.	72
Tabla 46. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 56 días de curado.	73
Tabla 47. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 72 días de curado.	73
Tabla 48. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 72 días de curado.	74
Tabla 49. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 72 días de curado.	74
Tabla 50. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 72 días de curado.	75
Tabla 51. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 72 días de curado.	75

Tabla 52. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 72 días de curado. .....	76
Tabla 53. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 110 días de curado.....	76
Tabla 54. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 110 días de curado. .....	77
Tabla 55. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 110 días de curado. .....	77
Tabla 56. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 110 días de curado. .....	78
Tabla 57. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 110 días de curado. .....	78
Tabla 58. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 110 días de curado. ....	79
Tabla 59. Resultados obtenidos bajo microscopía electrónica.....	81
Tabla 60. Proporción de vacíos en las muestra. ....	84
Tabla 61. Porcentaje de microscopia en las muestras. ....	86
Tabla 62. Porcentaje de microgrietas en las muestras. ....	87
Tabla 63. Porcentaje de la ceniza encontrada en las muestras. ....	88
Tabla 64. Porcentaje de inquemados en las muestras. ....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Microscopio petrográfico .....	39
Figura 2. Metodología.....	41
Figura 3. Requerimiento de agua de mezclado .....	47
Figura 4. Cilindros usados para fundir las muestras .....	48
Figura 5. Comportamiento de las muestras convencionales sin adición de ceniza volante vs días de curado.....	53
Figura 6. Comportamiento de las muestras adicionadas con 2% de ceniza volante vs días de curado.....	54
Figura 7. Comportamiento de las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante vs días de curado.....	55
Figura 8. Comportamiento de las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante vs días de curado.....	57
Figura 9. Comportamiento de las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante vs días de curado.....	58
Figura 10. Comportamiento de las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante vs días de curado .....	60
Figura 11. Secciones delgadas.....	82
Figura 12. Nicoles paralelos y nicoles cruzados muestra convencional .....	83
Figura 13. Nicoles paralelos y nicoles cruzados muestra 6%.....	83
Figura 14. Nicoles paralelos y nicoles cruzados muestra 8%.....	84
Figura 15. Porcentaje de vacíos presentes.....	85
Figura 16. Porcentaje de microporosidades .....	86
Figura 17. Porcentaje de microgrietas.....	87
Figura 18. Porcentaje de ceniza volante .....	88
Figura 19. Porcentaje de inquemados.....	89
Figura 20. Principales constituyentes .....	90
Figura 21. Falla tipo cónica.....	36
Figura 22. Falla tipo y dividida.....	36
Figura 23. Falla tipo cónica y transversal.....	36
Figura 24. Falla tipo transversal.....	37
Figura 25 Falla tipo columnar.....	37

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Cilindros convencionales: .....	100
Anexo 2. Cilindros adicionados con 2% de ceniza volante. ....	102
Anexo 3. Cilindros adicionados con 4% de ceniza volante. ....	104
Anexo 4. Cilindros adicionados con 6% de ceniza volante. ....	106
Anexo 5. Cilindros adicionados con 8% de ceniza volante. ....	108
Anexo 6. Cilindros adicionados con 10% de ceniza volante. ....	110

## GLOSARIO

**ADITIVOS:** son materiales diferentes del agua, de los agregados y del cemento, se agregan en pequeñas cantidades a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado, interactuando con el sistema hidratante - cementante.

**AGREGADO:** cualquier combinación de arena, grava o roca triturada en su estado natural o procesado. Son minerales comunes, resultado de las fuerzas geológicas erosivas del agua y del viento. Son generalmente encontrados en ríos y valles, donde han sido depositados por las corrientes de agua.

**AGREGADO FINO:** se define como aquel que pasa el tamiz 3/8" y queda retenido en la malla # 200. El más usual es la arena producto resultante de la desintegración de las rocas.

**AGREGADO GRUESO:** es aquel que pasa el tamiz 3 y es retenido el Tamiz número 4.

**ASENTAMIENTO:** es una medida de la consistencia de concreto, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla e indica qué tan seco o fluido está el concreto, se mide en pulgadas.

**CANTERA:** es un tipo de mina no subterránea, que se ubicada usualmente en una zona abundante en roca o formaciones rocosas particulares.

**CEMENTO:** material compuesto de una sustancia en polvo que mezclada con agua u otra sustancia forma una pasta blanda que se endurece en contacto con el agua o el aire.

**CENIZA VOLANTE:** 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.

**CONCRETO:** es el material resultante de la mezcla de cemento con agregados y agua, utilizado para estructuras que pueden soportar grandes cargas.

**CURADO:** es el proceso por el cual el concreto elaborado con cemento hidráulico

madura y endurece con el tiempo, como resultado de la hidratación continua del cemento en presencia de suficiente cantidad de agua y de calor.

**FRAGUADO:** es un proceso en el que se pierde manejo y donde se experimenta un proceso exotérmico, además de un proceso de pérdida de manejabilidad, con el fin de adquirir una resistencia a través del tiempo.

**GRANULOMETRÍA:** distribución de los tamaños de las partículas de un agregado tal como se determina por análisis de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas.

**PUZOLANA:** roca volcánica muy fragmentada y de composición basáltica, se utiliza como aislante en la construcción y para la fabricación de cemento hidráulico.

**TAMIZ:** usado para separar las partes finas de las gruesas de algunos materiales y que está formado por una tela metálica o rejilla tupida que está sujeta a un aro.



## **INTRODUCCIÓN**

Este estudio se realiza con el fin de evaluar la resistencia a la compresión del concreto con la adición de ceniza volante, identificando su comportamiento reemplazando cierto porcentaje de cemento por ceniza volante.

Para la realización de este estudio se continuará la investigación realizada por Angélica Agudelo Moreno y Bryan Gabriel Espinosa Torres titulada “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA”. Estudio en el que analizaron el comportamiento del concreto con la adición de ceniza volante con porcentajes de inclusión mayores al 10%, obteniendo resistencias a la compresión inferiores a la de diseño.

Las pruebas de laboratorio a realizar en el presente estudio, estarán basadas en las normas NTC-3493 “CENIZAS VOLANTES Y PUZOLANAS NATURALES, CALCINADAS O CRUDAS, UTILIZADAS COMO ADITIVOS MINERALES EN EL CONCRETO DE CEMENTO PÓRTLAND” y por las normas ASTM C33. Los ensayos de laboratorio se realizarán en cilindros y las edades de falla serán 7, 14, 28, 56, 120 y 180 días de curado con porcentajes de inclusión de ceniza volante de 0, 2, 4, 6, 8 y 10% para cada muestra.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 GENERAL**

Determinar cuál es el porcentaje de reemplazo de ceniza volante con el cual se obtienen mayores resistencias a la compresión

### **1.2 ESPECÍFICOS**

- Interpretar de manera adecuada los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio, para poder diseñar un concreto con condiciones de resistencia a la compresión óptimas
- Determinar las características químicas básicas de la ceniza volante entregada por Termopaipa
- Realizar una caracterización granulométrica a la ceniza volante de Termopaipa
- Caracterizar petrográficamente los principales componentes de las muestras en concreto falladas a compresión con el fin de determinar cuáles interfieren en la reducción de la resistencia a compresión
- Evaluar el comportamiento mecánico de las muestras de concreto adicionadas con ceniza volante con respecto a las encontradas en la muestra patrón
- Determinar las cantidades volumétricas de cada uno de los materiales para el diseño de las muestras de concreto con la adición de ceniza volante de Termopaipa.

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Al pasar de los años se han analizado diferentes métodos para poder mejorar la resistencia a la compresión del concreto por medio de la adición de diversos materiales. Uno de los materiales utilizados es la ceniza volante que se ha utilizado con el fin de darle un mejor manejo ambiental a los desechos industriales. Se debe tener en cuenta que los problemas ambientales asociados a la producción del cemento Portland en la actualidad son de alta relevancia, pues durante la etapa de clinckerización por cada tonelada de cemento producido se libera a la atmosfera 0.8 a 0.9 Toneladas de CO<sub>2</sub> lo que equivale al 7% del total de emisiones de CO<sub>2</sub>, a nivel mundial. La ceniza volante ha sido uno de los materiales estudiados para ayudar a mejorar la resistencia a la compresión del concreto, también para mejorar sus propiedades mecánicas y poder reducir en cierto porcentaje los costos de construcción de obras civiles. En este caso, la ceniza volante se obtendrá de Termopaipa, termoeléctrica comprometida con el medio ambiente, que presenta una disposición de la ceniza volante a concreteras que la usan como material de agregado para la producción de concreto.

En busca de mejorar la resistencia a la compresión del concreto y mitigar el impacto ambiental producido por las cenizas volantes, se harán reemplazos de cemento por ceniza volante a cada una de las muestras y de este modo poder determinar si efectivamente se presenta una mayor resistencia a la compresión de dichas muestras.

### **2.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Qué porcentaje de ceniza volante de Termopaipa será el más adecuado para que haya un incremento en la resistencia a la compresión de las muestras de concreto?

### 3. ANTECEDENTES

A lo largo de los años se han estudiado las propiedades del concreto por medio de la adición de cemento portland y el uso de diversos materiales que puedan mejorar propiedades como la fluidez o la resistencia a la compresión. Uno de los materiales usado para poder mejorar estas propiedades es la ceniza volante en donde a lo largo de los años y por medio de diferentes pruebas se ha podido obtener un concreto de muy buena calidad y con una durabilidad considerable. Se tienen registros tanto a nivel nacional como internacional en los que el mejoramiento de la resistencia a la compresión del concreto con adición de ceniza volante ha sido motivo de estudio, dichos estudios se han fundamentado en diversos métodos de ensayo, en los que las muestras a estudiar se llevan al laboratorio y se pueden observar por medio de diversos métodos ya sean manuales o tecnológicos las variaciones de resistencia a la compresión que sufren estas muestras de concreto con la adición de ceniza volante.

García, estudió la “INFLUENCIA DE DOS TIPOS DE CENIZAS VOLANTES ESPAÑOLAS EN LA MICROESTRUCTURA Y DURABILIDAD DE LA PASTA DE CEMENTO PORTLAND HIDRATADO”, en donde pudo observar que al adicionar ceniza volante a la mezcla de concreto se presentó un incremento en la reacción de hidratación del cemento, principalmente en muestras que presentaban pocos días de curado, los días de curado fueron puntualmente 21 días. Al analizar esta muestra pudo evidenciar que se produjo un refinamiento de la estructura porosa de la muestra de concreto con la adición de ceniza volante, lo que hizo que se incrementan las resistencias mecánicas de la muestra, España 1993.

Goñi, estudió las “ESCORIAS Y CENIZAS VOLANTES DE GASIFICACIÓN DE CARBÓN APLICACIÓN A LA PRODUCCIÓN DE ÁRIDOS LIGEROS EXPANDIDOS”, realizando una caracterización de escorias y cenizas provenientes de la central térmica GICC (Gasificación Integrada en Ciclo Combinado), en donde el carbón es utilizado como el combustible de origen. Su estudio se basó en comparar las escorias y cenizas volantes provenientes de diversas plantas convencionales, en donde se pudiera diferenciar su composición mineralógica y sus propiedades expansivas cuando son tratadas a temperaturas superiores a 1100 °C. También se observó que, durante los tratamientos térmicos, además de la expansión, se produce paralelamente la desvitrificación de los materiales, transformando las escorias y cenizas en materiales vitrocerámicos porosos de baja densidad cuyas propiedades porosas se pueden modular mediante un control del

tiempo y la temperatura de tratamiento, España 2009.

Agudelo y Espinosa, realizaron estudios en muestras de concreto con la adición de ceniza volante, estudiaron el “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA”, estudio en el cual se analizó la resistencia a la compresión que presentaron las muestras de concreto en un periodo de 72 días respectivamente y pudieron notar que al pasar los días de curado establecidos que fueron de 7, 28, 56 y 72 días, se observó que efectivamente el concreto presentó un aumento en su resistencia a la compresión y que al adicionar una cantidad considerable de ceniza volante a las muestras estas presentaron una absorción de agua bastante alta. También pudieron determinar que con respecto a los días de curado a los 56 días se presentó la resistencia máxima la compresión y teniendo en cuenta que según los valores obtenidos en los ensayos el porcentaje de ceniza volante que se debería adicionar a las muestras es de 10% o cercano a este valor dejando gran expectativa a lo que puede llegar a suceder al adicionar porcentajes de ceniza volante interiores y cercanos al 10%, Colombia 2017.

Valderrama, Torres y Mejía de Gutiérrez, realizaron ensayos para evaluar características de desempeño de muestras de concreto, su estudio que lleva por título “CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO DE UN CONCRETO ADICIONADO CON CENIZAS VOLANTES DE ALTO NIVEL DE INQUEMADOS” , estudio en el cual se utilizó ceniza volante obtenida de Termopaipa considerando que esta ceniza volante obtiene una clasificación tipo F, este tipo de ceniza volante presenta un porcentaje de inquemados superiores al 10% aspecto que afectó el desempeño de las muestras de concreto durante los ensayos. También determinaron que el porcentaje óptimo de ceniza volante que se debe adicionar a muestras de concreto y pudieron concluir que adicionar un 10% de ceniza volante presentó un resultado positivo en cuanto al aumento de la absorción capilar y la permeabilidad a cloruros, Colombia 2011.

Silva, fundamentó sus estudios en el “ESTUDIO PETROGRÁFICO PARA EXPLICAR LA REDUCCIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES DE CONCRETO CON DIFERENTES PORCENTAJES DE REEMPLAZO DE CEMENTO POR CENIZA VOLANTE DE TERMOTASAJERO”. En este estudio por medio de ensayos de laboratorio se pudo observar que al adicionar 10, 20, 25 y 30% de ceniza volante en la mezcla de concreto se presentaba una reducción en la resistencia a la compresión, esto debido al aumento en el porcentaje de ceniza volante agregado a las muestras. Por otra parte, al ser

analizadas las muestras, se pudo observar presencia de vacíos como también un aumento de porosidad, factores que afectan directamente la pasta de cemento teniendo de este modo una baja resistencia a la compresión. Por otra parte, durante la realización de estas pruebas de laboratorio, se pudo observar que a medida que se adiciona ceniza volante a las muestras de concreto se presenta un aumento en micro grietas con un valor que supera el 200% con respecto a la muestra patrón, Colombia 2017.

Durán y Velásquez en su tesis de pregrado, analizaron el comportamiento de muestras de concreto adicionadas con ceniza volante y con ceniza de bagazo de caña, su tesis titulada “EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE CONCRETOS, REEMPLAZANDO PARCIALMENTE EL CEMENTO PORTLAND POR CENIZAS VOLANTES Y CENIZAS DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR”. Realizaron a las muestras de concreto inclusiones de ceniza en porcentajes de 5%, 10%, 15% y 20%, obteniendo como porcentaje óptimo de inclusión de ceniza volante el 5% en el que se obtuvo una resistencia a la compresión de 3785.48 psi, resultado con el cual pudieron observar que alcanzó un 9.16% de más de la resistencia esperada. Al realizar inclusiones de ceniza volante superiores al 10%, la resistencia a la compresión de las muestras de concreto se reduce a 3331.52 psi para inclusión de ceniza volante de 15%, y 2950.01 psi para inclusión de ceniza volante de 20%. Las edades de falla que se tomaron en cuenta fueron de 7, 14 y 28 días de curado. Estudio realizado en Colombia, año 2016.

### **3.1. DELIMITACIÓN**

#### **3.1.1. ALCANCE**

Determinar el porcentaje de ceniza volante que se requiere para el diseño de un concreto que presente unas propiedades mecánicas ideales. Para determinar este porcentaje, se diseñarán cilindros que serán llevados a laboratorio, en donde se realizará la falla de los mismos a compresión y de este modo se podrá establecer cuál de estas muestras presenta una mayor resistencia. Se diseñarán un total de 72 muestras con edades de falla que van desde 0, 7, 14, 28, 56, 120, 180 días y los porcentajes de inclusión de ceniza volante para cada muestra serán de 0, 2, 4, 6, 8, 10%. Con estas pruebas de laboratorio, se busca poder diseñar un concreto que ayude a mitigar el impacto ambiental que es provocado por la combustión del carbón producido por la termoeléctrica Termopaipa, dándole un uso a la ceniza volante como material de reemplazo de cemento en muestras de concreto, teniendo en

cuenta que esta ceniza es un desecho industrial que provoca contaminación en el ambiente.

### **3.1.2. TIEMPO**

El tiempo que se asignó para la elaboración de la investigación fue de ocho meses, cuatro meses en la elaboración del anteproyecto en el que se plantea la propuesta y cuatro en el desarrollo investigativo de trabajo de grado, realizando a satisfacción las pruebas de laboratorio y presentando los resultados obtenidos con su respectiva documentación.

### **3.1.3. LIMITACIONES**

- El uso de los laboratorios de la universidad católica de Colombia
- La obtención de la ceniza volante de Termopaipa
- El tiempo estipulado para la elaboración de ensayos y análisis de resultados
- Disponibilidad de la empresa MINERLAB LTDA para realizar las secciones gruesas y delgadas
- Disponibilidad del microscopio para realizar la petrografía

#### **4. JUSTIFICACIÓN**

Este análisis, ha sido basado en las diferentes problemáticas ambientales que se generan con el uso de cemento como uno de los materiales principales en cualquier tipo de obra civil, es por esto que por medio de éste análisis se quiere recopilar los datos de las muestras analizadas a las que les fueron adicionados los porcentajes de ceniza volante producida por el carbón utilizado para la generación de energía en la termoeléctrica Termopaipa.

El carbón es un producto natural que es utilizado en las termoeléctricas para la generación de energía, durante este proceso se produce combustión, proceso por el cual se genera la ceniza volante. Se busca emplear la ceniza volante en el concreto como adición para verificar si se alcanzan las resistencias a la compresión para las cuales fue diseñado y poder mitigar el impacto ambiental producido por la combustión que se genera en las termoeléctricas.

Al utilizar ceniza volante como agregado para las mezclas de concreto se estará reduciendo la cantidad de cemento y de este modo se está reduciendo el impacto ambiental que se genera a partir de la producción del mismo, se busca aportar a la conservación del medio ambiente con nuevas alternativas y nuevos usos para los desechos producidos en las termoeléctricas.



## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1 MATERIALES CONSTITUYENTES DEL CONCRETO

#### 5.1.1 AGREGADOS

Los agregados son partículas pétreas que dan una resistencia mecánica y textura superficial, para garantizar la adherencia a la mezcla de cemento; comúnmente estos son los que controlan los cambios volumétricos que se presentan durante el fraguado del concreto. Generalmente, estos materiales constituyen más del setenta por ciento de la mezcla en un metro cúbico de concreto; por tal motivo se disminuye el costo de esta pasta. La calidad de estos materiales depende del lugar de origen, de la distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Los orígenes de los agregados involucran condiciones específicas de temperatura y presión, así como también procesos de meteorización, erosión, etc. Estos materiales son extraídos de depósitos aluviales (gravas y arenas de río) y de canteras de varias rocas naturales. Los agregados se pueden clasificar según la procedencia, el tamaño y la densidad. Todos estos materiales requieren pruebas de laboratorio para analizar si el comportamiento es factible, para que sea utilizado para la mezcla de concreto. La prueba de laboratorio que más se usa para la clasificación es la granulométrica, la cual varía desde fracciones de milímetros hasta centímetros. <sup>1</sup>

#### 5.1.2 CEMENTO

Es un material que resulta de la combinación de arcilla molida con materiales calcáreos de polvo, en tanto entran en contacto con el agua se solidifica y se vuelve duro. Es mayormente empleado en instancias de la construcción, justamente por esa solidez que reviste como adherente y aglutinante, es un material conglomerante dado capaz de unir partes de varios materiales y darles cohesión a partir de diversas modificaciones químicas de la masa. Cabe destacarse que cuando se mezcla con agua, arenas y grava se obtiene el hormigón o concreto.

Dependiendo del origen que presenta el mismo. De origen arcilloso, logrado a partir de arcilla y piedra caliza y por otra parte el puzolánico, que contiene puzolana, un material aluminio silíceo que se empleaban en la antigua roma para producir el

---

<sup>1</sup> Componentes del concreto. [En línea]

<http://elconcreto.blogspot.com.co/2009/01/componentes-del-concreto.html>

cemento hasta la aparición del cemento portland en el siglo XIX. La menciona puzolana es proveniente de volcanes un origen orgánico. <sup>2</sup>

### 5.1.3 ADITIVOS

En Colombia los aditivos para ser utilizados en el concreto se rigen por la **Norma Técnica Colombiana NTC 1299 – Concretos. Aditivos Químicos para Concreto**. Estos materiales son ingredientes del concreto, que son adicionados a la mezcla de concreto como los otros materiales antes o durante del proceso de preparación, se clasifican en:

- **Plastificante:** Permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener una determinada consistencia del concreto.
- **Retardante:** Demora el tiempo de fraguado del concreto.
- **Acelerante:** Acelera tanto el fraguado como la ganancia de resistencia a edad temprana del concreto.
- **Plastificante Retardante:** Permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla con determinada consistencia y retardar su fraguado.
- **Plastificante Acelerante:** Permite disminuir la cantidad de agua necesaria para obtener una mezcla con determinada consistencia y acelerar tanto el fraguado como la resistencia a edad temprana.
- **Súper-Plastificante:** Permite la reducción del agua de mezcla en más de un 12% para obtener determinada consistencia en el concreto.
- **Súper-Plastificante Retardante:** Permite la reducción del agua de mezcla en más de un 12% para obtener determinada consistencia en el concreto y además retardar su fraguado.
- **Súper-Plastificante Acelerante:** Permite la reducción del agua de mezcla en más de un 12% para obtener determinada consistencia en el concreto y acelerar tanto el fraguado como la resistencia a edad temprana.<sup>34</sup>

### 5.1.4 AGUA

El agua es un componente fundamental en la elaboración de las mezclas de concreto, pues cumple la función de hidratar el cemento, para que desarrolle sus

---

<sup>2</sup> Argos Colombia [En línea]

<https://www.argos.co/colombia/productos/producto/subproducto?id=733>

<sup>3</sup> Sika Colombia S.A.S, aditivos para concreto [En línea]

<https://col.sika.com/es/productos/doc2new/Document/aditivos-para-concreto.html>

<sup>4</sup> Generalidades y tipos de aditivos para el concreto según la NTC 1299 [En línea]

<http://blog.360gradosenconcreto.com/generalidades-y-tipos-de-aditivos-para-el-concreto>

Propiedades ligantes y de endurecimiento. Debe ser en lo posible libre de componentes extraños como minerales, aditivos u otros agentes químicos. La principal característica en la utilización del agua para formar la mezcla de concreto, es que tiene que estar en óptimas condiciones tales como libre de impurezas (ácidos, sustancias alcalinas, aceites, materia orgánica, entre otras) ya que esto puede afectar la mezcla homogénea que se realiza.

### **5.1.5 PUZOLANA**

La puzolana es un material natural o artificial que contiene sílice y/o alúmina. 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. La puzolana puede reemplazar de un 15% a un 40% del cemento sin reducir significativamente la resistencia del cemento. La mayoría de materiales puzolánicos son productos de procesos industriales o agrícolas, estos materiales contribuyen a ahorrar costos y energías, ayudan a reducir significativamente el impacto ambiental y en la mayoría de los casos mejora la calidad del producto final. La puzolana natural esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente. La puzolana artificial es el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, las más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado, escoria de altos hornos granulado y molida y ceniza de cáscara de arroz.<sup>5</sup>

### **5.1.6 CENIZA VOLANTE**

La ceniza volante es el resultado de los residuos de carbón bituminoso, que producen las plantas eléctricas de carbón, es material muy fino y en los últimos sesenta (60) años ha sido un material muy usado por los resultados satisfactorios que este ha tenido en la fabricación de concreto para presas hasta la estabilización de suelos; es un material muy versátil, lo que lo convierte en una alternativa para mitigar la contaminación ambiental que estas termoeléctricas producen y en segundo se ve reflejado una disminución en los costos de obra.<sup>6</sup>

#### **5.1.6.1 COLOR**

La apariencia de la ceniza volante, es el resultado directo de la combustión del carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno, el color de la ceniza puede variar

---

<sup>5</sup> Puzolana en el cemento [En línea]

<https://www.argos.co/Media/Panama/images/03%20CEMENTO%20PUZOLANICO.pdf>

<sup>6</sup> Ceniza volante [En línea]

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capitulo2cenizavolante.pdf>

desde un color gris claro a un color negro, el color gris indica un alto contenido de cal y de gris a negro indica un alto contenido de carbón.<sup>7</sup>

### 5.1.6.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

La ceniza volante según la norma ASTM C618, exige primordialmente un mínimo de 70% de óxidos principales ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y un máximo de 5% de sulfato (como  $\text{SO}_3$ ). Existen otros requerimientos químicos opcionales de magnesia ( $\text{MgO}$ ) y álcalis disponibles (como  $\text{Na}_2\text{O}$ ) cuando la ceniza volante va a usarse para propósitos especiales, como en autoclaves o para reducir la reacción álcali/agregado.<sup>8</sup> Teniendo en cuenta que la composición química del tipo de carbón empleado depende el tipo de ceniza, estas se pueden dividir en dos grupos que se diferencian por la cantidad de calcio que contienen.

- Ceniza tipo F: esta categoría contiene usualmente menos del 10% de  $\text{CaO}$  y más de 70% de óxidos ácidos, generalmente provienen de la combustión de antracita y carbones bituminosos, esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.
- Ceniza tipo C: esta categoría contiene usualmente entre un 15 y un 35 % de  $\text{CaO}$  y más de 50% de óxidos ácidos, proviene de la combustión de lignito y carbones sud-bituminosos, esta clase de cenizas volantes además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementosas.

### 5.1.6.3 DENSIDAD

La densidad aparente de las partículas de cenizas volantes varia, en general entre 1.88 y 2.84  $\text{g/cm}^3$ , la densidad de la ceniza volante aumenta cuando se comete a un molino y se ha encontrado que para una ceniza con una densidad inicial de 1.82  $\text{g/cm}^3$  después de molida es de 2.70  $\text{g/cm}^3$ , estos resultados tienden a varias con la cantidad de tiempo molida. Asimismo, las densidades son distintas, en razón de la cantidad presente de cenosferas huecas o macizas en las cenizas.<sup>9</sup>

---

<sup>7</sup> Corona Zazueta Miguel Ángel, Concreto-2, cemento portland. México 1997. Universidad de Sonora, División Ciencias e Ingeniería.

<sup>8</sup> Composición química ceniza volante [En línea]

<http://materconstrucc.revistas.csic.es2006>

<sup>9</sup> Concretos con cenizas volantes provenientes de termoeléctricas [En línea]

<http://www.ecoediciones.com/wp-content/uploads/2016/08/Concretos-con-cenizas-volantes-.pdf>

#### **5.1.6.4 FINURA**

La finura de las cenizas volantes es una de las propiedades que afecta la actividad puzolánica y la trabajabilidad del concreto.

Chaves en su investigación indica que al aumentar la finura de la ceniza, mayor será el afecto puzolánico en la resistencia del concreto, resistencia a la abrasión y resistencia al congelamiento.<sup>10</sup>

Esto se debe a que la velocidad de hidratación de las partículas es mayor mientras más pequeñas sean y la relación sílice-cal es más eficiente. Cuando la ceniza volante tiene una finura comparable a la del cemento portland, puede ser competente para efectos puzolánicos.

### **5.2 DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO**

Aunque se han realizado gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas, en buena parte permanece como un procedimiento empírico. La mayor parte de procedimientos de diseño están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad determinada así como la manejabilidad apropiada para un tiempo determinado, además se debe diseñar para unas propiedades que el concreto debe cumplir cuando una estructura se coloca en servicio. Una mezcla se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. Debemos tener en cuenta una selección de materiales principales como (cemento, agua, agregados y aditivos) y así tener una determinación de proporcionamiento ideal para producir un diseño tan económico sea posible, un concreto de trabajabilidad, resistencia a compresión y durabilidad apropiada.<sup>11</sup>

### **5.3 CARACTERÍSTICAS Y CONSIDERACIONES BÁSICAS DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO**

#### **5.3.1 TRABAJABILIDAD**

Claramente un concreto apropiadamente diseñado debe permitir ser colocado y compactado apropiadamente con el equipamiento disponible. El acabado que permite el concreto debe ser el requerido y la segregación y sangrado deben ser

---

<sup>10</sup> CHÁVEZ VELASQUEZ, Camilo Andrés y GUERRA MAESTRE, Yohana Liz Óp. Cit Pag 23

<sup>11</sup> Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón [En línea]  
<http://www.bdigital.unal.edu.co/40215/1/3352874.19873.pdf>

minimizados. La cantidad de agua requerida por trabajabilidad dependerá principalmente de las características de los agregados en lugar de las características del cemento. Cuando la trabajabilidad debe ser mejorada, el rediseño de la mezcla debe consistir en incrementar la cantidad de mortero en lugar de incrementar simplemente el agua y los finos (cemento). Debido a esto es esencial una cooperación entre el diseñador y el constructor para asegurar una buena mezcla de concreto. En algunos casos una menos mezcla económica podría ser la mejor solución. Y se deben prestar oídos sordos al frecuente pedido, en obra, de “más agua”.

### **5.3.2 MANEJABILIDAD**

Es importante que el concreto se diseñe con la manejabilidad adecuada para la colocación, esta depende principalmente de las propiedades y características de los agregados y la calidad del cemento. Cuando se necesita mejorar las propiedades de manejabilidad, se puede pensar en incrementar la cantidad de mortero. Una adición de agua en la obra es la peor solución para mejorar la manejabilidad del concreto, es totalmente contraproducente para la calidad del producto.

### **5.3.3 RESISTENCIA Y DURABILIDAD**

En general las especificaciones del concreto requerirán una resistencia mínima a compresión. Estas especificaciones también podrían imponer limitaciones en la máxima relación agua/cemento y el contenido mínimo de cemento. Es importante asegurar que estos requisitos no sean mutuamente incompatibles. No necesariamente la resistencia a compresión a 28 días será la más importante, debido a esto la resistencia a otras edades podría controlar el diseño. Las especificaciones también podrían requerir que el concreto cumpla ciertos requisitos de durabilidad, tales como resistencia al congelamiento y deshielo o ataque químico. Esta consideración podría requerir el uso de aditivos. Finalmente debe ser recordado que incluso la mezcla perfecta no producirá un concreto apropiado si no se lleva a cabo procedimientos apropiados de colocación, acabado y curado. Debemos de tener en cuentas los siguientes aspectos para obtener un diseño de mezcla.

- Análisis granulométrico de los agregados
- Peso unitario compactado de los agregados (fino y grueso)
- Peso específico de los agregados (fino y grueso)
- Contenido de humedad y porcentaje de absorción de los agregados (fino y grueso)
- Perfil y textura de los agregados

- Tipo y marca del cemento
- Peso específico del cemento
- Relaciones entre resistencia y la relación agua/cemento, para combinaciones posibles de cemento y agregados.<sup>12</sup>

## **5.4 CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO**

### **5.4.1 RESISTENCIA**

Es una propiedad del concreto, consiste en resistir esfuerzos y se puede considerar de cuatro maneras: compresión, tracción, flexión y corte. En este punto el concreto presenta una alta resistencia a los esfuerzos de compresión y poca a los de tracción, por esta razón, la resistencia a la compresión simple es la propiedad de mayor importancia.

En relación con la resistencia a compresión, se considera que un concreto es de resistencia normal, cuando no supera los 42 Mpa. Actualmente, se considera que un concreto es de alta resistencia, cuando esta es superior a 42 Mpa e inferior a 100 Mpa, a 28 días. Cuando tienen resistencias superiores a 100 Mpa, se considera de ultra alta resistencia.

### **5.4.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

La mayoría de estructuras de concreto son diseñadas bajo la suposición de que este solo resiste esfuerzos de compresión, por consiguiente, para propósitos de diseño estructural, la resistencia a la compresión es el criterio de calidad. Por esta razón, los esfuerzos de trabajo están prescritos en términos de porcentajes, por los códigos de la resistencia a la compresión. **NTC 550 Y NTC 673**

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. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los materiales que no se rompen en la compresión se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el material una cantidad arbitraria. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima por el área transversal original de una probeta en un ensayo de compresión.

---

<sup>12</sup> Montejo Fonseca, Alfonso. Bogotá 2013. Tecnología y patología del concreto armado (primera edición). Universidad Católica de Colombia

### **5.4.3 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN**

Por naturaleza, el concreto es bastante débil a esfuerzos de tracción, por lo tanto, esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras normales. La tracción tiene que ver con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de la temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tracción.

Máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse. Es sinónimo de carga de rotura por tracción. No debe confundirse con la carga admisible, ésta resulta inferior a la carga de fluencia en una cantidad que se denomina coeficiente de seguridad. El concreto posee muy baja resistencia a la tracción y por tanto esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras convencionales. Sin embargo, la tracción tiene importancia en el agrietamiento del concreto debido a la restricción de la contracción inducida por secado o por disminución de la temperatura.

### **5.4.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA**

Como es difícil de medir, por medio de ensayos directos, debido a la dificultad de montar las muestras y las dudas que existen sobre los esfuerzos secundarios, inducidos por los implementos que le sujetan, en Brasil se desarrolló un método denominado tracción indirecta. El ensayo detallado en la norma **NTC 722**, consiste en cargar a compresión un cilindro convencional de 15x30 cm, a lo largo de dos líneas axiales diametralmente

Opuestas, a través de listones de apoyo de 3mm de espesor, 25 mm de ancho y de longitud igual a la del cilindro. Las láminas de apoyo distribuyen la carga sobre un ancho pequeño, suficiente para evitar concentraciones de carga indebidas, de tal manera que la fuerza de tracción transversal, prácticamente sea constante a lo largo del diámetro vertical.

Si la resistencia a la compresión es por lo menos tres veces la resistencia a la tracción como normalmente sucede en el concreto, se produce la falla en sentido vertical, en la sección transversal.



## **5.5 OTROS ESTUDIOS DEL CONCRETO ENDURECIDO**

### **5.5.1 RESISTENCIA AL CONCRETO MEDIANTE ESCLERÓMETRO O ÍNDICE DE REBOTE**

Es una prueba no destructiva de la resistencia del concreto, la diseño y desarrollo el ingeniero suizo Ernst Schmidt en los años 40, El Esclerómetro está provisto de una pesa tensada con un muelle, funciona cuando la pesa tensada es lanzada contra la superficie para medir su rebote. A pesar de que no se considera un método excesivamente fiable, su uso está muy extendido, Proporciona valores aproximados y se lo emplea principalmente como método de comprobación, siendo menos usado que el ensayo de compresión, Se lo patentó con el nombre SCHMIDT su valor de rebote "R" permite medir la dureza de este material y se ha convertido en el procedimiento más usado. <sup>13</sup>

### **5.5.2 VENTAJAS**

- Es un ensayo no destructivo lo que permite realizar un gran número de determinaciones sin alterar la resistencia, estética y funcionalidad de la estructura.
- Ensayo muy económico.
- Puede ser realizado en horizontal y vertical.
- Permite ensayar muchos elementos en un corto espacio de tiempo.

### **5.5.3 DESVENTAJAS**

- Solo afecta a los primeros centímetros de la estructura (2-3 cm).
- Puede variar según la pericia del operario.
- Se necesita una superficie totalmente lisa para realizar el ensayo.
- No se considera un ensayo fiable.

### **5.5.4 ESCLERÓMETRO DIGITAL**

Frente a los esclerómetros convencionales, la ventaja de incorporar una pantalla en la que se recogen valores mínimos y máximos de una serie cuyo número de medidas establece el usuario. Además de establecer de forma automática tablas de edad del hormigón, descartar valores erráticos, mostrar la desviación estándar y corregir directamente la dirección de impacto, traduce el valor medio R a las

---

<sup>13</sup> Resistencia al concreto mediante esclerómetro o índice de rebote. [En línea]  
[http://www.preoc.es/download/ADS/D50EB090/Ficha%20esclerometro.pdf?cookie\\_check=1](http://www.preoc.es/download/ADS/D50EB090/Ficha%20esclerometro.pdf?cookie_check=1)

unidades convencionales de resistencia, asigna un número a la medida y puede transferir todos los datos a documentos digitales a través de un PC.

### **5.5.5 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA**

La potencia amplificadora de un microscopio óptico está limitada por la longitud de onda de la luz visible. El microscopio electrónico utiliza electrones para iluminar un objeto. Dado que los electrones tienen una longitud de onda mucho menor que la de la luz pueden mostrar estructuras mucho más pequeñas. La longitud de onda más corta de la luz visible es de alrededor de 4.000 angstroms.

La longitud de onda de los electrones que se utilizan en los microscopios electrónicos es de alrededor de 0,5 angstroms. Todos los microscopios electrónicos cuentan con varios elementos básicos. Disponen de un cañón de electrones que emite los electrones que chocan contra el espécimen, creando una imagen aumentada. Se utilizan lentes magnéticas para crear campos que dirigen y enfocan el haz de electrones, ya que las lentes convencionales utilizadas en los microscopios ópticos no funcionan con los electrones. El sistema de vacío es una parte relevante del microscopio electrónico. Los electrones pueden ser desviados por las moléculas del aire, de forma que tiene que hacerse un vacío casi total en el interior de un microscopio de estas características.

Por último, todos los microscopios electrónicos cuentan con un sistema que registra o muestra la imagen que producen los electrones.

### **5.5.6 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN**

Permite la observación de muestra en cortes extrafinos "laminas delgadas", funciona con un haz de electrones producido por una fuente de electrones que puede ser un cañón termoiónico. Una parte de los electrones rebotan o son absorbidos por el objeto y otros lo atraviesan formando una imagen aumentada del espécimen. Para utilizar la microscopía electrónica de transmisión debe cortarse la muestra en capas finas, no mayores de un par de miles de angstroms. Se coloca una placa fotográfica o una pantalla fluorescente detrás del objeto para registrar la imagen aumentada. Los microscopios electrónicos de transmisión pueden aumentar un objeto hasta un millón de veces. Al observar bajo el microscopio podemos encontrar formas diferentes de observar las láminas, encontramos nicols cruzados donde transmite la luz de este a oeste y nicols paralelos que transmite la luz de norte a sur.

### **5.5.7 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO**

La microscopía electrónica de barrido explora la superficie de la imagen punto por punto, al contrario que la microscopía electrónica de transmisión, que examina una gran parte de la muestra. Su funcionamiento se basa en recorrer la muestra con un haz muy concentrado de electrones, de forma parecida al barrido de un haz de electrones. Los electrones del haz pueden dispersarse de la muestra o provocar la aparición de electrones secundarios. Los electrones perdidos y los secundarios son recogidos y contados por un dispositivo electrónico situado a los lados del espécimen. Cada punto leído de la muestra corresponde a un píxel. Cuanto mayor sea el número de electrones contados por el dispositivo, mayor será el brillo del píxel en la pantalla. A medida que el haz de electrones barre la muestra, se presenta toda la imagen de la misma en el monitor. Los microscopios electrónicos de barrido pueden ampliar los objetos 200.000 veces o más. Este tipo de microscopio es muy útil porque, al contrario que la microscopía electrónica de transmisión o los microscopios ópticos, produce imágenes tridimensionales realistas de la superficie del objeto.<sup>14</sup>

### **5.5.8 PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO**

La resistencia a la compresión del concreto se mide fallando probetas cilíndricas de concreto en una máquina sometiendo unas cargas axiales como no lo dice la norma ASTM C-39. En tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga y se reporta en mega pascales (Mpa) o en unidades de Kg/cm<sup>2</sup>. Estas probetas cilíndricas cuando son sometidas a cargas, tienen diferentes formas de ruptura donde encontramos los siguientes tipos de falla: <sup>15</sup>

---

<sup>14</sup> La microscopía electrónica. [En línea]

<http://www.fisica.unam.mx/laboratorios/lmna/didactico/notas/notas%20Gonzalo/3.4%20microscopia%20electronica.pdf>

<sup>15</sup> Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. [On line]

<http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2015/01/C-39.pdf>

### 5.5.8.1 TIPOS DE FALLAS

**a) falla tipo cónica:** conos razonablemente bien formados en ambos extremos, fisuras a través de los cabezales de menos de 25 mm.

Figura: 21. Falla tipo cónica



Fuente: autor

**b) falla tipo cónica y divida:** conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo.

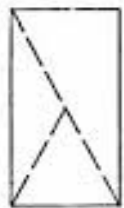
Figura: 22. Falla tipo cónica y divida



Fuente: Autor

**c) falla tipo cónica y transversal:** conos bien formados en un extremo, fisuras transversales a los extremos del cilindro.

Figura: 23 falla tipo cónica y transversal



Fuente: autor

**d) falla tipo transversal:** fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos, golpee suavemente para distinguir del tipo de falla (a).

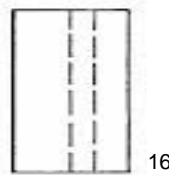
Figura: 24. Falla tipo transversal



Fuente: autor

**e) falla tipo columnar:** fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.

Figura: 25. Falla tipo columnar



Fuente: autor

## 5.6 PETROGRAFÍA DEL CONCRETO

Es importante destacar que la petrografía se basa en el estudio microscópico de unas secciones delgadas. Mediante este estudio también se puede evidenciar información acerca de la relación agua/cemento original de la mezcla, aunque el resultado obtenido es un indicativo.

La petrografía nos puede determinar la exudación excesiva o segregación del agua con respecto al resto del constituyente de la mezcla. Este es un indicativo de una relación agua/cemento alto del orden de 0.69, la cual afecta tanto la resistencia como la durabilidad y se manifiesta por medio de vacíos irregulares o zonas de pasta de cemento localizadas excesivamente porosas.

---

<sup>16</sup> Norma INVÍAS. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto I.N.V.E-410-07

Así mismo la porosidad capilar es otro indicador que se puede identificar por medio de este estudio, se manifiesta mediante la observación de poros capilares de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  de diámetro dentro de la pasta de cemento.

### 5.6.1 UTILIDAD DE LA PETROGRAFÍA

La petrografía permite conocer las proporciones de los constituyentes del concreto en estado endurecido como lo son los agregados, cemento, adiciones y vacíos. La forma en que estos interactúan para proporcionar las propiedades físicas y desempeño del concreto durante su vida útil. La identificación de sus componentes bajo el microscopio permite hacer un análisis sobre la historia del concreto objeto de estudio y cómo influyen cada una de las etapas por las que atraviesa este material desde la fabricación de sus materias primas, pasando por el proceso de mezclado, su colocación en obra, curado y finalmente su comportamiento frente a las condiciones ambientales a las que es sometido.

### 5.6.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE ÓPTICA

- **Luz:** se considera como un fenómeno electromagnético, por lo tanto está constituida por partículas electromagnéticas denominadas fotones que se desplazan a través del espacio a una velocidad de 300.000 Km/s.
- **Interferencia:** las ondas se caracterizan por tener una amplitud y una fase. La amplitud se refiere a la altura de la onda. La fase corresponde a si una onda se está moviendo arriba o abajo en un tiempo determinado. Cuando dos ondas interactúan en una misma dirección, se interfieren la una con la otra, la naturaleza de la interferencia depende de las relaciones entre sus longitudes de onda, amplitudes y fases.
- **Polarización:** es un fenómeno óptico por el cual los rayos luminosos son modificados mediante la aplicación de un polarizador de refracción o de reflexión.
- **Refracción:** es el cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda al pasar de medio a otro con distinto índice refractivo, la cantidad de difracción depende de los índices de refracción de los materiales con los que ha tenido contacto y se describe cuantitativamente por la ley de Snell.<sup>17</sup>
- **Materiales isótropos:** cuando la luz entra en este tipo de materiales el índice de refracción y el color son idénticos en todas las direcciones.

---

<sup>17</sup> César Eduardo Montalvo Arenas. Agosto de 2010. Óptica, concepto de luz. [En Línea]  
[http://www.facmed.unam.mx/deptos/biocetis/PDF/Portal%20de%20Recursos%20en%20Linea/Apuntes/1\\_optica.pdf](http://www.facmed.unam.mx/deptos/biocetis/PDF/Portal%20de%20Recursos%20en%20Linea/Apuntes/1_optica.pdf)

- **Materiales anisótricos:** cuando la luz entra en este tipo de materiales la luz es divide en dos ondas de luz que vibran perpendicularmente una con respecto a la otra.<sup>18</sup>

### 5.7.3 PARTES MICROSCOPIO PETROGRÁFICO

Figura 1. Microscopio petrográfico



Fuente. Los autores

Fuente: Microscopios petrográficos.<sup>19</sup> [En línea]

- **Oculares:** son un sistema de lentes acopladas en la parte superior del tubo del microscopio, cuya función es formar una imagen virtual y ampliada de la imagen real creada por el objetivo.
- **Lente de Bertrand:** se encuentra situada inmediatamente debajo del ocular, puede ser incorporado o removido, se utiliza para ver la interferencia de los materiales.

<sup>18</sup> Isotropía/anisotropía. [En línea]

<http://edafologia.ugr.es/optmine/intro/isoanis.htm>

<sup>19</sup> Microscopios petrográficos. [En línea]

[https://www.google.com.co/search?rlz=1C1CHBD\\_esCO803CO803&biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=k-DDW6m5I8-P5wLGgq2YBQ&q=microscopio+de+petrografia&oq=microscopio+de+petrografia&gs\\_l=img.3...9690.12615.0.12667.15.14.0.0.0.195.1409.0j10.10.0....0...1c.1.64.img..5.1.139...0i8i7i30k1.0.mPm\\_UzGIDkg#imgrc=l35mj7\\_56zcQPM](https://www.google.com.co/search?rlz=1C1CHBD_esCO803CO803&biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=k-DDW6m5I8-P5wLGgq2YBQ&q=microscopio+de+petrografia&oq=microscopio+de+petrografia&gs_l=img.3...9690.12615.0.12667.15.14.0.0.0.195.1409.0j10.10.0....0...1c.1.64.img..5.1.139...0i8i7i30k1.0.mPm_UzGIDkg#imgrc=l35mj7_56zcQPM)

P5wLGgq2YBQ&q=microscopio+de+petrografia&oq=microscopio+de+petrografia&gs\_l=img.3...9690.12615.0.12667.15.14.0.0.0.195.1409.0j10.10.0....0...1c.1.64.img..5.1.139...0i8i7i30k1.0.mPm\_UzGIDkg#imgrc=l35mj7\_56zcQPM

- **Analizador:** está situado encima de los objetos y de la ranura para introducir las láminas auxiliares o compensadoras. Es una lámina polaroide que produce luz polarizada plana. Similar a la del polarizador, pero su luz es en dirección perpendicular.
- **Objetivo sin deformación:** son lentes diseñados para ampliar la imagen de los objetos situados en la platina del microscopio.
- **Polarizador:** se encuentra situado inmediatamente encima del sistema de iluminación y por debajo del condensador. Está rígidamente unido al condensador y a la platina del microscopio. Su función es convertir la luz que sale del sistema de iluminación en luz polarizada plana.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> Microscopios petrográficos. [En línea]

[https://www.google.com.co/search?rlz=1C1CHBD\\_esCO803CO803&biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=k-DDW6m5I8-](https://www.google.com.co/search?rlz=1C1CHBD_esCO803CO803&biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=k-DDW6m5I8-)

[P5wLGgq2YBQ&q=microscopio+de+petrografia&oq=microscopio+de+petrografia&gs\\_l=img.3...9690.12615.0.12667.15.14.0.0.0.195.1409.0j10.10.0....0...1c.1.64.img..5.1.139...0i8i7i30k1.0.mPm\\_UzGIDkg#imgrc=l35mj7\\_56zcQPM:](https://www.google.com.co/search?rlz=1C1CHBD_esCO803CO803&biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=k-DDW6m5I8-P5wLGgq2YBQ&q=microscopio+de+petrografia&oq=microscopio+de+petrografia&gs_l=img.3...9690.12615.0.12667.15.14.0.0.0.195.1409.0j10.10.0....0...1c.1.64.img..5.1.139...0i8i7i30k1.0.mPm_UzGIDkg#imgrc=l35mj7_56zcQPM:)



## 6. METODOLOGÍA

Figura 2. Metodología



Fuente. Los autores.

## 7. CARACTERIZACIÓN CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA-BOYACA

A continuación se presenta tabla con la caracterización de la ceniza volante proveniente de la central eléctrica Termopaipa.

Tabla 1. Caracterización de ceniza termo-Paipa

PARAMETRO	RESULTADO	
% Humedad	0.0	
% Inquemados	13.103	
% Retención malla 325	19.0	
%SiO <sub>2</sub>	48.67	80.49
%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.62	
%Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.2	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0.8	
%CaO	0.9	
Alcalis disponible reportados co006Do %Na <sub>2</sub> O	0.4	
%SO <sub>3</sub>	1.0	

Fuente. Caracterización de la ceniza TERMOPAIPA i, ii y iii. Alienergy (alternativas integrales de energía renovable) PAIPA, COLOMBIA.

## 7.1 FICHA TÉCNICA CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA-BOYACA

**Nombre de material:** Ceniza volante

**Uso del producto:** la ceniza volante se utiliza como material cementoso o puzolana para el cemento y productos de hormigón.

### COMPOSICIÓN, INFORMACION DE LOS INGREDIENTES

Tabla 2.Composición de la ceniza volante

<b>COMPOSICIÓN MINERALÓGICA</b>				
<b>COMPUESTO</b>		<b>CONTENIDO (%)</b>		
<b>Mullita</b>		19.2		
<b>Quarzo</b>		19.7		
<b>Hematita</b>		0.3		
<b>Amorfo</b>		60.8		
<b>TAMAÑO DE PARTICULA</b>				
TAMAÑO		RETENIDO	ACUMULADO (%)	
Tamiz	µm	%	Retenido	pasante
Tamiz 16	1190	0.01	0.0	100
Tamiz 30	595	0.07	0.1	99.9
Tamiz 100	149	3.18	3.2	96.8
Tamiz 170	88	18.81	18.81	81.2
Tamiz 200	74	0.79	19.76	80.4
Tamiz 325	44	9.21	28.8	71.2
Tamiz 400	37	7.36	36.2	63.8
Diámetro efectivo		3.20	D10	320
Coeficiente de uniformidad		1.56	D60	500
Coeficiente de curvatura		1.00	D30	400

Fuente. Ficha técnica de TERMOPAIPA i, ii y iii. Alienergy (alternativas integrales de energía renovable) PAIPA, COLOMBIA.

## 7.2 CLASIFICACIÓN CENIZA

Tabla 3. Clasificación de la ceniza volante

CARACTERISTICA	CLASE C	CLASE F	CENIZA TERMOPAIPA
<b>PROPIEDADES QUIMICAS</b>			
<b>SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	50% min.	70% min.	80.49
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	5% máx.	> 10%	0.4%
<b>SO<sub>3</sub></b>	5% máx.	5% máx.	1.0%
<b>CaO</b>	10%-40%	< 10%	0.9%
<b>Contenido de humedad</b>	3% máx.	3% máx.	0
<b>Perdidas por ignición</b>	< 1%	1% a > 10%	7.8%
<b>Propiedades físicas</b>			
<b>% retenido tamiz # 325</b>	34% máx.	34% máx.	9.21%
<b>Actividad puzolánica %</b>	75% min.	75% min.	-----

Fuente. Norma ASTM C618

**Según norma ASTM C618, la ceniza volante de Termopaipa se clasifica en una ceniza clase F debido al cumplimiento de un alto porcentaje de parámetros encontrados en la norma.**

## 8. DISEÑO MEZCLA METODO A.C.I

### 8.1 ASENTAMIENTO:

Se escoge el asentamiento adecuado según su tipo de estructura y condición de colocación.

Tabla 4. Rango de asentamiento

<b>ASENTAMIENTO (CM)</b>	<b>CONSISTENCIA TIPO DE CONCRETO</b>	<b>GRADO DE TRABAJABILIDAD</b>	<b>TIPO DE ESTRUCTURA Y CONDICIÓN DE COLOCACIÓN</b>
5.0-10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración.

Fuente. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

### 8.2 TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:

Se elige el tamaño máximo nominal.

Tabla 5. Tamaño nominal según tipo de construcción

<b>TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL SEGÚN TIPO DE CONSTRUCCIÓN</b>	
<b>DIMENSIONES MÍNIMAS DEL ELEMENTO (CM)</b>	<b>MUROS REFORZADOS, VIGAS Y COLUMNAS</b>
19-29	19(1/2")-381(1 1/2")

Fuente. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

### 8.3 RELACIÓN AGUA-CEMENTO:

Se escoge el valor recomendado de la relación agua cemento para el diseño.

Tabla 6. Valores relación agua cemento

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS		CONCRETO SIN INCLUSOR DE AIRE (RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO)	CONCRETO CON INCLUSOR DE AIRE (RELACIÓN ABSOLUTA POR PESO)
Kg/cm <sup>2</sup>	PSI		
210	3000	0.58	0.5

Fuente. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

### 8.4 CONTENIDO DE AIRE:

Se elige el contenido de aire recomendado para el diseño.

Tabla 7. Contenido de aire

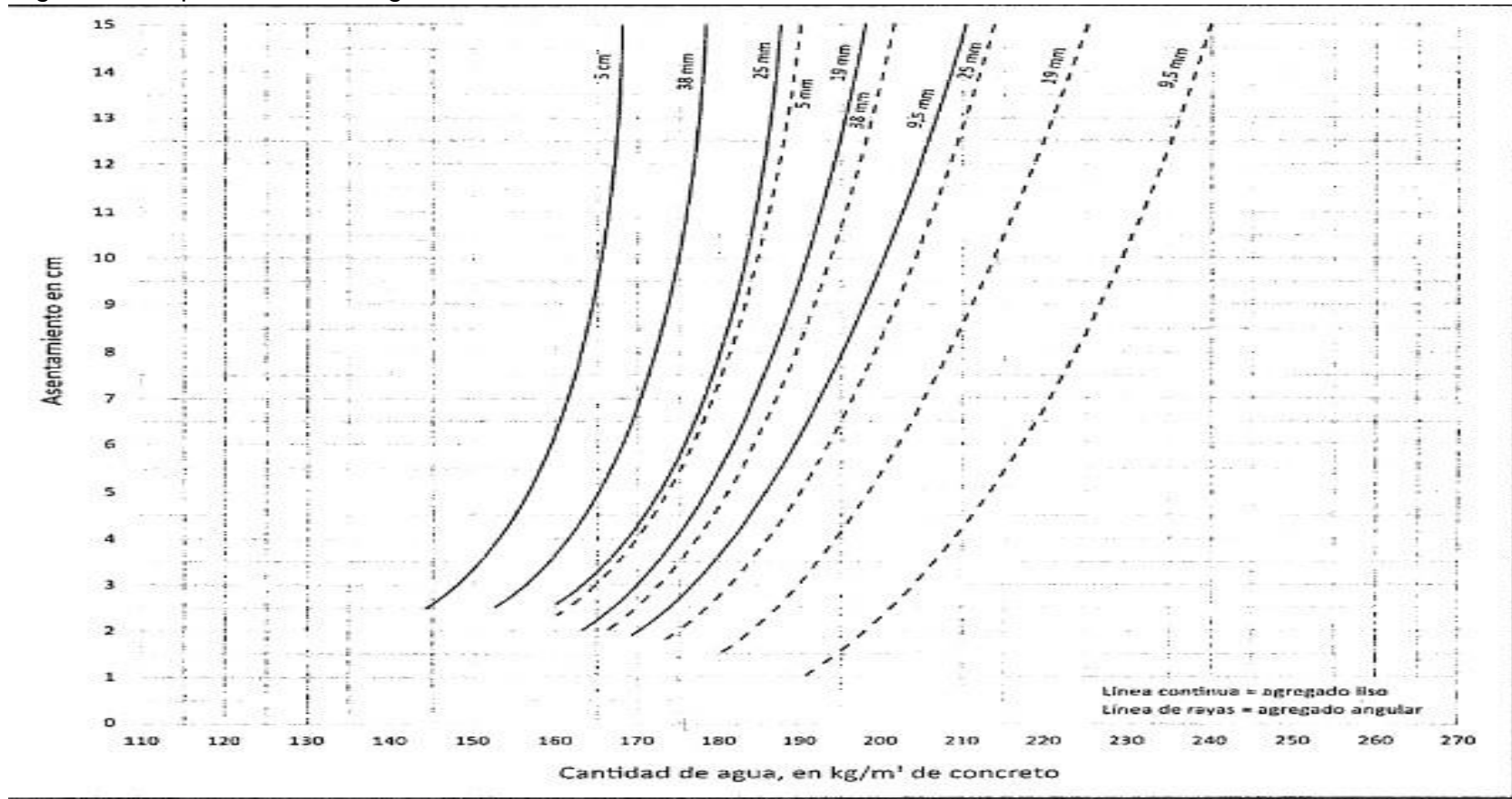
AGREGADO GRUESO		PORCENTAJE PROMEDIO APROXIMADO DE AIRE ATRAPADO	PORCENTAJE TOTAL DE AIRE RECOMENDADO PARA LOS GRADOS DE EXPOCISIÓN		
PULGADAS	MM		SUAVE	MEDIANO	SEVERO
1"	25.4	1.5	3.0	4.5	6.0
1 1/2"	38.10	1.0	2.5	4.5	5.5

Fuente. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

### 8.5. ESTIMACIÓN DE AGUA:

Éste contenido de agua se elige en función del asentamiento obtenido.

Figura 3. Requerimiento de agua de mezclado



Fuente. NIÑO HERNÁNDEZ, Jairo René. Tecnología del Concreto – Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas, Tomo 1, Tercera edición.

## 9. CÁLCULOS DISEÑO DE MEZCLA

### 9.1 CARACTERÍSTICAS

Se diseña una mezcla de concreto, no expuesto a la intemperie ni condiciones ambientales agresivas, para una resistencia mínima a la compresión de 3000 PSI a 28 días de fundida y una distribución de refuerzo tal que el tamaño máximo nominal es de 1 pulgada, a partir de los parámetros según el método A.C.I.

### 9.2 TIPO DE CAMISAS PARA MUESTRAS

Se utilizan unas camisas en acero convencionales para la toma de muestras en concreto según lo exige la norma ASTM-C39 donde debe cumplir con unas dimensiones específicas “20 cm de altura y 10 cm de diámetro”.

Figura 4. Cilindros usados para fundir las muestras



Fuente. Los autores



### 9.2.1 DATOS MATERIAL SELECCIONADO “AGREGADOS”

A continuación se indican los materiales seleccionados para realizar el diseño de mezcla con sus respectivas masas unitarias y para el caso del cemento portland tipo 1 se indicará también su masa unitaria compacta.

Tabla 8. Material seleccionado para diseño de mezcla

MATERIAL SELECCIONADO		
MATERIAL	MASA UNITARIA (kg/m³)	MASA UNITARIA COMPACTA (kg/m³)
GRAVA	1551	-
ARENA	1780	-
AGUA	1000	-
CEMENTO PORTLAND TIPO 1, HOLCIM	1468,48	1736,2

Fuente. Los autores

### 9.2.2 VOLUMEN CILINDROS

$$VC = \pi * r^2 * h$$

$$VC = \pi * 0.05^2 * 0.2 = 0.00157 m^3$$

$$Desperdicio 10\% = 0.0015 m^3 * 0.1 = 0.000157 m^3$$

$$V = 0.00157 + 0.000157 = 0.001727 m^3$$

### 9.2.3 CANTIDAD DE AGUA

Según las características de diseño para un tamaño máximo nominal que varía de 1" a 1/2" y para un asentamiento de rango 5 cm a 10 cm se obtiene una cantidad de agua de 195 litros por metro cubico de concreto. (Ver imagen xxx)

$$\text{MASA DEL AGUA: } Ma = 0.001727 m^3 * 195 \frac{kg}{m^3} = 0.336 kg$$

- MASA DE LA GRAVA:

$$V_g = 0.001727 \text{ m}^3 * 0.84 = 0.00145 \text{ m}^3$$

$$M_g = 0.00145 \text{ m}^3 * 1511 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.19 \text{ kg}$$

- MASA DE LA ARENA:

$$V_a = 0.001727 \text{ m}^3 * 0.55 = 0.000949 \text{ m}^3$$

$$M_a = 0.000949 \text{ m}^3 * 1780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1.689 \text{ kg}$$

### 9.3 CANTIDADES PARA EL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO

Según los cálculos anteriores se obtienen unas cantidades de materiales: cemento, grava, arena y agua para la elaboración de los cilindros de concreto

Tabla 9. Cantidades de materiales para el diseño de mezcla

MATERIAL	1 CILINDRO MASA (KG)	12 CILINDROS MASA (KG)
CEMENTO	0.58	6.96
GRAVA	2.19	26.28
ARENA	1.689	20.268
AGUA	0.336	4.032
<b>TOTAL</b>	4.795	57.54

Fuente. Los autores

### 9.3.1 REMPLAZO DE CEMENTO PORTLAND POR CENIZA VOLANTE

Tabla 10. Porcentajes de reemplazo de ceniza volante por cemento

<b>PORCENTAJE DE ADICION DE CENIZA VOLANTE (%)</b>	<b>CEMENTO MASA(KG)</b>	<b>CENIZA VOLANTE MASA(KG)</b>
<b>0</b>	0.58	0
<b>2</b>	0.56	0.02
<b>4</b>	0.54	0.04
<b>6</b>	0.5452	0.0348
<b>8</b>	0.5336	0.0464
<b>10</b>	0.522	0.058

Fuente. Los autores

## 10. ANALISIS DE RESULTADOS

### 10.1 RESISTENCIAS MÁXIMAS

Los resultados que se observan a continuación, corresponden a las muestras que mayor resistencia a la compresión presentaron. Para cada uno de los porcentajes de inclusión de ceniza volante se pueden observar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio. En las tablas 11, 13, 15, 17 y 19 se pueden evidenciar las dimensiones de cada una de las muestras en donde D es el diámetro, (Dt) el diámetro promedio, (H) la altura y (Ht) la altura promedio. En las tablas 12, 14, 16, 18, 20 y 22 las resistencias a compresión obtenidas en las pruebas de laboratorio, en cada una de las tablas de resistencias máximas se incluyeron las resistencias obtenidas para cada porcentaje de inclusión de ceniza volante y los valores de resistencia obtenidos de las muestras convencionales para poder evidenciar de manera clara las variaciones de resistencia a compresión entre muestra convencional y muestra con inclusión de ceniza volante.

- **Muestras convencionales sin adición de ceniza volante:**

Tabla 11. Medidas de cilindros convencionales sin adición de ceniza volante.

Convencional	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	10,17	10,17	10,17	10,17	20,5	20,4	20,5	20,47	3888	81,23
14 Días	10,03	10,03	10,02	10,03	20,46	20,51	20,5	20,49	3800	78,96
28 Días	10,01	10,03	10,02	10,02	20,39	20,41	20,46	20,42	3700	78,85
56 Días	10,02	10,04	10,03	10,03	20,42	20,45	20,52	20,46	3920	79,01
72 Días	10,03	10,1	10,11	10,08	20,53	20,58	20,54	20,55	3760	79,8
110 Días	10,03	10,03	10,02	10,03	20,8	20,62	20,69	20,70	3780	78,96

Fuente. Los Autores

Tabla 12. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras convencionales sin adición de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
<b>Cargas máximas (PSI)</b>	<b>2245,86</b>	<b>2224,96</b>	<b>3341,88</b>	<b>3489,15</b>	<b>4656,96</b>	<b>4946,25</b>

Fuente. Los Autores

Figura 5. Comportamiento de las muestras convencionales sin adición de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

Como se observa en la figura 5 y partiendo de los resultados obtenidos en la tabla 12, para los cilindros convencionales sin adición de ceniza volante, se observa un incremento en la resistencia a la compresión al paso de las edades de falla establecidas para la realización de los ensayos de laboratorio. Cuando se alcanza la edad de falla de 110 días se presenta la mayor resistencia a la compresión como era de esperarse.

Partiendo de los datos obtenidos en la tabla 12 se podrán comparar las resistencias a la compresión obtenidas en las muestras que fueron adicionadas con 2%, 4%, 6%, 8% y 10% de ceniza volante.

- **Muestras adicionadas con 2% de ceniza volante:**

Tabla 13. Medidas de los cilindros adicionados con 2% de ceniza volante.

2%	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	10,02	9,97	9,95	9,98	20,49	20,06	20,4	20,32	3740	78,22
14 Días	9,98	10	9,95	9,98	20,41	20,37	20,35	20,38	3720	78,17
28 Días	9,99	9,98	9,95	9,97	20,33	20,36	20,38	20,36	3740	78,12
56 Días	10,03	9,98	10,02	10,01	20,38	20,42	20,39	20,40	3840	78,69
72 Días	10,13	10,13	10,11	10,12	20,35	20,27	20,42	20,35	3820	80,49
110 Días	10,11	10,1	10,06	10,09	20,43	20,48	20,34	20,42	3760	79,96

Fuente. Los Autores

Tabla 14. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 2% de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
Cargas máximas (PSI) 2%	2073,06	2593,05	3286,73	4293,02	4365,33	4732,24
Cargas máximas (PSI) Convencional	2245,86	2224,96	3341,88	3489,15	4656,96	4946,25

Fuente. Los Autores

Figura 6. Comportamiento de las muestras adicionadas con 2% de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

Como se puede observar en la figura 6 y partiendo de las resistencias a la compresión obtenidas en la tabla 14, se puede decir que las muestras de concreto adicionadas con 2% de ceniza volante, al alcanzar los 7, 28, 72 y 110 días de falla presentan una disminución en la resistencia a la compresión de 7,69%, 1,65%, 6,26% y 4,32% respectivamente. Para las edades de falla de 15 y 56 días se presenta un aumento en la resistencia a la compresión de 16,54% y 23,03%. Todos los valores de resistencia fueron comparados con los obtenidos en las muestras convencionales para cada edad de falla como presentes en la tabla 12. Esto indica que el aumento de la resistencia a la compresión no se presenta de forma constante y solamente es favorable para las edades de falla de 14 y 56 días.

- **Muestras adicionadas con 4% de ceniza volante:**

Tabla 15. Medidas de los cilindros con 4% de ceniza volante.

4%	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	10,07	10,16	9,98	10,07	20,48	20,52	20,46	20,49	3700	79,64
14 Días	10,08	10,09	10,14	10,10	20,97	20,45	20,47	20,63	3820	80,17
28 Días	10,01	10	10,01	10,01	20,37	20,44	20,37	20,39	3740	78,64
56 Días	10,01	10,03	10,1	10,05	20,4	20,37	20,42	20,40	3800	79,27
72 Días	10,02	9,99	10,07	10,03	20,39	20,39	20,33	20,37	3760	79,96
110 Días	10	10,01	10,03	10,01	20,38	20,39	20,4	20,39	3760	78,75

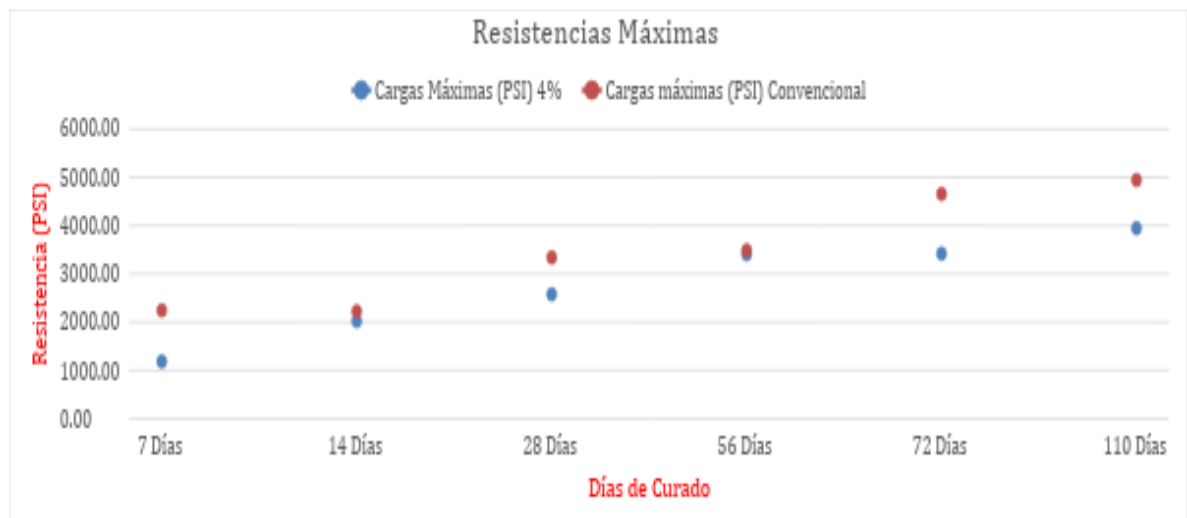
Fuente. Los Autores

Tabla 16. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
<b>Cargas Máximas (PSI) 4%</b>	<b>1187,76</b>	<b>2022,75</b>	<b>2577,53</b>	<b>3409,39</b>	<b>3423,01</b>	<b>3946,95</b>
<b>Cargas máximas (PSI) Convencional</b>	<b>2245,86</b>	<b>2224,96</b>	<b>3341,88</b>	<b>3489,15</b>	<b>4656,96</b>	<b>4946,25</b>

Fuente. Los Autores

Figura 7. Comportamiento de las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

De acuerdo a los datos graficados en la figura 7 correspondientes a las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante, y teniendo en cuenta los datos obtenidos

en la tabla 16 se observa que en todas las edades de falla (7, 14, 28, 56, 72 y 110 días) se obtuvo una disminución en la resistencia a la compresión de 47,11%, 9,08%, 22,87%, 2,28%, 26,49%, 20,20% respectivamente. Todas las resistencias obtenidas para las muestras adicionadas con 4% de ceniza son desfavorables comparadas con las que se obtuvieron para las muestras convencionales como se muestra en la tabla 16 ya que en ninguna edad de falla se presenta un aumento en la resistencia a la compresión.

- **Muestras adicionadas con 6% de ceniza volante:**

Tabla 17. Medidas de los cilindros con 6% de ceniza volante.

6%	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	10,11	10,11	10,12	10,11	20,46	20,41	20,28	20,38	3780	80,33
14 Días	9,99	10,06	9,97	10,01	20,34	20,26	20,4	20,33	3800	78,64
28 Días	10,09	10,13	10,11	10,11	20,35	20,28	20,31	20,31	3790	80,27
56 Días	10,14	10,16	10,17	10,16	20,33	20,4	20,42	20,38	3840	81,02
72 Días	10,01	10,03	10,01	10,02	20,38	20,36	20,47	20,40	3800	78,8
110 Días	10,1	10,1	10,07	10,09	20,16	20,32	20,45	20,31	3700	79,96

Fuente. Los Autores

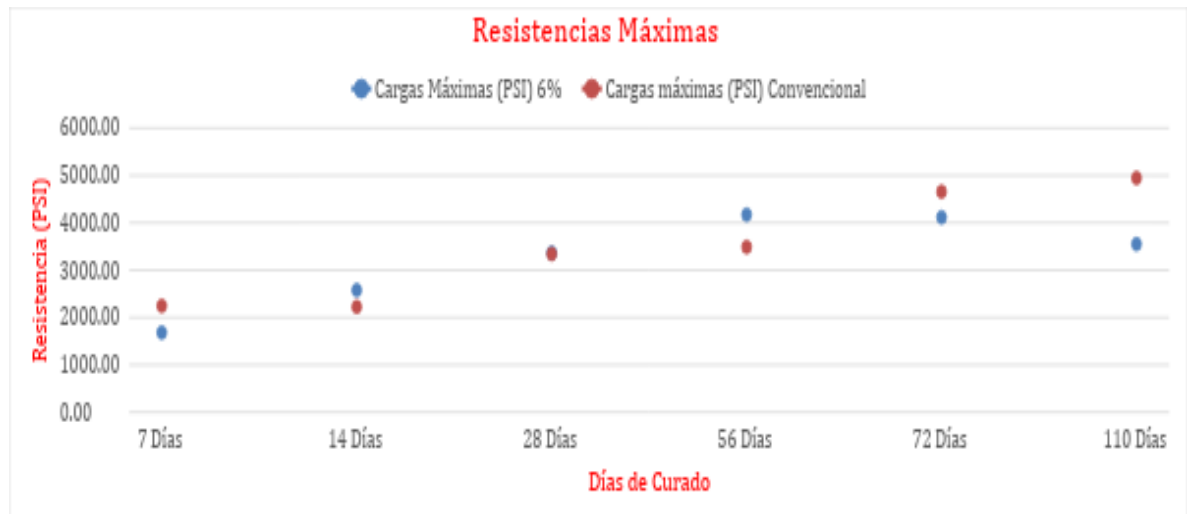
Tabla 18. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
<b>Cargas Máximas (PSI) 6%</b>	<b>1682,30</b>	<b>2577,53</b>	<b>3366,81</b>	<b>4169,93</b>	<b>4115,82</b>	<b>3549,18</b>
<b>Cargas máximas (PSI) Convencional</b>	<b>2245,86</b>	<b>2224,96</b>	<b>3341,88</b>	<b>3489,15</b>	<b>4656,96</b>	<b>4946,25</b>

Fuente. Los Autores



Figura 8. Comportamiento de las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

Como se puede observar en la figura 8 y partiendo de los datos obtenidos en la tabla 18, para las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante, se pudo observar que alcanzadas las edades de falla de 14, 28 y 56 días, se presentaron resistencias a la compresión favorables con un aumento de 15,84%, 0,74%, 19,51% respectivamente para cada edad de falla mencionada. Para las edades de falla de 7, 72 y 110 días, la resistencia a la compresión presenta una disminución de 25,09%, 11,62%, 28,24% respectivamente para cada edad de falla mencionada. Al obtener los resultados mostrados en la tabla 18, se puede decir que la inclusión del 6% de ceniza volante en la mezcla de concreto empieza a aumentar la resistencia a la compresión de forma considerable ya que la cantidad de edades de falla en la que se presenta un incremento en la resistencia a la compresión es mayor, para este caso 14, 28 y 56 días, caso que no se presentó en porcentajes de inclusión inferiores.

- **Muestras adicionadas con 8% de ceniza volante:**

Tabla 19. Medidas de los cilindros con 8% de ceniza volante.

8%	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	9,95	9,97	9,97	9,96	20,31	20,31	20,43	20,35	3740	77,96
14 Días	10,09	10,1	10,13	10,11	20,25	20,42	20,29	20,32	3860	80,22
28 Días	10,07	10,06	10,11	10,08	20,37	20,37	20,52	20,42	3840	79,8
56 Días	9,94	9,96	9,99	9,96	20,28	20,27	20,3	20,28	3760	77,96
72 Días	10,11	10,12	10,14	10,12	20,44	20,43	20,36	20,41	3840	80,49
110 Días	10,02	10,08	10,18	10,09	20,2	20,36	20,33	20,30	3840	80,01

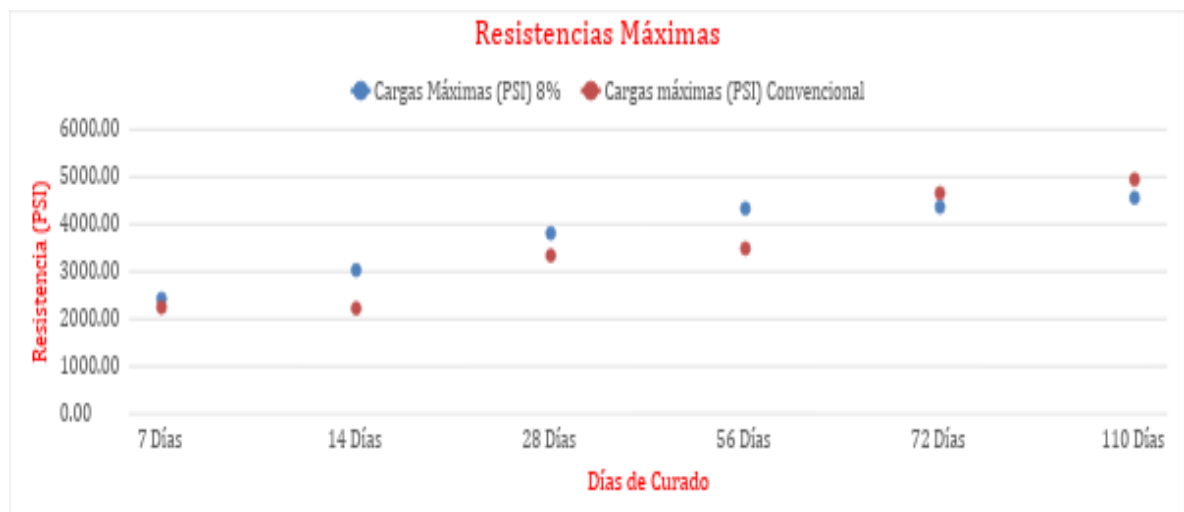
Fuente. Los Autores

Tabla 20. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
<b>Cargas Máximas (PSI) 8%</b>	<b>2426,67</b>	<b>3032,13</b>	<b>3810,24</b>	<b>4333,33</b>	<b>4365,33</b>	<b>4560,22</b>
<b>Cargas máximas (PSI) Convencional</b>	<b>2245,86</b>	<b>2224,96</b>	<b>3341,88</b>	<b>3489,15</b>	<b>4656,96</b>	<b>4946,25</b>

Fuente. Los Autores

Figura 9. Comportamiento de las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

Como se puede observar en la figura 9 y partiendo de los datos obtenidos en la tabla 20, para las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante se obtuvieron los

resultados más favorables superando las resistencias a la compresión presentadas por las muestras convencionales, las edades de falla en las que se presentó el incremento en la resistencia a la compresión fueron: 7, 14, 28 y 56 días aumentando la resistencia en 8,05%, 36,27%, 14,01% y 24,19% respectivamente. Como se puede observar en la tabla 20 para las edades de falla de 72 y 110 días se presenta una disminución en la resistencia a la compresión de 6,26% y 7,80% respectivamente. Esto indica que la inclusión del 8% de ceniza volante en la mezcla de concreto hará que la resistencia a la compresión aumente desde edades de falla tempranas.

- **Muestras adicionadas con 10% de ceniza volante:**

Tabla 21. Medidas de los cilindros con 10% de ceniza volante.

10%	D1 (cm)	D2 (cm)	D3 (cm)	Dt (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	H3 (cm)	Ht (cm)	Peso (g)	Área (cm <sup>2</sup> )
7 Días	9,96	10,01	10,09	10,02	20,31	20,36	20,33	20,24	3700	78,85
14 Días	10,04	10,01	10,05	10,03	20,32	20,46	20,46	20,41	3780	79,06
28 Días	9,91	10,05	10,08	10,01	20,44	20,43	20,46	20,44	3780	78,75
56 Días	9,97	10,02	10,07	10,02	20,58	20,52	20,41	20,50	3760	78,85
72 Días	10,09	10,12	10,17	10,13	20,38	20,32	20,19	20,30	3840	80,54
110 Días	10	10	10,02	10,01	20,25	20,23	20,17	20,22	3700	78,64

Fuente. Los Autores

Tabla 22. Resistencias máximas para cada edad de falla de las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante.

Días de curado	7 Días	14 Días	28 Días	56 Días	72 Días	110 Días
<b>Cargas Máximas (PSI) 10%</b>	<b>2313,61</b>	<b>2734,77</b>	<b>3432,13</b>	<b>3941,70</b>	<b>4194,67</b>	<b>4295,88</b>
<b>Cargas máximas (PSI) Convencional</b>	<b>2245,86</b>	<b>2224,96</b>	<b>3341,88</b>	<b>3489,15</b>	<b>4656,96</b>	<b>4946,25</b>

Fuente. Los Autores

Figura 10. Comportamiento de las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante vs días de curado



Fuente. Los Autores

Como se puede observar en la tabla 22, los valores de resistencia obtenidos para las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante, indican un aumento en la resistencia a la compresión para edades de falla de 7, 14, 28 y 56 días presentando un aumento de 3,01%, 22,91%, 2,70%, 12,97% respectivamente. Para las edades de falla de 72 y 110 días se obtuvo una reducción en la resistencia a la compresión de 9,92% y 13,14%. Los valores de resistencia presentes en la tabla 20 y 22 indican que el aumento en la resistencia a la compresión es mayor para el porcentaje de inclusión del 8% en edades de falla de 7, 14, 28 y 56 días.

## 11. TIPOS DE FALLA OBTENIDOS

Luego de realizar las pruebas a compresión para cada una de las muestras, a continuación se muestra evidencia de los tipos de falla obtenidos para cada uno de los porcentajes de inclusión de ceniza volante y para cada edad de falla, a su vez se indica la resistencia a compresión máxima y el porcentaje en el que se encuentra la muestra para la edad de falla.

Tabla 23. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Transversal	2245,86	74,86

Fuente. Los Autores

Tabla 24. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Cónica y Transversal	2073,06	69,10

Fuente. Los Autores

Tabla 25. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Cónica	1187,76	39,59

Fuente. Los Autores

Tabla 26. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Transversal	1682,3	56,08

Fuente. Los Autores

Tabla 27. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Cónica y Transversal	2426,67	80,89

Fuente. Los Autores

Tabla 28. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 7 días de curado.

Falla de cilindros a los 7 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Cónica y Transversal	2313,61	77,12

Fuente. Los Autores

Tabla 29. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Transversal	2224,96	74,17

Fuente. Los Autores



Tabla 30. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Cónica y Transversal	2593,05	86,44

Fuente. Los Autores

Tabla 31. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Transversal	2022,75	67,43

Fuente. Los Autores

Tabla 32. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Transversal	2577,53	85,92

Fuente. Los Autores

Tabla 33. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Transversal	3032,13	101,07


Fuente. Los Autores

Tabla 34. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 14 días de curado.

Falla de cilindros a los 14 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Transversal	2734,77	91,16

Fuente. Los Autores

Tabla 35. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Cónica y Transversal	3341,88	111,40

Fuente. Los Autores

Tabla 36. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Cónica y Transversal	3286,73	109,56


Fuente. Los Autores

Tabla 37. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Cónica y Transversal	2577,53	85,92

Fuente. Los Autores

Tabla 38.Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Transversal	3366,81	112,23

Fuente. Los Autores

Tabla 39. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Transversal	3810,24	127,01


Fuente. Los Autores

Tabla 40. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 28 días de curado.

Falla de cilindros a los 28 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Transversal	3432,13	114,40

Fuente. Los Autores

Tabla 41. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Cónica y Transversal	3489,15	116,31

Fuente. Los Autores

Tabla 42. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Transversal	4293,02	143,10

Fuente. Los Autores

Tabla 43. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Cónica y Transversal	3409,39	113,65

Fuente. Los Autores

Tabla 44. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Columnar	4169,93	139,00

Fuente. Los Autores

Tabla 45. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Transversal	4333,33	144,44

Fuente. Los Autores



Tabla 46. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 56 días de curado.

Falla de cilindros a los 56 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Cónica y Transversal	3941,7	131,39

Fuente. Los Autores

Tabla 47. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Cónica	4656,96	155,23

Fuente. Los Autores

Tabla 48. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Cónica	4365,33	145,51

Fuente. Los Autores

Tabla 49. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Transversal	3423,01	114,10

Fuente. Los Autores

Tabla 50. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Transversal	4115,82	137,19

Fuente. Los Autores

Tabla 51. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Transversal	4365,33	145,51


Fuente. Los Autores

Tabla 52. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 72 días de curado.

Falla de cilindros a los 72 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Transversal	4194,67	139,82

Fuente. Los Autores

Tabla 53. Registro fotográfico de cilindros convencionales a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
Convencional		Cónica	4946,25	164,88

Fuente. Los Autores

Tabla 54. Registro fotográfico de cilindros con 2% de ceniza volante a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
2%		Cónica	4732,24	157,74

Fuente. Los Autores

Tabla 55. Registro fotográfico de cilindros con 4% de ceniza volante a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
4%		Columnar	3946,95	131,57


Fuente. Los Autores

Tabla 56. Registro fotográfico de cilindros con 6% de ceniza volante a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
6%		Columnar	3549,18	118,31

Fuente. Los Autores

Tabla 57. Registro fotográfico de cilindros con 8% de ceniza volante a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
8%		Transversal	4560,22	152,01

Fuente. Los Autores

Tabla 58. Registro fotográfico de cilindros con 10% de ceniza volante a 110 días de curado.

Falla de cilindros a los 110 días				
Cilindro	Foto	Tipo de falla	Resistencia (psi)	Porcentaje (%)
10%		Cónica y Dividida	4295,88	143,20

Fuente. Los Autores

## **12. ANÁLISIS PETROGRÁFICO**

Para éste análisis petrográfico fueron elegidas 3 muestras, la primera de ellas es la muestra convencional o muestra patrón, la segunda es la adicionada con 6% de ceniza volante y la tercera es la adicionada con 8% de ceniza volante, estas muestras fueron escogidas ya que presentaron altos valores de resistencia a la compresión con respecto a las muestras convencionales. Las secciones delgadas fueron elaboradas en el laboratorio (Minerlab Ltda.) para posteriormente ser llevadas al laboratorio dispuesto por la Universidad Católica de Colombia para el análisis correspondiente de cada sección bajo el microscopio electrónico.

Para cada una de las secciones analizadas bajo el microscopio, se pudo observar que los principales constituyentes de las muestras son: agregados, micro-grietas, ceniza volante, micro-porosidades, vacíos, pasta de cemento, inquemados y agregados. Para poder obtener estos porcentajes, se realizaron un total de 180 puntos a cada sección bajo el microscopio moviendo la muestra cada 4mm en sentido horizontal y cada 1mm verticalmente. Los resultados de las 3 secciones analizadas están presentes en la tabla 59.



Tabla 59. Resultados obtenidos bajo microscopía electrónica

% CENIZA VOLANTE	% MICROGRIETA	% CENIZA	% MICROPOROSIDAD	% VACÍO	% PASTA	% INQUEMADO	% AGREGADO	% TOTAL
0	14,44	0	10,0	12,22	37,22	0	26,11	100
6	13,33	10,56	7,8	11,67	27,22	11,11	18,33	100
8	13,89	17,22	6,1	8,89	20,56	13,33	20,00	100

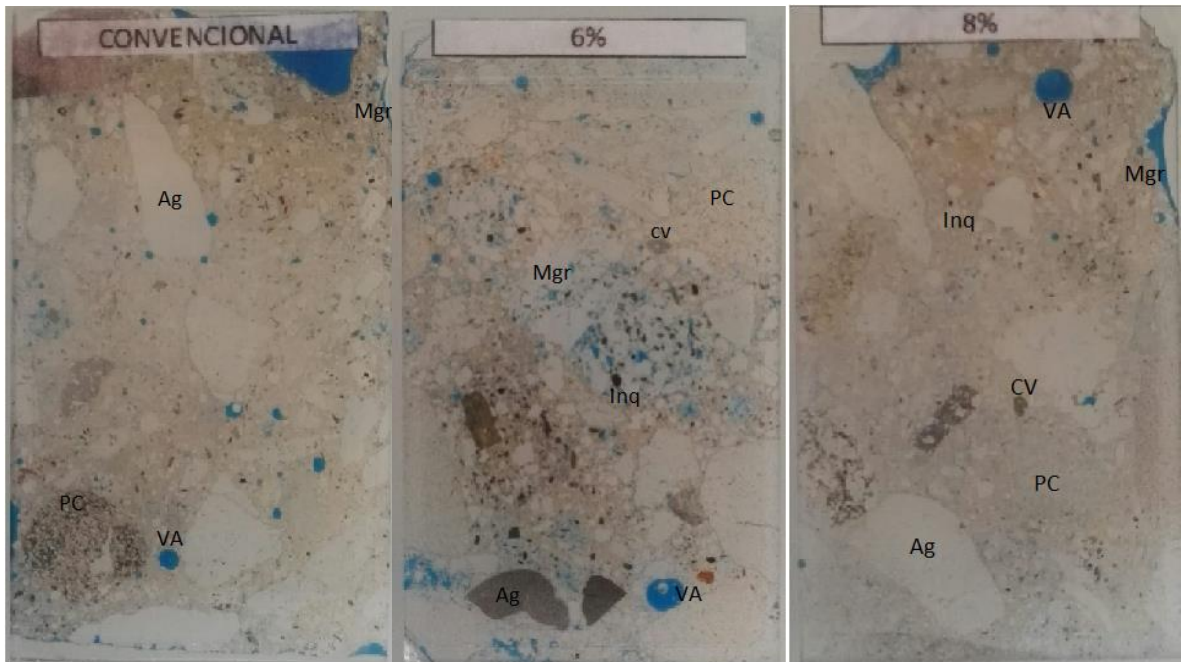
Fuente. Los Autores

## 12.1 ANÁLISIS DE MUESTRAS CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

### 12.1.1 PRINCIPALES CONSTITUYENTES

En la tabla No. 59 Se observan los principales constituyentes encontrados en las muestras de concreto con reemplazo de cemento por ceniza volante, encontramos entre ellos la presencia de microgrietas (mgr), pasta de cemento (pc), ceniza volante (cv), agregados (ag), vacíos (va) e inquemados (inq).

Figura 11. Secciones delgadas

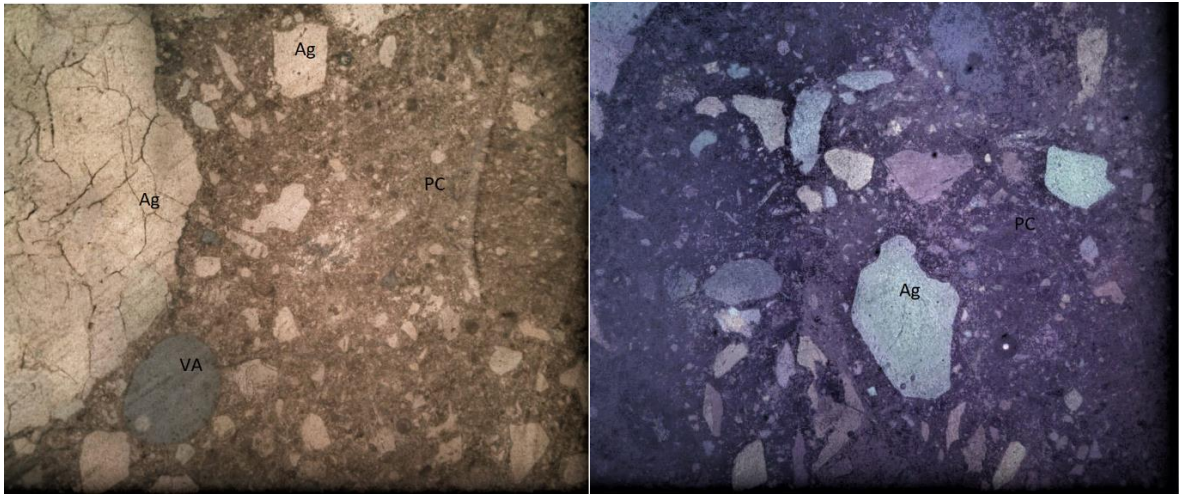


Fuente. Los Autores

En la figura 11 se pueden observar las secciones delgadas que se realizaron en el laboratorio Minerlab. Partiendo de estas secciones fue posible la realización de la petrografía en el microscopio dispuesto por la Universidad Católica de Colombia.

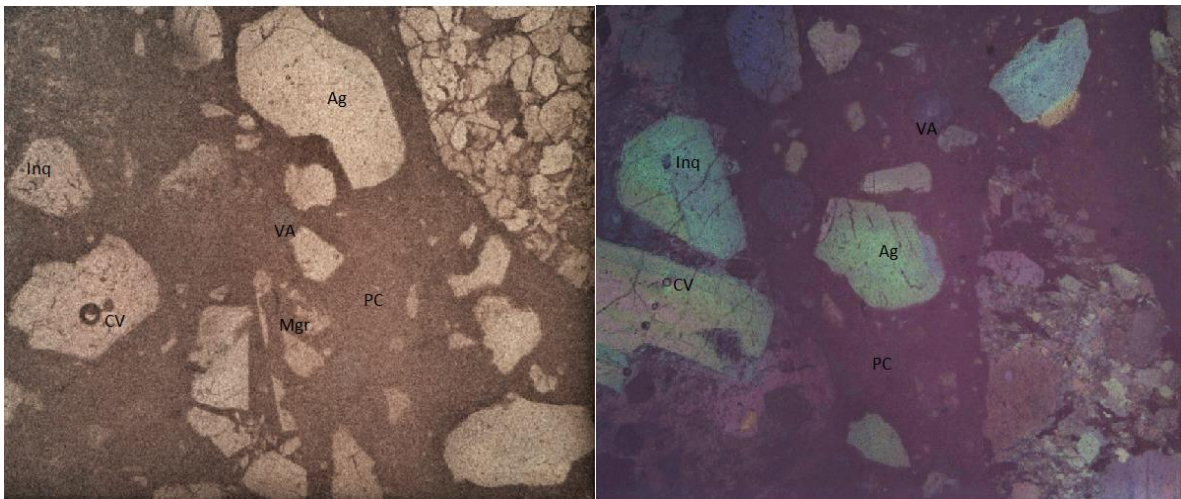
A continuación se podrán observar las imágenes tomadas bajo el microscopio electrónico las cuales se encuentran a una escala de 20  $\mu\text{m}$ .

Figura 12. Nícoles paralelos y nícoles cruzados muestra convencional



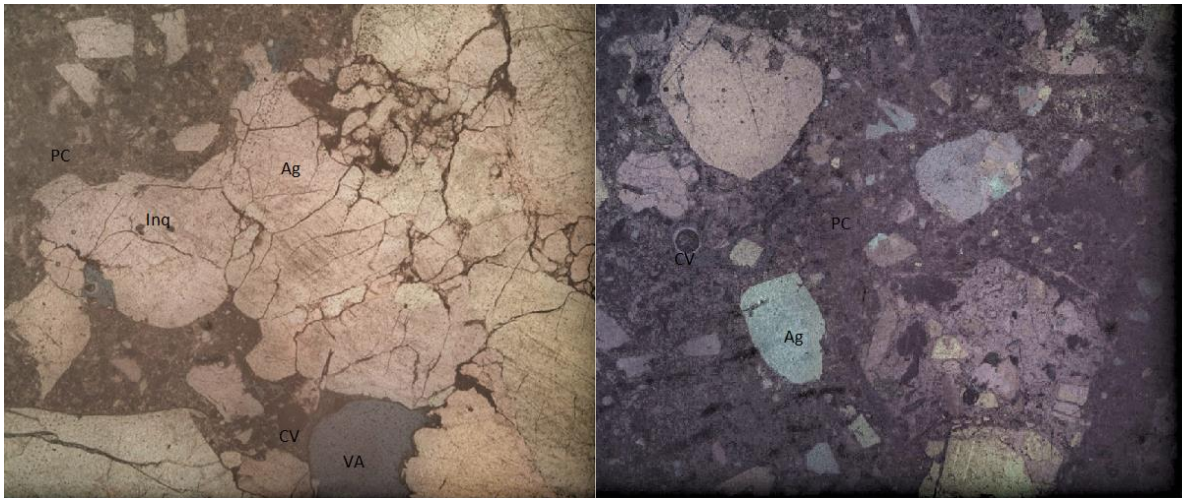
Fuente. Los Autores

Figura 13. Nícoles paralelos y nícoles cruzados muestra 6%



Fuente. Los Autores

Figura 14. Nicales paralelos y nicales cruzados muestra 8%



Fuente. Los Autores

- **Mezcla en general**

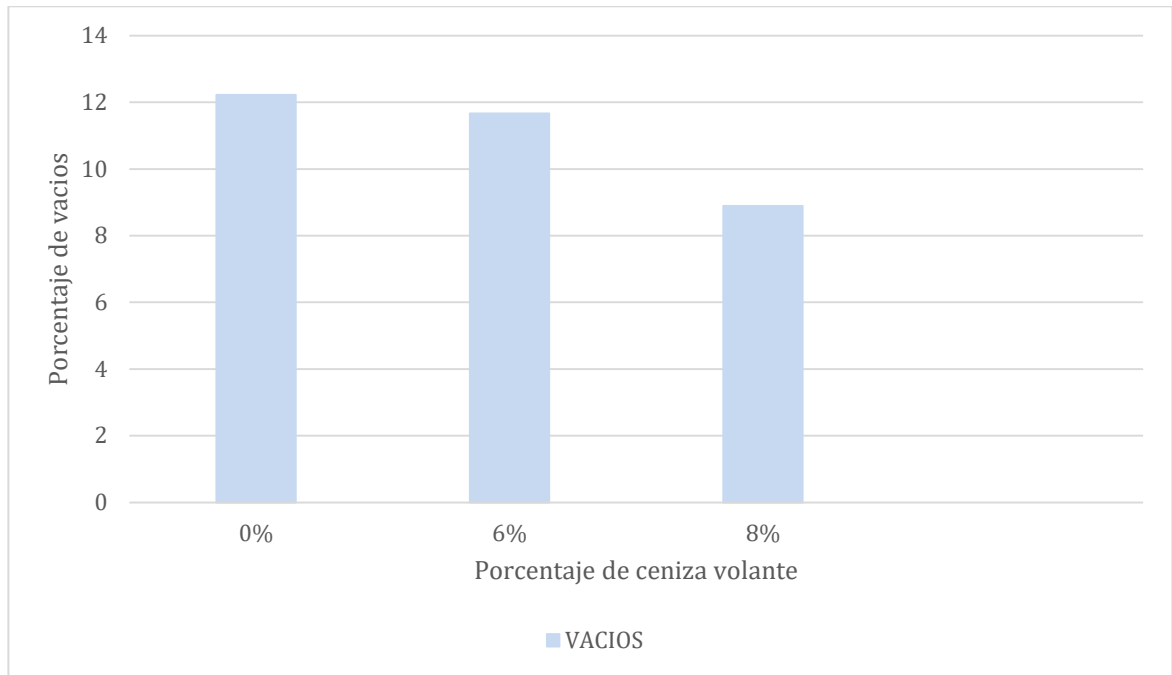
A continuación se realizar una descripción de cada uno de los componentes encontrados en la mezcla de concreto analizados bajo el microscopio electrónico:

Tabla 60. Proporción de vacíos en las muestra.

PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE		
0%	6%	8%
12.22	11.67	8.89

Fuente. Los Autores

Figura 15. Porcentaje de vacíos presentes



Fuente. Los Autores

- **Vacíos de aire**

El contenido de aire se encuentra distribuido en todas las muestras observadas por el microscopio electrónico. De acuerdo a la figura 15 se observan los siguientes resultados: la muestra patrón presenta un porcentaje del 12.22%, en la muestra con adición de ceniza volante del 6% se observa un porcentaje de vacíos del 11.67% y la muestra con una adición de ceniza volante del 8% presenta un 8.89%. Con estos resultados se puede afirmar que la adición de ceniza volante disminuye el 0.92% de vacíos de aire por cada 1% de adición de ceniza volante.

- **Microporosidad**

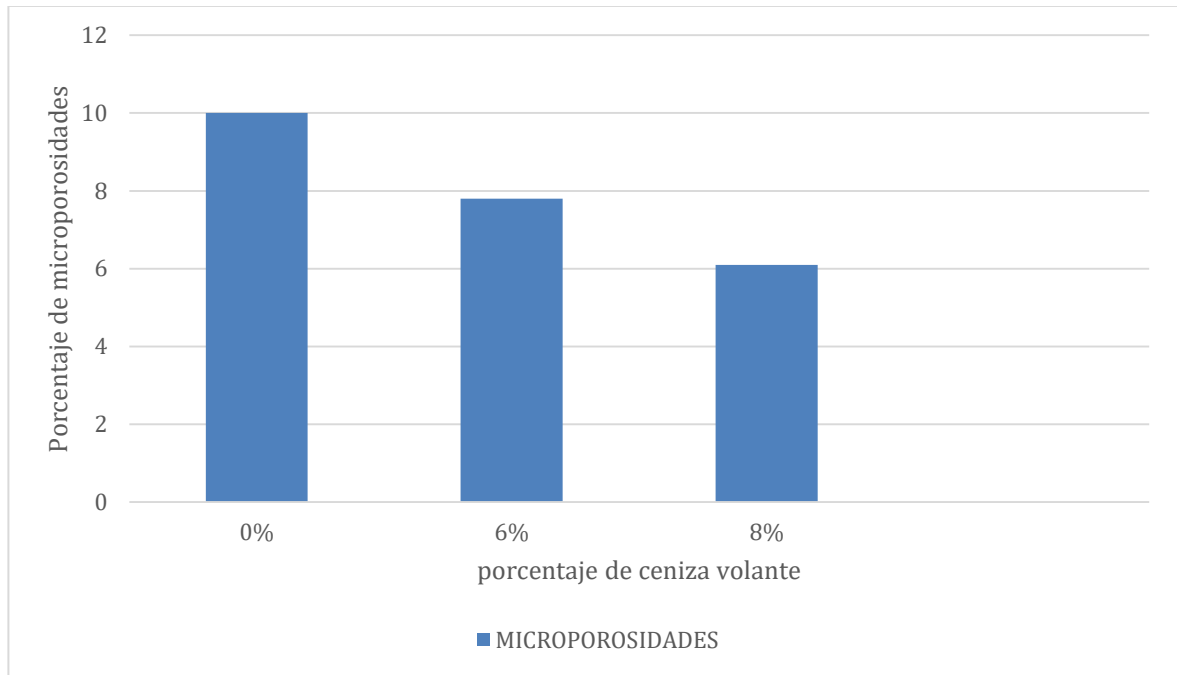
La micro porosidad se da por la exudación y es observada en forma de capilares y microporos.

Tabla 61. Porcentaje de microscopia en las muestras.

PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE		
0%	6%	8%
10	7.8	6.1

Fuente. Los Autores

Figura 16. Porcentaje de microporosidades



Fuente. Los Autores

De acuerdo con los datos obtenidos en la gráfica figura 16 se realizó el análisis de la presencia de microporosidades en las muestras de concreto, observamos que a medida que se aumenta la adición de ceniza volante dentro de la mezcla de concreto, hay una reducción notoria de microporosidades con respecto a la muestra patrón. En cuanto a los resultados las mezclas sin adicionar tienen un porcentaje alto del 10% el cual disminuye al 7.8% con la adición del 6% de ceniza volante, nuevamente al aumentar el porcentaje de adición de ceniza volante al 8% la pérdida de microporosidades llega al 6.1%, con lo cual se puede concluir que la mezcla

presenta un menor porcentaje de microporosidades con porcentajes mayores de ceniza volante.

- **Microgrietas**

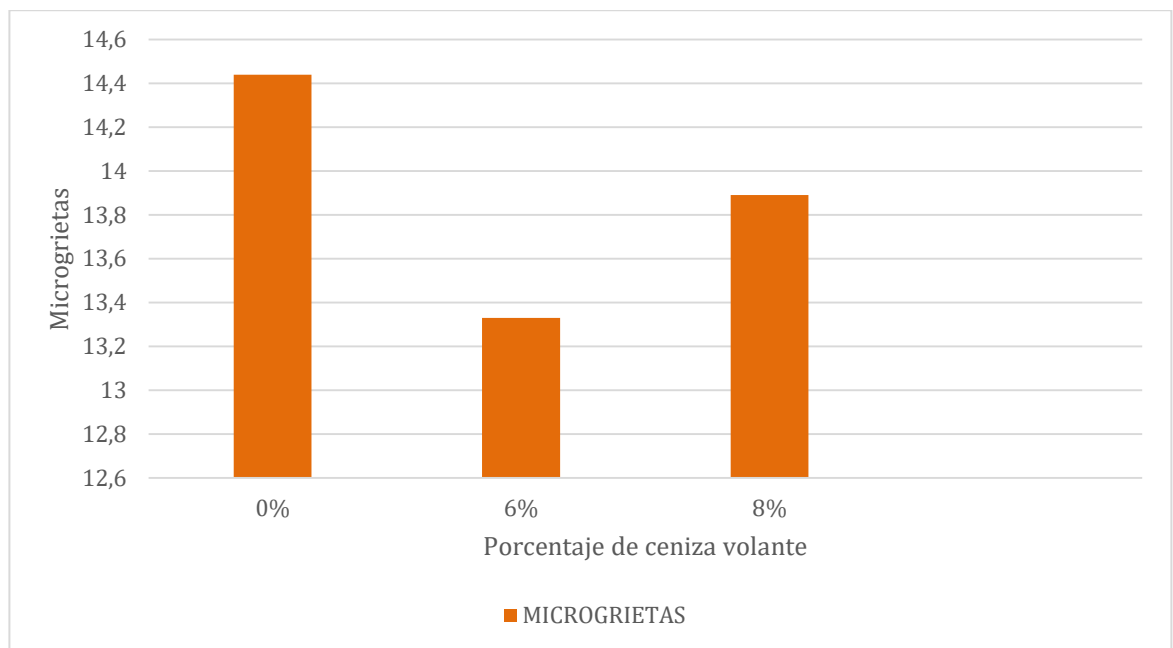
Se observa a nivel del microscopio la presencia de microgrietas, la mayoría perpendiculares en los agregados.

Tabla 62. Porcentaje de microgrietas en las muestras.

PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE		
0%	6%	8%
14.44	13.33	13.89

Fuente. Los Autores

Figura 17. Porcentaje de microgrietas



Fuente. Los Autores

- **Ceniza volante e inquemados**

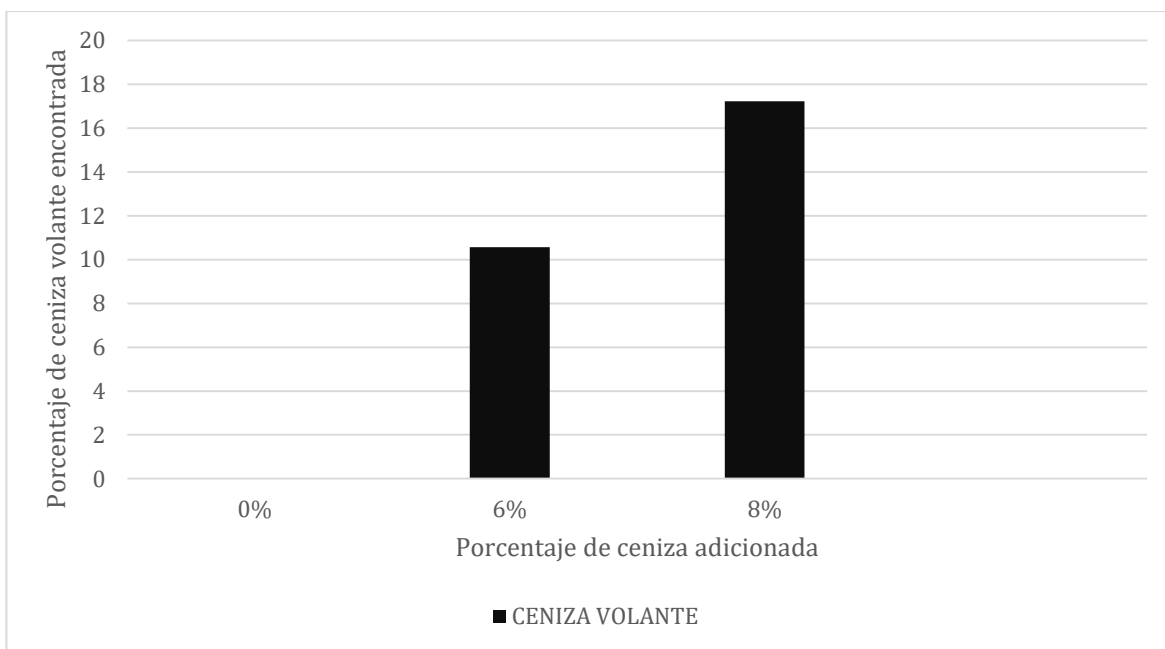
Al observar la ceniza volante de Termopaipa a través del microscopio electrónico, se puede ver que la ceniza se presenta en forma redondea, solidas de color negro. De acuerdo a la tabla No. 62 se obtienen unos porcentajes de ceniza volante con una adición del 6% un 10.56% de ceniza y con una adición del 8% un 17.22% de ceniza volante. Mientras que los inquemados se caracterizan por ser de forma irregular a semiredonda y color oscuro. De acuerdo a la tabla No. 63 se obtiene con una adición de ceniza volante del 6% un 11.11% de inquemados y con una adición del 8% de ceniza volante un 13.33% de inquemados afirmando los resultados obtenidos en la caracterización de la ceniza volante.

Tabla 63. Porcentaje de la ceniza encontrada en las muestras.

PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE		
0%	6%	8%
0.0	10.56	17.22

Fuente. Los Autores

Figura 18. Porcentaje de ceniza volante



Fuente. Los Autores



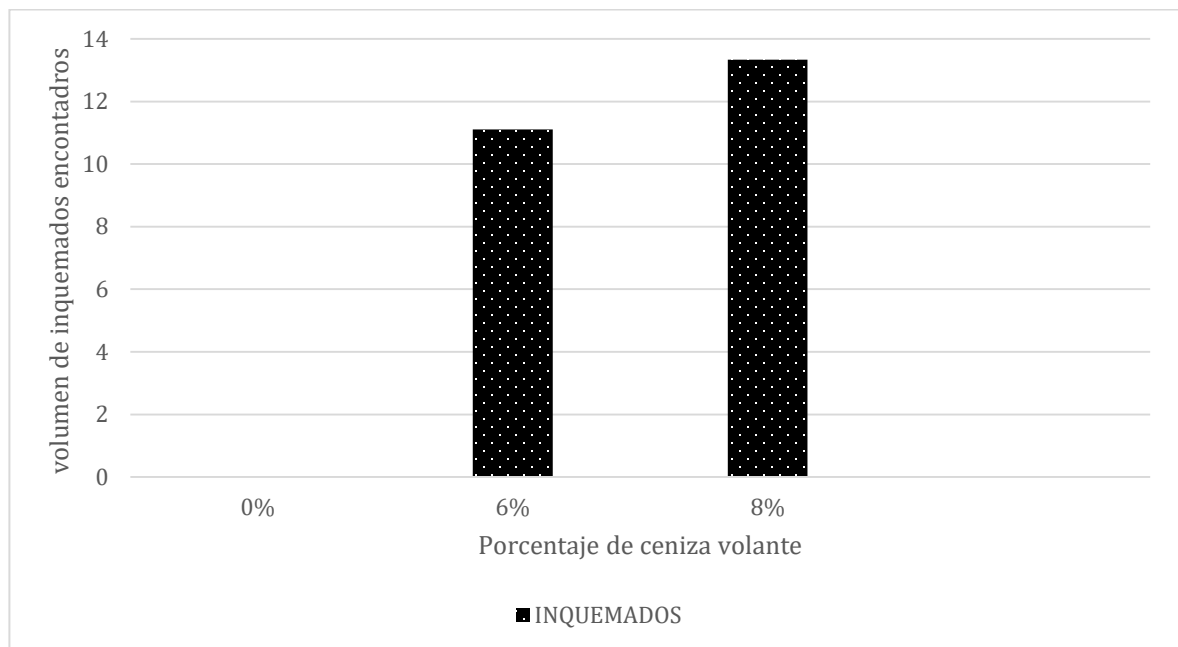
De acuerdo con los datos obtenidos se observa que al incrementar el porcentaje de ceniza volante dentro de la mezcla de concreto, se produce un aumento en la presencia de cenizas volantes y de inquemados en un porcentaje mayor respecto a la muestra patrón, tanto en los valores de ceniza volante como de inquemados. En las figuras 16 y 17 se evidencia resultados cuantitativos obtenidos del análisis petrográfico de las muestras son consecuentes con la proporción de adición de ceniza volante incluida en cada una de las muestras.

Tabla 64. Porcentaje de inquemados en las muestras.

PORCENTAJE DE CENIZA VOLANTE		
0%	6%	8%
0	11.11	13.33

Fuente. Los Autores

Figura 19. Porcentaje de inquemados

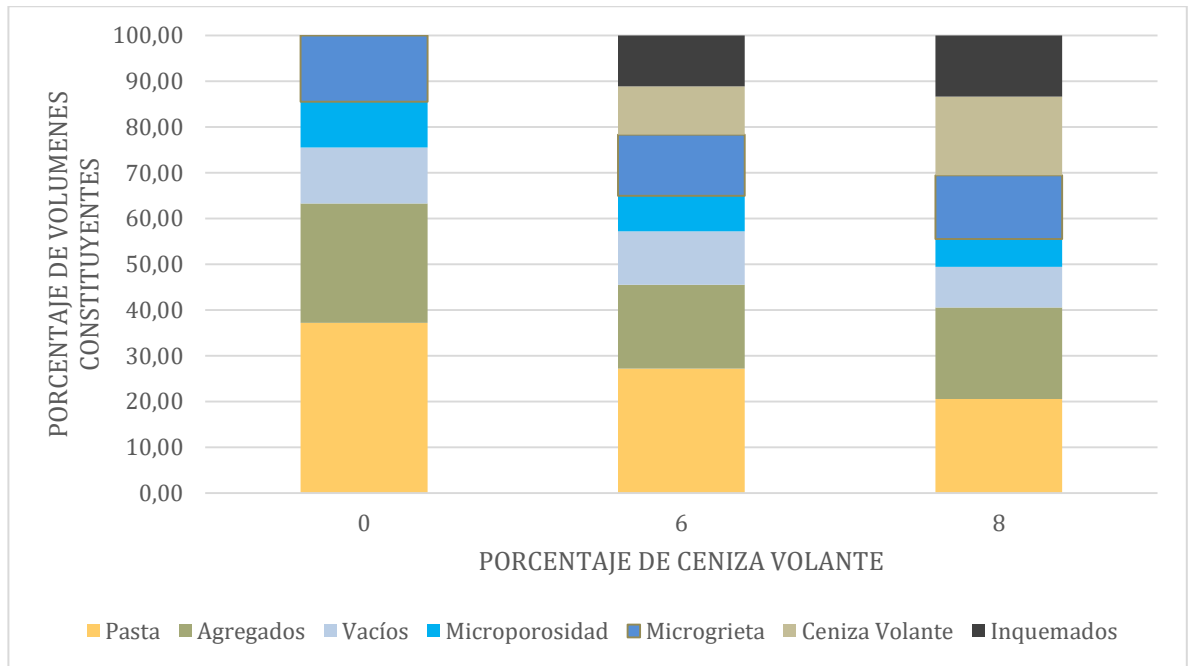


Fuente. Los Autores

Con estos resultados se puede observar una relación entre los inquemados con las microgrietas en las mezclas adicionadas con ceniza volante, donde estos dos parámetros tienen comportamientos similares con variaciones mínimas, afirmando así que a mayor porcentaje de inquemados mayor porcentaje de microgrietas en las mezclas.

## 12.1.2 VOLUMEN DE CONSTITUYENTES PRINCIPALES

Figura 20. Principales constituyentes



Fuente. Los Autores

- **Pasta de cemento:** El porcentaje de pasta en la gráfica se representa por el color naranja y los resultados obtenidos son los siguientes:

Las muestras sin adición de ceniza volante registran un 37% de volumen de pasta de cemento en la muestra.

La muestra con una adición de ceniza del 6% registra una pérdida de la pasta de cemento en un 10% dando como resultado el 22% de volumen de pasta, la muestra con una adición de ceniza del 8% registra una pérdida de la pasta de cemento en un 16% dando como resultado el 20% de volumen de pasta.

Con estos resultados se puede afirmar que la adición de cenizas volantes disminuye el volumen de pasta de las muestras, concluyendo así que la reducción de la pasta de cemento es de 1.6% por cada 1% de adición de ceniza volante.

- **Agregados:** En la figura 20 el porcentaje de agregados es representado por el color verde claro y muestran el siguiente comportamiento:

Las muestras sin adición presentan un volumen de agregados del 26% con una adición del 6% de ceniza volante reduce el volumen de pasta y se aumenta el volumen de agregados, aumentando este volumen con respecto al diseño testigo p patrón sin adición un 4%.

Las adiciones del 6% y 8% de ceniza volante tienen un comportamiento similar en cuanto a los agregados, ya que el 65 presenta un volumen de agregado del 19% y la muestra de 8% de ceniza volante reflejan un 20% de volumen de agregado. Comparando los parámetros de volumen de pasta y agregados se puede afirmar que los volúmenes de adición de ceniza al 6% y 8% tienen un comportamiento similar manteniendo variaciones sin grandes desviaciones en su resultado.

Los anteriores análisis demuestran un aumento en la cantidad de agregados, el cual puede ser causado por la no determinación de una zona de corte en donde se presente homogeneidad de los componentes del concreto, realizando cortes en zonas donde hay mayor predominio de agregados, los cuales al realizar la lectura de puntos sobre el microscopio electrónico, generan una mayor visualización de los agregados en la sección.

- **Vacíos:** El comportamiento de los vacíos en las muestras tanto testigo como adicionadas con ceniza volante, están representadas con el color azul claro y el análisis de su comportamiento es el siguiente:

El parámetro de vacíos para las muestras nos muestra unos datos altos el cual evidencia que en el momento de fundir las muestras no se procedió a sacar el contenido de aire en las muestras.

La muestra adicionada con 8% de ceniza volante presenta el mejor comportamiento en vacíos, su volumen es el menor en comparación con las otras muestras.

- **Microporosidad y Microgrietas:** Estos parámetros son representados en color azul y azul oscuro y los resultados evaluados son los siguientes:  
Las microgrietas y microporosidades para la muestra sin adición de ceniza volante tienen unos porcentajes del 10% y 14%.

Comparando el resultado anterior con la adición de ceniza volante al 6% y 8% se evidencia una disminución de microgrietas y microporosidades en un 2%, mejorando así las condiciones iniciales de la muestra.

Relacionado con los resultados de los parámetros anteriormente analizados, los resultados obtenidos para microgrietas y microporosidades en las muestras adicionadas con 6% y 8% nuevamente se evidencia la similitud en los resultados obtenidos.

- **Inquemados:** este parámetro se puede identificar por el color negro, donde el comportamiento de las diferentes mezclas adicionadas con ceniza volante a los quemados fue el siguiente:

Para la muestra adicionada con un 6% de ceniza volante los quemados llegaron a un 11% y tienen un comportamiento similar a la distribución de la ceniza volante, microgrietas y microporosidades, dentro del volumen de las muestras.

Para la muestra adicionada con un 8% de ceniza volante los quemados llegaron a un 13% y tienen un comportamiento similar a la distribución de la ceniza volante, microgrietas y microporosidades, dentro del volumen de las muestras.

## CONCLUSIONES

La ceniza volante que se obtiene en la central eléctrica Termopaipa, se clasifica como tipo F Según norma ASTM C618 por cumplir con las características de dióxido de silicio, óxido de aluminio, óxido férrico, óxido de azufre, óxido de calcio, contenido de húmeda, pérdidas por ignición y porcentaje retenido en tamiz # 325.

De acuerdo a los datos graficados en la figura 7 correspondientes a las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante, y teniendo en cuenta los datos obtenidos en la tabla 16, se observa que en todas las edades de falla (7, 14, 28, 56, 72 y 110 días) se obtuvo una disminución en la resistencia a la compresión de 47,11%, 9,08%, 22,87%, 2,28%, 26,49%, 20,20% respectivamente. Todas las resistencias obtenidas para las muestras adicionadas con 4% de ceniza volante son desfavorables comparadas con las que se obtuvieron para las muestras convencionales como se muestra en la tabla 16 ya que en ninguna edad de falla se presenta un aumento en la resistencia a la compresión.

Para las muestras adicionadas con 6% de ceniza volante, se tienen resistencias a la compresión favorables (ver tabla 18) para edades de falla de 14, 25 y 56 días obteniendo resistencias mayores a las obtenidas en las muestras convencionales (ver tabla 12) lo que indica que al realizarse el reemplazo de 6% de ceniza volante por cemento se presenta un incremento en la resistencia a la compresión para las edades de falla mencionadas.

Las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante presentan las resistencias a la compresión más favorables con un incremento de la resistencia desde los 7 días de falla hasta llegar a los 56 días de falla, presentando las resistencias a la compresión más altas comparadas con las muestras convencionales.

La presencia de inquemados en la pasta de cemento genera debilidad en las muestras de concreto. Esto se manifiesta en la poca adherencia inquemados-pasta de cemento, la identificación de microgrietas y capilares en el entorno de los inquemados presentes en las muestras de concreto.

Se encontró que a medida que se incrementa la adición de ceniza volante, se aumenta la presencia de microgrietas. La muestra adicionada que presenta un mejor comportamiento es la que contiene una adición de ceniza volante del 6%.

El 8% de reemplazo de ceniza volante por cemento indica que se puede diseñar un concreto que presente condiciones óptimas en cuanto a su resistencia a la compresión para edades de falla de 7, 14, 28 y 56 días ya que se tienen resistencias mayores a las presentes en las muestras convencionales. Para las edades de falla de 72 y 110 días no se obtuvo un incremento en la resistencia a la compresión pero se presentan resistencias similares a las obtenidas en las muestras convencionales, caso que no se presenta en ninguno de los otros porcentajes de reemplazo estudiados.

Al realizarse una reemplazo del 8% de ceniza volante por cemento en la mezcla de concreto, se está mitigando el impacto ambiental que se presenta durante la producción de cemento, ya que al adicionarse el 8% de ceniza volante conllevará a que se tenga que usar menor cantidad de cemento, esto quiere decir que se reducirá la producción del mismo y por ende se reducirán las emisiones de gases producidas durante su producción.

Se observa que a medida que se aumenta el contenido de adición de ceniza volante dentro de la mezcla de concreto, se presenta una disminución considerable de las microporosidades con respecto a la muestra patrón.

Para las muestras adicionadas con 10% de ceniza volante se obtuvieron resistencias a la compresión favorables para edades de falla de 7, 14, 28, y 56 días pero a diferencia de las muestras adicionadas con 8% de ceniza volante, el incremento en la resistencia a la compresión no es tan notorio como lo es en el caso del 8% de reemplazo. Para las edades de falla de 72 y 110 días no se presenta un incremento en la resistencia a la compresión, se siguen presentando mayores resistencias en las muestras convencionales para estas edades de falla.

## **RECOMENDACIONES**

Evaluar el comportamiento de la ceniza volante en porcentajes de reemplazo de 1, 3, 5, 7 y 9% para de este modo comparar si se presentan resistencias a la compresión mayores a las obtenidas para porcentajes de reemplazo de 2, 4, 6, 8 y 10%.

Para poder mitigar el impacto ambiental producido por las cenizas volantes provenientes de la central eléctrica TERMOPAIPA, se recomienda realizar más estudios de este tipo para poder darle un uso adecuado a esta ceniza y de este modo promover el desarrollo de las obras civiles en el país.

## BIBLIOGRAFÍA

Agudelo Moreno Angie Angélica, Espinosa Torres Bryan Gabriel. Trabajo de investigación “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA”, Universidad Católica de Colombia, Mayo de 2017.

Ammar Motorwala, Vineet Shah, Ravishankar Kammula, Praveena Nannapaneni, Prof. D. B. Rajiwala, Volume 3, Issue 1, January 2013.

ASTM C618-15, Especificación estándar para carbón cenizas volantes y cruda o calcinada natural puzolana para hormigón, ASTM international, west conshohocken, pag, 2015, [www.astm.org](http://www.astm.org)

CHÁVEZ VELASQUEZ, Camilo Andrés y Guerra Maestre, Yohana Liz. Producción, propiedades y usos de los residuos de la combustión del carbón de Termotasajero. Universidad Santo Tomás, 2014.

CORONA ZAZUETA, Miguel Ángel. Concretos dosificados con cemento Portland y ceniza volante, online. cited 22 July 2014.

DURAN BERNAL Alejandro José; Determinación del porcentaje óptimo de remplazo de cemento por ceniza volante (Termopaipa) en hormigón de alta resistencia. Tesis magister en ingeniería – estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, 2004.

DURAN HERRERA Ninfa Piedad; VELASQUEZ AMADO Norexy, Evaluación de la aptitud de concretos, reemplazando parcialmente el cemento portland por cenizas volantes y cenizas de bagazo de caña de azúcar, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia 2016.

Effect of fly ash on Portland cement systems Part I. Low-calcium fly ash. Danish Technological Institute, Building Technology Division, Concrete Centre, Taastrup, Denmark, Cement and Concrete Research 29 (1999) 1727–1736.

García, Carlos y Ponce de León, Juan. “Las cenizas como aditivo en el hormigón”. Tesis Ingeniero Civil. Universidad de los Andes. Bogotá 1978.



Gómez Cortes, José Gabriel. "Durabilidad del Concreto". Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. En revisión. Bogotá, 2003.

Hearn, Nataliya; Detwiler, Rachel; and Sframeli, Carmen. Water permeability and microstructure of three old concretes". In: Cement and Concrete Research. Vol 24. N.4. pp 633-640, 1994".

Instituto Colombiano De Normas Técnicas (ICONTEC), "Ensayo de Resistencia y Comprensión de Cilindros Normales de Hormigón" ICONTEC. NTC.673 1990.

International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal. ALKALI Activated FLY-ASH Based Geopolymer Concrete.

LÓPEZ GARCÍA. V, Estudio de los efectos de algunos materiales componentes en las propiedades mecánicas del hormigón de altas prestaciones desde edades tempranas., tesis presentada a la escuela técnica superior de ingenieros industriales, para optar al grado de doctor, 2003.

LORENZO GARCÍA, M. P., Influencia de dos tipos de cenizas volantes españolas en la microestructura y durabilidad de la pasta de cemento portland hidratado., Instituto Eduardo Torroja CSIC, Madrid (España), 1993.

MELGAREJO Joan Charles, Atlas de asociaciones minerales en lámina delgada. 2003

MOLINA. O, La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento pórtland en la durabilidad del hormigón., tesis presentada a la Universidad Politécnica de Madrid, para optar el grado de doctor, 2008.

Mónica Aineto Goñi. Trabajo de doctorado "Escorias y cenizas volantes de gasificación de carbón. Aplicación a la producción de áridos ligeros expandidos", Universidad de Castilla La Mancha. Enero de 2009.

Montejo Fonseca, Alfonso tecnología y patología del concreto armado (primera edición) Universidad Católica de Colombia 2013.

Mustafa Sahmaran, Ismail Ö. Yaman, Mustafa Tokyay. Transport and mechanical properties of self consolidating concrete with high volume fly ash. Article in Cement and Concrete Composites, February 2009.

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

Reportes y artículos de la AMCI (asociación mexicana de concretos independientes) referentes al tema concretos con cenizas volantes – “Artículo- Mejorando el concreto con ceniza volante” - Javier Molinari.

Sánchez de Guzmán, tecnología del concreto y del mortero (segunda edición) pontificia universidad javeriana, Colombia 1993.

Tognon G., "Combined lime and specific surface área of the hydration products of lime-puzzolana and lime-fly ashes mixes", Proc.Sympos.Mater. Res.Soc., pp.145-15.

VELAZQUEZ VALLEJO Leonardo Fabio; DE LA CRUZ MORALES Javier Fernando; SANCHEZ MORALES Jhon Fredy; MARIN LAVERDE Mauricio Alberto, Remoción de carbón inquemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón, revista energética número 38. Diciembre de 2007.

Valderrama Claudia Patricia, Torres Agredo Janneth, Mejía de Gutiérrez Ruby. INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN. “Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados”, VOL. 31 No. 1 APRIL 2011.

Y. KEUN-HYEOK. L. KYUNG-HO, S. JIN-KYU Y G. MIN-HO, “Properties and sustainability of alkali-activated slag foamed concrete”, Journal of Cleaner Production, vol. 68, pp. 226-233, 2014.

Componentes de la ceniza en el concreto.

[En línea]. <http://www.ehowenespanol.com/ponen-cenizas-concreto2007>.

Construdata, aditivos en muros de concreto [En línea]  
<http://www.construdata.com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co:2048/BancoConocimien>


Cemex Colombia, componentes del cemento. [En línea]  
<https://www.cemexcolombia.com/productos/concretos>>

Cemex Colombia, agregados. [En línea]  
<https://www.cemexcolombia.com/productos/agregados>>

Aditivos en muros de concreto. Construdata. [En línea]  
<http://www.construdata.com.ezproxyucdc.ucatolica.edu.co:2048/BancoConocimiento/A/aditivosmurosconcreto/aditivosmurosconcreto.asp>>

## ANEXOS

### Anexo 1. Cilindros convencionales:



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
Vigilada Misericordiosamente

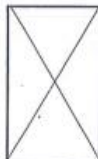
LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL  
2018

GRUPO ESCORIA 1

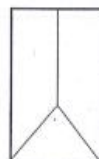
CÓDIGO ORDEN: _____	FECHA DE ENSAYO: <u>27-05-2018</u>
EQUIPO UTILIZADO	
BALANZA: _____ <input checked="" type="checkbox"/>	MAQUINA UNIVERSAL: _____ <input checked="" type="checkbox"/>
CALIBRADOR: _____ <input checked="" type="checkbox"/>	FLEXÓMETRO: _____ <input checked="" type="checkbox"/>
DESCRIPCIÓN: <u>Cilindros convencionales sin adición de ceniza volante.</u>	

REFERENCIA	1			2			3			4			5		
	<i>7 días</i>			<i>7 días</i>			<i>14 días</i>			<i>14 días</i>			<i>28 días</i>		
DIÁMETRO (cm)	10	10.6	10.4	10.17	10.17	10.17	10.06	10.02	10.02	10.03	10.03	10.02	10.04	10.04	10.02
ALTURA (cm)	20.4	20.5	20.6	20.5	20.4	20.5	20.42	20.46	20.56	20.46	20.51	20.50	20.64	20.46	20.63
PESO DE LA MUESTRA (g)	3800			3888			3780			3800			3740		
TIPO DE FALLA	c.			d.			d.			d.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	13000			13500			12500			13000			19000		
OBSERVACIONES															


TIPO DE FALLA



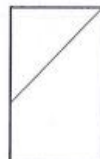
a) Cónica




b) Cónica y divida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar

GRUPO ESCORIA 1

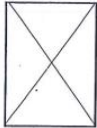
CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_ FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

EQUIPO UTILIZADO  
BALANZA: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_ MAQUINA UNIVERSAL: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_  
CALIBRADOR: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_ FLEXÓMETRO: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_

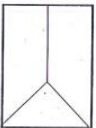
DESCRIPCION: *Cilindros convencionales Sin adición de ceniza Volante*

REFERENCIA	1			2			3			4			5		
	<i>28 días</i>			<i>56 días</i>			<i>56 días</i>			<i>92 días</i>			<i>97 días</i>		
DIÁMETRO (cm)	10.01	10.03	10.02	10.03	10.03	10.02	10.02	10.04	10.03	10.16	10.15	10.11	10.03	10.10	10.11
ALTURA (cm)	20.39	20.41	20.46	20.41	20.43	20.5	20.42	20.45	20.52	20.50	20.57	20.50	20.53	20.53	20.54
PESO DE LA MUESTRA (g)	3700			3760			3920			3888			3760		
TIPO DE FALLA	c.			d.			c.			d.			a.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	19500			20250			20400			25000			27500		
OBSERVACIONES															


TIPO DE FALLA




a) Cónica




b) Cónica y divida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar

GRUPO ESCORIA 1

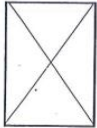
CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_ FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

EQUIPO UTILIZADO  
BALANZA: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_ MAQUINA UNIVERSAL: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_  
CALIBRADOR: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_ FLEXÓMETRO: \_\_\_\_\_ X \_\_\_\_\_

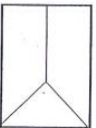
DESCRIPCION: *Cilindros convencionales Sin adición de ceniza Volante*

REFERENCIA	1			2			3			4			5		
	<i>110 días</i>			<i>110 días</i>											
DIÁMETRO (cm)	10.03	10.03	10.02	10.18	10.17	10.20									
ALTURA (cm)	20.80	20.62	20.69	20.60	20.64	20.68									
PESO DE LA MUESTRA (g)	3780			3840											
TIPO DE FALLA	a.			a.											
CARGA MÁXIMA (kgf)	28900			29000											
OBSERVACIONES															


TIPO DE FALLA




a) Cónica




b) Cónica y divida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar

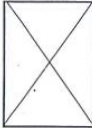
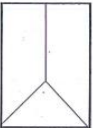

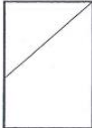

Anexo 2. Cilindros adicionados con 2% de ceniza volante.



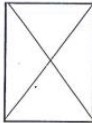
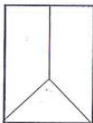



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
Vigilada por el Ministerio de Educación

LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL  
2018

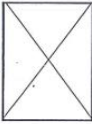
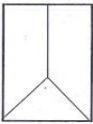



GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: <u>30-05-2018</u>																	
EQUIPO UTILIZADO																			
BALANZA: _____ <u>X</u>		MAQUINA UNIVERSAL: _____ <u>X</u>																	
CALIBRADOR: _____ <u>X</u>		FLEXOMETRO: _____ <u>X</u>																	
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de ceniza Volante. 2%</u>																			
REFERENCIA	1			2			3			4			5						
	<u>7 días</u>			<u>7 días</u>			<u>14 días</u>			<u>14 días</u>			<u>28 días</u>						
DIÁMETRO (cm)	10.04	10.02	10.09	10.02	9.97	9.95	10.06	10.09	10.05	9.98	10.0	9.95	9.99	9.98	9.95				
ALTURA (cm)	20.32	20.50	20.43	20.49	20.06	20.40	20.45	20.47	20.36	20.41	20.37	20.35	20.35	20.36	20.38				
PESO DE LA MUESTRA (g)	3800			3740			3780			3720			3740						
TIPO DE FALLA	d.			c.			e.			c.			c.						
CARGA MÁXIMA (kgf)	12000			12000			15000			15000			19000						
OBSERVACIONES																			
TIPO DE FALLA																			
																			
a) Cónica				b) Cónica y dividida				c) Cónica y transversal				d) Transversal				e) Columnar			

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____																	
EQUIPO UTILIZADO																			
BALANZA: _____		MAQUINA UNIVERSAL: _____																	
CALIBRADOR: <u>X</u>		FLEXÓMETRO: <u>X</u>																	
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de ceniza volante. 2%</u>																			
REFERENCIA	1			2			3			4			5						
	<u>28 días</u>			<u>56 días</u>			<u>56 días</u>			<u>72 días</u>			<u>72 días</u>						
DIÁMETRO (cm)	10.15	10.77	10.20	10.03	9.98	10.02	9.97	10.01	9.99	9.98	10.01	10.03	10.13	10.13	10.11				
ALTURA (cm)	20.35	20.30	20.32	20.38	20.42	20.39	20.41	20.38	20.40	20.30	20.30	20.38	20.35	20.27	20.42				
PESO DE LA MUESTRA (g)	3860			3840			3840			3780			3820						
TIPO DE FALLA	e.			d.			c.			d.			a.						
CARGA MÁXIMA (kgf)	19000			25000			24000			25000			26000						
OBSERVACIONES																			
TIPO DE FALLA																			
																			
a) Cónica				b) Cónica y dividida				c) Cónica y transversal				d) Transversal				e) Columnar			

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____																	
EQUIPO UTILIZADO																			
BALANZA: _____		MAQUINA UNIVERSAL: _____																	
CALIBRADOR: <u>X</u>		FLEXÓMETRO: <u>X</u>																	
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de ceniza volante. 2%</u>																			
REFERENCIA	1			2			3			4			5						
	<u>715 días</u>			<u>710 días</u>															
DIÁMETRO (cm)	10.10	10.10	10.12	10.11	10.10	10.06													
ALTURA (cm)	20.34	20.34	20.33	20.43	20.48	20.34													
PESO DE LA MUESTRA (g)	3780			3760															
TIPO DE FALLA	c.			a.															
CARGA MÁXIMA (kgf)	27000			28000															
OBSERVACIONES																			
TIPO DE FALLA																			
																			
a) Cónica				b) Cónica y dividida				c) Cónica y transversal				d) Transversal				e) Columnar			

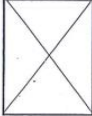
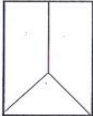



Anexo 3. Cilindros adicionados con 4% de ceniza volante.



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
Vigilada por el Estado

LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL  
2018

GRUPO ESCORIA 1


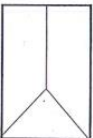



CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: <u>01-06-2018</u>													
EQUIPO UTILIZADO															
BALANZA: _____ <u>X</u>		MAQUINA UNIVERSAL: _____ <u>X</u>													
CALIBRADOR: _____ <u>X</u>		FLEXÓMETRO: _____ <u>X</u>													
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de ceniza Volante. 4%.</u>															
REFERENCIA	1		2		3		4		5						
	<u>7 días</u>		<u>7 días</u>		<u>74 días</u>		<u>74 días</u>		<u>28 días</u>						
DIÁMETRO (cm)	10.07	10.76	9.98	10.74	10.74	10.74	10.20	10.79	10.75	10.08	10.09	10.14	10.01	10.0	10.01
ALTURA (cm)	20.48	20.52	20.46	20.36	20.45	20.28	20.29	20.26	20.25	20.97	20.45	20.47	20.37	20.44	20.37
PESO DE LA MUESTRA (g)	3700			3780			3820			3820			3740		
TIPO DE FALLA	a.			a.			a.			d.			c.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	7000			7000			10500			12000			15000		
OBSERVACIONES															
TIPO DE FALLA															
    															
a) Cónica      b) Cónica y dividida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar															



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
Vigilada por el Estado

LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL  
2018

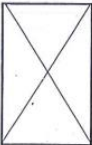
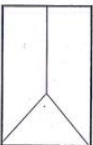

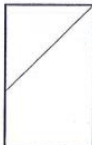

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____													
EQUIPO UTILIZADO															
BALANZA: _____ <u>X</u>		MAQUINA UNIVERSAL: _____ <u>X</u>													
CALIBRADOR: _____ <u>X</u>		FLEXÓMETRO: _____ <u>X</u>													
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de ceniza Volante. 4%.</u>															
REFERENCIA	1		2		3		4		5						
	<u>28 días</u>		<u>56 días</u>		<u>56 días</u>		<u>72 días</u>		<u>72 días</u>						
DIÁMETRO (cm)	10.10	10.13	10.15	10.03	10.01	10.02	10.01	10.03	10.10	10.04	10.06	10.06	10.02	9.99	10.07
ALTURA (cm)	20.30	20.30	20.35	20.38	20.40	20.37	20.40	20.37	20.42	20.46	20.33	20.43	20.39	20.39	20.33
PESO DE LA MUESTRA (g)	3820			3840			3800			3780			3760		
TIPO DE FALLA	d.			d.			c.			e.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	14800			19400			20000			20000			20000		
OBSERVACIONES															
TIPO DE FALLA															
    															
a) Cónica      b) Cónica y dividida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar															





GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____							
EQUIPO UTILIZADO									
BALANZA: _____		MAQUINA UNIVERSAL: _____							
CALIBRADOR: <u>X</u>		FLEXÓMETRO: _____							
DESCRIPCIÓN: <u>Cilindros con adición de ceniza volante 4%</u>									
REFERENCIA	1		2		3	4	5		
	<i>710 días</i>		<i>710 días</i>						
DIÁMETRO (cm)	10.0	10.01	10.03	10.12	10.13	10.14			
ALTURA (cm)	20.38	20.39	20.40	20.35	20.29	20.28			
PESO DE LA MUESTRA (g)	3760		3720						
TIPO DE FALLA	e.		e.						
CARGA MÁXIMA (kgf)	23000		22000						
OBSERVACIONES									
TIPO DE FALLA									
									
a) Cónica		b) Cónica y divida		c) Cónica y transversal		d) Transversal		e) Columnar	

Anexo 4. Cilindros adicionados con 6% de ceniza volante.

GRUPO ESCORIA 1


CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_ FECHA DE ENSAYO: 04-06-2018

EQUIPO UTILIZADO  
BALANZA: \_\_\_\_\_ CALIBRADOR: X MAQUINA UNIVERSAL: X FLEXÓMETRO: X

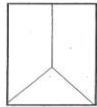
DESCRIPCION: Cilindros con adición de ceniza volante. 6%

REFERENCIA	1			2			3			4			5		
DIÁMETRO (cm)	<u>7 días</u>			<u>7 días</u>			<u>14 días</u>			<u>14 días</u>			<u>28 días</u>		
DIÁMETRO (cm)	10.08	10.14	10.09	10.11	10.11	10.12	9.99	10.06	9.97	9.94	9.94	9.97	10.09	10.13	10.11
ALTURA (cm)	20.32	20.26	20.33	20.46	20.41	20.28	20.34	20.26	20.40	20.27	20.43	20.31	20.35	20.28	20.31
PESO DE LA MUESTRA (g)	3800			3780			3800			3720			3790		
TIPO DE FALLA	d.			d.			d.			d.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	9000			10000			15000			14000			20000		
OBSERVACIONES															


TIPO DE FALLA




a) Cónica



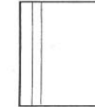
b) Cónica y dividida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_ FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

EQUIPO UTILIZADO  
BALANZA: \_\_\_\_\_ CALIBRADOR: X MAQUINA UNIVERSAL: X FLEXÓMETRO: X

DESCRIPCION: Cilindros con adición de ceniza volante. 6%

REFERENCIA	1			2			3			4			5		
DIÁMETRO (cm)	<u>28 días</u>			<u>56 días</u>			<u>56 días</u>			<u>56 días</u>			<u>56 días</u>		
DIÁMETRO (cm)	10.14	10.11	10.16	10.05	10.13	10.13	10.14	10.16	10.17	10.0	9.99	10.0	10.01	10.03	10.01
ALTURA (cm)	20.32	20.30	20.34	20.48	20.52	20.59	20.33	20.40	20.42	20.35	20.40	20.26	20.38	20.36	20.47
PESO DE LA MUESTRA (g)	3800			3800			3840			3700			3800		
TIPO DE FALLA	d.			d.			e			d.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	19500			23000			25000			23000			24000		
OBSERVACIONES															

TIPO DE FALLA



a) Cónica



b) Cónica y dividida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar



GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: \_\_\_\_\_ FECHA DE ENSAYO: \_\_\_\_\_

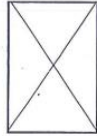
EQUIPO UTILIZADO

BALANZA: \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ MAQUINA UNIVERSAL: \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_  
CALIBRADOR: \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ FLEXÓMETRO: \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_

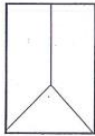
DESCRIPCION: *Cilindros con adición de ceniza volante. 6%*

REFERENCIA	1			2			3	4	5
	<i>110 días</i>			<i>110 días</i>					
DIÁMETRO (cm)	10.02	10.05	10.06	10.10	10.10	10.07			
ALTURA (cm)	20.24	20.18	20.23	20.16	20.32	20.45			
PESO DE LA MUESTRA (g)	3680			3700					
TIPO DE FALLA	d.			e.					
CARGA MÁXIMA (kgf)	20000			27000					
OBSERVACIONES									

TIPO DE FALLA



a) Cónica



b) Cónica y divida



c) Cónica y transversal



d) Transversal



e) Columnar

Anexo 5. Cilindros adicionados con 8% de ceniza volante.



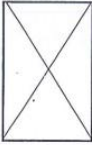




UNIVERSIDAD CATÓLICA  
de Colombia  
Vigilado Mineducación

LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL  
2018

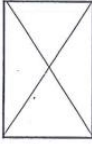
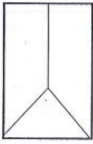



GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: <u>11-06-2018</u>																	
EQUIPO UTILIZADO																			
BALANZA: _____ <u>X</u>		MAQUINA UNIVERSAL: _____ <u>X</u>																	
CALIBRADOR: _____ <u>X</u>		FLEXÓMETRO: _____ <u>X</u>																	
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de Ceniza Volante. 8%</u>																			
REFERENCIA	1			2			3			4			5						
	<u>7 días</u>			<u>7 días</u>			<u>14 días</u>			<u>14 días</u>			<u>28 días</u>						
DIÁMETRO (cm)	9.95	9.97	9.97	10.08	10.10	10.11	10.09	10.10	10.13	10.0	10.05	10.06	10.10	10.07	10.10				
ALTURA (cm)	20.31	20.31	20.43	20.30	20.28	20.35	20.25	20.42	20.29	20.26	20.34	20.35	20.34	20.35	20.21				
PESO DE LA MUESTRA (g)	3740			3780			3860			3800			3820						
TIPO DE FALLA	c.			d.			d.			c.			d.						
CARGA MÁXIMA (kgf)	14000			13000			18000			17500			22000						
OBSERVACIONES																			
TIPO DE FALLA																			
a) Cónica				b) Cónica y división				c) Cónica y transversal				d) Transversal				e) Columnar			


GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____													
EQUIPO UTILIZADO															
BALANZA: _____ X _____		MAQUINA UNIVERSAL: _____ X _____													
CALIBRADOR: _____ X _____		FLEXÓMETRO: _____ X _____													
DESCRIPCION: <i>Cilindros con adición de ceniza Volante. 8 %.</i>															
REFERENCIA	1		2		3		4		5						
	<i>28 días</i>		<i>56 días</i>		<i>56 días</i>		<i>72 días</i>		<i>72 días</i>						
DIÁMETRO (cm)	10.07	10.06	10.11	10.04	10.03	10.03	9.94	9.96	9.99	10.04	10.07	10.12	10.11	10.12	10.14
ALTURA (cm)	20.37	20.37	20.52	20.28	20.30	20.04	20.28	20.27	20.30	20.32	20.39	20.35	20.44	20.43	20.36
PESO DE LA MUESTRA (g)	3840			3740			3760			3780			3840		
TIPO DE FALLA	d.			e.			d.			d.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	27500			25000			25000			25000			26000		
OBSERVACIONES															
TIPO DE FALLA															
    															
a) Cónica      b) Cónica y divida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar															

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____									
EQUIPO UTILIZADO											
BALANZA: _____ X _____		MAQUINA UNIVERSAL: _____ X _____									
CALIBRADOR: _____ X _____		FLEXÓMETRO: _____ X _____									
DESCRIPCION: <i>Cilindros con adición de ceniza Volante. 8 %.</i>											
REFERENCIA	1		2		3		4		5		
	<i>770 días</i>		<i>770 días</i>								
DIÁMETRO (cm)	10.02	10.08	10.18	10.17	10.16	10.17					
ALTURA (cm)	20.20	20.36	20.33	20.38	20.35	20.46					
PESO DE LA MUESTRA (g)	3840			3860							
TIPO DE FALLA	d.			d.							
CARGA MÁXIMA (kgf)	27000			27000							
OBSERVACIONES											
TIPO DE FALLA											
    											
a) Cónica      b) Cónica y divida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar											

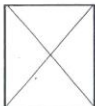
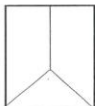


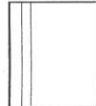
Anexo 6. Cilindros adicionados con 10% de ceniza volante.




**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia  
Vigilada Mineducación

**LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL**  
2018

**GRUPO ESCORIA 1**

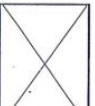
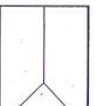

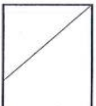

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: <u>14-06-2018</u>													
EQUIPO UTILIZADO		EQUIPO UTILIZADO													
BALANZA: _____	X	MAQUINA UNIVERSAL: _____	X												
CALIBRADOR: _____	X	FLEXÓMETRO: _____	X												
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de Ceniza Volante. 10%</u>															
REFERENCIA	1 <i>7 días</i>		2 <i>7 días</i>		3 <i>7 días</i>		4 <i>7 días</i>		5 <i>28 días</i>						
DIÁMETRO (cm)	9.96	10.01	10.09	10.77	10.75	10.77	10.04	10.01	10.05	10.06	10.09	10.75	9.91	10.05	10.08
ALTURA (cm)	20.36	20.33	20.24	20.40	20.38	20.35	20.32	20.46	20.46	20.35	20.28	20.26	20.44	20.43	20.46
PESO DE LA MUESTRA (g)	3700			3820			3780			3760			3780		
TIPO DE FALLA	c.			c.			d.			d.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	13500			13800			16000			15000			20000		
OBSERVACIONES															
TIPO DE FALLA															
    															
a) Cónica      b) Cónica y dividida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar															



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia  
Vigilada Mineducación

**LABORATORIOS DE INGENIERÍA CIVIL**  
2018

**GRUPO ESCORIA 1**

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____													
EQUIPO UTILIZADO		EQUIPO UTILIZADO													
BALANZA: _____	X	MAQUINA UNIVERSAL: _____	X												
CALIBRADOR: _____	X	FLEXÓMETRO: _____	X												
DESCRIPCION: <u>Cilindros con adición de Ceniza Volante. 10%</u>															
REFERENCIA	1 <i>28 días</i>			2 <i>56 días</i>			3 <i>56 días</i>			4 <i>77 días</i>			5 <i>77 días</i>		
DIÁMETRO (cm)	10.09	10.10	10.16	10.15	10.77	10.21	9.97	10.02	10.07	10.08	10.10	10.75	10.09	10.72	10.77
ALTURA (cm)	20.33	20.37	20.30	20.24	20.29	20.34	20.58	20.52	20.41	20.53	20.36	20.40	20.38	20.32	20.19
PESO DE LA MUESTRA (g)	3780			3820			3760			3820			3840		
TIPO DE FALLA	d.			c.			c.			b.			d.		
CARGA MÁXIMA (kgf)	19000			23000			23000			23000			25000		
OBSERVACIONES															
TIPO DE FALLA															
    															
a) Cónica      b) Cónica y dividida      c) Cónica y transversal      d) Transversal      e) Columnar															

GRUPO ESCORIA 1

CÓDIGO ORDEN: _____		FECHA DE ENSAYO: _____					
EQUIPO UTILIZADO							
BALANZA: _____ X		MAQUINA UNIVERSAL: _____ X					
CALIBRADOR: _____ X		FLEXÓMETRO: _____ X					
DESCRIPCION: <i>Cilindros con adición de ceniza volante, 10%</i>							
REFERENCIA	1		2		3	4	5
DIÁMETRO (cm)	10.03	10.04	10.08	10.0	10.0	10.02	
ALTURA (cm)	20.42	20.43	20.39	20.25	20.23	20.17	
PESO DE LA MUESTRA (g)	3780		3700				
TIPO DE FALLA	e.		b.				
CARGA MÁXIMA (kgf)	25000		25000				
OBSERVACIONES							
TIPO DE FALLA							
a) Cónica		b) Cónica y divida		c) Cónica y transversal		d) Transversal	
e) Columnar							