

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE  
CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE**

**ESTEFANIA ROBAYO NUÑEZ**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ DC  
JUNIO, 2013**



**COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABILIDAD DE MORTEROS DE  
CENIZAS VOLANTES ACTIVADAS ALCALINAMENTE**

**ESTEFANIA ROBAYO NUÑEZ**

**TRABAJO DE GRADO**

**DIRECTOR  
JESUS ORLANDO CASTAÑO TABARES**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ DC  
JUNIO, 2013**



## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

*Ing. Luis Felipe Prada Sarmiento  
Director de Carrera de Ingeniería Civil  
(Encargado)*

---

*Ing. Jesús Orlando Castaño Tabares  
Director de Trabajo de Grado*

**Bogotá, Junio, 2013**



## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que contribuyeron con su colaboración, apoyo y dirección en el desarrollo del trabajo.

- A mi familia por su constante interés y colaboración en la elaboración del trabajo de grado.
- Al director del trabajo de grado, Jesús Orlando Cataño Tabares por su constante apoyo e interés durante el desarrollo del presente proyecto, por su permanente orientación y aportes.
- A los Técnicos de laboratorio de Cementos, Aguas y Suelos, por su colaboración desinteresada y constante a lo largo del trabajo, en la elaboración de ensayos, pruebas de laboratorio y asesoría.
- A mi compañera de carrera María Cristina Peralta por sus indicaciones y colaboración en el este trabajo.
- A la Pontificia Universidad Javeriana, al Departamento de Ingeniería Civil por la formación académica recibida durante el pre-grado, así como la disponibilidad de recursos técnicos para el desarrollo satisfactorio de la presente investigación.



## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de grado a mi familia por su apoyo durante todo el proceso en el desarrollo de la carrera.



## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	18
2. JUSTIFICACIÓN .....	19
3. MARCO TEÓRICO.....	21
3.1. Ceniza Volante.....	21
3.2. Activador Alcalino .....	22
3.3. Geopolímeros .....	23
3.4. Antecedentes .....	23
4. OBJETIVOS .....	32
4.1. Objetivo General .....	32
4.2. Objetivos Específicos.....	32
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....	33
5.1. Selección y caracterización de materias primas .....	34
5.1.1. Materias Primas.....	34
5.2. Preparación de los especímenes.....	39
5.2.1. Definición de mezclas.....	39
6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	43
6.1. MATERIAS PRIMAS.....	43
6.1.1. Cemento de uso general Tipo I y Portland Tipo III .....	43
6.1.2. Ceniza Volante .....	45
6.1.3. Arena Silíceo .....	50
6.1.4. Activadores Alcalinos .....	53
6.2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ESPECÍMENES. ....	54
6.2.1. Comportamiento Mecánico Mezclas Pre-selección.....	54
6.2.2. Comportamiento Mecánico Mezclas Definitivas. ....	56
6.3. COMPORTAMIENTO DURABLE DE LOS ESPECÍMENES.....	62
6.3.1. Comportamiento Frente a Altas Temperaturas.....	62
6.3.2. Comportamiento Frente a Ataque de Medios Agresivos. ....	67
7. CONCLUSIONES.....	71

8. RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA .....	76

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resistencia a Compresión a edades de a) 1 día y b) 3 días. La MUESTRA 1 se recolecto en el mes de Septiembre de 2009 y La MUESTRA 2 en Enero de 2010. Fuente: (Quijano, 2010).....	25
Gráfica 2. Resistencia a Compresión a edades de a) 7 día y b) 28 días. La MUESTRA 1 se recolectó en el mes de Septiembre de 2009 y La MUESTRA 2 en Enero de 2010. Fuente: (Quijano, 2010).....	26
Gráfica 3. Efecto del contenido de Sílice en la solución activadora sobre la resistencia a compresión, de morteros de ceniza volante original (CVO) y ceniza volante molida (CVM). Fuente: (Erich Rodríguez, 2009).....	28
Gráfica 4. Resistencias mecánicas a compresión en morteros de ceniza volante activada alcalinamente (a) M-FA-N; (b) M-FA-W. (Fernández-Jiménez, 2009)/ M-FAN: Mezcla Ceniza Volante Activada NaOH 8M; M-FAW: Mezcla Ceniza Volante Activada 15%Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +85%NaOH 12.5M. Fuente: (Palomo, 2004) ....	30
Gráfica 5. Resistencias mecánicas en hormigones, (a) a compresión probetas cúbicas (15x15x15 cm); (b) a flexión probetas prismáticas (15x10x70 cm) / H-FAN: Mezcla Ceniza Volante Activada NaOH 8M; H-FAW: Mezcla Ceniza Volante Activada 15%Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> +85%NaOH 12.5M; H-CE-A: Mezcla Cemento Portland; H-CE-B: Mezcla Cemento portland. Fuente: (Fernández-Jiménez, 2009).....	30
Gráfica 6. Tiempos de Fraguado curva representativa Cemento Tipo III. Fuente: Elaboración Propia.....	45
Gráfica 7. Curva Granulométrica Cenizas Volantes.....	48
Gráfica 8. Curva Granulométrica Agregado fino. Fuente: Elaboración Propia. .	51
Gráfica 9. Fluidez de Morteros 8M, 10M y 12M. Fuente: Elaboración Propia. ..	55
Gráfica 10. Resistencia a Compresión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 8M ,10M y 12M. Fuente: Elaboración Propia. ....	56
Gráfica 11. Evolución Resistencia a Compresión en Cubos de Mortero. Fuente: Elaboración Propia.....	58
Gráfica 12. Comportamiento Mecánico Resistencia a Compresión. Fuente: Elaboración Propia.....	59
Gráfica 13. Evolución Resistencia a Flexión en Viguetas de Mortero. Fuente: Elaboración Propia.....	61
Gráfica 14. Resistencia a Compresión de Cubos y Resistencia a Flexión de Viguetas Expuestas a Altas Temperaturas. Fuente: Elaboración Propia. ....	63
Gráfica 15. Resistencia de Cubos a Compresión: Sin exposición a temperatura, con exposición a Temperaturas de 400°C Y 700°C. Fuente: Elaboración Propia. ....	65

Gráfica 16. Pérdida de Masa por Exposición ante Ácido Sulfúrico. Fuente: Elaboración Propia.....	68
Gráfica 17. Resistencia a Compresión Ante Exposición de Ácido Sulfúrico VS Medio de Referencia. Fuente: Elaboración Propia.....	70
Gráfica 18 Comparación a) Resistencia a Compresión Mezcla de ceniza volante activada alcalinamente con NaOH (Mezcla 2) VS NTC 3356 Morteros Premezclados para Mamposteria b) Resistencia a Flexión Mezcla de ceniza volante activada alcalinamente con NaOH (Mezcla 2) VS NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos.....	72

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ceniza Volante Original y Molida. Efecto tratamiento de moliendo sobre la morfología de la CV. Fuente: (Erich Rodríguez, 2009).....	27
Imagen 2 a) Andén Westgate Freeway b) Sendero Peatonal en Lyndarum Estate.....	31
Imagen 3. Metodología Experimental. Fuente: Elaboración Propia .....	33
Imagen 4. Ceniza Volante Fabricato. Fuente: Elaboración Propia.....	35
Imagen 5. Arena Silícea 50% arena 40 y 50% arena 60. Fuente: Elaboración Propia.....	37
Imagen 6. Hidróxido de Sodio en Escamas y Silicato de Sodio. Fuente: Elaboración Propia.....	38
Imagen 7. Cubos y Viguetas de Mortero de Ceniza Volante Activada Alcalinamente. Fuente: Elaboración propia.....	39
Imagen 8. Mezcla Prueba de Ceniza Volante Activada Alcalinamente 100% Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> . Fuente: Elaboración Propia. ....	41
Imagen 9. a) Cubos de Mortero sin Curado a 60C b) Horno Dispuesto para el curado de las probetas Fuente: Elaboración Propia. ....	42
Imagen 10 Microscopia Electrónica de Barrido del Cemento Hidráulico. ....	44
Imagen 11 Aparato de Blaine. Peso Específico Cemento.....	44
Imagen 12 Microscopia Electrónica de Barrido de las Cenizas Volantes.....	46
Imagen 13. Microscopia Electrónica de Barrido de la Arena Silícea Arena 40. 50	
Imagen 14 Microscopia Electrónica de Barrido de la Arena Silícea Arena 60. .	51
Imagen 15. Ensayo de Colorimetría. Fuente: Elaboración Propia.....	52
Imagen 16a) Falla a Compresión Cubo de Mortero b) Falla a Flexión Vigüeta de Mortero. Fuente: Elaboración Propia. ....	54
Imagen 17. Cubos de Mortero de Ceniza Volante activada con 10M ,12M y 8M. Fuente: Elaboración Propia.....	55
Imagen 18. Falla a Compresión de Cubos de Mortero. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia. 57	
Imagen 19. Falla a Flexión de Vigüetas de Mortero. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia. ....	60
Imagen 20. a) Probetas de Ceniza Volante acativada alcalinamente expuesta a altas temperaturas. b) Cubo de Mortero de Ceniza Volante expuesto a Ataque de Ácido. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Imagen 21. Mufla Prueba Resistencia a Altas Temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.....	62
Imagen 22 a) Falla a Compresión de cubo de mortero de cemento Hidráulico expuesto una temperatura de 400°C b) Falla de Vigüeta de mortero de cemento a flexión después de exposición a una temperatura de 400°C .....	64

Imagen 23. Interior de las viguetas Falladas a Flexión a) Con Cemento Hidráulico b) Con Ceniza volante Fuente: Elaboración Propia.....	65
Imagen 24. Cubos de Mortero expuestos a una temperatura de 400°C. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.....	66
Imagen 25. Cubos de Mortero expuestos a una temperatura de 700°C. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 5 e) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.....	66
Imagen 26. Cubos de Mortero Sumergido en Ácido Sulfúrico. a) Cubos de Cemento Tipo I b) Cubos de Ceniza Volante. Fuente: Elaboración Propia.....	67
Imagen 27. Mezcla 5 inmersa en Ácido Sulfúrico. Fuente: Elaboración Propia.	68
Imagen 28. Pérdida de Masa de Cubos expuestos a ataque de ácidos. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.....	69
Imagen 29. Falla de Cubos a Compresión expuestos a Ataque de Ácidos. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.....	69

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Consumo de carbón, producción de cenizas volantes para 25 empresas de Colombia. ....	20
Tabla 2. Requerimientos Químicos .....	22
Tabla 3. Requerimientos Físicos.....	22
Tabla 4. Ensayos de caracterización de los Cementos Hidráulicos .....	35
Tabla 5. Ensayos de caracterización de la Ceniza Volante. ....	36
Tabla 6. Ensayos de caracterización de la Arena Silícea. ....	37
Tabla 7. Especificaciones Técnicas del Puzzolith 460 N .....	38
Tabla 8. Diseño Experimental. ....	39
Tabla 9. Dosificaciones Mezclas de Mortero.....	40
Tabla 10. Numero de Especímenes realizados.....	41
Tabla 11. Resumen Caracterización Cemento Hidráulico Tipo I y Tipo III. ....	43
Tabla 12. Datos de Medición Tiempos de Fraguado Cemento Tipo I y Tipo III. ....	45
Tabla 13. Resumen Caracterización Ceniza Volante.....	45
Tabla 14. Caracterización Química Ceniza Volante.....	46
Tabla 15. Peso Específico Ceniza Volante. ....	48
Tabla 16. Índice de Actividad Resistente para Cenizas Volantes. ....	49
Tabla 17. Resumen Caracterización de la Arena Silícea. ....	50
Tabla 18. Granulometría Agregado Fino.....	51
Tabla 19. Análisis Hidróxido de Sodio (NaOH) Certificado de Calidad. ....	53
Tabla 20. Análisis Silicato de Sodio (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ) Certificado de Calidad. ....	54
Tabla 21. Fluidez de Morteros 8M, 10M y 12M. ....	55
Tabla 22. Resistencia a Compresión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 8M ,10M y 12M. ....	55
Tabla 23. Resistencia a Compresión de Cubos de Mortero.....	58
Tabla 24. Resistencia a Flexión de Viguetas de Mortero. ....	60
Tabla 25. Resistencia a Compresión de Cubos de Mortero expuestos a altas temperaturas.....	63
Tabla 26. Resistencia a Compresión y Pérdida de Masa de Cubos de Mortero expuestos en Medios Agresivos.....	67

## 1. INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que la economía del país ha venido creciendo durante los últimos años, en gran parte alrededor de sectores que generan grandes cantidades de residuos ( **UPME, 2012**), como es el caso del sector minero e hidrocarburos que se basa en la explotación de carbón, este crecimiento económico se ha visto reflejado en el sector industrial y de la construcción, los cuales exigen a sectores relacionados un aumento en su producción (energético, siderúrgico), lo que incrementa la generación de residuos provenientes de los procesos industriales (cenizas volantes, cenizas de fondo, escoria de alto horno y escoria negra). En este sentido, la idea de implementar residuos industriales provenientes de procesos de combustión del carbón como materia prima base para el desarrollo morteros, se hace viable, en este caso utilizando cenizas volantes activadas alcalinamente (con Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio) como material cementante, de forma que pueda sustituir al cemento hidráulico convencional. En este estudio se emplean mezclas con dosificaciones diferentes, sometiendo dichas mezclas a pruebas de laboratorio que determinaran las propiedades mecánicas y de durabilidad de las probetas de mortero, esta forma poder dar un estimativo del desempeño y posible uso de dichas mezclas.

Este proyecto principalmente se encuentra basado en la sustitución de cemento hidráulico convencional, por cenizas volantes activadas alcalinamente, en la producción de mortero, donde se permite obtener un producto que cumple con los requerimientos físicos y mecánicos especificados en las normas NTC. Se trabajaran mezclas con cenizas volantes activadas alcalinamente, provenientes del procesos energéticos de la empresa textilera Fabricato, estas serán activadas alcalinamente con Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) en diferentes proporciones. De este modo, mediante la evaluación del desempeño mecánico y de la durabilidad de las diferentes mezclas de mortero con ceniza volante activada alcalinamente, se pretende dar un paso hacia la implementación de materiales ecológicos de bajo impacto.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente la construcción es considerado uno de los sectores que generan mayor consumo de materiales, recursos naturales y consumo de energético, se habla de un sector profundamente impactante sobre el medio económico, ecológico y social ( **UPME, 2012**), sin embargo, su importancia en el desarrollo de una sociedad, nos da idea de los esfuerzos que debemos llevar a cabo para conseguir avanzar hacia un modelo de constructivo que no desperdicie energía, ni recursos naturales y a la vez no genere gran cantidad de residuos, saturando vertederos y rellenos sanitarios. Es entonces pertinente la implementación de un modelo y sistema de construcción sostenible, que optimice procesos y recursos, creando materiales alternativos de bajo impacto ambiental, eficientes tanto económica como ambientalmente, con iguales o mejores propiedades a las de los materiales existentes.

Actualmente, gran parte de la infraestructura en el mundo está hecha en concreto, a base de cemento hidráulico convencional, demandando aproximadamente una producción mundial del mismo, de alrededor de 1,5 billones de toneladas anuales, cuya producción genera una tonelada de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) por cada tonelada de cemento portland producido (**Mannan M. A., 2002**), sin mencionar lo que su procesos de producción le hacen al entorno paisajístico, lo cual demuestra que es un modelo insostenible, con un altísimo impacto en todos los ámbitos.

Nuevos materiales inorgánicos, para la sustitución parcial o total de cementos tradicionales, en este caso hablan de cenizas volantes como sustituyente, contribuye de manera positiva a la reducción de la contaminación global y el crecimiento en el desarrollo sostenible. En la actualidad Colombia produce más de 80.000 millones de toneladas de carbón térmico. El carbón térmico que se produce en el interior del país abastece el mercado doméstico, que lo destina a la generación eléctrica, como fuente de energía primaria y secundaria en la industria, (**Maroto V, 1999**) carbón que en el interior del país en su mayoría es implementado en sectores industriales. Se considera que anualmente se queman más de 830 millones de toneladas de carbón que generan unos 75 millones de toneladas de residuos de combustión formados principalmente por cenizas volantes; donde de cada tonelada de carbón utilizada se generan 0.8 toneladas de cenizas volantes como residuos. La producción anual de ceniza volante de algunas empresas colombianas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Consumo de carbón, producción de cenizas volantes para 25 empresas de Colombia.  
Fuente: ( Centro de Investigaciones del Carbón, 1996)

EMPRESAS	Consumo	Producción
	Carbón (ton/año)	C.V. (ton/año)
1Alimentos Copelia	36	0,72
2Coloidales S.A.	420	8,40
3Creaciones M. Blanco	900	18,00
4Hinestrosa y Cía.	960	19,20
5Laboratorio Higietex	240	4,80
6Lavandería los Trajes	600	12,00
7Minerales Industriales	960	19,20
8Súper de Alimentos	360	7,20
9Tintorería y L. Espumar	480	9,60
10Tintorería Mil Colores	558	11,16
11Tintorería T.P.Q.	432	8,64
12Bavaria (Manizales)	4320	86,40
13Bavaria. (Pereira)	4800	96,00
14Colombiana Kimberly	4320	86,40
15Fatelares S.A.	1332	26,64
16Lavamoda Ltda.	1704	34,08
17Pasabocas Margarita	1440	28,80
18Teñidos y Acabados	1680	33,60
19Tintorería Servicolor	3600	72,00
20Cervecería Unión S.A.	14160	283,20
21Coltejer S.A.	204000	16320,00
22Fabricato S.A.	108000	8640,00
23Gravetal S.A.	10260	205,20
24Productos Familia	12240	244,80
25Textiles Rionegro	28800	576,00
Total	406602	26852

Teniendo conocimiento de la alta producción de ceniza volante de algunas de las industrias colombianas, se hace aún más viable la intención de aprovechamiento de residuos en construcción, haciendo de la ceniza volante no un residuo si no un subproducto en la construcción, sustituyendo totalmente al cemento hidráulico.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Ceniza Volante

Las cenizas volantes son residuos de la combustión del carbón, al igual que se pueden obtener de materiales como, madera, incineración de residuos urbanos y de procesos de fundición (**Moreno, 2002**), termoeléctricas, sectores como hidrocarburo, textil, entre otros, que utilizan como fuente principal para generar energía el carbón, es entonces de los procesos de combustión del carbón de donde se obtiene residuos entre ellos las cenizas volantes, (**Laverde, 2007**). Las cenizas volantes constituyen el componente principal de los residuos que se producen por el uso del carbón como como fuente principal generadora de energía.

Actualmente, la normativa americana ASTM C618-12 / NTC 3493 (**ASTM C150, 2012**) (Coal Fly ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete) clasifica la ceniza volante de acuerdo a su composición química:

- **Clase N:** Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y lutitas.
- **Clase F:** Este tipo de Ceniza posee propiedades puzolanica, son Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita<sup>1</sup>, carbón bituminoso<sup>2</sup>, a partir de carbón sub-bituminoso y lignito<sup>3</sup>.
- **Clase C:** Esta clase de Ceniza además de tener propiedades puzolanicas, posee propiedades cementantes, Cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub-bituminoso<sup>4</sup> o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas.

---

<sup>1</sup> Antracita: o carbón duro, con alto contenido de carbono (86% al 98%), usado como combustible en generación de calor o vapor en la industria térmica y siderúrgica, también se usa en la fabricación de goma sintética, colorantes y purificación de agua para consumo humano (filtros).

<sup>2</sup> Bituminosa: este tipo de carbón posee un menor contenido de carbono y menor poder calorífico que los carbones antracíticos. Por su forma de uso, se conocen como carbones coquizables, usados en procesos de obtención tanto del acero y los carbones térmicos usados en la producción de vapor para generación de energía.

<sup>3</sup> Lignito: son carbones con alta humedad y alto contenido de ceniza y de material volátil, lo cual hace que posean un bajo poder calorífico. Es empleado para la generación de calórica (calefacción), energía eléctrica.

<sup>4</sup> Sub-bituminosa: con menor poder calorífico que los carbones bituminosos, su composición en carbono está entre 35% y 45%, tiene un elevado contenido de material volátil, algunos con poder coquizable. Es empleado en la generación de energía eléctrica y en procesos industriales

Las cenizas volantes son conocidas como una puzolana artificial, un material silíceo o silico-aluminosos que en sí mismo posee poco o ningún valor cementante pero que en forma de partículas finas y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes, según la Norma NTC 3493 (Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas como aditivos minerales en el concreto de cemento portland).

El grado de reactividad y composición de la ceniza volante depende fundamentalmente del tipo de carbón empleado, del proceso de transformación durante su combustión, tipo de horno o caldera, velocidad de enfriamiento y sistema de captación (húmedo o seco) (**ASTM C150, 2012**). Para la clasificación de las diferentes cenizas se revisan lineamientos mencionados en las siguientes tablas.

*Tabla 2. Requerimientos Químicos*

	Clase		
	N	F	C
Dioxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Oxido de Aluminio (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )+Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) min, %	70	70	50
Trioxido de Azufre (SO <sub>3</sub> ), max, %	4	5	5
Contenido de Humedad, max, %	3	3	3
Perdida por ignición, max, %	10	6	6

*Tabla 3. Requerimientos Físicos*

	Clase		
	N	F	C
Finura, Cantidad Retenida en el tamiz 45µm (No 325), max, %	34	34	34
Indice de Actividad Resistente			
Con Cemento Portland, a 7 días, min, porcentaje de control	75	75	75
Con Cemento Portland, a 28 días, min, porcentaje de control	75	75	75
Requerimiento de Agua, max, porcentaje de control	115	105	105
Solidez, Expansión o Contracción, max %	0.8	0.8	0.8

### 3.2. Activador Alcalino

El activador alcalino se define como la solución responsable de acelerar la reacción de la fuente de aluminosilicato, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos hidratos. Los activantes pueden ser compuestos alcalinos o alcalinotérreos, tales como hidróxidos (ROH, R (OH)<sub>2</sub>), sales de ácido débil (R<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, R<sub>2</sub>S, RF), sales de ácido fuerte (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) y sales silícicas del tipo R<sub>2</sub>O(n) SiO<sub>2</sub> donde R es un ion alcalino del tipo Na, K o Li. Los activadores comúnmente usados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos.

La activación alcalina de cenizas volantes es un proceso químico por el que el componente vítreo de este subproducto industrial es transformado en un material cementoso compacto también conocido como Geopolímero.

### **3.3. Geopolímeros**

Se le ha dado la connotación de geopolímero a los materiales sintetizados a través de la activación alcalina o silico-alcalina, los geopolímeros se forman por la co-polimerización del aluminio y especies de silicato que proceden de la disolución de la alúmina y el silicio presentes en la constitución química de los materiales de origen, a valores altos de pH, en presencia de silicatos solubles alcalino **(Hua X., 2000)**.

Estos materiales geopoliméricos se obtienen mediante una reacción de polimerización de soluciones activantes basadas en álcalis de sodio y/o potasio para formar soluciones acuosas de alta concentración y hábiles en disolver grandes cantidades de sílice y alúmina. **(Davidovits J. , 2011)** Esta disolución es necesaria para generar la destrucción de la estructura amorfa de diferentes tipos de minerales naturales, desechos y subproductos industriales, tales como caolines, arcillas calcinadas libres de calcio, cenizas volantes y escorias de industrias metalúrgicas.

Se tiene en cuenta que factores como; naturaleza de la fuente de aluminosilicato, relación Sílice/Alúmina, el contenido de agua, las condiciones de curado, el tipo y concentración del alcalino empleado, pueden afectar las propiedades del Geopolímero.

### **3.4. Antecedentes**

Estos morteros en base a ceniza volante activada alcalinamente vinieron siendo desarrollados por Joseph Davidovits, como uno de los pioneros de la polimerización, quien empezó a hablar en los 70 de geopolímeros también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la química conocida como geopolimerización, **(Palomo, 2004)** donde se forma un material compacto caracterizado por sus excelentes propiedades ligantes y el buen desarrollo de propiedades mecánicas.

Entre 1940 y 1970, científicos e inventores alternativos dieron pasos en la implementación de alumino-silicatos y residuos (escoria) para la invención de materiales alternativos, Purdon científico Belga **(Purdon, 1940)** descubrió que

la adición de álcali produce una nueva forma de endurecimiento rápido ligante, propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria (basada en un 41% de CaO, 30% de SiO<sub>2</sub> y 20.5% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) activada alcalinamente con NaOH (del 5.5% al 7.5%) involucrando la disolución de Si y Al y precipitación de silicato cálcico hidratado o aluminatos hidratados, se obtendrían resistencias de 27 MPa a un día y de 72 MPa a 5 años. Cementos de escoria activada alcalinamente (llamados cementos Trief) se utilizaron en la construcción a gran escala en la década de 1950. Al igual que el científico Victor Glukhovsky, **(Gluchovskij, 1959)** quien estudio los efectos de la activación álcali en las escorias aglomeradas y dio su mayor contribución al sentar las bases del cementos alcalinos con alto contenido de Calcio (*Escorias de Alto Horno*), este noto que las rocas y la arcilla reaccionaba durante el proceso alcalino formando Zeolitas (Sodio Silico-aluminato Hidratado), llamándolo “*Concretos de Suelo Silicato*” y a los aglutinantes “*Suelo Cementos*”.

Una de las primeras aplicaciones constructivas se desarrollaron por el científico Davidovits en 1972-1976, **(Davidovits J. , 1976)**, donde utilizó geopolímeros para paneles de virutas de madera resistentes al fuego, constituido por un núcleo de madera y dos revestimientos de geopolímeros, durante la fabricación de estos paneles se observó una característica inusual, el endurecimiento del material orgánico, se produjo simultáneamente con el ajuste del mineral silico-aluminato, al aplicar los mismos parámetros termo-endurecibles, de 150-180 ° C de temperatura. **(Davidovits J. , 1993)**,este desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín<sup>5</sup> y Metacaolín<sup>6</sup>, la mezcla de este alumino-silicato sólido con una solución cáustica altamente alcalina constituida con hidróxidos y/o silicatos produce un material sintético, identificando que las propiedades ligantes de los geopolímeros son atribuidas a que las especies disueltas tras la activación alcalina son polimerizadas, de manera que se produce una red tridimensional amorfa de los aluminosilicatos, que endurece rápidamente y presenta buenas propiedades mecánicas.

En este sentido, el aprovechamiento de residuos de como humo de sílice, escorias de alto horno, cenizas volantes, en la elaboración de materiales alternativos de construcción se ha venido contemplando como una de las alternativas de sustitución del cemento convencional, se han llevado a cabo

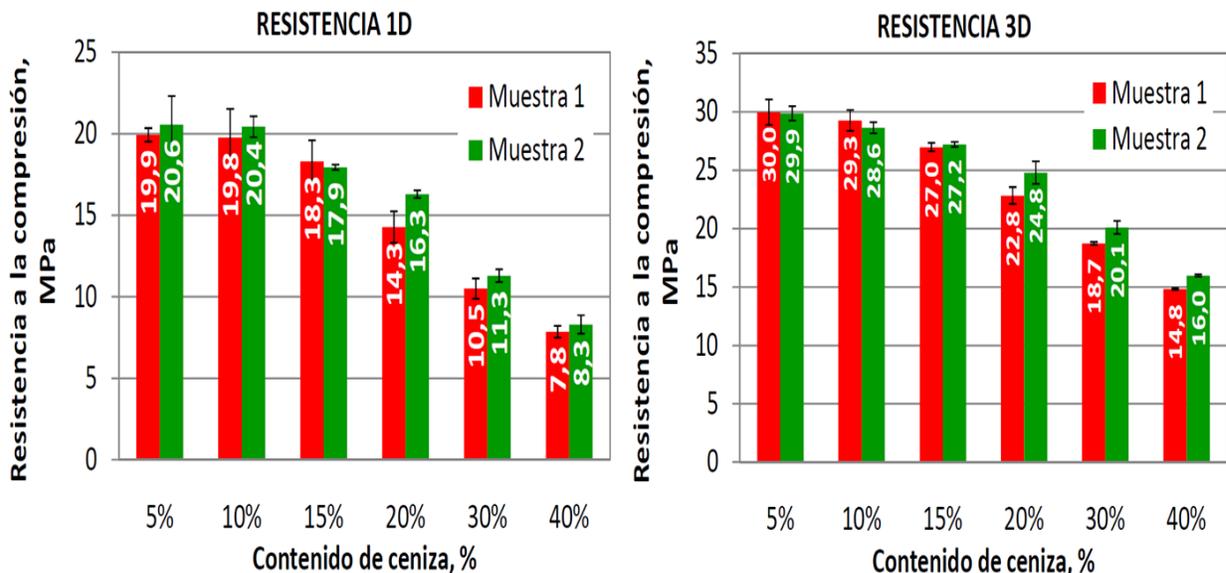
---

<sup>5</sup> Caolín: es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente. Suele utilizarse como agente adsorbente.

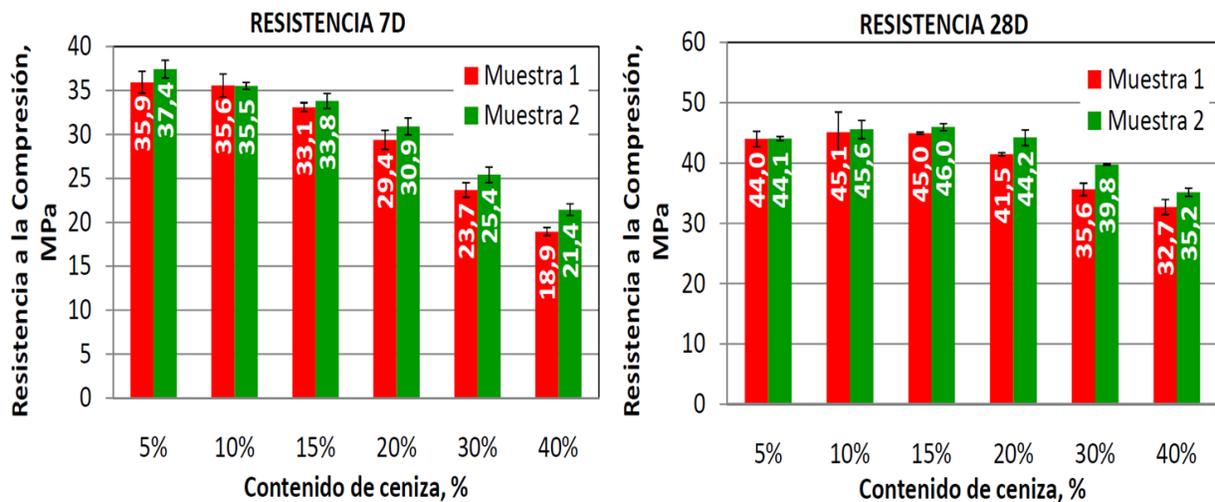
<sup>6</sup> Metacaolín: es una forma deshidroxilada de la caolinita mineral de arcilla. Las rocas que son ricas en caolinita son conocidas como arcilla china o caolín, que se utiliza tradicionalmente en la fabricación de porcelana. El tamaño de las partículas de metacaolín es más pequeña que las partículas de cemento, pero no tan bien como el humo de sílice.

estudios e investigaciones para la evaluación de las distintas propiedades de los materiales.

Empezando con la sustitución parcial del cemento hidráulico hasta llegar a la geopolimerización, con sustitución total del cemento hidráulico. En el ámbito local, la Universidad Industrial de Santander, quienes realizaron el “Análisis del comportamiento mecánico del cemento hidráulico, adicionados con cenizas volantes provenientes de la Central de Generación Térmica de Termopaipa”. **(Quijano, 2010)** El procedimiento experimental consistió en la preparación de doce cementos, mezclando un cemento base con dos muestras de cenizas volantes, provenientes de la central de generación térmica Termopaipa, en peso de adición de ceniza de 5, 10, 15, 20, 30 y 40 por ciento, se les realizaron pruebas físicas y químicas para caracterizar y clasificar los cementos adicionados. Dicho estudio revelando que la adición de cenizas volantes mejora la resistencia mecánica del cemento comparado con los requisitos mínimos exigidos para un cemento tipo I, de acuerdo a la Norma Técnica Colombiana, de igual forma, comprobaron que la adición otorga al cemento una reducción en su calor de hidratación y un aumento en el requerimiento de agua. Obteniendo resistencias para edades de 1, 3, 7 y 28 días, entre 7,8 MPa y 40,0 MPa, como se evidencia en la Gráfica 1 y Gráfica 2, mostradas a continuación.



Gráfica 1. Resistencia a Compresión a edades de a) 1 día y b) 3 días. La MUESTRA 1 se recolecto en el mes de Septiembre de 2009 y La MUESTRA 2 en Enero de 2010. Fuente: (Quijano, 2010)

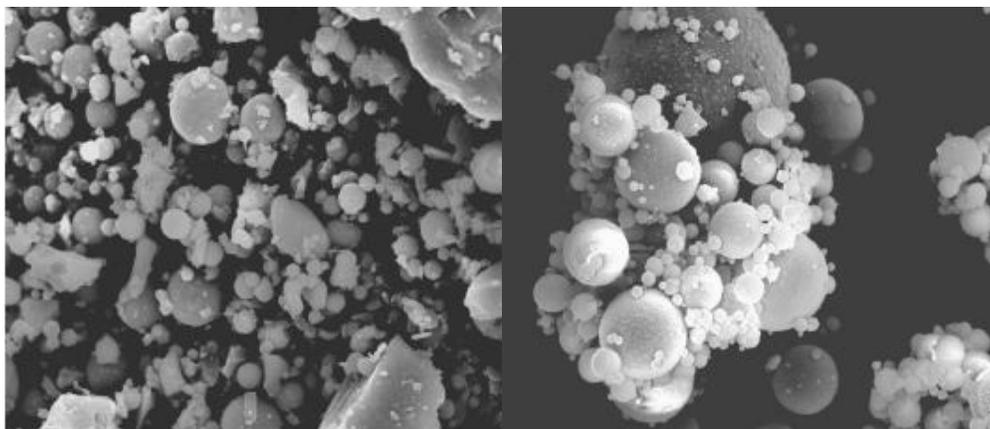


Gráfica 2. Resistencia a Compresión a edades de a) 7 día y b) 28 días. La MUESTRA 1 se recolectó en el mes de Septiembre de 2009 y La MUESTRA 2 en Enero de 2010. Fuente: (Quijano, 2010)

El Centro Internacional para el Desarrollo Sostenible del Cemento y del Concreto (ICON), Ottawa, Canadá, **(N Bouzoubaâ, 2001)** realizó estudios sobre las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones elaborados con alto volumen de cemento de ceniza volantes, con el fin de implementarlo técnicamente. Se encontró que propiedades como resistencia a la compresión y abrasión se mejoran con la inclusión de cenizas volantes en la mezclas, coincidiendo con la investigación de Eric Rodríguez **(Erich Rodríguez, 2009)**, en la cual se constata que las mezclas realizadas con ceniza volante sometida a algún tipo de molienda muestra un mejor desempeño frente a la ceniza que no fue molida, con cuatro mezclas distintas en concentración de Ceniza Volante y Cemento tipo III, donde se pudo observar que para resistencia a la compresión en edades tempranas las mezclas con adición de ceniza tenían menor resistencia que la mezcla de control de cemento portland, pero para edades de 14 a 91, el aumento de la resistencia era más lenta que para las mezclas de ceniza. En cuanto a la resistencia a la compresión, las mezclas de ceniza y de control mostraron similares desempeños, así, que para la edad de 28 días su resistencia a flexión fue 6.3 MPa y 6.7 MPa respectivamente.

Como anteriormente se mencionó el inicio de la implementación de geopolímeros se da con los concretos de suelo silicato de Victor Glukhovsky, desde esta fecha hasta la actualidad se investigan los factores que intervienen en estas mezclas geopoliméricas. Empezando con la procedencia y microestructura de los aglomerantes bien sea ceniza volante u otro, se puede analizar el desempeño de un geopolímero. Ángel Palomo Sánchez en compañía de Ana Fernández Jiménez y M Criado, **(Palomo, 2004)**, constituyen

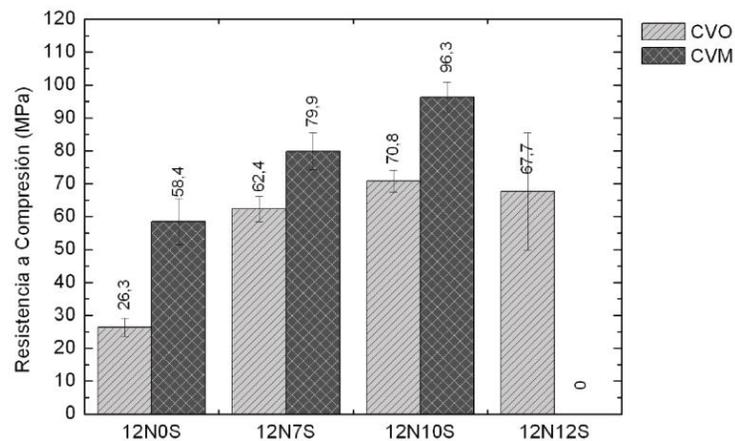
un estudio, describiendo el efecto de diferentes variables en la evolución microestructural de sistemas basados en cenizas volantes térmica y alcalinamente activadas. Utilizando disoluciones distintas; KOH, NaOH, 85%NaOH/15%Waterglass como solución alcalina, donde se tomó como variable de trabajo la concentración del activador, y el cual demostró ser un factor determinante para diseñar la dosificación de morteros o concretos de ceniza Volante Activada, dichos cambios consisten básicamente en un incremento de la densidad de la matriz y en la formación de un material vítreo a medida que la concentración aumenta. Asemejándose al estudio de Eric Rodríguez (**Erich Rodríguez, 2009**), en la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España, evaluó de manera general el comportamiento mecánico y algunas características micro-estructurales de morteros geopoliméricos, obtenidos a partir de una ceniza volante baja en calcio, con el propósito de determinar las condiciones óptimas de diseño y producción, donde se estudió la eficiencia de diferentes activadores alcalinos alternativos y la modificación de algunos parámetros de dosificación, como el efecto de la naturaleza del ion alcalino, la incorporación de una fuente extra de calcio y el contenido de agua de amasado. Observando por medio de la microscopia, que las propiedades físicas de geopolímeros basados en cenizas volantes dependen directamente de la cantidad de sílice presente, el cual se le viene incorporando a través de la solución activante, por lo se esperaría que la resistencia mecánica de la estructura aumente con el incremento de sílice, evaluando la incidencia de trabajar con ceniza volante molida y la original, teniendo como activadores alcalinos Oxido de Sodio  $\text{Na}_2\text{O}$  Y Oxido de Silicio  $\text{SiO}_2$ . (Ver Imagen 1)



*Imagen 1. Ceniza Volante Original y Molida. Efecto tratamiento de moliendo sobre la morfología de la CV.  
Fuente: (Erich Rodríguez, 2009)*

Obteniendo resultados donde se refleja claramente que el tratamiento mecánico previo a la Ceniza Volante favorece al incremento en su reactividad, por lo que

da la posibilidad de mayores resistencias, frente a los resultados de la Ceniza original no tratada. De esta manera, los sistemas geopoliméricos producidos con Ceniza Volante Molida y con condiciones de activación equivalentes exhiben resistencias hasta dos veces superiores, al mismo tiempo dándose cuenta que un exceso de silicato en la muestra puede tener un efecto negativo en comportamiento mecánico del material.



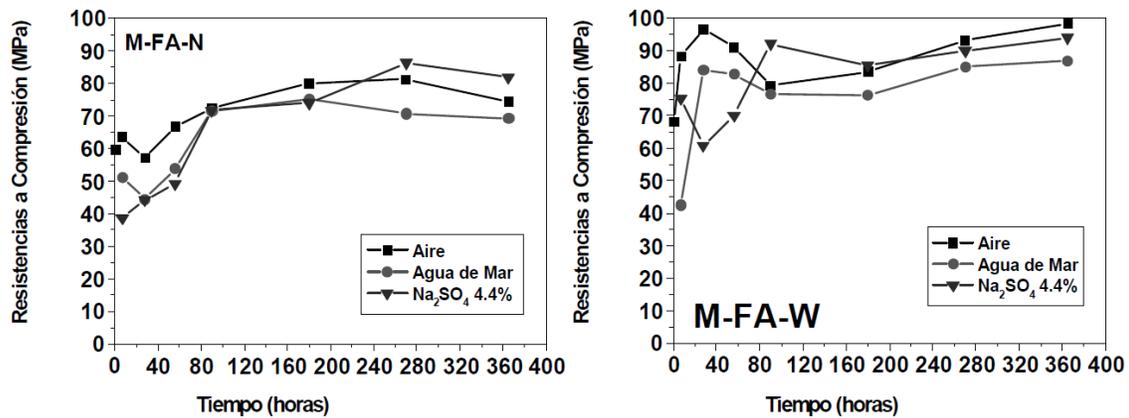
Gráfica 3. Efecto del contenido de Sílice en la solución activadora sobre la resistencia a compresión, de morteros de ceniza volante original (CVO) y ceniza volante molida (CVM). Fuente: (Erich Rodríguez, 2009)

La Universidad del Valle, Cali junto con el Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España, **(Puertas, 2002)** desarrolló un proyecto sobre la resistencia química al ataque por sulfatos y agua de mar a morteros de cementos alcalinos, donde se concluyó la elevada estabilidad química frente al ataque por sulfatos y agua de mar de los morteros de escoria activada alcalinamente y de los morteros de mezcla de escoria y ceniza activados alcalinamente, Los factores que más influyen en dicha durabilidad son el régimen de curado y el tipo de cemento, **(S. D. Wang, 1995)** se pudo demostrar que la impermeabilidad de los morteros y concreto de escoria activada alcalinamente resulta mucho mayor que la de los cementos portland convencionales, donde se realizaron probetas de escoria activada con Waterglass, escoria activada con Hidróxido de Sodio y escoria con ceniza volante, determinando durabilidad por dos métodos distintos: ASTM C1012 en el que las probetas se conservaron en cámara húmeda durante 28 días y posteriormente se colocaron en un solución acuosa de Sulfato de Sodio en concentración 50g/L durante 200 días, evaluando cambio dimensional y resistencia a la compresión; mediante el método de Kock-Steinegger. Se mantenían las probetas en cámara húmeda durante 21 días, sumergiéndolas luego en disolución acuosa de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  al 4.4% en peso, disolución de agua de mar artificial (ASTM D114 86) y agua desionizada/destilada, como medio de referencia, posteriormente se ensayaron a flexo-tracción. Obteniendo resultados

favorables para edades largas y con variaciones pequeñas para las probetas expuestas a soluciones sulfatadas frente a las se conservan en el medio de referencia. Profundizando en el tema anterior, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) Madrid, España, Fernández y Palomo, **(Fernández-Jiménez, 2009)** llevan a cabo un estudio sobre algunas de las propiedades tecnológicas de los materiales cementantes elaborados por activación alcalina de aluminosilicatos, sobre las propiedades de morteros y hormigones elaborados con cenizas volantes activadas, de forma que, en función del tipo de activador alcalino empleado y tras un curado térmico previo, el material resultante presenta propiedades y características que incluyen: elevadas resistencias mecánicas iniciales (a flexión y a compresión), baja retracción al secado, y una muy buena adherencia matriz-acero, así como una excelente resistencia al ataque ácido y un excelente comportamiento frente al fuego, implementando Ceniza Volante, un cemento comercial y como activadores alcalinos utilizaron dos disoluciones: N = NaOH 8M y W= mezcla del 15% de silicato sódico + 85% NaOH 12.5M.

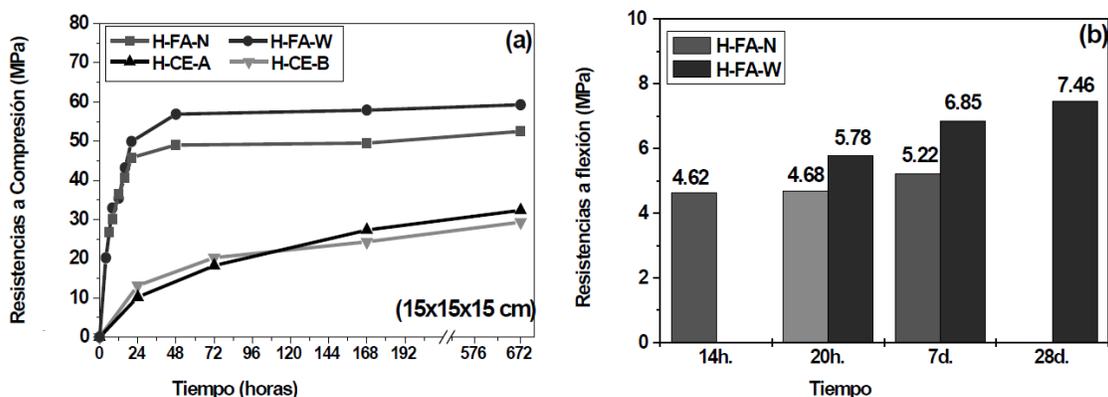
Como lo menciona Palomo **(Palomo, 2004)** en su estudio de las propiedades los Hormigones de Ceniza Volante, la durabilidad de los materiales está relacionada con la composición mineralógica y microestructura de los mismos. En los Concretos, morteros a base de cemento portland el principal problema durabilidad se encuentra relacionado en la mayoría de los casos, con la presencia de calcio. Sin embargo en los cementos basados en la activación alcalina de ceniza volante el principal producto de reacción que se forma es un gel de aluminosilicatos hidratado, sin calcio, por lo que el comportamiento durable de los cementos alcalinos ha de ser por fuerza diferente.

Para determinar comportamiento de estos materiales frente a inmersión en agua de mar y en sulfatos, Fernández y Palomo **(Palomo, 2004)**, elaboraron morteros con Ceniza Volante Activada NaOH 8M y Ceniza Volante Activada 15%Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+85%NaOH en 12.5Molar. Estos primas fueron sumergidos en dos tipos de medios agresivos: Agua de Mar (ASTM D 1141-90); Disolución de sulfato sódico (4.4% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Se extrajeron del medio agresivo a las edades de ensayo (7, 28, 56, 90, 180, 270 y 365 días) y ensayados mecánicamente a flexión y compresión. Los resultados mostraron que no hay un deterioro significativo de los materiales, aunque sí, se observan algunas fluctuaciones en los valores de resistencia mecánica sobre todo a edades iniciales y en ambos casos las resistencias mecánicas a compresión aumentan en función del tiempo independientemente del medio en el cual han estado sumergidos.



Gráfica 4. Resistencias mecánicas a compresión en morteros de ceniza volante activada alcalinamente (a) M-FA-N; (b) M-FA-W. (Fernández-Jiménez, 2009) / M-FAN: Mezcla Ceniza Volante Activada NaOH 8M; M-FAW: Mezcla Ceniza Volante Activada 15%Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+85%NaOH 12.5M. Fuente: (Palomo, 2004)

En dicho estudio se observó el desarrollo de elevadas resistencias a compresión a edades iniciales; así a un día se obtienen valores del orden de 45 MPa, valores similares a los obtenidos para un hormigón convencional en base Cemento Portland de altas resistencias. Las resistencias siguen aumentando en el tiempo aunque de forma más gradual. En el caso de las cenizas volantes al emplear la disolución activadora con sílice soluble procedente del silicato sódico se obtiene una clara mejora el desarrollo de resistencias mecánicas aunque hay que mencionar que en estos casos se observó que disminuía la trabajabilidad de las pastas. En cuanto a la resistencia a flexión obtuvieron que, al igual que ocurre a compresión, estos hormigones desarrollan muy buenas resistencias a flexión desde edades iniciales, valores de resistencia que siguen aumentando en el tiempo de forma paulatina. (Ver Gráfica 5 Gráfica 5. Resistencias mecánicas en hormigones, (a) a compresión probetas cúbicas (15x15x15 cm); (b) a flexión probetas prismáticas (15x10x70 cm)



Gráfica 5. Resistencias mecánicas en hormigones, (a) a compresión probetas cúbicas (15x15x15 cm); (b) a flexión probetas prismáticas (15x10x70 cm) / H-FAN: Mezcla Ceniza Volante Activada NaOH 8M; H-

FAW: Mezcla Ceniza Volante Activada 15%Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>+85%NaOH 12.5M; H-CE-A: Mezcla Cemento Portland; H-CE-B: Mezcla Cemento portland. Fuente: (Fernández-Jiménez, 2009)

De esta forma, con el desarrollo de nuevos materiales cementantes basados en cenizas volantes activadas con un agente alcalino, se quiere mejorar y superar problemas como la alta retracción por secado presentada en el cemento portland convencional (**Susan A. Bernal, 2011**), utilizando como activadores poliméricos; NaOH (soda caustica) y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (silicato sódico), los cuales en su mayoría son subproductos de procesos industriales o de fácil y económica fabricación. Inclusive en algunos países como Australia se comprobó que elementos prefabricados a base de cenizas volantes y escorias de siderurgia, presentan grandes propiedades frente al ataque de sulfatos o agentes agresivos o inclusive al fuego, la universidad de Melbourne por medio de varias pruebas comprobó que morteros con contenidos cenizas volantes activadas alcalinamente tienen una resistencia al fuego de más de 4 horas en comparación con el mortero convencional de cemento portland que tiene una resistencia al fuego promedio de 2,5 horas (**Van Deventer, 2006**), Zeobond es el primer promotor y líder mundial en la producción a gran escala, produciendo elementos prefabricados en base a ceniza volante y escorias de alto horno, logrando reducir en un 80% y 90% las emisiones de CO<sub>2</sub>, y mejorando su comportamiento a temperatura elevadas y productos químicos agresivos. Su cemento geopolimérico está hecho de aluminio y silicio, en lugar de calcio y silicio. Las fuentes de aluminio en la naturaleza no están presentes como carbonatos y por lo tanto, cuando se hace activo para su uso como cemento, no liberan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Las materias primas más fácilmente disponibles que contienen aluminio y silicio son cenizas volantes y escorias - estos son los materiales que Zeobond utiliza para crear su baja emisión de aglutinante de carbono. Actualmente Zeobond es líder mundial en la comercialización de concreto premezclado para las calzadas, senderos, casas-losas, paneles de pared prefabricados de hormigón, losas de hormigón.



Imagen 2 a) Andén Westgate Freeway b) Sendero Peatonal en Lyndarum Estate.  
Fuente: Zeobond Projects

## **4. OBJETIVOS**

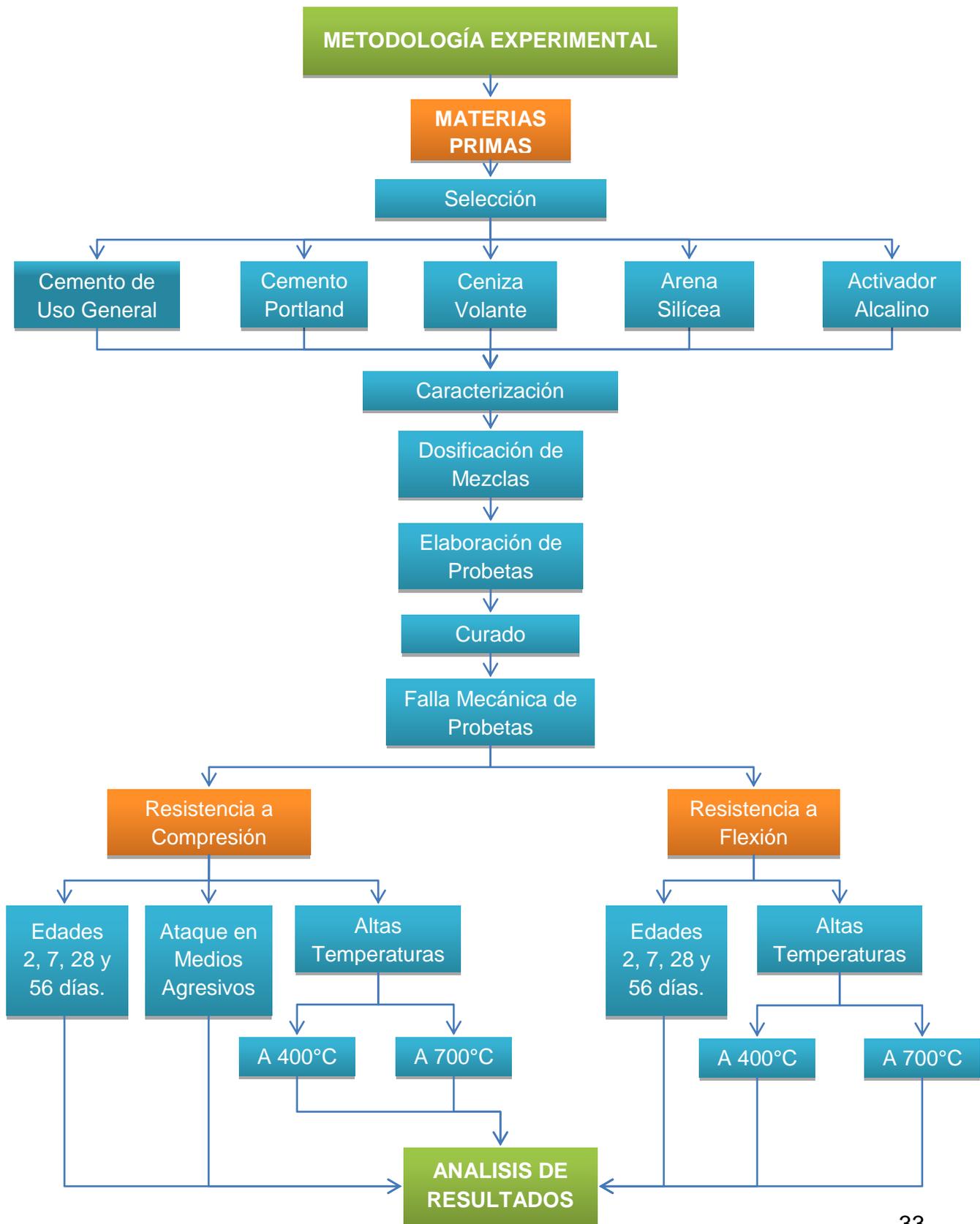
### **4.1. Objetivo General**

Evaluar el desempeño mecánico y durabilidad de los morteros geopoliméricos, utilizando distintos activadores alcalinos, variando su concentración.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Caracterizar los diferentes tipos de activadores alcalinos de sustancias silico-aluminosas definidos para el proyecto mediante consulta bibliográfica, y soporte técnico de expertos.
- Evaluar la efectividad de las mezclas activadas alcalinamente a través de un análisis experimental, evaluando sus propiedades mecánicas.
- Valoración de la durabilidad de las mezclas de mortero en función de su resistencia a temperaturas extremas y comportamiento frente a medios agresivos.
- Realizar un análisis comparativo entre los distintos morteros de geopolímeros y los morteros de cemento hidráulico.

## 5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL



## **5.1. Selección y caracterización de materias primas**

En el desarrollo de esta sección se realiza la selección y caracterización de cada una de las materias primas a utilizar durante el desarrollo del proyecto. Dando a conocer las metodologías y que características serán evaluadas en cada material.

### **5.1.1. Materias Primas**

Se seleccionaron dos mezclas de control con cemento de uso general tipo I y cemento portland tipo III, otras cuatro mezclas con ceniza volante y dos activadores alcalinos: Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio, a cada una de las mezclas con ceniza volante se le adiciono un aditivo plastificante. A continuación se presentan los ensayos de caracterización a realizar.

#### **5.1.1.1. Cemento de uso general Tipo I y Cemento Portland Tipo III**

Uno de los cementos utilizados fue un Cemento Tipo I de marca Argos, color gris claro, **(Argos, 1934)** empleado en la producción de concretos para cimentaciones, muros, contenciones, estructuras, rellenos y todo tipo de obra en general, preparación de morteros para mampostería, pega de cerámicos, enchapes, acabados, recubrimientos y morteros de relleno, elaboración de morteros para pisos, nivelaciones, lechadas y emboquillados, producción de elementos prefabricados de pequeño y mediano formato, reparaciones, remodelaciones, pequeñas obras y diversas aplicaciones domésticas.

Y otro Cemento Portland Tipo III, color gris claro, este tipo de cemento desarrolla altas resistencias a edades tempranas, a 3 y 7 días. Esto se debe por el cemento obtenido durante la molienda es más fino. Su utilización se debe a necesidades específicas de la construcción, cuando es necesario retirar cimbras, encofrados lo más pronto posible o cuando por requerimientos particulares, una obra tiene que ponerse en servicio muy rápidamente, como en el caso de carreteras y autopistas **(ASTM, 2012)**.

Para la implementación de estos cementos se realizaron algunos ensayos de caracterización con los métodos enunciados a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Ensayos de caracterización de los Cementos Hidráulicos

ENSAYO	NORMA	DESCRIPCIÓN
Densidad	NTC 221	Tiene por objeto determinar la densidad del cemento hidráulico, su principal utilidad se encuentra relacionada con el diseño y control de mezclas de concreto.
Finura	NTC 33	La importancia de la finura radica en la influencia que puede tener en la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado
Consistencia Normal	NTC 110	Tiene por objeto establecer la cantidad de agua requerida para la preparación de pastas de cemento hidráulico, de consistencia normal.
Tiempos de Fraguado	NTC 118	Tiene por objeto determinar el tiempo que tarda la pasta en adquirir rigidez, se obtiene un tiempo de fraguado inicial cuando la aguja del aparato obtenga una penetración de 25mm y un tiempo de fraguado final para cuando se obtenga una penetración de 1mm

Los resultados para cada uno de los ensayos anteriores se presentan en la sección 6.1.1.

#### 5.1.1.2. Ceniza Volante

La ceniza volante a utilizada en la presente investigación, proveniente de la Industria Textilera Fabricato, Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de carbón bituminoso. Se realizaron algunos ensayos de caracterización para la identificación de las propiedades de la ceniza volante a utilizar. (Ver Tabla 5)



Imagen 4. Ceniza Volante Fabricato. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Ensayos de caracterización de la Ceniza Volante.

ENSAYO	NORMA	DESCRIPCIÓN
<b>Requerimientos Químicos</b>		
Dióxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Oxido de Aluminio (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )+Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	NTC 3493	Se analizo la muestra por fluorencencia de rayos x. Este análisis permite cuantificar la proporción de óxidos presentes en el cemento, los cuales se relacionan entre si para dar determinadas características al aglomerado.
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	NTC 3493	Tiene por objeto determinar el contenido de Trióxido de Azufre, el cual decide la calidad del cemento, por modificar factores como tiempos de fraguado.
Contenido de Humedad	NTC 3493	Tiene por objeto determinar el contenido de humedad de una muestra, la importancia de este radica en el contenido de agua junto con la cantidad de aire, que explica cambios de volumen, estabilidad mecánica.
Perdida por Ignición	NTC 3493	Tiene por objeto determinar que contenido de materia orgánica presente en la muestra, Este método sirve para determinar la oxidación cuantitativa de materia orgánica en tales materiales y proporciona una estimación válida del contenido orgánico
<b>Requerimientos Físicos</b>		
Granulometría	-	Se realiza la granulometrías de la ceniza por medio del método laser.
Finura	NTC 3493	La importancia de la finura radica en la influencia que puede tener el la velocidad de hidratación, la resistencia inicial y el calor generado
Densidad	NTC 3493	Tiene por objeto determinar la densidad de la muestra de ceniza, la cual juega un papel importante en la producción y funcionamiento de morteros y concretos, tiene que tenerse en cuenta para temas de diseño.
Requerimiento de agua	NTC 3493	Tiene por objeto determinar un estimativo de el agua requerida por la pasta de mortero.
Índice de Actividad Resistente	NTC 3493	Tiene por objeto determinar cuando un aditivo mineral resulta de un nivel aceptable de desarrollo de resistencia, cuando se usa con cemento hidráulico en el concreto. Dado que el ensayo es efectuado con mortero, los resultados pueden no suministrar una correlación directa de cómo contribuye el aditivo mineral en la resistencia del concreto.

### 5.1.1.3. Arena

Se realizaron ensayos de caracterización de la arena, con el fin de obtener una arena con propiedades similares a la de una arena normalizada se utilizan dos arenas con gradaciones distintas, siendo Arena silícea Tipo 60 y Tipo 40, según la clasificación de la empresa SA Arena Silícea & Arquitectos LTDA (SA Arena silícea & Arquitectos LTDA, 2004), en proporciones de 50% y 50%.



Imagen 5. Arena Silícea 50% arena 40 y 50% arena 60. Fuente: Elaboración Propia

Los ensayos de caracterización para la Arena Silícea se enuncian a continuación en la Tabla 6.

Tabla 6. Ensayos de caracterización de la Arena Silícea.

ENSAYO	NORMA	DESCRIPCIÓN
Granulometría	INV.E 213-07	Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente.
Materia Orgánica Contendida	INV.E 212-07	Tiene por objeto determinar de manera aproximada , la presencia de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico, proporcionando una advertencia sobre las impurezas orgánicas que puedan estar presentes en el material.
Gravedad Específica de Agregados Finos	INV.E 222-07	Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk y aparente 23 /23°C. Determina (después de 15 horas en agua) la gravedad
Absorción de Agregados Finos	INV.E 222-07	específica bulk basada en la masa saturada y superficialmente seca del agregado y la absorción.
Densidad Bulk - Masa Unitaria	INV.E 217-07	A menudo es utilizado para determinar valores de densidad bulk, que son utilizadas por muchos métodos de selección de proporciones para mezclas de concreto,
Porcentaje de Vacíos	INV.E 217-07	Representa un volumen unitario de agregados, el espacio entre partículas en una masa de agregado no ocupado por materiales minerales sólidos.

#### 5.1.1.4. Activadores alcalinos

Para geopolímeros con ceniza volante se utilizaron dos tipos de activadores alcalinos hidróxido de Sodio y Silicato de sodio. Para cada una de estos

activadores se utilizaron soluciones en diferente concentración escogidas según su comportamiento mecánico (resistencia a compresión) y trabajabilidad.



Imagen 6. Hidróxido de Sodio en Escamas y Silicato de Sodio. Fuente: Elaboración Propia

#### 5.1.1.5. Aditivo Puzzolith 460 N

Se adiciona Puzzolith460 N a todas las mezclas de mortero en las cuales se utilizó ceniza volante, con el fin de mejorar sus propiedades de manejabilidad, y fluidez. **(BASF, 1865)** Este es un aditivo hiperplastificante reductor de agua en alto rango. Con excelente capacidad fluidificante, mejora la impermeabilidad y durabilidad del concreto al disminuir la porosidad de la misma, permite obtener concreto fluido con baja relación agua/cemento, sin segregación ni sangrado, permite la reducción de los ciclos de curado (en tiempo y temperatura) por reducción de la relación agua/cemento, mejora el acabado y la textura de la superficie del concreto.

Tabla 7. Especificaciones Técnicas del Puzzolith 460 N

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Aspecto		Líquido poco turbio
Densidad @+20°C	g/cm <sup>3</sup>	1.05±0.02
ph @+20°C		6.5±1
Viscosidad @+20°C	cps	<60
Contenido Halogenuros	%	<0.1
Punto de Congelación	°C	0

Este aditivo es recomendado para, concreto prefabricado de alta calidad, concreto pretensado, aplicaciones donde se demanden altas resistencias iniciales y finales, para obra civil.

## 5.2. Preparación de los especímenes

En este estudio el proceso de elaboración de las probetas cumplieron varias fases, donde inicialmente se definen que materiales se utilizarían para realizar las pastas de mortero, al igual que el tipo activadores alcalinos para las mezclas con inclusión de Ceniza Volante, cuál sería su concentración, cuáles serían las dosificaciones para las diferentes mezclas, finalmente las propiedades se evaluarían durante el proceso.



Imagen 7. Cubos y Viguetas de Mortero de Ceniza Volante Activada Alcalinamente. Fuente: Elaboración propia

### 5.2.1. Definición de mezclas

Para el desarrollo de este proyecto se realizaron seis (6) mezclas, con dos (2) diferentes activadores alcalinos, variando la concentración de los mismos en la mezcla. Se definieron dos (2) mezclas de control con material cementante Cemento Hidráulico Tipo I y Cemento Portland Tipo III como sistema de referencia y cuatro (4) más con material cementante ceniza volante activada alcalinamente con Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio.

Para elaboración de las probetas definitivas de ensayo, se realizaron probetas previas para definir cuál era la concentración óptima de Hidróxido de Sodio NaOH óptima, según lo evaluado experimentalmente.

Tabla 8. Diseño Experimental.

<b>Item</b>	<b>Descripción</b>
Variable Independiente	Porcentaje de concentración de los Activadores Alcalinos
Variable Dependiente	Resistencia a Compresión y Flexión, Altas temperaturas Pérdida de Masa ante medios Agresivos .
Numero de Repeticiones	2 Probetas por nivel

- Selección inicial de concentración de Hidróxido de Sodio NaOH en las mezclas. Como primera etapa de elaboración de las probetas se definieron tres concentraciones: 8 M NaOH, 10 M NaOH y 12 M NaOH. Para cada una de estas concentraciones se hicieron cubos de mortero con el fin de evaluar su resistencia a compresión a edades de 1, 7 y 28 días, según la norma INV.E-323 y NTC 220.
- Definición de dosificaciones. Con los resultados obtenidos de las mezclas anteriores y seleccionando el mejor de los tres comportamientos se definen las dosificaciones finales.

A cada una de las mezclas se le adicionó aditivo puzzolith 460 N, en iguales proporciones (4% de la masa cementante), con el fin de mejorar su manejabilidad

- **Mezcla 1:** Mezcla de control con Cemento Portland Tipo III.
- **Mezcla 2:** 100% Ceniza Volante, activada 100% con Hidróxido de Sodio NaOH
- **Mezcla 3:** 100% Ceniza Volante, activada 75% con Hidróxido de Sodio NaOH y 25% Silicato de Sodio.
- **Mezcla 4:** 100% Ceniza Volante, activada 50% con Hidróxido de Sodio NaOH y 50% Silicato de Sodio.
- **Mezcla 5:** 100% Ceniza Volante, activada 25% con Hidróxido de Sodio NaOH y 75% Silicato de Sodio.
- **Mezcla 6:** Mezcla de control con Cemento de uso general Tipo I.

A continuación se presentan las dosificaciones planteadas para una mezcla de mortero con peso de masa cementante de 500g.

Tabla 9. Dosificaciones Mezclas de Mortero.

MATERIAL	MEZCLAS					
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
Cemento Tipo I	-	-	-	-	-	500
Cemento Tipo III	500	-	-	-	-	-
Ceniza Volante	0	500	500	500	500	-
Arena	1375	1375	1375	1375	1375	1375
Agua	295	-	22.5	45	67.5	295
NaOH	-	300	225	150	75	-
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub>	-	-	52.5	105	157.5	-
Aditivo Puzzolith 460 N	20	20	20	20	20	20

No se realizó mezcla activada alcalinamente con 100 por ciento Silicato de Sodio debido a que durante el proceso de definición de mezclas definitivas, se realizó una mezcla prueba, donde la trabajabilidad la pasta fue nula, y no fue posible mezclar todos los materiales para la pasta de mortero. (Ver Imagen 8), La mezcla geopolimérica con ceniza volante y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  se solidificó antes de añadir la arena silícea.



Imagen 8. Mezcla Prueba de Ceniza Volante Activada Alcalinamente 100%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . Fuente: Elaboración Propia.

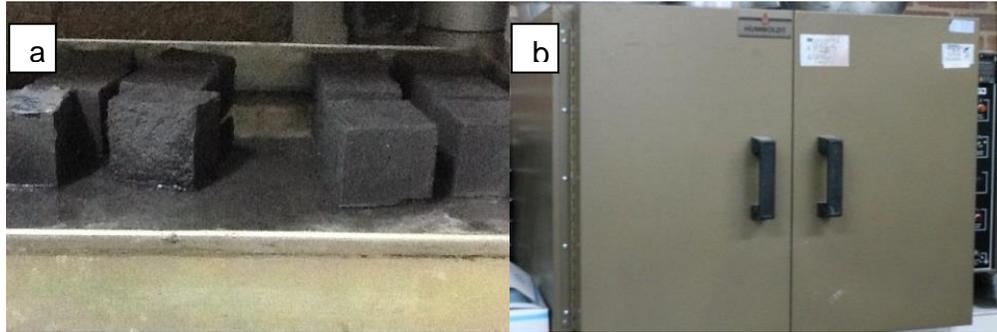
Tabla 10. Numero de Especímenes realizados.

Ensayo	MEZCLAS						
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	
<b>Resistencia compresión</b>	A edades de 1, 7, 28 y 56 días	8	8	8	8	8	8
	Alta temperatura 400°C Y 700°C	4	4	4	4	4	4
	Ataque en Medios Agresivos	2	2	2	2	2	2
<b>Resistencia Flexión</b>	A edades de 7, 28 y 56 días	6	6	6	6	6	6
	Alta temperatura 400°C Y 700°C	4	4	4	4	4	4

- Como paso clave para la elaboración de los especímenes se tiene el curado a una temperatura controlada de 60°C por dos días. Se pudo observar tanto experimental como en documentos que las mezclas de ceniza volante activada alcalinamente no reaccionara, (**Fernández-Jiménez, 2009**) si no hay un factor de temperatura, un incremento en la temperatura de curado acelera la cinética de la reacción de geopolimerización, ya que favorece la disolución de las disoluciones activantes, sin embargo hay que tener en cuenta que la implementación de elevadas temperaturas de curado y/o

prolongados tiempos de exposición puede afectar negativamente las propiedades mecánicas.

Todas las mezclas con ceniza volante luego de ser fundidas fueron dejadas en horno durante dos días, posteriormente se desencofraron y llevaron a la cámara de curado.



*Imagen 9. a) Cubos de Mortero sin Curado a 60C b) Horno Dispuesto para el curado de las probetas  
Fuente: Elaboración Propia.*

## 6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, que comprende resultados de caracterización de las materias primas, resistencias a compresión y flexión en las edades especificadas, resistencias a altas temperatura, resistencias a ataque de ácidos y durabilidad frente a los mismos.

### 6.1. MATERIAS PRIMAS.

Se realiza la caracterización de cada una de las materias primas a utilizar, con el fin de determinar factores que puedan influir en las propiedades finales de las pastas de mortero.

#### 6.1.1. Cemento de uso general Tipo I y Portland Tipo III

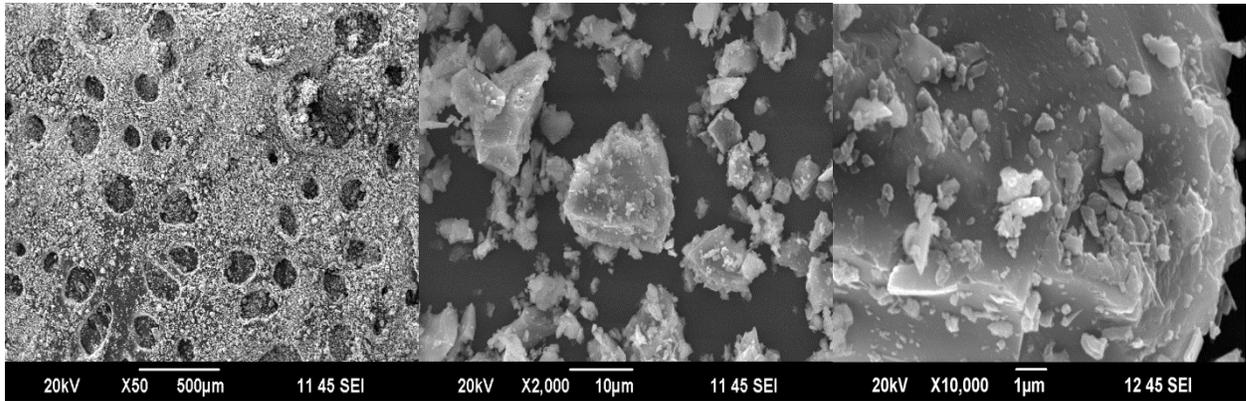
A continuación se presentan los resultados obtenidos en la caracterización física de los cementos hidráulicos. Cada uno de los resultados mencionados fueron determinados mediante la metodología nombrada en la sección 5.1.1.1.

Tabla 11. Resumen Caracterización Cemento Hidráulico Tipo I y Tipo III.

PARAMENTRO		RESULTADO	
		Cemento Tipo I	Cemento Tipo III
Densidad	(g/cm <sup>3</sup> )	3.02	3.17
Finura	(m <sup>2</sup> /Kg)	403.55	379.69
Consistencia Normal	A/C	30.00	26.10
Tiempo de Fraguado Inicial	(min)	170.00	175.00
Tiempo de Fraguado Final	(min)	210.00	212.00

#### a. Microscopia Electrónica de Barrido SEM.

Se realizó un análisis visual de la micro-estructura del cemento por medio de una microscopia electrónica de barrido, con el microscopio JOEL (Ensayo desarrollado en la Universidad de los Andes) (**Andes, 1948**), lo que permite apreciar con mayor facilidad textura y morfología estructural del cemento. (Ver Imagen 10)



*Imagen 10 Microscopia Electrónica de Barrido del Cemento Hidráulico.*

**b. Peso Específico, Finura del Cemento Hidráulico:**

Se determinó el peso específico de la muestra de Cemento Tipo I y Tipo III, por medio del método de Le Chatelier según el procedimiento de la NTC 221. Se determina la finura del Cemento Tipo I y Cemento Tipo III, por medio del Aparato de Blaine, según el procedimiento descrito en la Norma NTC 33.



*Imagen 11 Aparato de Blaine. Peso Específico Cemento.*

Obteniendo resultados acorde con los cementos evaluados, dentro de lo estipulado en norma.

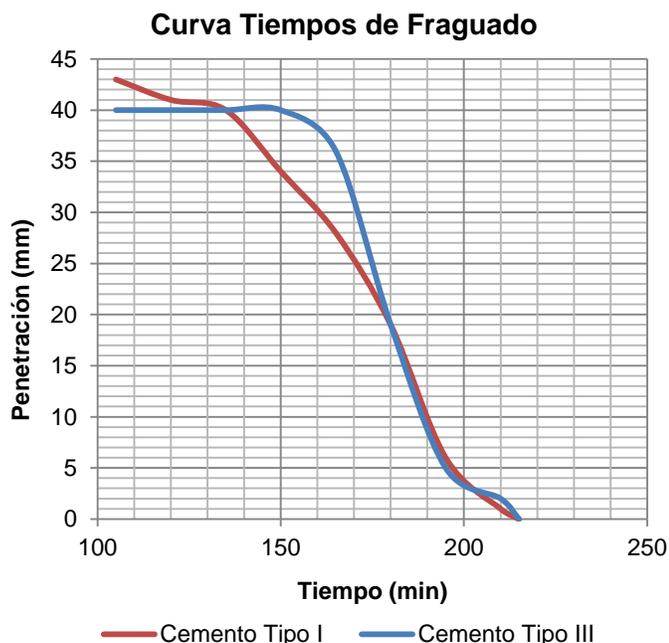
**c. Consistencia Normal y Tiempos de Fraguado del Cemento Hidráulico:**

Se determina la consistencia normal del Cemento Tipo I y Tipo III, mediante el método del aparato de Vicat, Según el procedimiento de la Norma NTC 110, distinguiendo que para una pasta de cemento tipo I es mayor el requerimiento de agua, en comparación con la del cemento Tipo III.

Se realiza la evaluación de tiempo de fraguado del Cemento Tipo I, por medio del método del Aparato Vicat, según el procedimiento descrito en la Norma INV. E-305-07 y NTC 118.

Tabla 12. Datos de Medición Tiempos de Fraguado Cemento Tipo I y Tipo III.

Cemento	Tipo I	Tipo III
Tiempo (min)	Penetración (mm)	Penetración (mm)
105	43	40
120	41	40
135	40	40
150	34	40
165	28	36
180	19	19
195	6	5
210	1	2
215	0	0



Gráfica 6. Tiempos de Fraguado curva representativa Cemento Tipo III. Fuente: Elaboración Propia.

### 6.1.2. Ceniza Volante

Se tiene una ceniza volante clase F según la clasificación de la ASTM c618, los resultados obtenidos por la caracterización química y física se presentan a continuación.

Tabla 13. Resumen Caracterización Ceniza Volante.

PARAMETRO	RESULTADOS	NORMA CLASE F
<b>Requerimientos Químicos</b>		
Dioxido de Silicio (SiO <sub>2</sub> ) + Oxido de Aluminio (AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )+Oxido de Hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) min	% 78.369	70
Trioxido de Azufre (SO <sub>3</sub> ), max	% 0.025	5
Contenido de Humedad, max	% 0.280	3
Perdida por ignición, max	% 2.180	6
<b>Requerimientos Físicos</b>		
Densidad	2.091	
Finura, Cantidad Retenida en el tamiz 45µm (No 325), max, %	% 77.79	34
Indice de Actividad Resistente		
Con Cemento Portland, a 7 días, min, porcentaje de control	84.75	75
Con Cemento Portland, a 28 días, min, porcentaje de control	101.28	75
Requerimiento de Agua, max, porcentaje de control	123.97	105

## Requerimientos Químicos.

### a. *Microscopia Electrónica de Barrido.*

Se realizó un análisis visual de la micro-estructura de la ceniza Volante encontrando que en contraste con el cemento que presenta partículas angulares, esta cuenta con una estructura de partículas esféricas. Lo que puede que afecte la adherencia con el agregado fino de la pasta de mortero. (Ensayo desarrollado en la Universidad de los Andes).

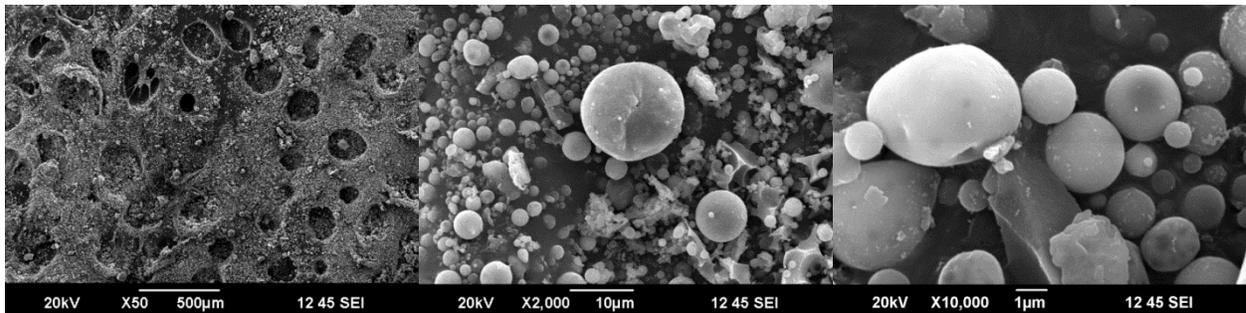


Imagen 12 Microscopia Electrónica de Barrido de las Cenizas Volantes.

### b. *Caracterización Química:*

La caracterización química de la ceniza volante fue realizada y proporcionada por el Centro de Investigación y Desarrollo Argos.

Tabla 14. Caracterización Química Ceniza Volante.

MUESTRA	Ceniza Coltejer	Ceniza Coltejer Pasante 75 micras	Variación %
LOI	7,26	6,14	15,4
SiO <sub>2</sub>	43,372	45,000	3,8
TiO <sub>2</sub>	1,247	1,231	1,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29,071	28,858	0,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,926	5,893	0,6
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	0,025	0,020	20,0
MgO	2,300	2,274	1,1
CaO	<b>6,985</b>	6,547	6,3
Na <sub>2</sub> O	1,517	1,448	4,5
K <sub>2</sub> O	1,594	1,289	19,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,088	0,081	8,0
SO <sub>3</sub>	0,025	0,637	2448,0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,112	0,114	1,8
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,041	0,045	9,8
SrO	0,059	0,048	18,6
ZrO <sub>2</sub>	0,015	0,013	13,3
BaO	0,278	0,275	1,1
NiO	0,020	0,024	20,0
CuO	0,021	0,020	4,8
ZnO	0,035	0,034	2,9
PbO	0,009	0,009	0,0
HfO <sub>2</sub>	0,001		100,0

En cuanto al requerimiento de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , nos encontramos por encima del mínimo admitido por la norma, de igual forma cumpliendo con el máximo contenido de  $\text{SO}_3$ , este parámetro decide la calidad del cemento, así, cuando este es menor al 2% el fraguado puede ser rápido, pero cuando se encuentra entre 6% y 10% se inhibe en fraguado.

**c. Contenido de Humedad:**

Se determinó el contenido de humedad de la muestra de ceniza volante, por medio del método descrito en la Norma ASTM C311-11b (ASTM C150, 2012).

$$w = \frac{\text{Peso perdido}_{105^\circ\text{C}}}{\text{Peso Inicial Humedo}} \times 100 = \frac{149,94 - 149,52}{149,94} \times 100 = 0,28\%$$

*Ec. 1*

Este factor es de gran importancia, debido a que afecta el tiempo de fraguado y en cambios volumétricos de la mezcla para la ceniza evaluada el contenido de humedad es bajo por lo que este factor no influye de gran forma en el tiempo de fraguado de los geopolímeros.

**d. Perdida por Ignición:**

Se determina la perdida por ignición por medio del método de la Norma ASTM C311-11b.

$$\text{Perdida por Ignición \%} = \frac{\text{Peso perdido}_{105^\circ\text{C a } 750^\circ\text{C}}}{\text{Peso Inicial Humedo}} \times 100 = 2,18\%$$

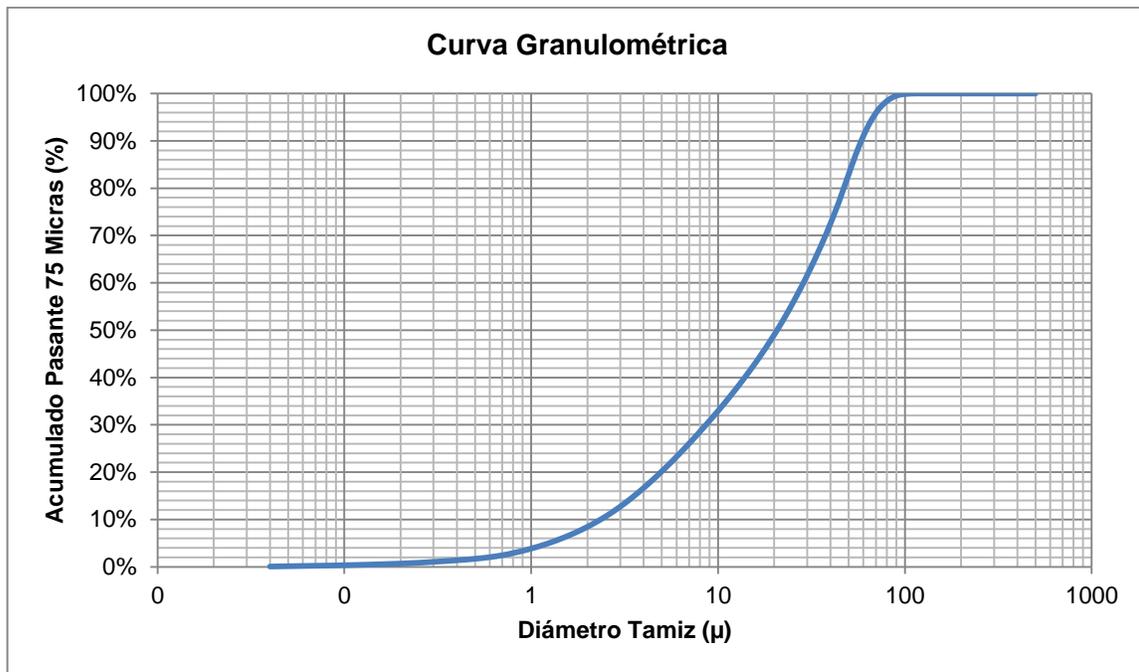
*Ec. 2*

Resultado por el cual se puede discernir que la ceniza analizada tiene un bajo contenido de inquemados no sobrepasa. Midiendo la cantidad de anhídrido carbónico de los carbonatos presentes, así como la cantidad de agua de hidratación incorporada al aglomerante por la misma causa.

**Requerimientos Físicos.**

**a. Granulometría:**

Se realizó la granulometría de las cenizas volantes. Por medio del método Laser. Con el fin de conocer la distribución granulométrica.



Gráfica 7. Curva Granulométrica Cenizas Volantes

**b. Finura:**

Se determina la finura de la ceniza por medio del método descrito en la norma NTC 3493 y ASTM c311. Pasante 45μ (Tamiz No 325) la ceniza evaluada cuenta con una finura de 77.79%.

La finura resulta ser un parámetro significativo para aumentar la capacidad de reacciones con efecto puzolánico en la ceniza volante, debido a que al tener un mayor nivel de finura las áreas superficiales de la estructura sílicea de la ceniza volante pueda reaccionar en mayor porcentaje. En este caso se supera el porcentaje límite de material pasante 45μ que se encuentra según la norma NTC 3493 en máximo 34%.

**c. Densidad:**

Se determinó el peso específico de la muestra de Ceniza Volante por medio del procedimiento descrito en la norma ASTM C188 e INV. E-128-07.

Tabla 15. Peso Específico Ceniza Volante.

MUESTRA		F
Tipo de Ceniza Volante(según ASTM)		
Factor de coreccion basada en la densidad del agua a 20°C, K		0.999
Masa del picnómetro + agua Wa	(g)	308.97
Masa del picnómetro + agua + solidos a temperatura del ensayo, Wb	(g)	699.72
Masa del suelo seco, Ws	(g)	282.17
Gravedad específica de solidos, (Gs 20°C )		2.091

**d. Índice De Actividad Resistente:**

Se determina el índice de actividad resistente por medio del método descrito en la Norma ASTM C311-11b y NTC 3493.

Se reemplaza el 20% de la masa de cemento de la mezcla de control. Calculando haciendo uso de la siguiente ecuación.

$$IAR = \frac{A}{B} \times 100 = MPa$$

**Ec. 3**

A: Promedio resistencia compresión cubos mezclas de ensayo ceniza volante.

B: Promedio resistencia compresión cubos mezclas de control.

Obteniendo resultados favorables que muestran la alta posibilidad de un buen desempeño de la ceniza volante en aglomerantes. Alcanzando para 28 días más de 100% lo que muestra que se mejoran las propiedades las mezclas de control.

*Tabla 16. Índice de Actividad Resistente para Cenizas Volantes.*

Mezcla	Edades	Resistencia a Compresión en cubos (Mpa)	
		7 días	28 días
Mezcla de Control		23.28	24.15
Mezcla de ensayo con Ceniza Volante		19.73	24.46
Índice de Actividad Resistente, IAR		84.75	101.28

Los índices de actividad resistente indican el cumplimiento de la norma, así que a las edades ensayadas superan el mínimo de porcentaje de control (75%) con cemento.

**e. Requerimiento De Agua:**

Se determinó el requerimiento de agua para la pasta por medio del método según la Norma NTC 3356

$$RA = \left[ \frac{Y}{242} \times 100 \right] = \left[ \frac{300}{242} \times 100 \right] = 123.966$$

**Ec. 4**

Y= Agua requerida por la mezcla para que el flujo sea ± 5 el flujo de la mezcla de control.

Que da un estimativo del agua requerida por la pasta de mortero, el valor obtenido se sale del máximo especificado por la norma NTC 3356 para una ceniza tipo F.

### 6.1.3. Arena Silícea

Se realizan los ensayos correspondientes para la caracterización de la arena, como agregado fino en la pasta de mortero.

Tabla 17. Resumen Caracterización de la Arena Silícea.

PARAMETRO	RESULTADO
Materia Orgánica Contenida	No. 1
Gravedad específica bulk, 23/23°C, (Gsb 23/23°C )	2.548
Gravedad específica bulk Saturada Superficialmente Seca, 23/23°C (GsbSSS 23/23°C )	2.594
Gravedad específica Aparente, 23/23°C, (Gsa 23/23°C )	2.672
Absorción de Agregados Finos	% 1.832
Densidad Bulk - Masa Unitaria	1591.442
Porcentaje de Vacíos	99.687

#### e. Microscopia Electrónica de Barrido.

Se realizó un análisis visual de la micro-estructura de la arena silíceo con el fin de conocer su morfología, en la Imagen 13 se puede observar la arena 40 con un tamaño de partículas mayor que el de la arena 60, lo que es favorable puesto juntas conforman una granulometría adecuada para los morteros, con bajo contenido de vacíos. (Ensayo desarrollado en la Universidad de los Andes)

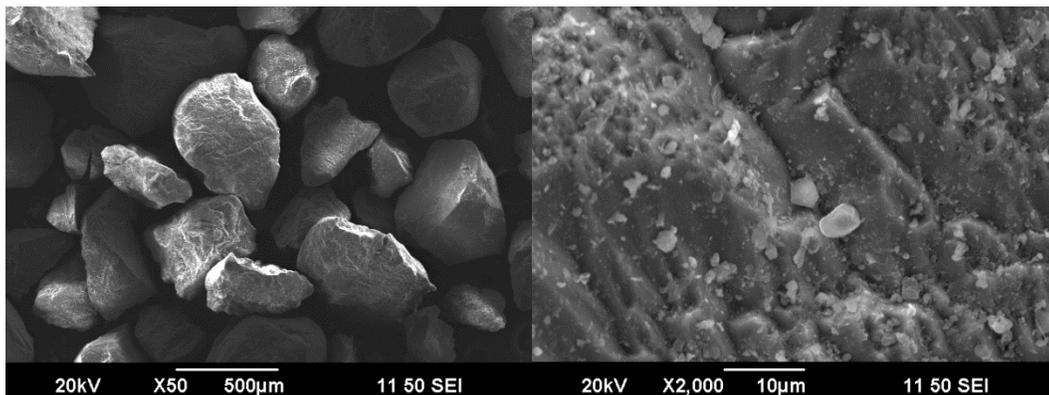


Imagen 13. Microscopia Electrónica de Barrido de la Arena Silíceo Arena 40.

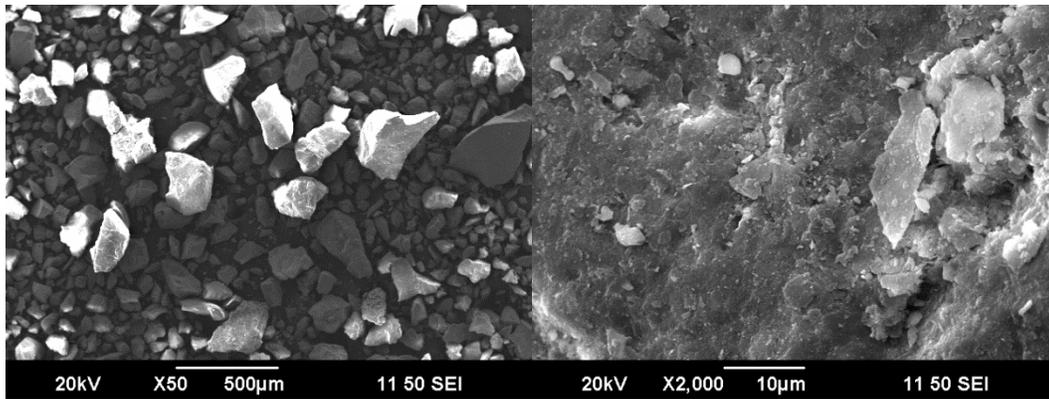


Imagen 14 Microscopia Electrónica de Barrido de la Arena Sílicea Arena 60.

**a. Granulometría:**

Se realiza la granulometría de la Arena sílicea con el fin de conocer la distribución de partículas.

Tabla 18. Granulometría Agregado Fino

Tamaño Tamiz (In)	(%) Pasa	Tipo de agregado (%)
No 4	100.00	ARENA
No 8	100.00	
No 16	99.92	
No 30	98.36	
No 50	28.36	
No 100	7.14	FINO
No 200	1.92	
Fondo	0.00	



Gráfica 8. Curva Granulométrica Agregado fino. Fuente: Elaboración Propia.

**b. Materia Orgánica contenida:**

Se realiza un estimativo del contenido de materia orgánica presente en la arena a utilizar, de acuerdo a la Norma INV. E- 212 según los colores de referencia la arena analizada cuenta con un nivel de materia orgánica de 1, lo que significa que no presenta ningún nivel aparente de materia orgánica. Lo que es una propiedad favorable, puesto que la presencia de materia orgánica en los morteros tiene un efecto perjudicial, ya que puede retardar efecto el fraguado y el endurecimiento del mortero, reduciendo resistencias y durabilidad de los mismos.



Imagen 15. Ensayo de Colorimetría. Fuente: Elaboración Propia.

**c. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos:**

Se determina la gravedad específica del agregado fino a utilizar (Arena 60/40), por medio del método descrito en la Norma INV. E-222-07. (Ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**)

Se determinan las gravedades específicas por medio de las ecuaciones descritas a continuación según la Norma INV. E-222-07:

- Gravedad específica Bulk, 23/23°C, ( $G_{sb_{23/23^{\circ}C}}$  )
- Gravedad Específica Bulk Saturada Superficialmente Seca, 23/23°C ( $G_{sb_{SSS\ 23/23^{\circ}C}}$ )
- Gravedad Específica Aparente, 23/23°C ( $G_{sa_{23/23^{\circ}C}}$  )

Se determina la gravedad específica del agregado fino a utilizar (Arena 60/40), por medio del método descrito en la Norma INV. E-222-07.

**d. Densidad Bulk- Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos:**

Se determinó la Masa Unitaria de la arena por medio del método descrito en la Norma INV. E-217-07.

Se determinó el porcentaje de vacíos, se utilizó solo el método apisonado para hallar el porcentaje de Vacíos. Por medio del Método descrito INV. E-217-07. (Ver Tabla 17)

**6.1.4. Activadores Alcalinos**

**1. Hidróxido de Sodio NaOH (Soda caustica)**

El hidróxido de sodio en presentación de escamas con pureza del 98.8%, este para su inclusión en la mezcla de mortero fue disuelto.

En principio, se trabajaron tres soluciones de Hidróxido de Sodio en tres diferentes concentraciones, con el fin de determinar que concentración tenía un mejor comportamiento en la pasta de mortero, en cuanto a fluidez y resistencia a compresión, utilizando concentraciones de 8M, 10M y 12M.

*Tabla 19. Análisis Hidróxido de Sodio (NaOH) Certificado de Calidad.*

<b>Descripción</b>		
Empresa	<b>Bell Chem Internacional S.A.</b>	
	Soda Caustica en Lentejas 98.5%	
<b>Item</b>	<b>Estandar</b>	<b>Resultado Analisis</b>
NaOH	98.5 Min	98.8
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.5 Max	0.3
NaCl	0.04 Max	0.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.005 Max	0.003
P ppm	-	0.4
AS ppm	-	0.088
HG ppm	-	0.016
C ppm	-	0.001
Cl ppm	-	1.04
N ppm	-	1.3

## 2. Silicato de Sodio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Water Glass)

El Silicato de Sodio se redujo en un 70% de Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> y 30 % agua, para poder que la pasta de mortero pudiese ser trabajable.

Tabla 20. Análisis Silicato de Sodio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) Certificado de Calidad.

Propiedad		Especificación	Resultado
Relación	(SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O)	3.00 - 3.25	3,25
Oxido de Sodio	(%p/p Na <sub>2</sub> O)	8.75 - 9.86	9,24
Oxido de Silicio	(%p/p SiO <sub>2</sub> )	26.45 - 30.75	30,04
Densidad Baume	(°Be)	40.00 - 43.50	42,95
Gravedad Especifica		1.3810 - 1.4286	1,4209
Solidos Totales	(%p/p)	36.1 - 40.1	39,29

### 6.2. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS ESPECÍMENES.

Para la evaluación de las propiedades mecánicas de las mezclas, se le realizan ensayos de resistencia a compresión de acuerdo a la Norma INV.E-323 y NTC 220, de igual forma se evalúa comportamiento a flexión en probetas siguiendo la Norma INV.E-324, donde para cada nivel se ensayaran dos probetas.

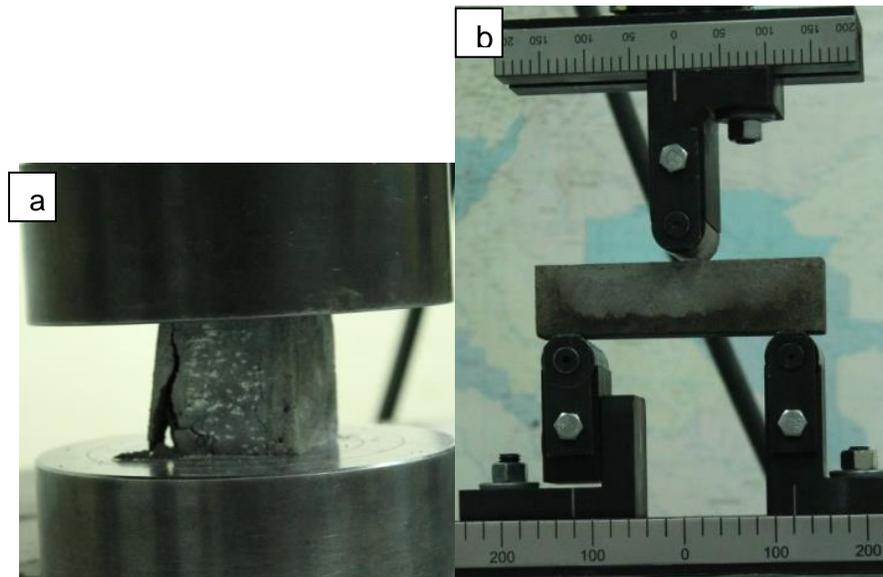


Imagen 16a) Falla a Compresión Cubo de Mortero b) Falla a Flexión Vigueta de Mortero. Fuente: Elaboración Propia.

#### 6.2.1. Comportamiento Mecánico Mezclas Pre-selección.

Con el fin de encontrar y seleccionar la molaridad óptima para la cual el hidróxido de sodio se comportaba de mejor forma, se realizan tres mezclas con distintas molaridades del mismo (8, 10 y 12 Molar), evaluando en estado fresco fluidez y en estado endurecido resistencia a compresión.

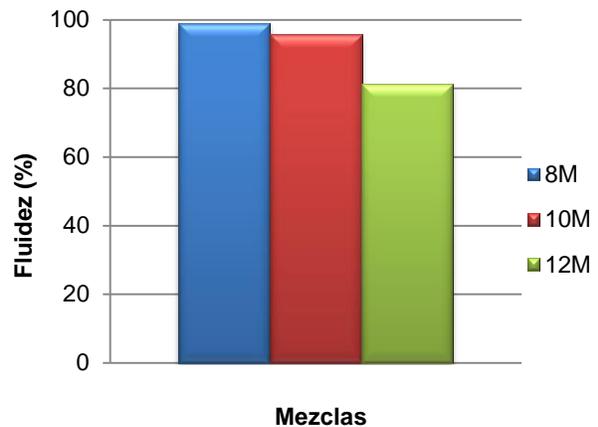
De esta forma se encontró que para la molaridad de 12 la fluidez se reducía con respecto a la mostrada por mezcla de 8M, que fue la que obtuvo una mayor fluidez de las tres mezclas evaluadas, como se puede observar en la Gráfica 9.



Imagen 17. Cubos de Mortero de Ceniza Volante activada con 10M ,12M y 8M. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 21. Fluidez de Morteros 8M, 10M y 12M.

MEZCLA	RELACIÓN A/C	FLUIDEZ
8M	60	98,9
10M	60	95,6
12M	60	81,3



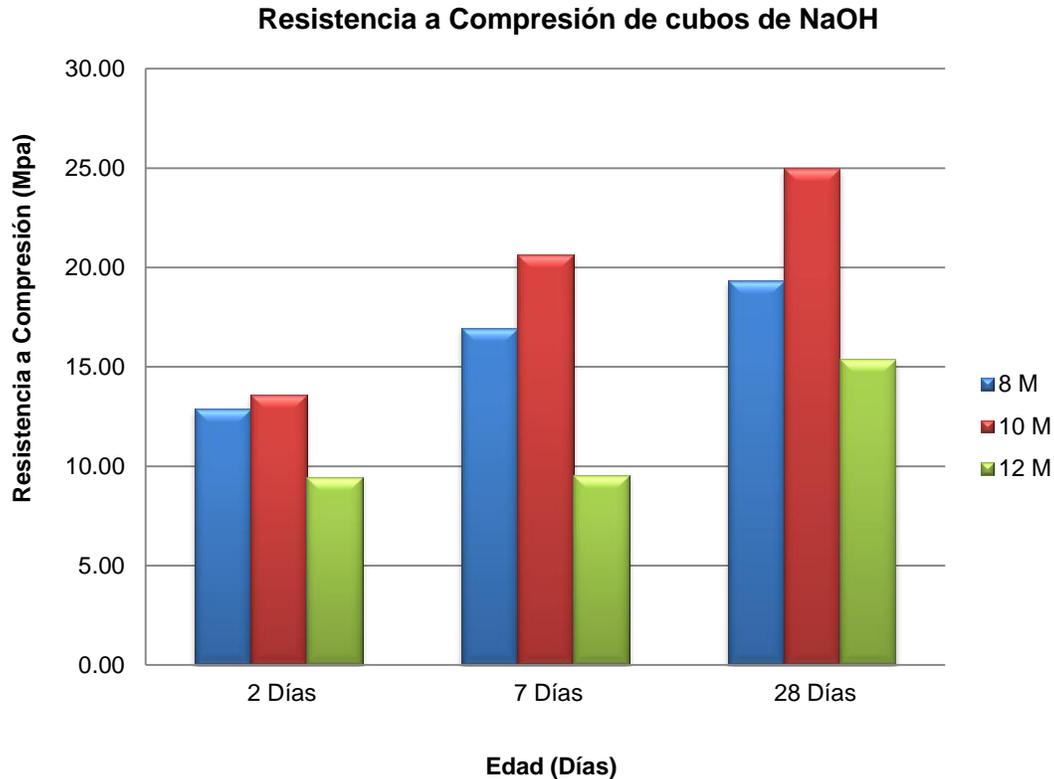
Gráfica 9. Fluidez de Morteros 8M, 10M y 12M. Fuente: Elaboración Propia.

En la Tabla 22, se muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos, se evidencia que desligado a la fluidez, la mezcla 10M mostro mayor resistencia a compresión respecto a las otras dos mezclas evaluadas, En edades cortas las mezclas 8M y 10M obtienen resistencias cercanas, sin embargo para 28 días la 10M la supera en mayor proporción.

Tabla 22. Resistencia a Compresión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 8M ,10M y 12M.

MEZCLA	Resistencia a Compresión (Mpa)		
	2 Días	7 Días	28 Días
8M	12,864	16,955	19,342
10M	13,593	20,666	25,014
12M	9,445	9,551	15,403

En consecuencia a los resultados arrojados la Molaridad que se escogió para realizar las mezclas definitivas de ensayo es 10M de NaOH. Debido a su desempeño mecánico.



Gráfica 10. Resistencia a Compresión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 8M , 10M y 12M. Fuente: Elaboración Propia.

### 6.2.2. Comportamiento Mecánico Mezclas Definitivas.

Con los resultados mencionados en la anterior sección, se realizan las probetas de las mezclas definitivas, se presentaron sus dosificaciones previamente en la Tabla 9. Para las seis mezclas planteadas se evalúa resistencia a compresión a edades de 2, 7, 28, y 56 días y resistencia a flexión a edades de 7, 28 y 56 días.

#### a. Comportamiento Mecánico a Compresión

La resistencia a compresión se evaluó en probetas cubicas de 5.0x5.0x5.0 cm, los resultados obtenidos para las distintas edades evaluadas, se presentan en la Tabla 23. De acuerdo a los resultados alcanzados por las mezclas, se puede observar el desarrollo de la resistencia en el tiempo (ver Gráfica 11), dejando ver que para la mezcla de control *Mezcla 1* se obtienen resistencias elevadas a

edades iniciales, en contraste con la otra mezcla de control que obtiene una resistencia de 9.44MPa a edad de 2 días, y mostrando mejor resultado a esta misma edad la *Mezcla 2 (con ceniza Volante)*, que obtiene a 2 días una resistencia de 13.65MPa, mas sin embargo para edades intermedias y finales la *Mezcla 1* logra resistencias de hasta 27.22MPa estando a la par con la *Mezcla 2 con 27.88MPa*. En el caso de la *Mezcla 3* que obtiene bajas resistencias edades iniciales sin embargo, sus resistencias aumentan en función del tiempo hasta alcanzar 21.71MPa.

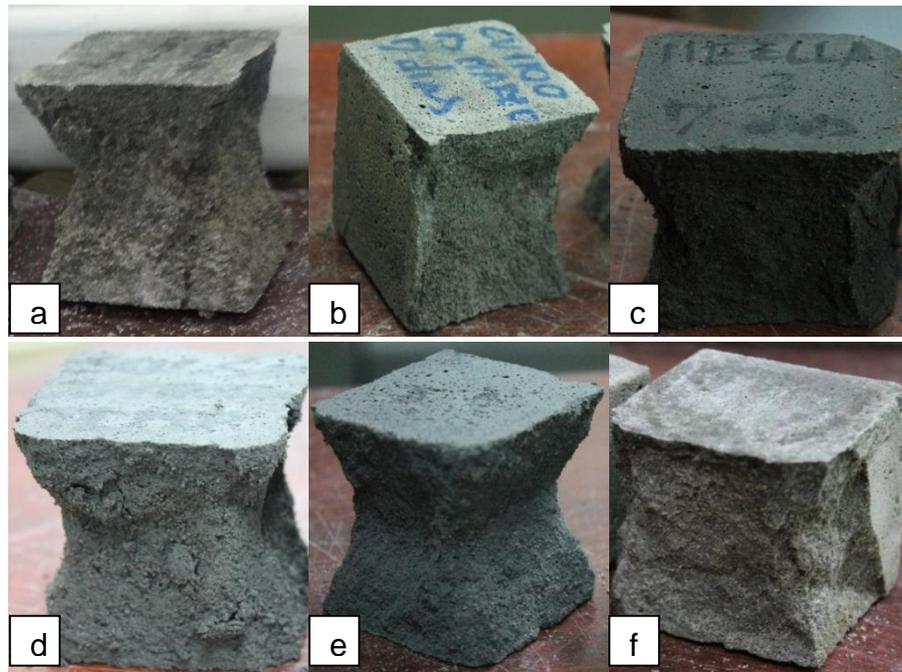


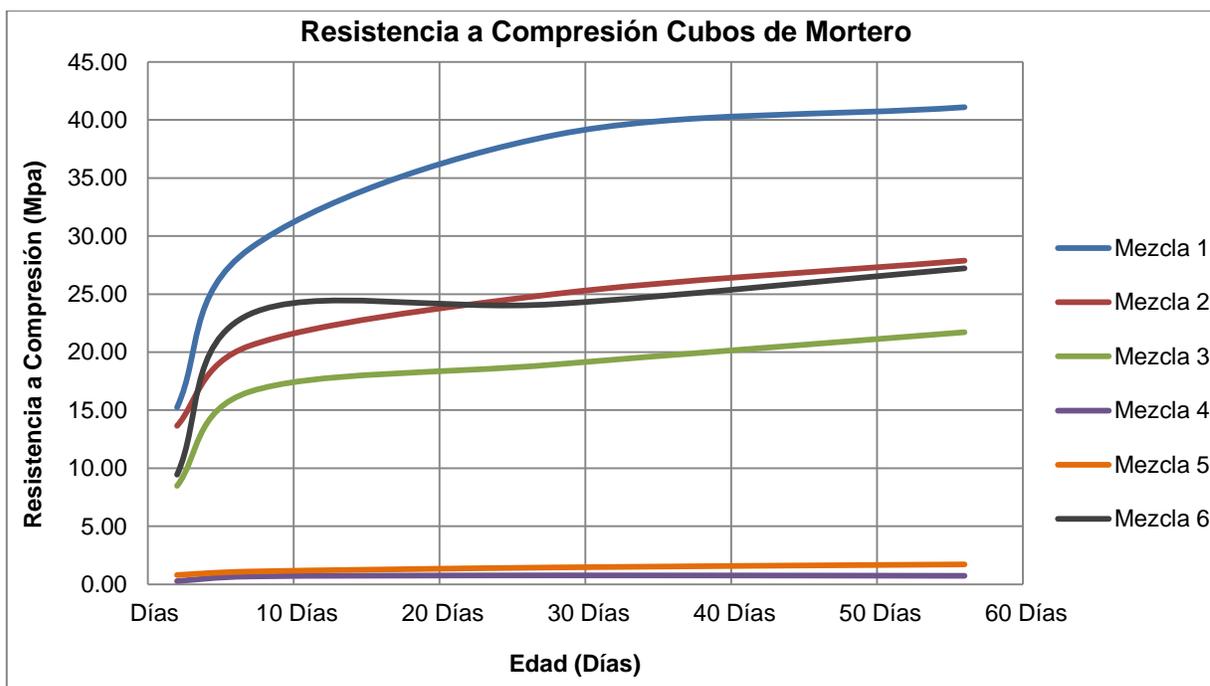
Imagen 18. Falla a Compresión de Cubos de Mortero. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

Es representativo, que para las mezclas con Ceniza Volante que fueron activadas alcalinamente con NaOH en su totalidad o en su mayor parte, obtuvieron mejores desempeños a compresión, comparados con los alcanzados por las mezclas que tuvieron como activador al  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ . De igual forma, respecto a los resultados se puede inferir que la interacción del NaOH y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , no fue buena debido a que presenta deficientes resistencias, cabe mencionar que durante el proceso de ensayo de las probetas, los cubos de *Mezcla 4 y Mezcla 5*, presentaban desmoronamiento, luego de retirados de la cámara de curado, en todas las edades de falla.

Tabla 23. Resistencia a Compresión de Cubos de Mortero.

MEZCLA	Resistencia a Compresión (Mpa)			
	2 Días	7 Días	28 Días	56 Días
Mezcla 1	15.243	28.926	38.726	41.102
Mezcla 2	13.653	20.555	25.025	27.883
Mezcla 3	8.480	16.597	18.947	21.716
Mezcla 4	0.277	0.677	0.768	0.731
Mezcla 5	0.592	0.723	1.072	1.086
Mezcla 6	9.447	23.277	24.147	27.222

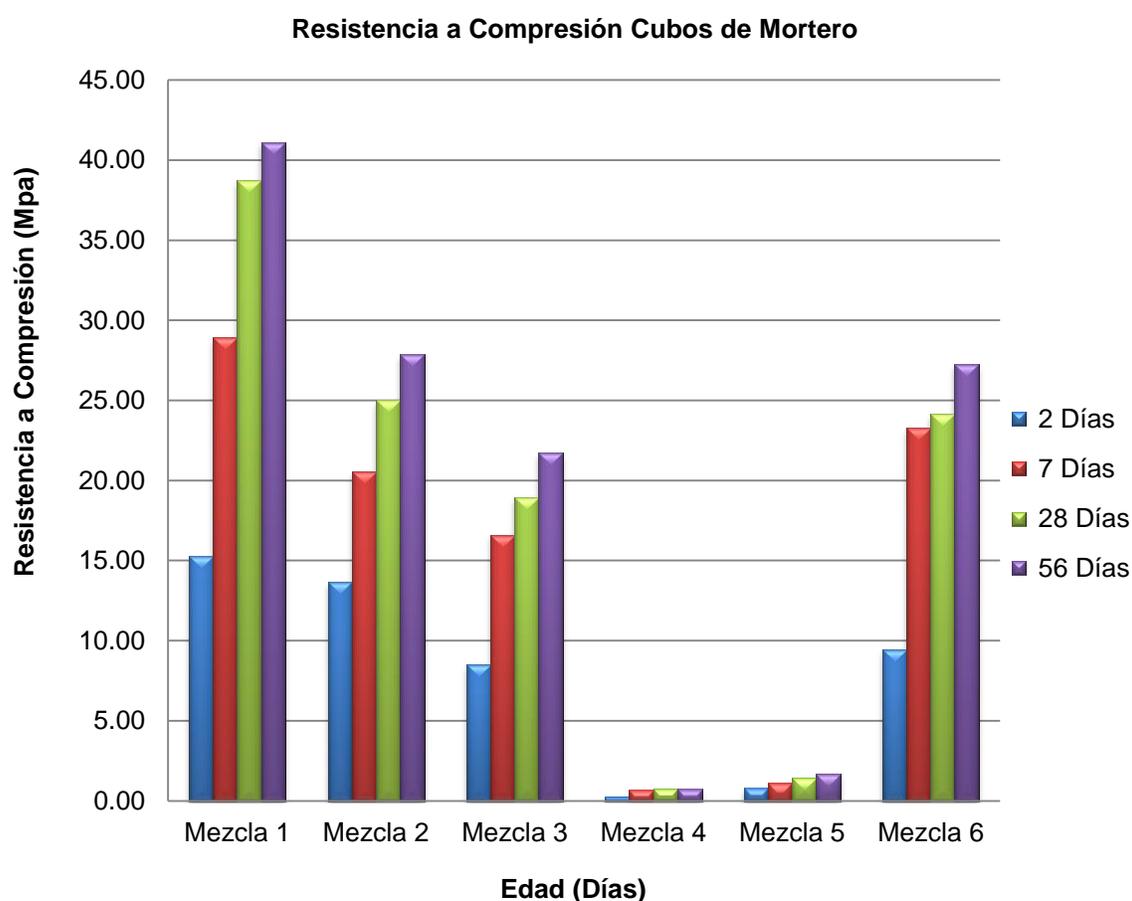
Para morteros de cemento portland, según la NTC 121 *Especificaciones físicas y mecánicas*, fija que para cementos Tipo I, sus resistencias no deben ser menores a 15.0MPa y 24MPa para una edades de 7 y 28 días respectivamente, donde se puede destacar que las mezclas 2 y 3 alcanzan mayores resistencias que las especificadas en la norma, demostrando un gran desempeño a compresión, inclusive la *Mezclas 2* supera los alcanzados por el mortero de cemento de uso general a una edad de 28 días, obteniendo similar comportamiento en el desarrollo de las resistencias. Esta misma norma para edades de 1 y 3 días en cementos tipo III fija resistencias de 10 y 21 MPa respectivamente, para los cuales la mezcla activada 100% con NaOH, alcanzo a edad inicial. Las probetas de *Mezcla 4* y *5* no obtienen resistencias significativas a ninguna de las edades evaluadas.



Gráfica 11. Evolución Resistencia a Compresión en Cubos de Mortero. Fuente: Elaboración Propia.

También conviene destacar que las resistencias aumentan gradualmente con el tiempo, exceptuando las mezclas con alto contenido de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , (*Mezcla 4 y 5*) que no presentaron mayores aumentos en sus resistencias, ni en edades iniciales ni en edades finales. En cuanto a la trabajabilidad cabe señalar que esta disminuía para las mezclas con Ceniza Volante activada alcalinamente, respecto a la trabajabilidad mostrada para las mezclas de control.

Se puede atribuir los bajos desempeños de las *Mezclas 4 y 5*, a que un mayor contenido de  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  en mezclas de ceniza volante favorece una disminución considerable en el tiempo de fraguado y en la trabajabilidad, por dichos aspectos es de gran dificultad poder producir especímenes de óptima calidad.



Gráfica 12. Comportamiento Mecánico Resistencia a Compresión. Fuente: Elaboración Propia.

La mayor resistencia mecánica obtenida por las muestras con ceniza volante fue de 27.88MPa que viene siendo el 70% de la mayor resistencia alcanzada por la mezcla de control 1 y superando las resistencias de la mezcla de control 6, el desempeño individual de las mezclas se puede observar de mejor forma mediante la Gráfica 12.

## b. Comportamiento Mecánico a Flexión

La resistencia a flexión se evaluó en probetas rectangulares de 4x4x16 cm, con luz libre de 12cm, y una carga en la mitad de la luz de la vigueta, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 24. Se evaluaron dos especímenes por etapa a edades de 7, 28 y 56 días. Evaluados de acuerdo a la metodología enunciada en la NTC 120.

Tabla 24. Resistencia a Flexión de Viguetas de Mortero.

MEZCLA	Resistencia a Flexión (Mpa)		
	7 Días	28 Días	56 Días
Mezcla 1	5.643	7.156	7.075
Mezcla 2	3.162	5.234	6.284
Mezcla 3	3.244	3.626	3.708
Mezcla 4	0.354	0.545	0.668
Mezcla 5	0.164	0.218	0.409
Mezcla 6	4.621	6.202	6.652

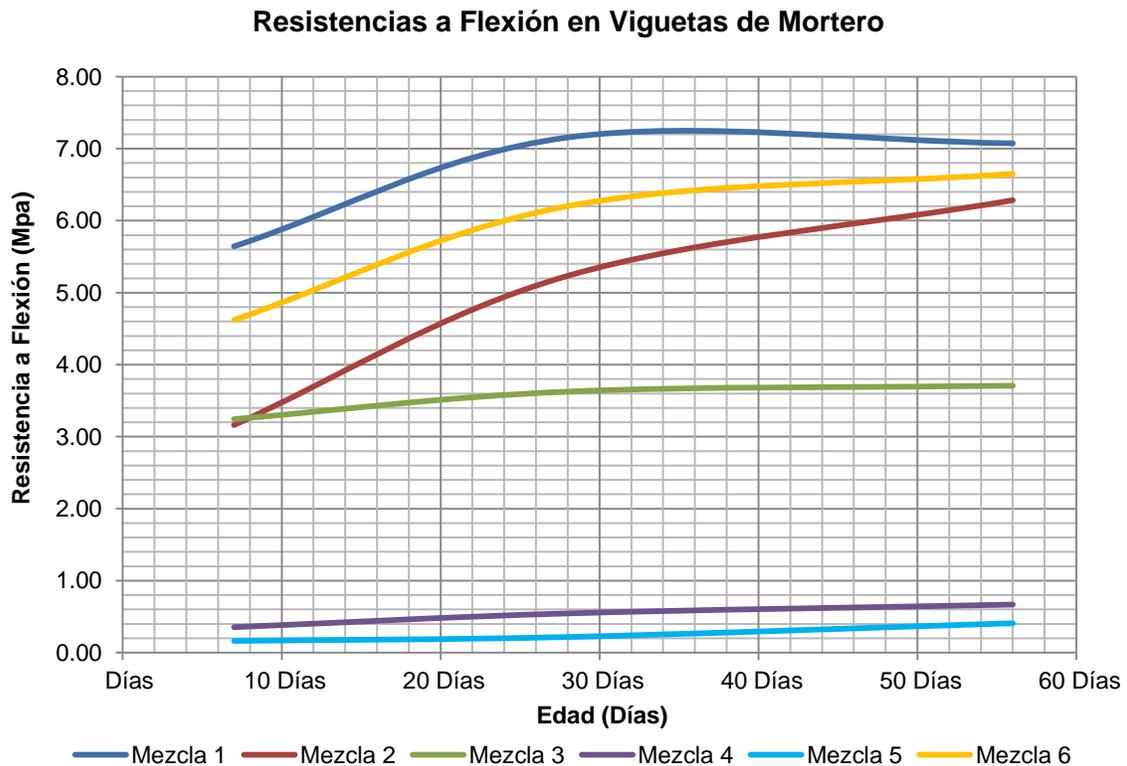


Imagen 19. Falla a Flexión de Viguetas de Mortero. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

Se evidencian resistencias entre 0.354 y 7.075MPa, donde la mayor resistencia la obtuvo la *Mezcla 1*. Para este caso las viguetas con cenizas volante activadas alcalinamente con NaOH obtuvieron similares resistencias iniciales, sin embargo para edades de 7 días en adelante la resistencia de la mezcla

activada 100% con NaOH, aumentaron considerablemente, mejorando la resistencia mostrada por la mezcla de control con cemento Tipo I. Se reitera en similitud con los resultados a compresión que para los geopolímeros activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , no se presentó buena trabajabilidad que es de gran importancia para un mezclado homogéneo y para el moldeado de las muestras a lo que se le puede atribuir sus bajo desempeños mecánicos.

Para mezclas geopoliméricas el mejor desempeño lo obtuvo la mezcla de ceniza volante activada alcalinamente cien por ciento con NaOH con 5.234 para 28 días, lo que demuestra un desempeño aceptable por los requisito de la NTC 2017 que estipula un mínimo de 5.0MPa, para prismas a flexión. En cuanto al restante de las pastas con cenizas volante alcanzaron resistencias para la misma edad entre 0.21MPa y 3.62MPa, encontrándose por debajo de la norma.



Gráfica 13. Evolución Resistencia a Flexión en Viguetas de Mortero. Fuente: Elaboración Propia.

Se evidencia que para las mezclas 4 y 5, no se obtienen resultados favorables a lo largo de los periodos las resistencias en estos geopolímeros tienden a permanecer constantes, en contraste con las demás mezclas que aumentan su resistencia gradualmente.

### 6.3. COMPORTAMIENTO DURABLE DE LOS ESPECÍMENES

En este capítulo se evaluó el comportamiento de las seis mezclas, ante altas temperatura y ataque de ácidos, estas en cada uno de los casos expuestos durante periodos controlados, luego de dicha exposición se determinó la resistencia a compresión y flexión de cada muestra.

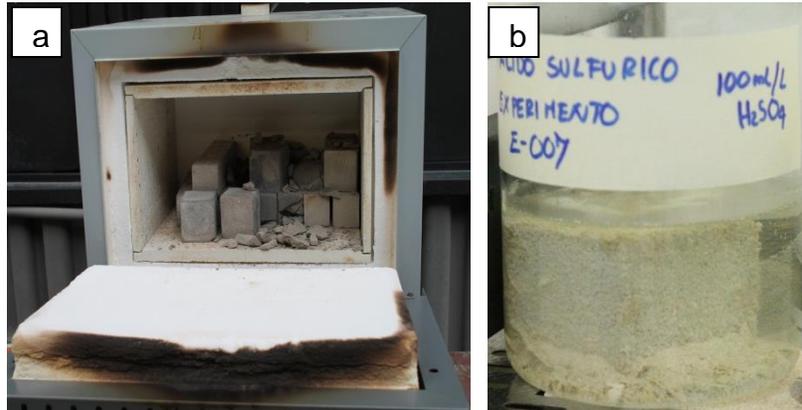


Imagen 20. a) Probetas de Ceniza Volante acativada alcalinamente expuesta a altas temperaturas. b) Cubo de Mortero de Ceniza Volante expuesto a Ataque de Ácido. Fuente: Elaboración Propia.

#### 6.3.1. Comportamiento Frente a Altas Temperaturas.

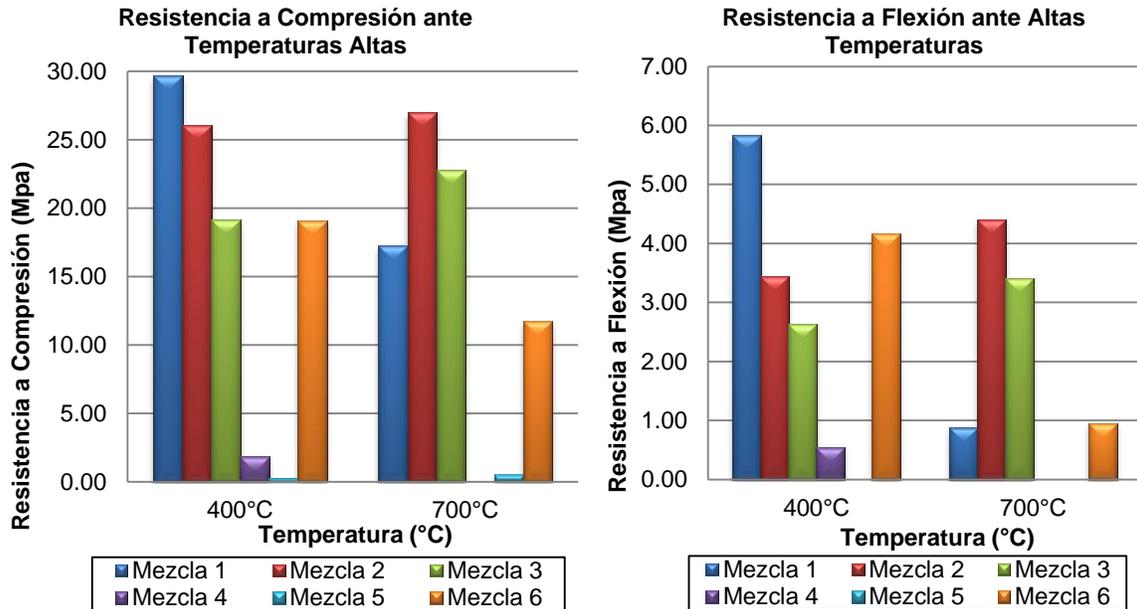
Para la evaluar el desempeño de las mezclas frente a altas temperaturas, se determina resistencia a compresión en probetas cubicas 5x5x5cm y resistencia a flexión en probetas rectangulares de 4x16x4 cm, dichas probetas previamente cumplieron un proceso de curado por 28 días, se trabajan dos temperaturas 400°C y 700°C, las probetas se sometieron durante dos horas a cada una de dichas temperaturas. Posteriormente, se determinó su resistencia a compresión y flexión.



Imagen 21. Mufla Prueba Resistencia a Altas Temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.

## Comportamiento a Compresión y Flexión

Los resultados obtenidos para compresión y flexión a temperaturas de 400 y 700 °C, se presentan en la Tabla 25 donde se puede observar la particularidad de los resultados y su diferencia con las resistencias de las probetas sin exposición a temperatura. Las Imágenes 18 y 19, se puede observar el aspecto físico de las probetas ensayadas a compresión luego del tratamiento térmico correspondiente.



Gráfica 14. Resistencia a Compresión de Cubos y Resistencia a Flexión de Viguetas Expuestas a Altas Temperaturas. Fuente: Elaboración Propia.

Se destacan sobresalientes resistencias para las mezclas 2 y 3, que tanto a flexión como a compresión alcanzan mejores resistencias que las obtenidas por las mezclas de control. (Ver Gráfica 14).

Tabla 25. Resistencia a Compresión de Cubos de Mortero expuestos a altas temperaturas.

Ensayo	MEZCLAS						
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	
<b>Resistencia compresión (Mpa)</b>	Temperatura de 400°C	32,366	26,039	19,144	1,827	0,886	21,011
	Temperatura de 700°C	17,236	29,193	22,753	0,000	0,000	11,705
<b>Resistencia Flexión (Mpa)</b>	Temperatura de 400°C	5,835	3,435	2,631	0,545	0,000	4,158
	Temperatura de 700°C	0,879	4,403	3,408	0,000	0,000	0,954

El desempeño a compresión como se indica en la sección anterior, como estipula la norma NTC 121 a 28 días resistencias de 24MPa para cemento Tipo I, resistencia que fue mejorada por la mezcla 2 con 29.16MPa sometida a una temperatura de 700°C y de 26.03MPa ante 400°C de temperatura. En cuanto a la resistencia a flexión, se muestra un comportamiento similar al mostrado a compresión las resistencias aumenta en función del aumento de temperatura.

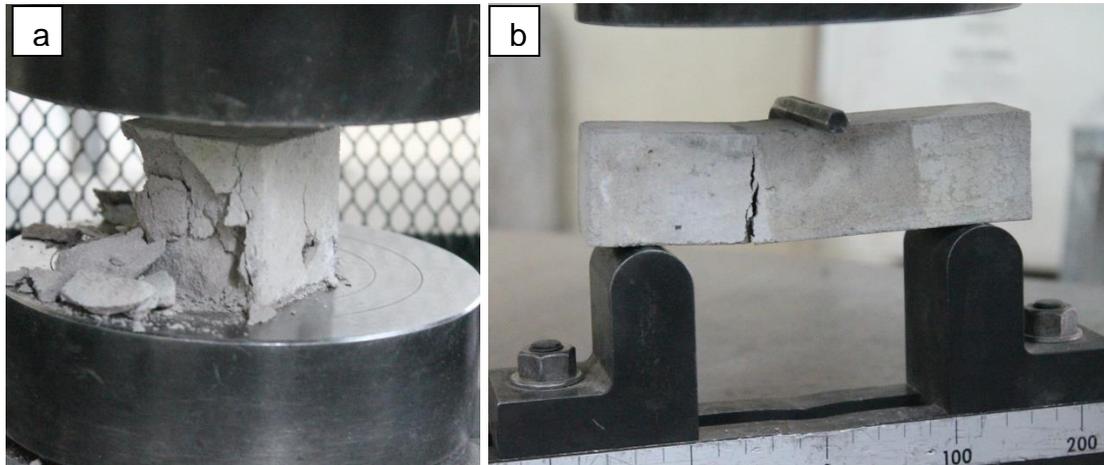
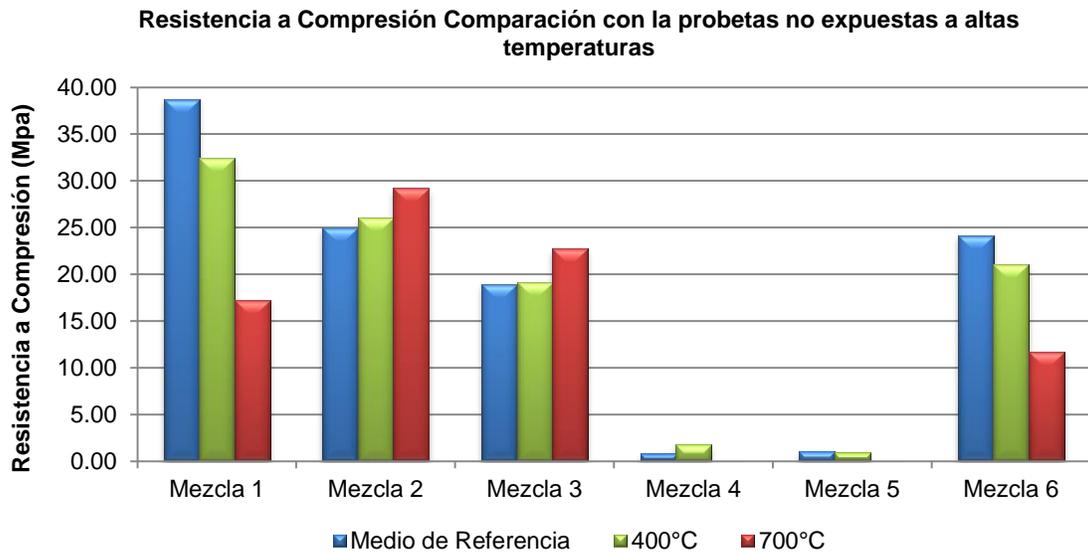


Imagen 22 a) Falla a Compresión de cubo de mortero de cemento Hidráulico expuesto una temperatura de 400°C b) Falla de Vigueta de mortero de cemento a flexión después de exposición a una temperatura de 400°C

Dentro del proceso de evaluación de las probetas se evidenció una disminución significativa en las resistencias para las probetas de mortero con cemento hidráulico convencional expuestas a altas temperaturas, en contraste con las resistencias obtenidas en el medio de referencia. Los resultados presentados muestran con claridad que en la Mezclas de control 1 y 6, las resistencias disminuyen considerablemente con el aumento de temperatura, para una exposición de 400°C y 700°C su resistencia se reduce en más de un 16 y 50 por ciento respectivamente para la Mezcla 1 y para la mezcla 6 en un 12 y 48 por ciento. A diferencia de estas mezclas, el mortero geopolimérico activado con 100% NaOH (Mezcla 2) mostró una reacción positiva frente a la exposición a altas temperaturas alcanzado resistencias de 29.19MPa a 700°C aumentado en un 14% con respecto a las probetas que no fueron expuestas, de igual forma la mezcla 3 también aumentó sus resistencias considerablemente, mostrando buen comportamiento a compresión, como evidencia la Gráfica 15. La mezcla 4 y 5 muestra un leve incremento en la resistencia aunque no significativo, para 700°C ninguna de las dos mezclas registra valor de resistencia debido a que durante el proceso de exposición se deshicieron dentro de la mufla por lo que no fue posible evaluar su resistencia mecánica.



Gráfica 15. Resistencia de Cubos a Compresión: Sin exposición a temperatura, con exposición a Temperaturas de 400°C Y 700°C. Fuente: Elaboración Propia.

Como se menciona anteriormente, se evidencia que para temperaturas de 400°C las probetas de todas las mezclas aún conservan sus propiedades originales de resistencia, con excepción a los geopolímeros activados en gran porcentaje con NaOH que aumentaron su resistencia, para una temperatura de 700°C se hacen evidentes fisuras en las probetas, así que estas fisuras aumentan a medida que aumenta la temperatura de exposición, ello puede ser la principal causa de pérdida de resistencia a compresión y a flexión en su mayor parte. Cabe señalar que a temperaturas elevadas los morteros de cemento Hidráulico se calcinan perdiendo resistencia considerablemente y los geopolímeros aún no alcanzan ese punto como se puede observar en la Imagen 23. De la misma forma se puede evidenciar que muchas de las viguetas que se fallaron a flexión, fallaron por las fisuras presentadas previamente por la exposición a altas temperaturas. (Ver Imagen 22)

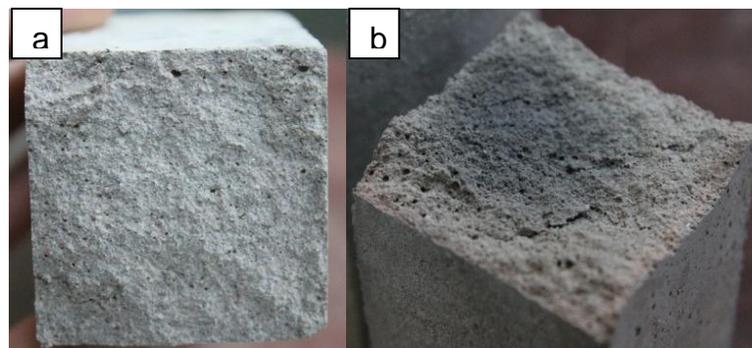


Imagen 23. Interior de las viguetas Falladas a Flexión a) Con Cemento Hidráulico b) Con Ceniza volante Fuente: Elaboración Propia.

Teniendo en cuenta estudios adicionales realizados (Fernández-Jiménez, 2009), (Krivenko P.V., 2007) se ha podido mostrar que la caída de resistencias a flexión observada en los cementos obtenidos por activación alcalina de cenizas volantes para temperaturas superiores a 600°C (valor a partir del cual las propiedades mecánicas del cemento Portland comercial se degradan rápidamente) se debe principalmente a que en torno a 600°C estos materiales presentan un punto de sinterización parcial, que afecta a su estabilidad dimensional. Sin embargo una vez que el material se ha enfriado la solidificación del fundido hace que se forme una matriz más compacta y por tanto que aumenten las resistencias mecánicas a compresión, debido a la disminución de la porosidad inicial, dándose un proceso de recristalización, a la vez detectándose formación de nuevas fases en el material cementante (Fernández-Jiménez, 2009). En el proceso de exposición a altas temperaturas, se da paralelamente a las reacciones químico-físicas, el desarrollo de nuevas fases cristalinas y vítreas, que tiene lugar una serie de cambios microestructurales en los especímenes. El cambio en la forma y tamaño de los poros es uno de los más importantes, ya que gran parte de las propiedades físicas del producto son dependientes de este parámetro (Gourley G., 2005), podría ser esta la razón por la que los morteros geopoliméricos, aumentan su resistencias a compresión algunos en mayores (Mezcla 2 y 3) otros en menores proporciones (Mezcla 4 y 5), como se puede evidenciar en los resultados obtenidos.

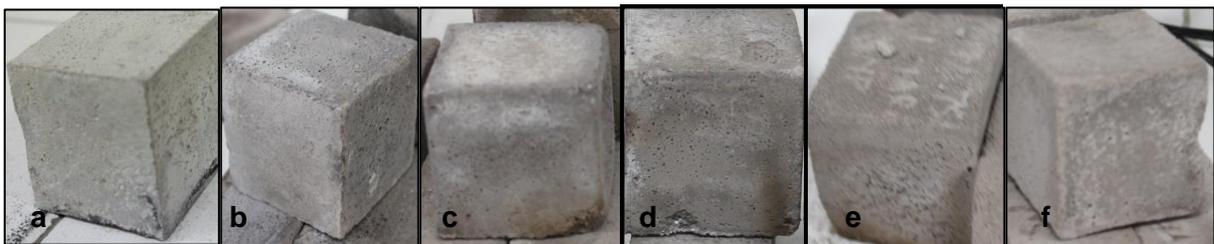


Imagen 24. Cubos de Mortero expuestos a una temperatura de 400°C. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

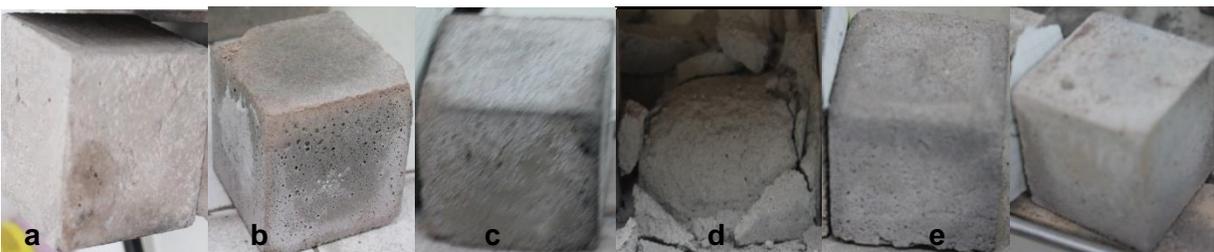


Imagen 25. Cubos de Mortero expuestos a una temperatura de 700°C. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 5 e) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

### 6.3.2. Comportamiento Frente a Ataque de Medios Agresivos.

Para evaluar el desempeño de las mezclas frente a ataque de medios agresivo, se implementó una solución de ácido sulfúrico de 50ml/L, se sumerge totalmente la probeta en la solución, por un periodo de 24 horas, posteriormente se lava y se lleva al horno para luego tomar su peso. Antes de dicha inmersión la probeta a ensayar se seca en horno a  $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ , con el fin de tomar el peso seco. En este proceso se determinara la resistencia a compresión y la pérdida de masa, en probetas cubicas de 5x5x5cm.

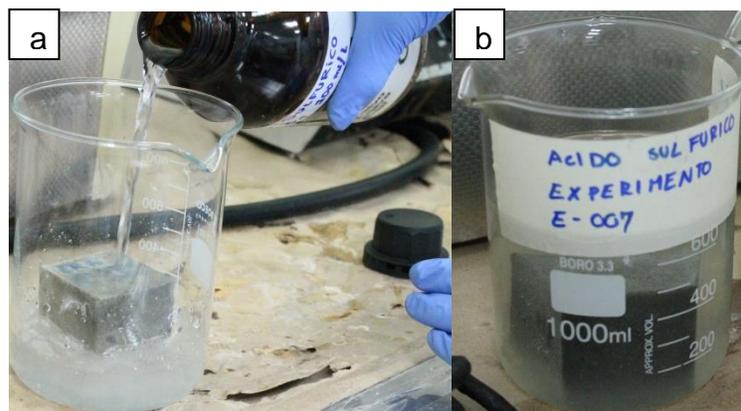


Imagen 26. Cubos de Mortero Sumergido en Ácido Sulfúrico. a) Cubos de Cemento Tipo I b) Cubos de Ceniza Volante. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 26. Resistencia a Compresión y Pérdida de Masa de Cubos de Mortero expuestos en Medios Agresivos.

Ensayo	MEZCLAS					
	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6
<b>Ataque en Medios Agresivos</b>						
Resistencia compresión (Mpa)	28.267	24.123	16.791	0.449	0.000	24.728
Pérdida de Masa (%)	2.54	7.73	4.67	18.40	77.53	7.76

#### a. Pérdida de Masa

Para las mezclas se evidenció que la mayor pérdida de masa se registra en la Mezcla 5, donde durante las 24 horas de exposición al ácido la probeta se fue desintegrando como muestra la Imagen 27, debido a esto no fue posible evaluar el comportamiento a compresión, ninguna otra mezcla presentó este comportamiento, aunque la Mezcla 4 perdió masa considerable fue posible evaluar su resistencia. Se puede distinguir en todas las mezclas un proceso acelerado de deterioro debido a la alta concentración de ácido sulfúrico, según

ASTM C1012, recomendado tanto para cementos Portland puros como adicionados, corresponde a una técnica de ensayo de agresividad de sulfatos de carácter acelerado, al exponer las probetas  $\text{SO}_4$  50 ml/l lo que equivale a que corresponde a una exposición muy severa (superior a 10.000 ppm) según las normas ASTM.

### Perdida de Masa en Medios Agresivos

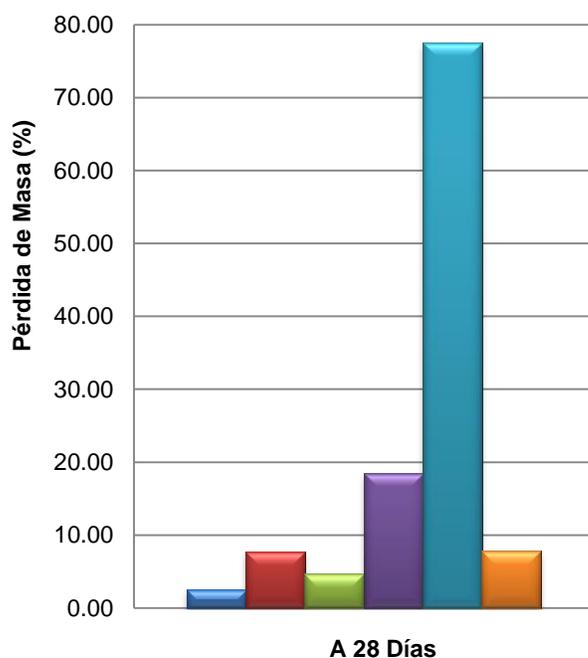


Imagen 27. Mezcla 5 inmersa en Ácido Sulfúrico. Fuente: Elaboración Propia.

■ Mezcla 1      ■ Mezcla 2      ■ Mezcla 3  
 ■ Mezcla 4      ■ Mezcla 5      ■ Mezcla 6

Gráfica 16. Pérdida de Masa por Exposición ante Ácido Sulfúrico. Fuente: Elaboración Propia.

Un examen visual de las probetas expuestas a ácido se muestra un buen estado físico para las mezclas de control, solo con pérdida de un pequeño porcentaje de la capa superficial, de igual se muestra en la Mezcla 2 y 3. Por el contrario las 4 y 5 evidencias un gran deterioro luego de 24 horas de inmersión.



Imagen 28. Pérdida de Masa de Cubos expuestos a ataque de ácidos. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 5 f) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

## b. Resistencia a Compresión

Las mezclas con Ceniza volante no experimentan variaciones significativas en los valores de resistencia respecto a las resistencias obtenidas para la probetas sin sumergir en ácido sulfúrico, incluso se puede observar que para todas las mezclas disminuye la resistencia. En la mezcla 5 no se registró ningún valor de resistencia debido a que durante la inmersión la probeta se deshizo dentro del ácido.

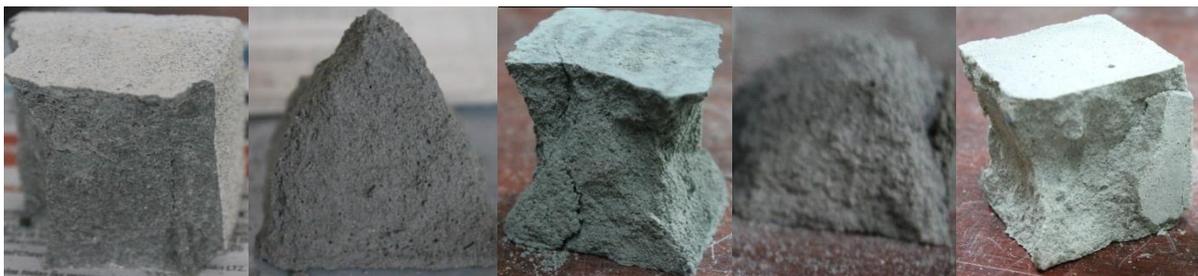
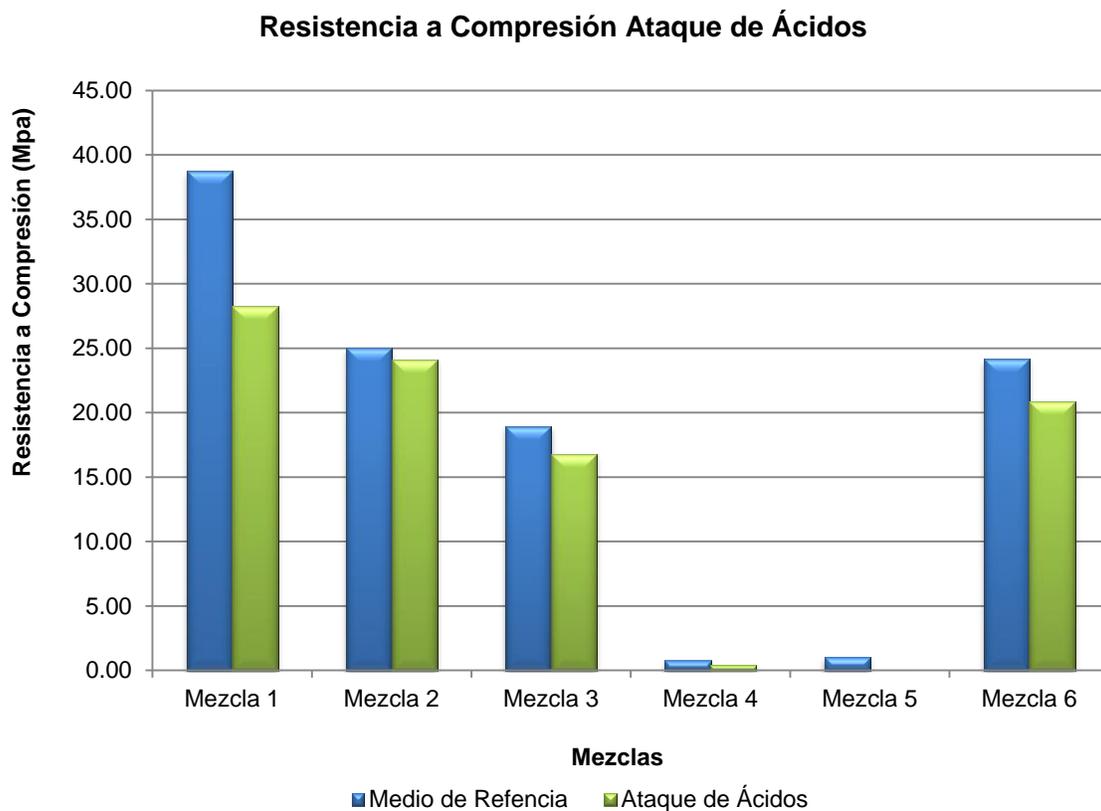


Imagen 29. Falla de Cubos a Compresión expuestos a Ataque de Ácidos. a) Mezcla 1 b) Mezcla 2 c) Mezcla 3 d) Mezcla 4 e) Mezcla 6. Fuente: Elaboración Propia.

La mezcla 1 alcanzó resistencias a compresión de 28.26MPa, siendo esta la mayor resistencia obtenida entre todas las mezclas, y entre las mezclas geopoliméricas la mezcla 2 obtuvo resistencias de 24.12MPa superando a la mezcla 6, de igual forma que en los anteriores capítulos las mezclas 4 y 5 no

alcanzaron resistencias. (Ver Gráfica 17). Se puede observar que a pesar que la Mezcla 2 pierde una considerable cantidad masa durante la prueba su resistencia no disminuye de gran forma, similar comportamiento presenta la Mezcla 3.



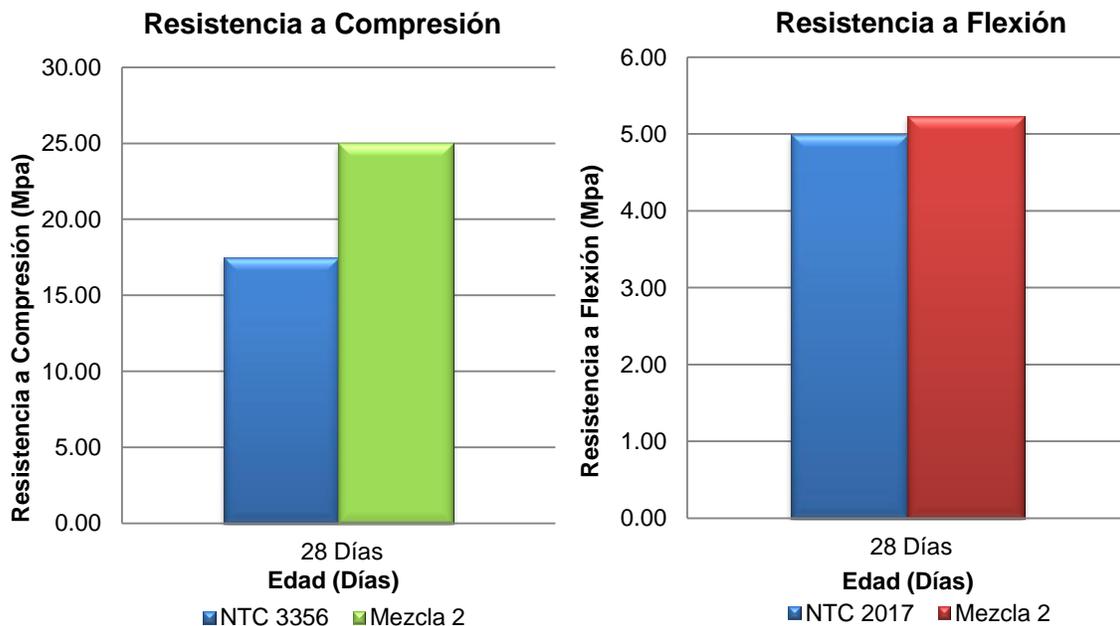
Gráfica 17. Resistencia a Compresión Ante Exposición de Ácido Sulfúrico VS Medio de Referencia.  
Fuente: Elaboración Propia.

## 7. CONCLUSIONES

- Una de las principales conclusiones que se puede extraer del presente estudio, es la estabilidad de la mezcla geopolimérica activada alcalinamente con Hidróxido de Sodio (*Mezcla 2*), debido a que tuvo un desempeño sobresaliente en todos los aspectos evaluados, igualando y mejorando propiedades de las dos mezclas de control con cemento hidráulico. En el aspecto mecánico, esta mezcla obtuvo una resistencia a compresión de 25.025MPa a 28 días, cumpliendo con lo estipulado en la NTC 121 para la misma edad y mejorando las resistencias obtenidas para las probetas de mortero con cemento tipo I. En cuanto al comportamiento a flexión alcanzó resistencias de hasta 6.28MPa resultado que se encuentra por encima de lo estipulado por la NTC 120. Este geopolímero mostró un excelente desempeño ante altas temperaturas, de esta forma, a medida que aumentaba la temperatura su resistencia aumentaba, en contraste con los morteros de cemento hidráulico Tipo I y Tipo III, que disminuyeron notoriamente sus resistencias. Así, para temperaturas de 700°C la pasta con ceniza volante activada con NaOH mejoró en un 59 y 40% el desempeño mostrado por las pastas de cemento Tipo I y Tipo III respectivamente. Finalmente, frente a ataque de ácido sus resistencias a compresión disminuyeron un 3.6% en comparación con la mezcla que no fue sumergida en ácido, y de igual forma se encuentra por encima de la resistencia mínima requerida por la NTC 121 para 28 días.
- Por otro lado, las mezclas geopoliméricas que fueron activadas alcalinamente en un 50% y 75% con Silicato de Sodio, no reflejaron resultados favorables en ninguno de los aspectos evaluados, mecánico, exposición a altas temperaturas, exposición a ataque de ácido. No consiguió aumentar su resistencia en el transcurso del tiempo, una de las razones a las cuales se le atribuye este deficiente comportamiento, es a la trabajabilidad presentada durante la elaboración de las probetas, lo que dificulta la producción de especímenes de calidad y de igual forma, la temperatura en la cual fueron curadas las mezclas (60°C) pudo haber afectado el desempeño de las mezclas, mediante un examen visual de las probetas luego de 48 horas de curado no parecían tener consistencia, se pudo ver reflejado en los resultados obtenidos.
- Aunque la procedencia de la ceniza volante es de gran importancia para la definición de las propiedades de las pastas de mortero, se puede concluir que el tipo de activador alcalino influye contundentemente en el desarrollo

de las propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros geopoliméricos y de la mano de este factor se encuentra el tiempo y temperatura de curado, las cuales definen la estructura del geopolímero. Estudios realizados también demuestran que la temperatura de curado afectan de manera importante el comportamiento mecánico de la mezcla que a mayor temperatura de curado mejores comportamientos mecánicos se obtienen, sin embargo el aumento excesivo de temperatura puede afectar la estructura cristalina de la mezcla geopolimérica, recomiendan temperaturas entre 60°C y 150°C. (Criado Saenz, 2007)

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la capacidad mecánica y durable mostrada por la mezcla geopolimérica activada con NaOH que fue la que alcanzó mejores desempeños, podría enfocarse el uso de este material hacia la fabricación de morteros premezclados y elementos prefabricados, campo en el que dicha pasta podría desempeñar un óptimo trabajo, para morteros premezclados la NTC 3356 especifica una resistencia mínima a compresión de 17.5MPa a 28 días y para adoquines en concreto la NTC 2017 fija un mínimo de módulo de rotura de 5.0 MPa a 28 días. Para los dos requerimientos anteriores el mortero de ceniza volante cumple dichos requerimientos, como se puede observar en la Gráfica 18.



Gráfica 18 Comparación a) Resistencia a Compresión Mezcla de ceniza volante activada alcalinamente con NaOH (Mezcla 2) VS NTC 3356 Morteros Premezclados para Mampostería b) Resistencia a Flexión Mezcla de ceniza volante activada alcalinamente con NaOH (Mezcla 2) VS NTC 2017 Adoquines de Concreto para Pavimentos.

Adicionalmente, el que su resistencia mejore gradualmente con el aumento de temperatura es un aspecto a favor, el cual puede ser aprovechado en estructuras especiales donde se requiera o pueda estar exposición a altas temperaturas

- Los resultados dejan ver el gran potencial con el que cuentan estos materiales geopoliméricos en una posible aplicación, sustituyendo al cemento hidráulico de uso general Tipo I, dando una idea del aprovechamiento constructivo que se le puede dar por su facilidad con la que se puede adecuar a las instalaciones existentes en la industria actualmente.
- Se puede presentar un amplio campo para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación, con el objeto de profundizar en el perfeccionamiento y manejo de la amplia gama de factores que afectan las propiedades de los geopolímeros, de esta forma pautar una guía hacia el desarrollo de materiales más competitivos técnica, económica y ambientalmente.

## 8. RECOMENDACIONES

- Dado los bajos desempeños iniciales y finales en cuanto a comportamiento mecánicos y durable de las mezclas activadas alcalinamente con Silicato de Sodio (*Mezcla 4 y 5*), se recomienda aumentar la temperatura de curado con el fin de que la reacción activador, ceniza sea mayor, y esto pueda mejorar el comportamiento mecánico y durable de estos morteros.
- Para estudios posteriores y futuras líneas de investigación, se podría investigar sobre el comportamiento de las mezclas geopoliméricas con ceniza volante en mampostería, y funcionamiento como mortero premezclado, evaluando sus propiedades mecánicas y durables como prefabricado. Y de igual forma tener en cuenta como la variación de temperatura de curado afecta las propiedades de las probetas.
- De igual forma se recomienda realizar estudios con otro tipo de ceniza volante, de distinta procedencia industrial, tomando como variable el tiempo de curado de las mezclas geopoliméricas, aumentando la temperatura de curado, observando las variaciones en el comportamiento de las probetas.
- Con el fin de avanzar hacia el manejo de estos geopolímeros en la elaboración de concretos, resulta de gran importancia desarrollar proyectos de investigación sobre la resistencia de a compresión y flexión en hormigones, así como la evaluación de la adherencia al acero por medio de un ensayo de “Pull Out”.
- En el desarrollo de investigaciones futuras, se recomienda para la manipulación y evaluación ante altas temperaturas (más de 200°C), de los geopolímeros con hidróxido de sodio (NaOH), tener en cuenta los vapores emitidos por estos materiales cuando se exponen a temperatura mayores de 200°C, donde resulta pertinente la adecuación de un espacio con un sistema de extracción. En la concentración de hidróxido de sodio trabajada en este estudio, 10 molar se recomienda para la manipulación utilizar guantes, tapabocas y gafas de protección, ya que esta sustancia durante procesos de elaboración de especímenes, puede llegar a entrar en contacto con la piel y ojos causando irritación severa. Para ocasiones en donde este material este expuesto a temperaturas mayores de 200°C, es indispensable contar con cámaras de extracción que absorban todos los gases emitidos, ya que su inhalación puede causar irritación en las membranas mucosa

de la nariz, garganta y tracto respiratorio. El ministerio de ambiente en la ficha de manejo del NaOH, **(MinAmbiente, 2000)** fija como medida de control de emisiones; ventilación local, ventilación general de dilución, equipo de protección personal. Cabe tener en cuenta que el hidróxido de sodio en distintas concentraciones, cuando se libera en la atmósfera, se lava por acción de lluvias y cae en el suelo o en lechos de agua donde se neutraliza. Por acción de vapores ácidos reacciona en el aire y cae con la lluvia en forma de sales no tóxicas.

## BIBLIOGRAFÍA

Centro de Investigaciones del Carbón. (1996). Universidad Nacional de Colombia, Centro de Investigaciones del Carbón, Bogotá.

UPME, U. (2012). *Unidad de Planeación Minero Energética UPME*. Recuperado el 9 de Mayo de 2012, de Unidad de Planeación Minero Energética UPME: <http://www1.upme.gov.co/>

SA Arena sílicea & Arquitectos LTDA. (2004). Recuperado el 14 de 03 de 2013, de SA Arena sílicea & Arquitectos LTDA: <http://arenasilicea.com/index.php/productos/arena>

Andes, U. d. (16 de Noviembre de 1948). *Universidad de los Andes*. Recuperado el 22 de Junio de 2013, de Universidad de los Andes: <http://investigaciones.uniandes.edu.co/index.php/es/centro-de-microscopia/microscopio-electronico-de-barrido-meb>

Argos. (1934). *Argos*. Recuperado el 29 de Abril de 2013, de Argos: [http://www.argos.com.co/wps/wcm/connect/3dbc0300405e576b91b6ff5efd947518/Cemento\\_Gris\\_Uso\\_General.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=3dbc0300405e576b91b6ff5efd947518](http://www.argos.com.co/wps/wcm/connect/3dbc0300405e576b91b6ff5efd947518/Cemento_Gris_Uso_General.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=3dbc0300405e576b91b6ff5efd947518)

ASTM C150, S. (March de 2012). *C150-12, Especificación Normalizada para Cemento Portland*.

ASTM, S. a. (2012). *ASTM C150/C150M - 12 Especificación Normalizada para Cemento Portland*.

BASF. (1865). *BASF The Chemical Company*. Recuperado el 13 de 04 de 2013, de BASF The Chemical Company: <http://www.basf-cc.com.co/es/productos/aditivosconcreto/Pozzoloth460N/Documents/Pozzoloth%20460%20N.pdf>

Criado Saenz, M. (2007). *Nuevos Materiales cementantes Basados en la Activación Alcalina de Cenizas Volantes. Caracterización del Gel N-A-S-H en funcion del contenido de silice soluble. Efeto del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*. Tesis Doctoral, Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid.

Davidovits, J. (September de 1976). Solid phase synthesis of a mineral blockpolymer by low temperature polycondensation of aluminosilicate polymers, IUPAC

International Symposium on Macromolecules Stockholm. *New Polymers of high stability*.

Davidovits, J. (March de 1993). Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement. (P. C. Association, Ed.) *Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment*, 21.

Davidovits, J. (2011). Geopolymer Chemistry and Applications. En J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications* (3rd edition, July 2011 ed., pág. 608).

Erich Rodríguez, e. a. (2009). "Efecto de los módulos  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín". (F. I. Antioquia, Ed.) pp. 30-40.

Fernández-Jiménez, A. A. (Diciembre de 2009). Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 24 No3.

Gluchovskij, V. (1959). Gruntosilikaty" . 245 627 (1967), Patent USSR 449894 (Patent appl. 1958, Gosstrojizdat Kiev, Patent USSR.

Gourley G., J. G. (2005). Developments in geopolymer precast concrete. *World Congress 2005 Geopolymer and sustainable development solution*, (págs. 139-143). France, .

Hua X., V. D. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate mineral. pp. 247-266.

Krivenko P.V., .. K. (2007). *Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix*. J. Mater Sci.

Laverde, L. F.-J.-J.-S.-M. (Diciembre de 2007). Remoción De Carbón Inquemado De Las Cenizas Volantes Producidas En El Proceso De Combustión De Carbón. *Revista Energética*, 6.

Mannan M. A., B. H. (2002). Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete. *Building Env*, 37, 1167-1171.

Maroto V, M. e. (1999). *Environmental benefits of producing adsorbents materials from unburned carbon*. The Pennsylvania State University. , The Energy Institute and department of energy and geo-environmental engineering. .

- MinAmbiente. (2000). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 23 de Junio de 2013, de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: <http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf>
- Moreno, N. (2002). *Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales*. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- N Bouzoubaâ, M. Z. (October de 2001). Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash Original Research . *Cement and Concrete Research*, 31 Issue 10, 1393-1402.
- Palomo, A. F.-J. (2004). "Geopolimeros": una única base química y diferentes micro estructuras. *Materiales de Construcción*, 54(275): 77-91 doi: 10.3989/mc.2004.v54.i275.249.
- Puertas, F. G.-J. (2002). Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos y al agua de mar. *Materiales de Construcción*, 52(267): 55-71 doi: 10.3989/mc.2002.v52.i267.
- Purdon, A. (1940). L'action des alcalis sur le laitier de haut-founeau (Theaction of alkalis on blast furnace slag),. Bruxelles, Belgium: Journal de la Société des Industries Chimiques.
- Quijano, J. C. (2010). *Análisis del comportamiento mecánico del cemento hidráulico, adicionados con cenizas volantes provenientes de la Central de Generación Térmica de Termopaipa*. Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, Santander, Bucaramanga.
- S. D. Wang, X. P. (1995). Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Adv. Cem. Res.*
- Salazar J, A. (3 de Diciembre de 2011). *Unidad de Planeación Minero Energética*. Recuperado el 5 de marzo de 2013, de Unidad de Planeación Minero Energética: <http://www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/2%20ALEJANDRO%20SALAZAR.pdf>
- Subdirección de Información Minero Energética . (2012). *La Cadena del Carbón*. Colombia: Juan José Manrique Galvis-Imprenta Nacional de Colombia.

Susan A. Bernal, e. a. (2011). Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science*, 46, 5477-5486.

Van Deventer, J. S. (2006). *The Zeobond Group*. Recuperado el 05 de Abril de 2013, de <http://www.zeobond.com>.