

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ALCALINO ELABORADO
A PARTIR DE ROCA VOLCÁNICA (TOBA)**

JEAN PAUL MARQUEZ CASTAÑEDA

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ALCALINO ELABORADO
A PARTIR DE ROCA VOLCÁNICA (TOBA)**

JEAN PAUL MARQUEZ CASTAÑEDA

Trabajo de tesis presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres
Asesor disciplinar

Roy Waldhiersen Morales Pérez
Asesor metodológico

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, Diciembre de 2015

Este trabajo está dedicado al sentimentalismo de trabajar acompañado.

Corrijo,

Para mi madre y abuela, por supuesto. Porque me han traído hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis más sinceros agradecimientos a las personas que colaboraron en el desarrollo de esta investigación: a Arnold Gutiérrez y Roy Morales, asesores de esta tesis, quienes, no solo dedicaron parte de su tiempo y me guiaron durante esta travesía, sino que también me contagiaron de su buena energía y entusiasmo para realizar este trabajo. A Oscar Camelo por su interés y colaboración en el desarrollo experimental. A Jose y Martin, laboratoristas de la facultad por su colaboración constante y desinteresada.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
2. ANTECEDENTES	17
3. JUSTIFICACION	19
4. OBJETIVOS	20
4.1 OBJETIVO GENERAL	20
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
5. HIPÓTESIS	21
6. MARCO CONCEPTUAL	22
6.1 MATERIALES ACTIVADOS ALCALINAMENTE	22
6.1.1 Reseña histórica.....	22
6.1.2 Activación alcalina	22
6.1.3 Aspectos químicos	23
6.2 GEOPOLÍMEROS	24
6.2.1 Definición.....	24
6.2.2 Estructura	24
6.2.3 Mecanismos de geopolimerización	26
6.2.4 Propiedades	27
6.2.5 Aplicaciones	28
6.3 TOBA.....	29
6.3.1 Definición.....	29
6.3.2 Localización y distribución en Colombia	29
6.3.3 Composición y características	30
6.3.4 Antecedentes de geopolímeros a base rocas volcánicas.....	31
7. MARCO LEGAL	33
7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. NORMA I.N.V.E 323.	33
7.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA GS NORMA I.N.V.E 128.....	33

8. DISEÑO METODOLÓGICO	34
8.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN.....	34
8.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	34
8.2 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	36
8.3 FASES DE INVESTIGACIÓN	36
8.3.1 FASE I: Caracterización de materia prima.....	36
8.3.2 FASE II: Definición De Mezclas	37
8.3.3 FASE III: Estudio Del Comportamiento Mecánico Y Durable	39
9. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	40
9.1 MATERIA PRIMA	40
9.1.1 Requerimientos químicos	40
9.1.2 requerimientos físico	41
9.2 PRUEBA PRELIMINAR DE GEOPOLIMERIZACIÓN.....	41
9.2.1 Comportamiento de la toba con los agentes alcalinos	41
9.2.2 prueba de curado y relación arena/material cementante	44
9.2.3 Pruebas con agentes alcalinos	46
9.3 COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABLE.....	49
9.3.1 Resistencia a compresión.....	49
9.3.2 Comportamientos en medios agresivos.....	51
9.3.3 Comportamiento frente a altas temperaturas.....	56
10. CONCLUSIONES.....	60
11. RECOMENDACIONES.....	63
12. BIBLIOGRAFÍA.....	64

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Esfuerzo de compresión de geopolímeros formados de minerales Al-Si.....	18
Tabla 2. Principales componentes de las cenizas volcánicas	31
Tabla 3. Resistencia de los concreto	32
Tabla 4 Variables de la investigación.....	36
Tabla 5. Matriz prueba preliminar de geopolimerización	37
Tabla 6. Matriz relación arena/material cementante vs temperatura de curado	38
Tabla 7. Relación activante/toba.....	43
Tabla 8. Dosificación cubos de mortero	44
Tabla 9. Resistencia a la compresión (kN).....	45
Tabla 10 Matriz para la selección del agente alcalino	46
Tabla 11 Resistencia a compresión (kN)	48
Tabla 12 Resistencia a la compresión de cubos de mortero	50
Tabla 13 Pérdida de masa de los especímenes en solución de HCl 0.1N	53
Tabla 14 Resistencia a la compresión de cubos expuestos a HCL 0.1N.....	54
Tabla 15 pérdida de masa de los cubos expuestos a altas temperaturas	57
Tabla 16 Resistencia a la compresión (kN) a altas temperaturas.....	58

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Resistencia a la compresión (kN)	45
Gráfica 2 Resistencia a compresión (kN)	48
Gráfica 3 Resistencia a la compresión: geopolímero vs cemento Portland	51
Gráfica 4 Resistencia a la compresión de los cubos elaborados con el geopolímero.....	55
Gráfica 5 Resistencia a la compresión de los cubos elaborados con cemento Portland ..	56
Gráfica 6 Resistencia a la compresión del geopolímero expuesto a altas temperaturas ..	58
Gráfica 7 Resistencia a la compresión de cemento Portland sometido a altas temperaturas	59
Gráfica 8 Resistencia a la compresión de la toba y el cemento Portland	61
Gráfica 9 Comportamiento en medios agresivos	61
Gráfica 10 Comportamiento frente a altas temperaturas.....	62

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representaciones de polisialatos.....	25
Figura 2. Toba volcánica.....	29
Figura 3. Distribución espacial de los volcanes y de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia	30
Figura 4. Metodología experimental.....	35
Figura 5 Toba volcánica.....	40
Figura 6. Elaboración muestras preliminares de geopolimerización.....	42
Figura 7. Muestras de geopolimerización a) relación 0.5- 2M b) NaOH 5M c) relación 2.5 5M	42
Figura 8. Cubos de mortero. Dosificación y temperatura de curado.....	44
Figura 9 Molde de acrílico.....	46
Figura 10 Elaboración de cubos de mortero en molde de acrílico	47
Figura 11 Cubos de mortero 1 M	47
Figura 12 Cubos de mortero. a) Elaboración de los cubos b) cubos de mortero	49
Figura 13 a) ensayo de resistencia a la compresión. b) grieta de falla del cubo elaborado con el geopolímero	50
Figura 14 Cubos de mortero en solución HCl a) Cemento Portland b) Geopolímero	52
Figura 15 Cambio de fase en el cubo de mortero elaborado con el geopolímero.....	52
Figura 16 Fase presentada en el curado. a) R1 2M b) R1 3M c) R0.5 4M	53
Figura 17 Pérdida de masa en el cubo elaborado con el geopolímero.....	54
Figura 18 Cara irregular del cubo de mortero	55
Figura 19 Mufla para ensayo a altas temperaturas	57

GLOSARIO

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.

ALUMINOSILICATO: son minerales que contienen sílice y óxido de aluminio, como el feldespato, cloritas y minerales de arcilla.

GEOPOLIMERO: término asignado a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de una reacción química.

MORTERO: mezcla plástica aglomerante que resulta de la combinación de arena y agua con un material cementante.

MOLARIDAD: medida de concentración de un soluto en una disolución, que se encuentra en un volumen dado expresado en moles por litro.

POLIMERO: son macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas que se repiten a lo largo de toda una cadena.

TOBA: tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños.

RESUMEN

La producción mundial de cemento Portland es un proceso que requiere un alto consumo de energía el cual produce una alta emisión de contaminantes a la atmosfera por descarbonatación y usos de combustibles, dando lugar a la investigación y desarrollo de materiales alternativos como es el caso de los geopolímeros. Esta investigación consiste en obtener un geopolímero utilizando como material de partida toba volcánica extraída de Manizales (Colombia). La síntesis del geopolímero se realizó a partir de la activación alcalina del contenido de aluminosilicatos que contiene la toba, para esto, se empleó hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3) como agentes alcalinos. Para evaluar el desempeño del geopolímero, se elaboraron cubos de mortero, donde a través de una metodología experimental se determinaron variables como temperatura y tiempo de curado, relación arena-material cementante, tipo y concentración del agente alcalino. Finalmente los cubos de mortero se analizaron mecánicamente, donde se determinó su resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de edad. Adicionalmente se evaluó la durabilidad de los cubos de mortero, sometiénolos a un ambiente acido donde se utilizó una solución de ácido clorhídrico HCl 0.1N y a altas temperaturas (450°C) para, posteriormente determinar su resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos fueron comparados con cubos elaborados con cemento Portland tradicional, como material de control, los cuales fueron sometidos a los mismos ambientes agresivos. Los valores obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión muestran que el polímero sintetizado con una mezcla de silicato de sodio y hidróxido de sodio con relación = 1 y molaridad = 3 ofrecen el mejor desempeño mecánico (11.68 kN) alcanzando aproximadamente el 50% de la resistencia que ofrecen los cubos elaborados con cemento Portland. En las pruebas de altas temperaturas muestran que como norma general no hay un deterioro significativo de los materiales, la resistencia para los cubos elaborados con el geopolímero se mantiene casi constante a diferencia de los cubos elaborados con el cemento Portland, donde los valores de resistencia disminuyen. Durante la prueba de durabilidad en solución acida se observó que los cubos de mortero elaborados con el geopolímeros presentaron una pérdida de masa de en promedio un 25% debido a que en la etapa de curado se presenta un cambio de fase en la solución alcalina, donde sus dos componentes, hidróxido y silicato de sodio se separan, dejando una franja oscura en la parte superior de los cubos, separadas por una minúscula grieta, por donde se filtra la solución acida al ser sumergidos y por cuestiones de presión, se separan estas dos secciones, generando una pérdida de masa significativa y reduciendo notablemente la

resistencia a la compresión de los cubos. La toba como material de partida en esta investigación, presento un comportamiento exitoso en el proceso de geopolimerización, los resultados de resistencia a la compresión a pesar de ser inferiores a los del cemento Portland, dan una clara idea del potencial que tiene la toba para crear un geopolímero con uso cementante, sin procesos industriales, uso de altas temperaturas, uso de aditivos ni emisiones de CO₂ a la atmosfera La durabilidad y comportamiento mecánico se puede mejorar, trabajando variables como finura de la toba, mejorando las condiciones de curado y un tratamiento térmico previo del material.

Palabras clave: aluminosilicatos, Geopolímero, mortero, toba, resistencia a la compresión.

INTRODUCCIÓN

La fabricación del cemento tipo Portland, principal componente de la mezcla de concreto, ha aumentado considerablemente en las últimas décadas y se ha convertido en una de las principales industrias contaminantes. En el país la producción de cemento Portland es responsable de la emisión del 5% aproximadamente de CO₂ que se emite a la atmosfera. Según estadísticas del DANE sobre el cemento gris, se evidencia que en los últimos 12 meses hasta marzo de 2015, los despachos al mercado aumentaron 8.6% al llegar a las 12.497,6 mil toneladas, lo cual se traduce en un incremento de 9.3% respecto al año anterior.¹

Materiales alternativos de tipo cementoso han sido objeto de investigación en las últimas décadas, ya que poseen la capacidad de sustituir parcial o totalmente al cemento Portland debido a su composición y características en aspectos como estructura cristalina, tamaño de partículas y reacción puzolanica o hidráulica, creándose así una nueva clase de materiales denominados geopolímeros. Estos geopolímeros o polímeros inorgánicos consisten en aluminosilicatos alcali-activados obtenidos por medio de una reacción geosintética que usa bajas temperaturas. Se ha reportado además, que el uso de estos geopolímeros evita la emisión de CO₂ a la atmosfera en un orden del 80%-90% en comparación con el cemento Portland.²

El material de partida de esta investigación debido a sus propiedades es la toba volcánica, consiste en un tipo de roca ígnea volcánica que se forma por la acumulación de cenizas. En Colombia ocupa cerca del 11.6% del territorio nacional y se encuentra particularmente en toda la región andina, centro y sur del país. Así, en función del tipo de activador alcalino empleado se presentará un análisis de las propiedades y características dentro de las cuales están, resistencia a la compresión, ataque químico de disoluciones agresivas, resistencia a altas temperaturas y caracterización físico-química del polímero sintetizado.

¹ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA DANE, estadísticas de cemento gris ECG, Presentación [citado 27 jul., 2015] Disponible en:

http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/cp_cem_gris_mar15.pdf

² MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland. n.p.: 2015. Repositorio Institucional UN, EBSCOhost [citado 31 jul., 2015]

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cemento Portland es uno de los materiales que constituye principalmente la mezcla de concreto, no obstante debido a su alto nivel de producción la industria del cemento portland se enfrenta a problemas de transcendencia social, es decir, problemas socio-económicos por el uso de materias primas a base de combustibles fósiles, cada vez más escasos y más caros. Así se estima que entre el 6-7% de las emisiones totales de CO₂ a la atmosfera a escala global se deben a la industria cementera.³

Los concretos elaborados con cemento Portland presentan problemas de durabilidad (ataque por sulfatos, corrosión de armadura, baja resistencia a altas temperaturas etc.) esto se traduce en que un 40-50% del presupuesto de la industria de la construcción es destinado a reparaciones. Todos estos factores hace que la búsqueda de materiales cementantes alternativos con bajas emisiones de CO₂ durante su proceso de producción y que además mejoren algunas propiedades antes las cuales el cemento Portland ha presentado deficiencias, sea una de los principales objetivos de la comunidad científica, tal es el caso de los cementos alcalinos.

Frente a esta situación, investigaciones relativamente recientes han iniciado estudios con geopolímeros o polímeros inorgánicos lo cuales son materiales de gran interés en la industria de la construcción ya que presentan características mecánicas similares al cemento Portland. Estos polímeros inorgánicos son sintetizados a partir de materiales con alto contenido de óxido de silicio y aluminio, activados por un agente alcalino.

Los geopolímeros obtenidos a partir de la activación alcalina de una aluminio-silicato pueden resultar ventajosos como agente cementante alternativo al aprovechar los recursos naturales que tiene una baja contaminación en su proceso de sintetizado, además, no solo contribuye a la disminución del CO₂ sino que también ofrecen una alternativa económicamente viable, a diferencia del cemento Portland con excelentes propiedades mecánicas.

Los morteros y hormigones elaborados con polímeros sintéticos permiten desarrollar resistencia mecánicas muy elevadas a cortas edades, resistencias que

³ FERNÁNDEZ JIMÉNEZ, Ana *et al.* Propiedades Y Aplicaciones De Los Cementos Alcalinos / Properties And Uses Of Alkali Cements. Revista Ingeniería De Construcción 3 (2009): 213. SciELO. [citado jul., 25 2015].

siguen aumentando de forma más lenta en función del tiempo. También presentan otras propiedades físico-mecánicas como la baja retracción al secado, buena adherencia matriz-acero y durabilidad.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los altos niveles de contaminación por la producción de cemento Portland hacen que el desarrollo y transferencia de tecnologías aplicadas a la innovación y el mejoramiento de materiales sean implementados en la actualidad debido a la necesidad de preservar el medio ambiente. Haciendo frente a esta situación, la presente investigación se plantea resolver la siguiente pregunta:

¿Cuáles son las propiedades y características del cemento alcalino elaborado a partir de roca volcánica (toba)?

2. ANTECEDENTES

En 1979, Joseph Davidovits introdujo el término *geopolímero* para designar aquellos polímeros de origen inorgánico obtenidos tras la síntesis de una solución alcalina con un sólido constituido fundamentalmente por aluminosilicatos; surge así el concepto de la geopolimerización.

Hua Xu, J. S. J. Van Deventer⁴ elaboraron una investigación titulada "The geopolymerisation of alumino-silicate minerals" donde se estudió el comportamiento de la geopolimerización de 16 minerales naturales Al-Si. Dichos minerales eran en cierta medida más solubles en una solución alcalina concentrada en hidróxido de sodio (NaOH) que en hidróxido de potasio (KOH), excepto en el caso de la sodalita. El orden de extensión de la disolución de las estructuras como laminares y anillos eran menos evidentes. El silicio y el aluminio parecían estar sincronizados en la disolución de la superficie de los minerales. La teoría ion-par podría ser utilizada para explicar la diferencia en el grado de disolución en soluciones de NaOH y KOH, así como el aumento de la resistencia a la compresión de los geopolímeros sintetizados en presencia de KOH.

Factores como el porcentaje de óxido de calcio (CaO), porcentaje de óxido de potasio K₂O, la molaridad Si-Al en el mineral original, el tipo de álcali, la extensión de la disolución de Si y la relación molar Si/Al en solución tenían una correlación significativa con la resistencia a la compresión. El mineral estilbita en presencia de KOH mostró la resistencia a la compresión más alta (18 MPa). Finalmente, los resultados muestran que los minerales de la geopolimerización podrían ser una fuente de material para geopolímeros. Sin embargo, es evidente que los mecanismos de reacción involucrados en la disolución, la formación de gel, fraguado y fases de endurecimiento son muy complejos y requieren una gran cantidad de nuevas investigaciones.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión de los 16 minerales geopolimerizados con KOH y NaOH:

⁴ XU, HUA, and Jannie S.J. Van Deventer. "Geopolymerisation of multiple minerals." *Minerals Engineering* 15, (January 1, 2002): 1131-1139. ScienceDirect, EBSCOhost [citado jul., 31 2015]

Tabla 1. Esfuerzo de compresión de geopolímeros formados de minerales Al-Si

Minerals	Compressive strength (MPa)	
	KOH	NaOH
Almandine	10.3	8.5
Grossular	16.7	14.5
Sillimanite	12.7	6.5
Andalusite	11.1	8.8
Kyanite	6.8	6.3
Pumpellyite	10.8	8.8
Spodumene	13.1	5
Augite	6.7	5
Lepidolite	4.3	2.5
Illite	7.1	5.8
Celsian	9.7	8.7
Sodalite	15	10.3
Stilbite	18.9	14.2
Heulandite	7.4	5.6
Anorthite	14.4	6

Fuente: Xu, Hua, and Jannie S.J. Van Deventer.⁵

En agosto de 2011 se dieron a conocer los resultados preliminares de la síntesis de geopolímeros obtenidos por la activación de piedra pómez (roca volcánica)⁶ los cuales se caracterizaron experimentalmente por espectroscopia de infrarrojo y difracción de rayos x para analizar su composición estructural y posteriormente adicionarlos al concreto para sustituir el agregado fino. Como agente alcalino se utilizó una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio; la síntesis de geopolímeros se inició agregando el aluminosilicato a la solución del agente alcalino.

Los concretos mostraron un aumento en la resistencia a la compresión a medida que aumenta el tiempo de secado. La sustitución del agrado fino por el geopolímero permitió observar que el polímero inorgánico afecta la resistencia del concreto, a expensas de saber que el agregado fino le confiere al concreto la mayor cantidad de la resistencia junto con el agregado grueso.

⁵ XU HUA. Op. cit.,

⁶ GONZÁLEZ CUERVO, Montano Angarita, *et al.* Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto', Revista El Hombre y la Maquina, no. 38, 2012 p. 59.

3. JUSTIFICACION

El sector de la construcción es considerado uno de los que genera mayor consumo de materiales, consumo energético y recursos naturales, se habla de un sector que tiene un gran impacto socio-económico. El cemento Portland, como componente principal en la mezcla de concreto, demanda una producción anual de 1.5 billones de toneladas, lo que se traduce en términos ambientales, en la producción de una tonelada de dióxido de carbono por cada tonelada de cemento Portland que se produce. Esta situación ha dado inicio a la búsqueda de materiales alternativos que reemplacen parcial o totalmente el uso de cemento Portland, además de implementar modelos y sistemas construcción sostenible, que optimice procesos y recursos.

Los concretos elaborados con cemento Portland, han presentado deficiencias en su durabilidad por ataques de sulfatos, exposición a altas temperaturas, corrosión de armaduras, dando oportunidad para que la búsqueda de materiales alternativos no solo se centre en la reducción de emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera por su producción, sí que también, mejoren estas deficiencias que presenta el concreto elaborado con cemento Portland.

El desarrollo de esta investigación se enfoca en buscar un material que ofrezca características de resistencia y durabilidad similares a las del cemento Portland, que tenga una bajo consumo energético en su producción y bajas emisiones de dióxido de carbono durante su producción.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener y caracterizar cemento alcalino elaborado a partir de roca volcánica (toba).

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 4.2.1 Establecer la concentración y relación del agente activador que se desempeñe mejor con la toba.
- 4.2.2 Caracterizar fisicoquímicamente el geopolímero sintetizado.
- 4.2.3 Determinar la resistencia a la compresión de morteros elaborados con el geopolímero sintetizado.
- 4.2.4 Evaluar la resistencia de morteros elaborados con el geopolímero sintetizado al ataque químico de disoluciones agresivas: ácido clorhídrico.
- 4.2.5 Evaluar el comportamiento de morteros elaborados con el geopolímero sintetizado a elevadas temperaturas.

5. HIPÓTESIS

Las rocas volcánicas están compuestas fundamentalmente por silicatos (SiO_4^{4-}), mas iones de aluminio calcio, potasio, magnesio y hierro. Composición química que tiene relación con la dinámica de activación alcalina de cementos. En este sistema se mezclan aluminosilicatos que contiene calcio. Adicionalmente en lo que respecta al comportamiento durable de los geopolímeros, las fases mineralógicas y microestructurales son diferentes a las del cemento Portland por ello los procesos de degradación son diferentes⁷. Así presentan diferentes comportamientos frente a altas temperaturas, y a ambientes ácidos o de sulfatos Es por esto, que la toba volcánica se considera un material prometedor, para desarrollar el proceso de geopolimerización y obtener valores de resistencia a la compresión y durabilidad comparables con los ofrecidos por el cemento Portland.

⁷ FERNÁNDEZ JIMÉNEZ. Op. cit.,

6. MARCO CONCEPTUAL

6.1 MATERIALES ACTIVADOS ALCALINAMENTE

6.1.1 Reseña histórica

Las primeras investigaciones relacionadas con disoluciones alcalinas fueron realizadas por el investigador alemán Kuhl a principios de la década de 1930, el cual trabajó con cenizas molidas e hidróxido de potasio. Años después, en 1940 Purdon, determinó la reactividad de las escorias por medio de hidróxido de sodio y hidróxido de potasio, realizando así, el primer estudio sobre cementos sin Clinker, empleando escorias y disoluciones alcalinas. En 1957 V. D. Glukhovsky desarrolló materiales cementantes utilizando aluminosilicatos con bajo contenido de calcio y disoluciones alcalinas. En la década de 1980, J. Davidovits creó materiales cementantes por medio de la activación alcalina de caolín calcinado, domita y caliza, logrando materiales basados en la teoría de Glukhovsky. En 1986, Krivenko comprobó que en los medios acuosos de alta alcalinidad con presencia de sales alcalinas, silicatos y aluminosilicatos de origen natural o artificial, y sin presencia de calcio, reaccionan químicamente formando un material resistente al agua, de un carácter similar a las zeolitas.

6.1.2 Activación alcalina

Es un proceso que utiliza activadores alcalinos, cuya función consiste en acelerar la solubilización del material Al-Si, así como ayudar en la formación de hidratos estables con baja solubilidad creando una estructura más sólida. Los activadores más usados corresponden al hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH), pero también pueden tratarse de compuestos alcalinotérreos y alcalinos:

- Hidróxidos: ROH, R(OH)₂
- Sales de ácido débiles: R₂CO₃, R₂S, RF
- Sales de ácido fuerte: Na₂SO₄, CaSO₄·2H₂O
- Sales silícicas del tipo R₂O_(n) SiO₂

Los minerales que en su composición mineralógica contengan sílice y alúmina pueden ser empleados como insumos para la activación alcalina. Se incluyen

también, desechos industriales como cenizas volantes, escorias, arcillas y otros materiales con contenidos en calcio.

Se ha comprobado también, que materiales Al-Si de estado amorfo o en fase vítrea, pueden ser activados alcalinamente en condiciones fuertemente alcalinas y en curado a temperatura, desarrollando materiales con buenas propiedades mecánicas.

6.1.3 Aspectos químicos

A nivel estructural se evidencian diferencias con la composición de los cementos convencionales. Los productos de reacción de los cementos tradicionales son silicatos cálcicos hidratados nombrados gel CSH y Portlandita Ca(OH)_2 , por otro lado, los cementos activados alcalinamente presentan una estructura tridimensional polimérica de tetraedros de Al^{3+} y Si^{4+} , amorfa, con orificios donde se ubican cationes monovalentes (Na^+ o K^+) con el fin de contrarrestar la carga negativa relacionada a los tetraedros de Al^{3+} .

Según la concentración de calcio en las muestras, se pueden presentar dos tipos de activación alcalina:

- Activación alcalina con geopolímeros

Denominada comúnmente como cemento del suelo o geocementos, donde los productos se obtienen por la reacción de materiales Al-Si sin contenido de calcio (arcilla, caolín, metacaolín y cenizas volantes) y disoluciones alcalinas.

- Cementos activados alcalinamente

Las fuentes Al-Si activadas en este sistema tiene contenido de calcio en bajas concentraciones en su estructura, en casos donde la cantidad de calcio es abundante, es posible generar mezclas de estructuras (propias de estos sistemas y geles CSH).

En las reacciones típicas de la geopolimerización se identifica una fase inicial donde mediante el suministro adicional de silicio y un medio alcalino se produce una disolución de los aluminosilicatos. Posteriormente los monómeros de Si y Al se condensan formando precursores geopoliméricos

(complejos dímeros, trímeros, etc.). Aumentando de número y concentración se forman estructuras amorfas.

6.2 GEOPOLÍMEROS

A mediados de 1950 surgió la idea de desarrollar sistemas álcali-activados con contenido de silicato de calcio hidratados y fases de aluminosilicatos. Estos avances fueron desarrollados por Pavel Krivenko y Víctor Glukhovskiy en Ucrania, donde fueron nombrados como “silicatos del suelo”. La durabilidad de los morteros y concretos elaborados con estos nuevos materiales despertaron interés para determinar su naturaleza.

6.2.1 Definición

Son geopolímeros sintéticos elaborados a partir de la activación alcalina. Se forman por la copolimerización del aluminio y silicatos que surgen de la disolución del aluminio y silicato presentes en la composición química de los materiales de origen.

Estos materiales se obtienen por medio de una reacción de polimerización de agentes activantes (sodio o potasio) para formar soluciones de concentraciones altas y con gran capacidad de disolver sílice y alúmina. Con esta solución se destruye la estructura amorfa de diferentes minerales naturales, subproductos y desechos de la industria. El contenido del agua, condiciones de curado, concentración del agente alcalino utilizado, pueden afectar las propiedades del geopolímero.

6.2.2 Estructura

Para sintetizar los polímeros se requiere de un material de partida, que pueden ser minerales naturales, arcillas calcinadas, desechos o subproductos industriales, y rocas volcánicas; un relleno inactivo, conformados por caolinita o metacaolinita el cual suministra Al^{3+} , la solución geopolimérica compuesta de una solución álcali de hidróxido la cual disuelve el material de partida y una solución de silicato de sodio o potasio el cual actúa como aglomerante.

Las redes de sialatos son conformadas por moléculas tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 , que se enlazan de modo alterno con átomos de oxígeno compartidos. Las cadenas o anillos de polímeros con Al^{4+} y Si^{4+} en número de coordinación IV con oxígeno son denominadas polisialatos⁸ y de acuerdo a su estructura se puede expresar por medio de la siguiente fórmula:

$$M_n - (\text{SiO}_2)_z - (\text{AlO}_2)_n \text{WH}_2\text{O}$$

Donde,

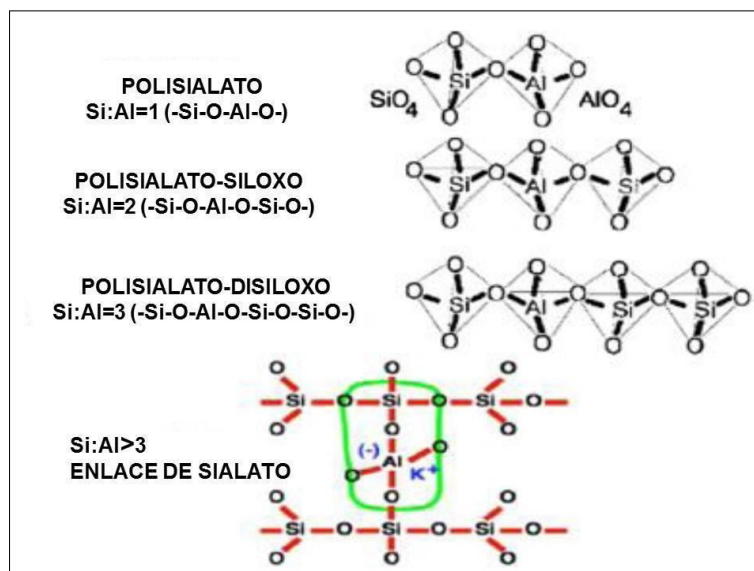
n es el grado de poli condensación

M es el catión monovalente (K^+ o Na^+)

z para polisialato $z=1$, poli (sialato-siloxo) $z=2$ y poli (sialato-disiloxo) $Z=3$

Los iones que tienen una carga positiva (cationes) como el Na^+ , K^+ o Ca^{2+} , tienen la labor de neutralizar la carga negativa del Al^{3+} y se alojan en las cavidades de la estructura

Figura 1. Representaciones de polisialatos



Fuente: Bentour 1997

⁸ MARTÍNEZ LÓPEZ. Op. cit.,

6.2.3 Mecanismos de geopolimerización

El proceso de geopolimerización se lleva a cabo por medio de una reacción exotérmica a través de oligómeros (dímeros, trímeros) los cuales generan las estructuras necesarias para la formación de una macromolécula tridimensional. La geopolimerización tiene los siguientes pasos básicos:

- En esta primera etapa las especies que forman posilatos, se liberan de los precursores de la zeolita. En esta etapa la disolución activa la superficie y las reacciones de unión contribuyen de manera importante en la resistencia final del material.

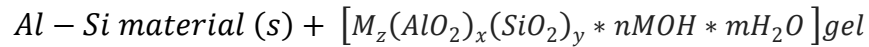
En condiciones alcalinas, los elementos Al-Si adquieren gran reactividad, y se cree que este proceso se da por la participación de iones hidroxilo. Se ha encontrado que cuando hay mayor presencia de iones hidroxilo, la disolución de distintas especies de aluminato y silicato, se facilita generando una polimerización adicional.

Por otro lado, si la solución alcalina es muy concentrada (mayor a 30% de moles de Na_2O) la conectividad de los aniones de silicato puede comprometerse resultando en una polimerización pobre. Varios estudios indican que el grado de disolución resulta mayor cuando se usa hidróxido de sodio (NaOH) en lugar de hidróxido de potasio (KOH) debido al tamaño reducido del Na^+ los cuales estabilizan mejor los monómeros y dímeros de silicato que se encuentran en la solución, mejorando la velocidad en que se disuelven los minerales.

- El intercambio de complejos Al-Si disueltos en la superficie de la partícula hacia el espacio inter-partícula.
- La formación de gel que resulta de la polimerización dada entre la solución de silicato adicionado y los complejos de Al-Si.
- Endurecimiento de la fase gel.

El siguiente esquema muestra la reacción para la policondensación que tiene lugar durante el proceso de geopolimerización de minerales:⁹

⁹ XU HUA. Op. cit.,



Donde,

M: indica el sodio o potasio

s: estado solido

n: número de moles del activador alcalino

m: número de moles de agua

gel: mezcla bifásica de agua y aluminosilicatos que se encuentra en los espacios entre las partículas sin reaccionar

material: cualquier material formado por sílice y alúmina.

De acuerdo a las ecuaciones descritas anteriormente, durante las dos primeras reacciones la cantidad de material Al-Si que se emplea depende del tamaño de partícula, el grado de disolución y la concentración de la solución alcalina

En la última ecuación se describe la formación de los geopolímeros con estructura amorfa, debido a la formación de gel que se basa principalmente en el grado de disolución de los materiales Al-Si.

6.2.4 Propiedades

Las propiedades tecnológicas de los morteros, hormigones elaborados con cementos alcalinos presentan en general unas propiedades mejores que las observadas en mezclas con cemento Portland convencional, destacando el comportamiento de adherencia matriz-acero, resistencias mecánicas tempranas, y bajas retracciones al secado.

Respecto a la durabilidad, las fases micro estructurales y mineralógicas de los productos elaborados con cementos alcalinos son diferentes a las de un cemento portland convencional, presentando procesos de degradación distintos. Es por

esto, que presentan un buen comportamiento frente al ataque de sulfatos y agua de mar. En contacto con sulfatos se genera una degradación formándose una precipitación de sulfato sódico. En agua de mar se genera un intercambio iónico de Na por Mg modificando la morfología del gel dejándolo más poroso. En medios ácidos los materiales elaborados con cementos alcalinos sufren un proceso de dealuminación el cual compromete su resistencia y masa. No obstante este comportamiento es mejor al del cemento Portland tradicional.

Sus propiedades mecánicas se mantienen frente a un ambiente de altas temperaturas y mejoran entre 25°C y 600°C. No obstante, aparecen faces vítreas al superar los 600° C dando lugar a fenómenos locales de plasticidad causando una degradación del material limitándolo para usos en los que no se expongan a estas condiciones de temperatura.

6.2.5 Aplicaciones

Gracias a las buenas propiedades mecánicas, su buena adherencia matriz-acero, su estabilidad dimensional y su resistencia al fuego, los concretos y morteros elaborados a partir de cementos alcalinos pueden ser usados en la industria de lo prefabricado. La producción de elementos prefabricados deriva de los siguientes hechos constatados:¹⁰

- La elaboración de productos prefabricados solo pueden hacerse con materiales que garanticen altas resistencias, durabilidad, adherencia con la armadura, estabilidad de vehículos, etc. Características que cumplen los hormigones elaborados con cementos alcalinos.
- El proceso de producción de elementos prefabricados exige un curado térmico en la mayoría de ocasiones. El curado de hormigones elaborados con cementos alcalinos se optimiza en condiciones de curado a temperatura.
- Los hormigones elaborados con cementos alcalinos presentan elevadas resistencias en las primeras horas de curado, disminuyendo el tiempo necesario para el desmoldado de las piezas aumentando el número de producción de materiales prefabricados.

¹⁰ FERNÁNDEZ JIMÉNEZ. Op. cit.,

6.3 TOBA

6.3.1 Definición

Consiste en un tipo de roca ígnea volcánica, de consistencia ligera y porosa. Se forma por la acumulación de elementos volcánicos como ceniza, que son liberados durante una erupción volcánica.

Figura 2. Toba volcánica



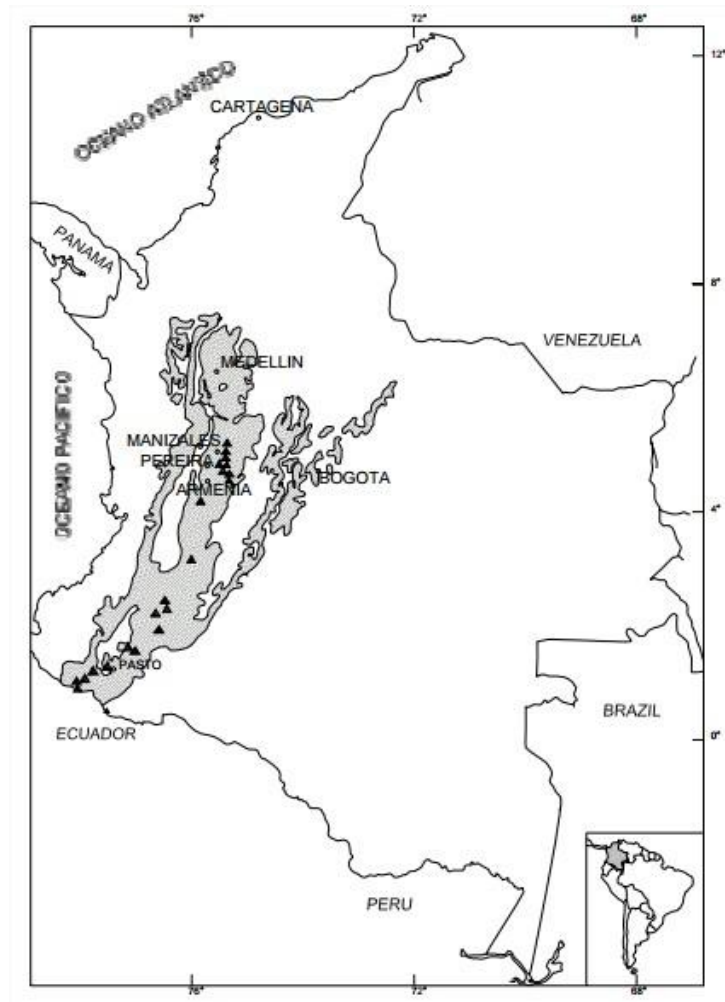
Fuente: dreamstime

6.3.2 Localización y distribución en Colombia

Los suelos de cenizas volcánicas representan alrededor del 0.84% a nivel mundial, y se encuentran en su mayoría en zonas tropicales. En Colombia los depósitos de suelos derivados de cenizas volcánicas, ocupan aproximadamente el 11.6% del territorio y se localizan en regiones de crecimiento demográfico y económico. Estos depósitos se extienden en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío y en el centro del país hasta los departamentos Tolima, Cauca y Nariño. En las regiones del oriente del país, como los Llanos Orientales y

Bogotá se han localizado depósitos de este tipo de suelo distribuido aleatoriamente sin mostrar un patrón definido.¹¹

Figura 3. Distribución espacial de los volcanes y de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia



Fuente: IGAC

6.3.3 Composición y características

Según cada sistema volcánico los productos derivados de estos, tienen composiciones químicas diferentes. Su mineralogía es de gran importancia en este tipo de investigación debido a que tiene gran influencia sobre el comportamiento mecánico, y calidad del geopolímero.

¹¹ A. Lizcano, M.C. Herrera, J. C. Santamarina "Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia" Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol 6, No 2 (2006)

Los minerales livianos ($G_s < 2.8$) son los principales componentes de las cenizas volcánicas. En menor proporción se encuentran minerales pesados ($G_s > 2.8$) dentro de su mineralogía se encuentran:

Tabla 2. Principales componentes de las cenizas volcánicas

Mineral	Gs (g/m.s)
feldespatos	2,2 – 2,4
Cuarzo	2,6 – 2,65
hornablenda	3,0 – 3,4
hiperstena	3,2 – 3,9
Augita	3,2 – 3,6
magnetita	4,5 – 5,0
Biotita	2,9 – 3,4
Apatita	3,1 – 3,2
Vidrio volcánico	2,2 – 2,4

Fuente: Martínez López 2015¹²

De acuerdo al contenido de sílice, las cenizas pueden dividirse en riolíticas, dacíticas, andesíticas y basaltos-andesíticas, cuyos porcentajes presentan un 78.05 – 47.6% de contenido de sílice.

6.3.4 Antecedentes de geopolímeros a base rocas volcánicas

En un estudio titulado “obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto”¹³ se presentan los resultados obtenidos de la síntesis de geopolímeros a partir de la activación alcalina de aluminosilicatos. Como agente alcalino se utilizó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y una solución de silicato de sodio (Na_2O_3Si). La síntesis del geopolímero se realizó adicionando el aluminosilicato a la solución del agente alcalino. Posteriormente la mezcla se calentó a una temperatura de 60-80°C durante 6-12 horas, obteniendo un material con propiedades cementantes. Para la elaboración de las muestras de concreto, se reemplazó en su totalidad el agregado fino por el geopolímero. La relación agua-cemento fue acondicionada buscando un asentamiento medio entre

¹² MARTÍNEZ LÓPEZ. Op. Cit.,

¹³ González Cuervo, CP, Montano Angarita, AM, & Castro Rodríguez, DC 2012, 'Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto', Revista El Hombre y la Maquina, no. 38, p. 59.

5cm y 10cm. Para la preparación de las probetas se elaboraron cilindros de 75mm de diámetro y 150mm de alto para realizar los ensayos a compresión a los 7, 14 y 28 días de fraguado.

Los análisis mecánicos de las probetas muestran que efectivamente los geopolímeros afectan la resistencia del concreto. Los concretos muestran un aumento en la resistencia con el paso del tiempo. Comparado con concretos elaborados con cemento Portland tradicional, el cual tiene su máxima resistencia a los 28 días de secado, los concretos elaborados con geopolímeros siguen la aumentando su resistencia con el aumento de los días.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos de resistencia a la compresión [$f'c$ (kg/cm²)]:

Tabla 3. Resistencia de los concreto

Días \ Concreto	7	14	28
Ceniza volante	6	31.65	48.7
Portland	169.9	221.8	319.15
Geopolímero	11.85	22.6	34.4

Fuente: Gonzales C. ¹⁴

¹⁴ GONZÁLEZ CUERVO Op, cit.,

7. MARCO LEGAL

7.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. NORMA I.N.V.E 323.

Por medio de este ensayo se determinara la resistencia a la compresión de los cubos de mortero elaborados con el cemento alcalino. A partir de estos resultados se analizara la viabilidad de que la toba sea usada para la creación de geopolímeros.

7.2 GRAVEDAD ESPECÍFICA GS NORMA I.N.V.E 128.

Por medio de este método se determinara la gravedad específica del material por medio de un picnómetro

8. DISEÑO METODOLÓGICO

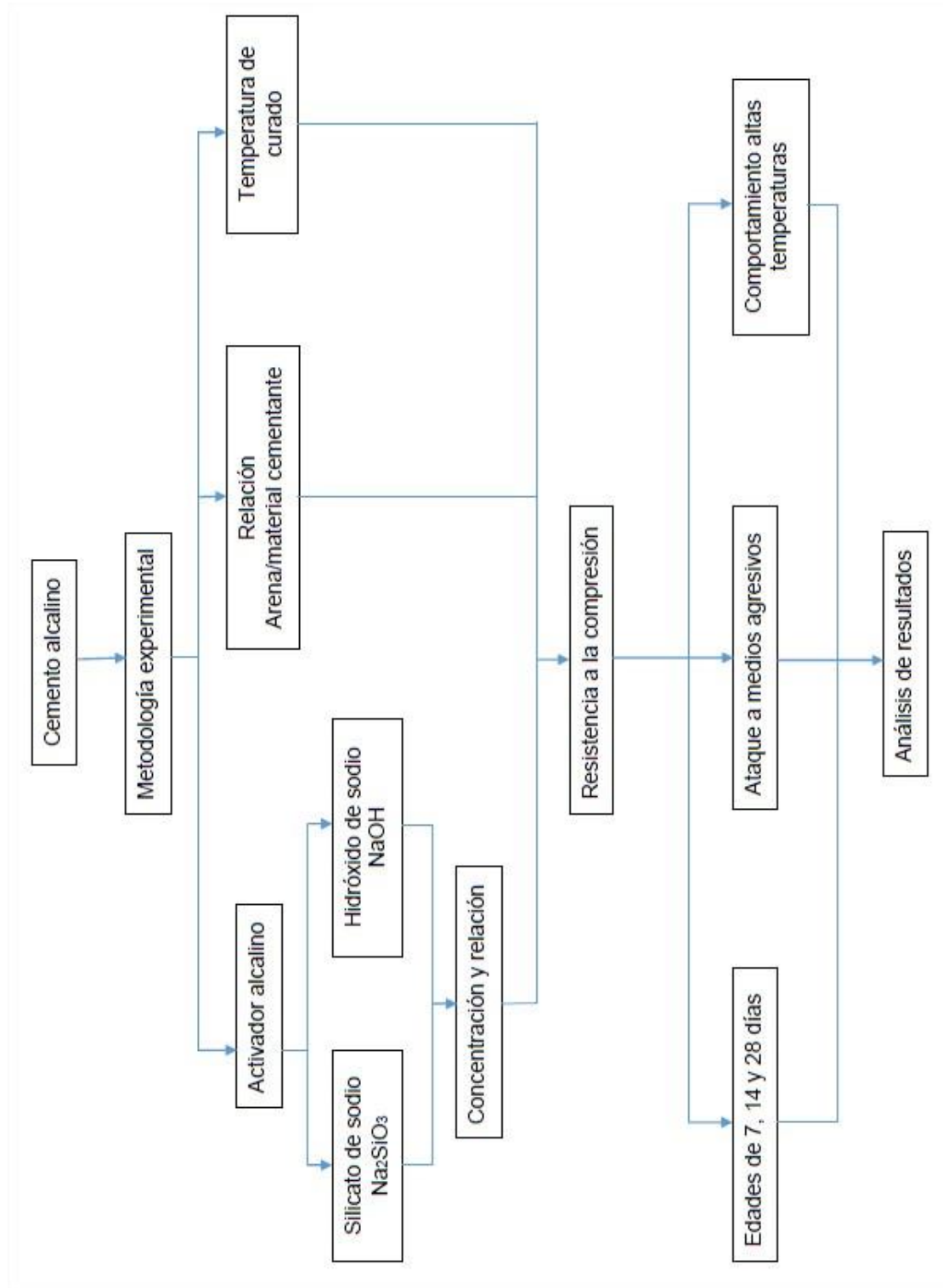
8.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, donde por medio de experimentos, se obtendrá información específica que ayudara a cuantificar la resistencia a la compresión de los especímenes al ser expuestos a altas temperaturas, al ataque de ácidos y sulfatos.

8.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Como los estudios a los que se enfoca esta investigación requieren que sean demostrados experimentalmente, en las variables a evaluar se deberá plantear las posibles hipótesis para posteriormente obtener los análisis de resultados, que demuestren que el objeto de estudio, produjo los resultados esperados, dando paso a la creación de nuevas alternativas y valores agregados con referencia a las otras investigaciones que tienen temas similares, es por esto que este tipo de investigación es de tipo experimental.

Figura 4. Metodología experimental



Fuente: propia

8.2 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 4 Variables de la investigación

Ítem	Descripción	Operación
Variables independientes	Tipo de activador alcalino	
	Concentración de activador alcalino	
	Relación (arena/material cementante)	
	Temperatura de curado	
Variables dependientes	Resistencia a la compresión	Ensayo a compresión simple
	Resistencia a soluciones acidas	
	Resistencia a sulfatos	
	Resistencia a altas temperaturas	

Fuente: Propia

8.3 FASES DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de esta investigación se divide en tres etapas, donde inicialmente se definen los materiales que se utilizarán en la mezcla de mortero, posteriormente se estudiarán diferentes concentraciones y dosificaciones de estos materiales y por último se evaluarán las propiedades mecánicas de los especímenes después de ser sometidos a soluciones acidas, altas temperaturas y sulfatos.

8.3.1 FASE I: Caracterización de materia prima

a. Selección de materia prima

Reportes en la literatura muestran que el uso de materiales Al-Si en la elaboración de geopolímeros ofrece buenos resultados en los ensayos de resistencia a la compresión. Los materiales derivados de formaciones volcánicas tienen componentes en mayor proporción de SiO_2 y Al_2O_3 y son estos óxidos, los más frecuentes en el cemento Portland tradicional, es por esto que se escoge la toba volcánica como material de partida para realizar el geopolímero sintético y estudiar sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

b. Fluorescencia de rayos X (XRF)

Ensayo en el cual se busca cuantificar la proporción de óxidos presentes en el material de estudio, los cuales se relacionan entre sí para dar ciertas características al aglomerado.

c. Gravedad específica GS

El tamaño de partícula influye dentro del proceso de geopolimerización, es por esto, que se determinara la gravedad específica del material. Este ensayo se hará bajo la norma I.N.V.E 128.

8.3.2 FASE II: Definición De Mezclas

a. Prueba preliminar de geopolimerización

Con el fin determinar el comportamiento de la toba con los agentes activantes se hará una prueba variando el tipo de activante (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio o una mezcla de ambos) y su concentración. Para esta prueba se utilizara 35gr de toba para cada una de las mezclas. Al final de la prueba se observaran características como manejabilidad, tiempo de secado, endurecimiento y relación activante/material. A continuación se muestra la matriz de diseño para desarrollar esta prueba.

Tabla 5. Matriz prueba preliminar de geopolimerización

		Concentración (molaridad)								
		1 M	2 M	3 M	4 M	5 M	6 M	7 M	8 M	9 M
NaOH										
<u>Na₂SiO₃</u> NaOH	R=0.5									
<u>Na₂SiO₃</u> NaOH	R=1									
<u>Na₂SiO₃</u> NaOH	R=1.5									
<u>Na₂SiO₃</u> NaOH	R=2									
<u>Na₂SiO₃</u> NaOH	R=2.5									

Fuente: propia

b. Estudio de la relación Arena / Material cementante y temperatura de curado

Durante esta prueba se estudiará los porcentajes de cada uno de los componentes del mortero. Se variara esta relación tomando como referencia la relación que indica la norma I.N.V E 323-07 para la elaboración de cubos de mortero con cemento tipo Portland, la cual es de 2.75. Para el caso de los cubos elaborados con el cemento alcalino se utilizaran relación de 1, 1.5 y 2. Una vez se elaboren los cubos de mortero, se pondrán a diferentes temperaturas de curado para determinar la temperatura que ofrezca un mejor comportamiento en el momento de hacer los ensayos de resistencia a la compresión. Las temperaturas de curado serán 80°C, 60°C y temperatura ambiente. Para desarrollar este objetivo se elabora la siguiente matriz.

Tabla 6. Matriz relación arena/material cementante vs temperatura de curado

		temperatura de curado		
		18° C	60° C	80° C
arena toba	2			
	1.5			
	1			

Fuente: Propia

c. Estudio del activador alcalino

Después de identificar la relación arena/toba, y temperatura de curado que mejores resultados ofrecieron, se estudiara el comportamiento con diferentes mezclas y concentraciones de activadores alcalinos. De acuerdo a los resultados obtenidos en la prueba preliminar de geopolimerización, se tomaran las 3 mezclas de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ con diferentes concentraciones que mejor interactuaron con la toba y se elaboraran cubos de mortero de 5x5x5cm. Se evaluara el desempeño de los cubos de mortero por medio de análisis de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado.

8.3.3 FASE III: Estudio Del Comportamiento Mecánico Y Durable

a. Resistencia a la compresión

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Fase II (tipo y concentración de activador alcalino, relación arena/material cementante, tiempo y temperatura de curado), se elaboraran cubos de mortero de 5x5x5cm para ser sometidos a cargas de compresión. Para ello se elaboraran 3 muestras por cada día seleccionado para realizar el ensayo. Los cubos serán fallados a la edad de 7, 14 y 28 días de curado. Este proceso se registrará bajo la norma I.N.V.E 323.

b. Comportamiento en medios agresivos

Para estudiar el comportamiento de estos materiales frente al ataque en un medio ácido, se elaboraran cubos de mortero de 5x5x5cm bajo las mismas condiciones utilizadas en el estudio del ataque por sulfatos. Los prismas serán sumergidos en una disolución de ácido clorhídrico HCl 0.1N; a las edades de 7, 14 y 28 días, los prismas serán ensayados mecánicamente de acuerdo a la norma I.N.V.E 323 y se determinara también, las variaciones de peso.

c. Comportamiento frente a altas temperaturas

Se elaboraran cubos de mortero de 5x5x5cm elaborados con la mezcla determinada en la Fase II. Estos cubos una vez desmoldados se guardarán en una cámara de curado hasta los días de ensayo, a las edades de 7, 14 y 28 días. El ensayo consistirá en introducir durante una hora los prismas a una temperatura de 400°C para ser sacados y enfriados bruscamente a temperatura ambiente. Posteriormente se evaluara la resistencia mecánica residual por medio del ensayo de compresión bajo la norma I.N.V.E 323.

9. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 MATERIA PRIMA

9.1.1 Requerimientos químicos

a. Fluorescencia de rayos X

La muestra en polvo de toba fue secada a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente mezclada con cera espectrométrica de casa Merck en relación Muestra: Cera de 10:1, homogenizada por agitación, llevada a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando una pastilla prensada de 37mm de diámetro que fue medida en la aplicación **SEMIQ-2007**.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software IQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H,C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos x, MagixPro PW – 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos

El resultado obtenido en forma de compuestos y elementos se muestra en la Tabla 7.

Figura 5 Toba volcánica



Fuente: Propia

Tabla 7 Compuestos y/o elementos de la toba (% en peso)

Elemento y/o Compuesto	% en peso
SiO ₂	66.985
Al ₂ O ₃	13.417
Na ₂ O	3.876
Fe ₂ O ₃	3,453
CaO	3.305
K ₂ O	2.763
MgO	1.064
TiO ₂	0.454
P ₂ O ₅	0.142
Ba	0.115
Sr	0.076
MnO	0.065
Cl	0.039
S	0.016
Zr	0.014
Rb	0.007
Zn	0.006
Y	0.002

Fuente: Propia

9.1.2 requerimientos físico

a. Gravedad específica

Se determina la gravedad específica por medio de las ecuaciones descritas según la Norma I.N.V.E 128

$$G_s = 2.53$$

9.2 PRUEBA PRELIMINAR DE GEOPOLIMERIZACIÓN

9.2.1 Comportamiento de la toba con los agentes alcalinos

Se realizó una prueba para estudiar el comportamiento de la toba con los agentes alcalinos (hidróxido de sodio, silicato de sodio, o una mezcla de ambos). Para realizar esta prueba se tomó 35 gr de toba y se mezcló agregando el agente

alcalino poco a poco hasta lograr una trabajabilidad del material aceptable. Siguiendo el modelo de matriz de la Tabla 5, se realizaron un total de 56 muestras.

Figura 6. Elaboración muestras preliminares de geopolimerización



Fuente: Propia

Se observó que las muestras donde se utilizó relaciones de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ altas ($R=2$, $R=2.5$) y molaridades superiores a 7, no secaron al cabo de unos días; por el contrario las muestras que utilizaron relaciones y molaridades bajas, secaron y ofrecieron algo de dureza.

Figura 7. Muestras de geopolimerización a) relación 0.5- 2M b) NaOH 5M c) relación 2.5 5M



Fuente: propia

Luego de observar estos resultados, se empezó a trabajar las molaridades de 2 a 5. Se realizó otra prueba donde se estableció la relación activante/ material cementante, y se encontró que las mezclas que tienen mayor cantidad de silicato de sodio, necesitan mayor cantidad de activante para logran una buena trabajabilidad del material.

Tabla 8. Relación activante/toba

Activante	Molaridad	Relación activante/toba
NaOH	2	0.5
	3	0.5
	4	0.55
	5	0.55
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 0.5$	2	0.5
	3	0.55
	4	0.55
	5	0.6
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1$	2	0.55
	3	0.55
	4	0.6
	5	0.6
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1.5$	2	0.55
	3	0.6
	4	0.6
	5	0.65
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 2$	2	0.6
	3	0.6
	4	0.65
	5	0.65
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 2.5$	2	0.65
	3	0.65
	4	0.65
	5	0.65

Fuente: Propia

9.2.2 prueba de curado y relación arena/material cementante

Para determinar la relación de arena/material cementante y temperatura de curado que ofrezcan un mejor desempeño en el ensayo de resistencia a la compresión, se elaboraron 9 cubos de 5x5x5cm, utilizando relaciones arena/material = 1, 1.5, y 2, dejándolos a diferentes temperaturas de curado (temperatura ambiente, 60°C y 80°C). Como agente activante se utilizó NaOH 2M en todas las mezclas. Posteriormente fueron expuestos a cargas de compresión a los 7 días de edad.

La dosificación de materiales para la elaboración de los cubos de mortero, se muestra a continuación:

Tabla 9. Dosificación cubos de mortero

Relación arena/toba	% Arena	% Toba	% NaOH 2M	Relación activante/material
1	50	50	28.53	0.28
1.5	60	40	26.08	0.26
2	66.67	33.33	20.38	0.20

Fuente: Propia

Se elaboraron 3 cubos para cada una de las relaciones, para un total de 9 cubos. Para cada relación se utilizaron tres temperaturas diferentes de curado por 24 horas.

Figura 8. Cubos de mortero. Dosificación y temperatura de curado



Fuente: Propia

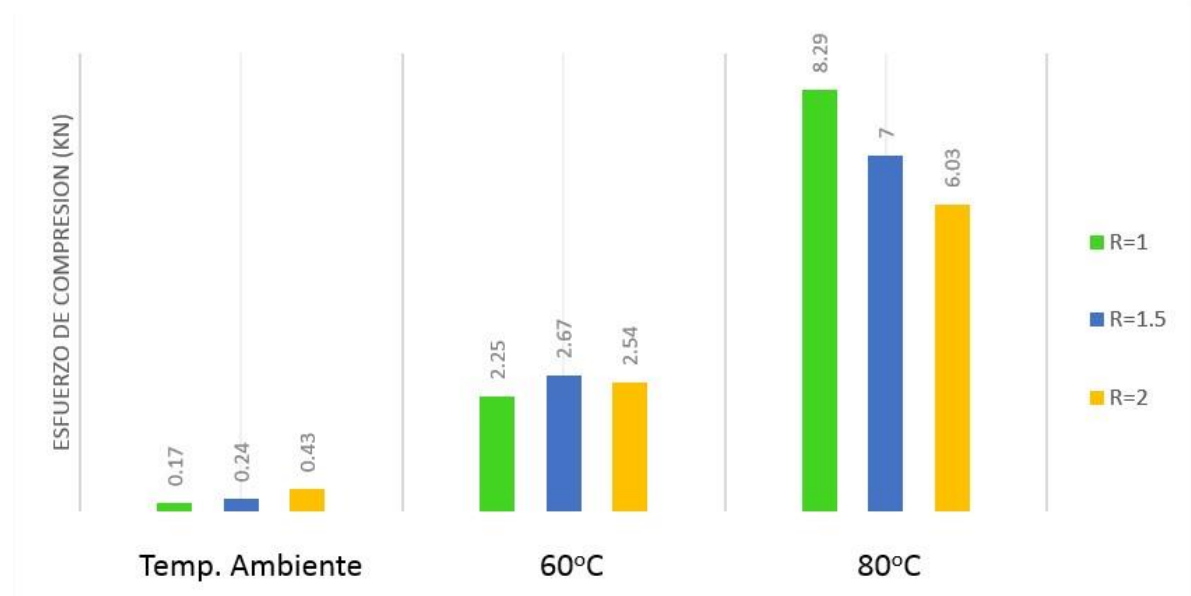
El ensayo de resistencia a compresión se realizó a los 7 días de edad, los resultados se muestran en la siguiente tabla

Tabla 10. Resistencia a la compresión (kN)

Temperatura Relación	Temperatura ambiente	60°C	80°C
1	0.17	2.25	8.24
1.5	0.24	2.67	7.01
2	0.43	2.54	6.03

Fuente: propia

Gráfica 1. Resistencia a la compresión (kN)



Fuente: propia

En los resultados se observa que a una temperatura ambiente de curado, las probetas no ofrecen resistencia a la compresión. Por otro lado, los cubos que estuvieron a temperatura a 80°C por un periodo de 24 horas, ofrecen valores de resistencia a la compresión superior a los cubos que estuvieron a 60°C por el mismo periodo de tiempo. Se evidencia también, que los cubos que se elaboraron con una cantidad mayor de toba, es decir relación arena/material cementante =1,

ofrecen valores de resistencia a la compresión superiores. Es por esto, que los cubos que se hicieron en los siguientes ensayos de la investigación utilizaron una **relación arena/material cementante = 1 y una temperatura de curado de 80°C por un periodo de 24 horas.**

9.2.3 Pruebas con agentes alcalinos

Según los resultados obtenidos en el ensayo sobre el comportamiento de la toba con los agentes alcalinos, se tomaron las siguientes concentraciones y relaciones de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$:

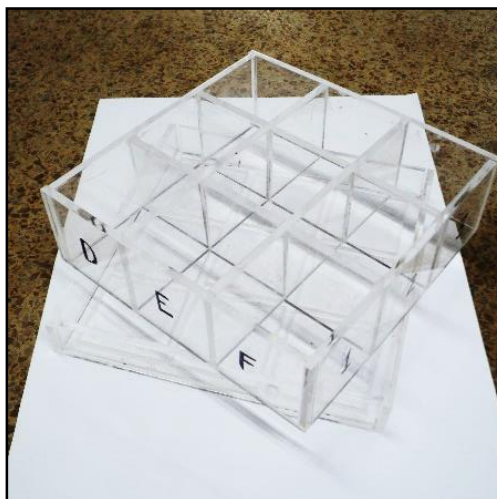
Tabla 11 Matriz para la selección del agente alcalino

		1 M	2 M	3 M
NaOH				
Na_2SiO_3 /NaOH	0.5			
Na_2SiO_3 /NaOH	1			

Fuente: Propia

Se elaboraron cubos de mortero de 5x5x5cm para cada una de estas relaciones y concentraciones, posteriormente se ensayaron a compresión a los 7, 14 y 28 días de edad. Para la elaboración de los cubos de mortero se utilizaron moldes de acrílico.

Figura 9 Molde de acrílico



Fuente: Propia

Figura 10 Elaboración de cubos de mortero en molde de acrílico



Fuente: Propia

Durante el desmolde de los cubos con concentración 1 M, se evidencio que la concentración no era suficiente para que se desarrollara el proceso de geopolimerización, por lo cual, la mezcla de mortero se deshizo como se muestra en la figura 10. Por esta razón las mezclas con molaridad 1 se descartan para los ensayos posteriores y es reemplazado por la concentración de 4 M.

Figura 11 Cubos de mortero 1 M



Fuente: Propia

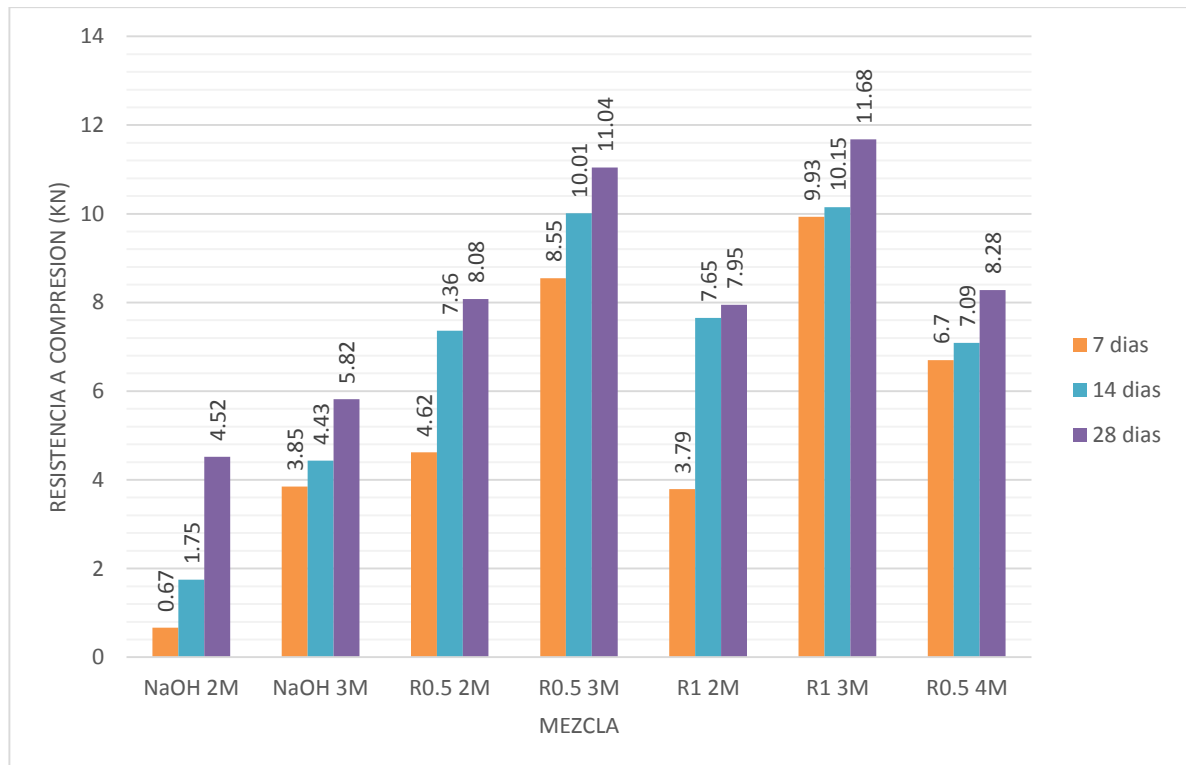
Los resultados de la prueba de resistencia a compresión se muestran a continuación.

Tabla 12 Resistencia a compresión (kN)

		Edad	2 M	3 M	4 M
NaOH		7 días	0.67	3.85	-
		14 días	1.75	4.43	-
		28 días	4.52	5.82	-
Na₂SiO₃ NaOH	0.5	7 días	4.62	8.55	6.7
		14 días	7.36	10.01	7.09
		28 días	8.08	11.04	8.28
Na₂SiO₃ NaOH	1	7 días	3.79	9.93	-
		14 días	7.65	10.15	-
		28 días	7.95	11.68	-

Fuente: propia

Gráfica 2 Resistencia a compresión (kN)



Fuente: Propia

Como se observa en la gráfica 2 los agentes alcalinos compuestos de hidróxido de sodio y silicato de sodio son más efectivos que los compuestos de solo hidróxido de sodio. La molaridad que mejor se desempeña es 3M, donde se obtienen valores cercanos a los 10 kN a los 7 días de edad.

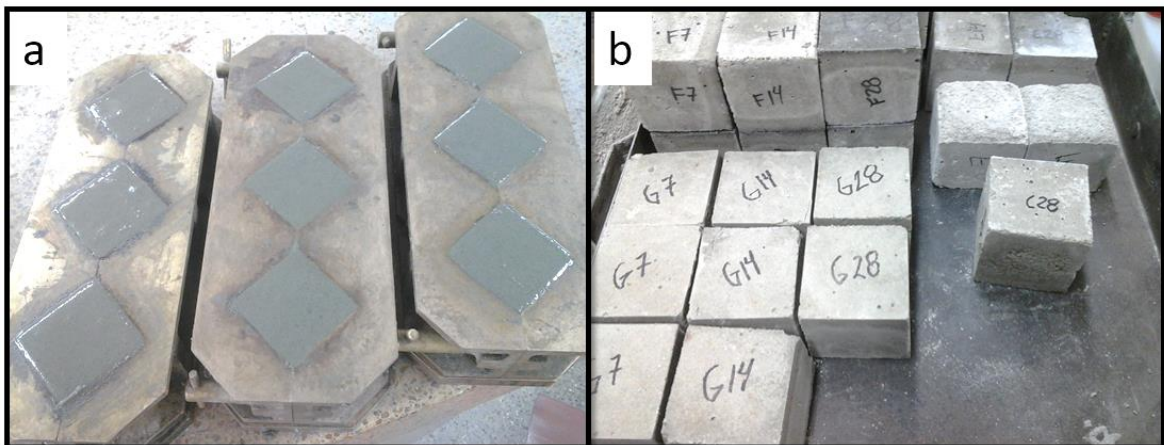
9.3 COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DURABLE

Para el desarrollo de esta etapa de la investigación, se seleccionó el agente alcalino $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH} = 1$ con una concentración 3M, según los resultados obtenidos en la gráfica 2. Su curado fue a una temperatura de 80°C por un periodo de 24 horas. Como material de control se utilizó cemento Portland marca Argos (cemento gris de uso general) para realizar cubos según la norma I.N.V.E 323. Para la elaboración de los cubos de mortero se utilizaron moldes convencionales.

9.3.1 Resistencia a compresión

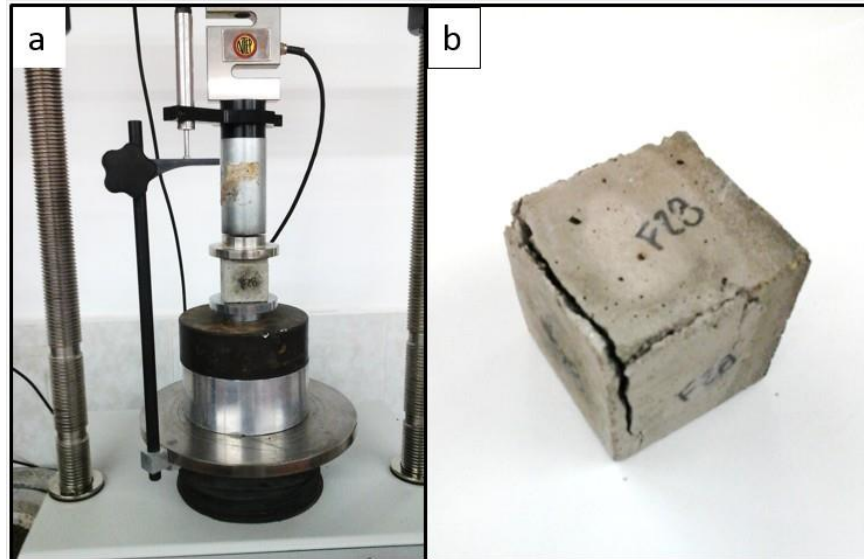
Se elaboraron cubos de mortero con el geopolímero y con cemento Portland para ser fallados a la edad de 7, 14 y 28 días, 3 muestras por cada uno de los días, para un total de 9 cubos por cada material utilizado.

Figura 12 Cubos de mortero. a) Elaboración de los cubos b) cubos de mortero



Fuente: Propia

Figura 13 a) ensayo de resistencia a la compresión. b) grieta de falla del cubo elaborado con el geopolímero



Fuente: propia

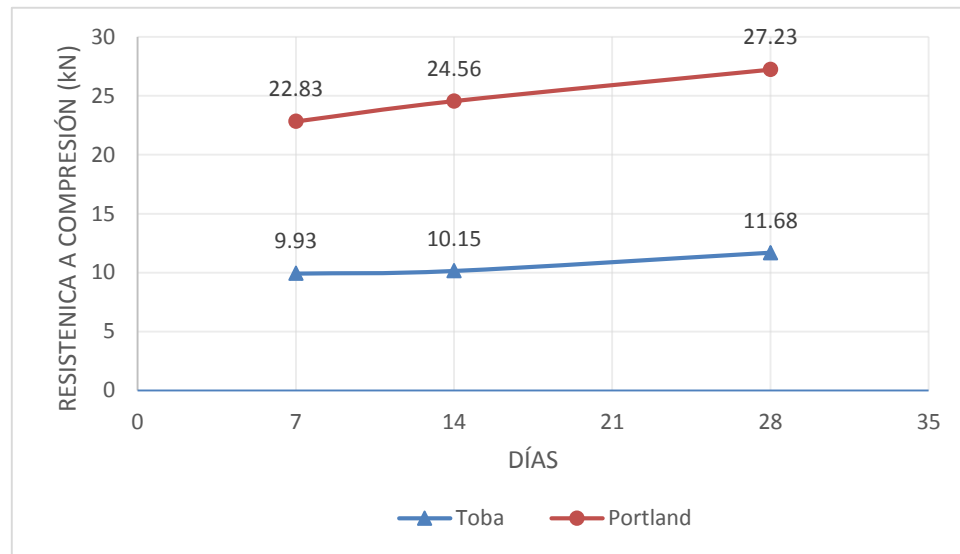
Los resultados de esta prueba se muestran a continuación:

Tabla 13 Resistencia a la compresión de cubos de mortero

		Edad	Resistencia (kN)
Cemento Portland		7 días	22.83
		14 días	24.56
		28 días	27.23
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1$	3 Mol	7 días	10.11
		14 días	10.45
		28 días	11.89

Fuente: propia

Gráfica 3 Resistencia a la compresión: geopolímero vs cemento Portland



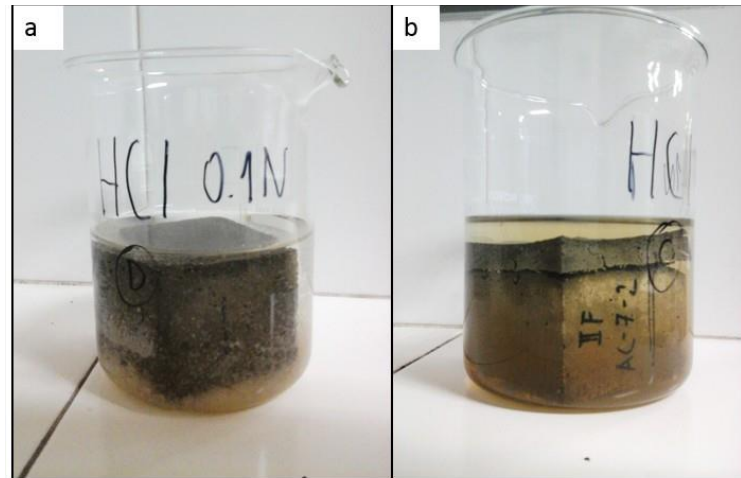
Fuente: propia

Como se observa en la gráfica 3, la resistencia de los cubos elaborados con el geopolímero es inferior a la resistencia que ofrecen los cubos elaborados con cemento Portland tradicional. También se evidencia la diferencia en la tasa de crecimiento de la resistencia en los días de ensayo, para el cemento portland la curva de resistencia tiene una pendiente más alta que la curva del geopolímero. Esta evolución de la resistencia de los cubos elaborados con el geopolímero, es típica en estos materiales, donde en los primeros días desarrollan altas resistencias y aumentan lentamente con el paso del tiempo.

9.3.2 Comportamientos en medios agresivos

Para esta prueba se elaboraron cubos de mortero con el geopolímero y con cemento Portland como material de control. Después de ser desmoldados se colocaron en una solución de ácido clorhídrico HCl, con una concentración de 0.1N, se tomó su peso antes de ser colocados en la solución. Se sacaron de la solución de ácido clorhídrico un día antes del aprueba de resistencia, para permanecer en horno a una temperatura de 80°C por un periodo de 24 horas para ser secados y tomar su peso, con el fin de determinar pérdida de masa. Los cubos fueron fallados a los 7, 14 y 28 días de edad.

Figura 14 Cubos de mortero en solución HCl a) Cemento Portland b) Geopolímero



Fuente: propia

Después de ser colocados los cubos de mortero en la solución de HCl se evidencio la presencia de una grieta horizontal en la parte superior de los cubos de mortero elaborados con el geopolímero. Esta grieta se debe al cambio de fase de los agentes alcalinos que ocurre en el proceso de curado, en la Figura 14 se aprecia este fenómeno.

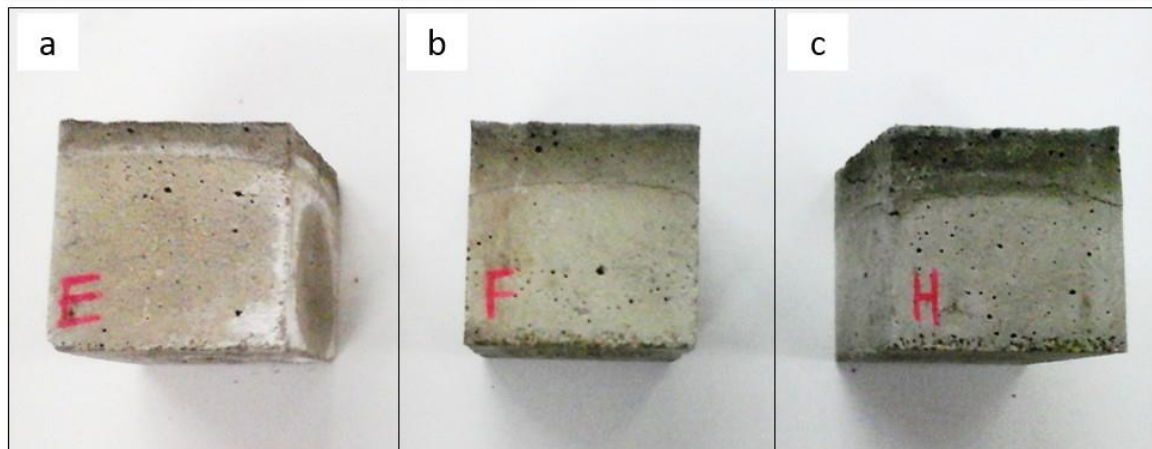
Figura 15 Cambio de fase en el cubo de mortero elaborado con el geopolímero



Fuente: Propia

El cambio de fase que se presenta en el curado de los cubos elaborados con el geopolímero, es un fenómeno donde el silicato de sodio y el hidróxido de sodio, como componentes de la mezcla alcalina se separan, creando una franja oscura en la parte superior de los cubos. El ancho de esta franja está relacionada con la molaridad de la solución alcalina. En la figura 15 se evidencia que a mayor molaridad la franja oscura es mayor y presenta una grieta mucho más notoria.

Figura 16 Fase presentada en el curado. a) R1 2M b) R1 3M c) R0.5 4M



Fuente: Propia

Los resultados de pérdida de masa de los especímenes se muestran a continuación:

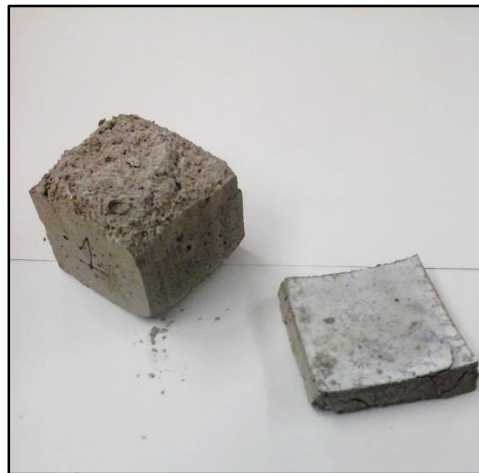
Tabla 14 Pérdida de masa de los especímenes en solución de HCl 0.1N

	días	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de pérdida de masa
Cemento portland	7	260.65	246.9	5.28
	14	261.74	243.3	7.05
	28	259.74	240.7	7.33
Toba	7	212.89	159.7	24.98
	14	213.36	161.6	24.25
	28	213.84	160.5	24.94

Fuente: Propia

Se evidencia que los cubos elaborados con el geopolímero tiene una porcentaje de pérdida de masa mucho mayor que los cubos elaborados con el cemento Portland, como anteriormente se explicó, estos cubos presentaron una grieta al ser sumergidos en la solución de ácido clorhídrico, y posteriormente al ser sacados de la solución, las dos secciones que se formaron por la grieta se separaron como se muestra en la Figura 15, razón por la cual el porcentaje de pérdida de masa de los cubos elaborados con el geopolímero es alto.

Figura 17 Pérdida de masa en el cubo elaborado con el geopolímero.



Fuente: propia

Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión se muestran a continuación:

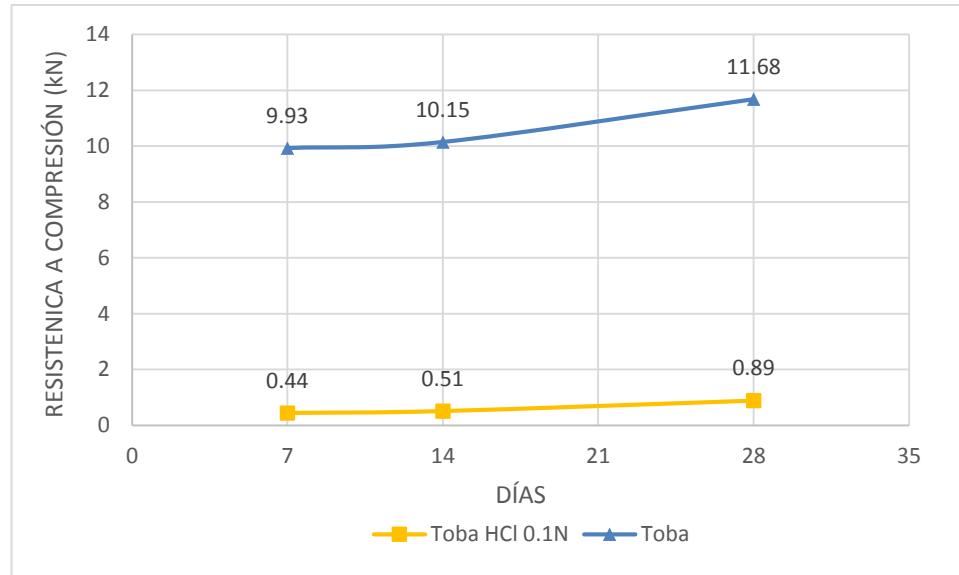
Tabla 15 Resistencia a la compresión de cubos expuestos a HCL 0.1N

		Edad	Resistencia (kN)
Cemento Portland		7 días	20.5
		14 días	22.02
		28 días	23.49
$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1$	3 Mol	7 días	0.44
		14 días	0.51
		28 días	0.89

Fuente: Propia

En las siguientes gráficas se muestran los resultados de la prueba de resistencia a los que fueron sometidos los cubos expuestos a la solución de ácido clorhídrico HCl 0.1N y los que no estuvieron expuestos a estas condiciones, con el fin de analizar su comportamiento mecánico en ambos escenarios.

Gráfica 4 Resistencia a la compresión de los cubos elaborados con el geopolímero



Fuente: propia

En la Gráfica 4 se evidencia una caída en la resistencia a la compresión de los cubos elaborados con el geopolímeros que estuvieron sometidos a la solución acida, respecto a los que no. Se puede atribuir este bajo desempeño de los especímenes a su pérdida de masa, la cual dejó una cara irregular expuesta, lugar en donde falló el cubo durante el ensayo de resistencia.

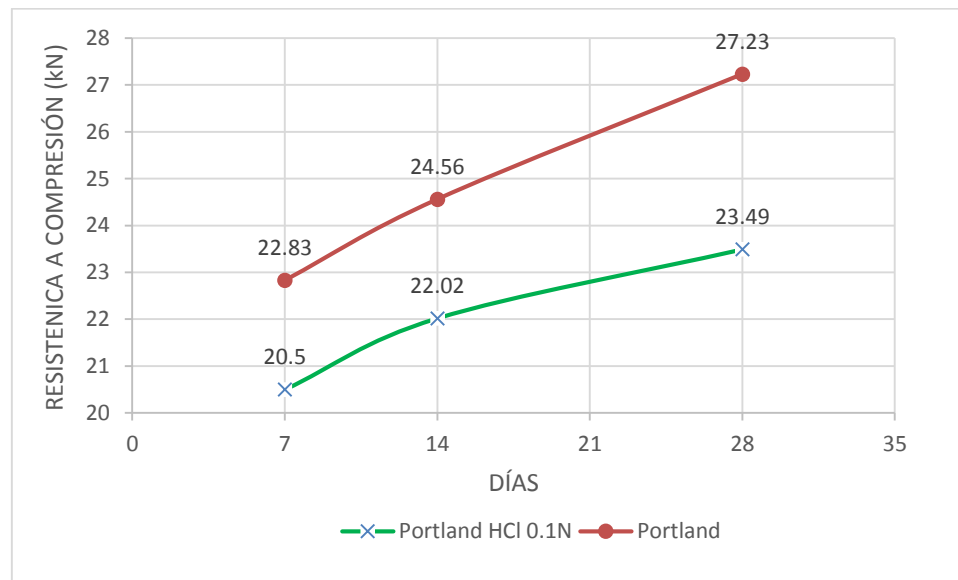
Figura 18 Cara irregular del cubo de mortero



Fuente: Propia

En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión a los cubos elaborados con cemento Portland tradicional que fueron sometidos a la solución de ácido clorhídrico HCl 0.1N.

Gráfica 5 Resistencia a la compresión de los cubos elaborados con cemento Portland



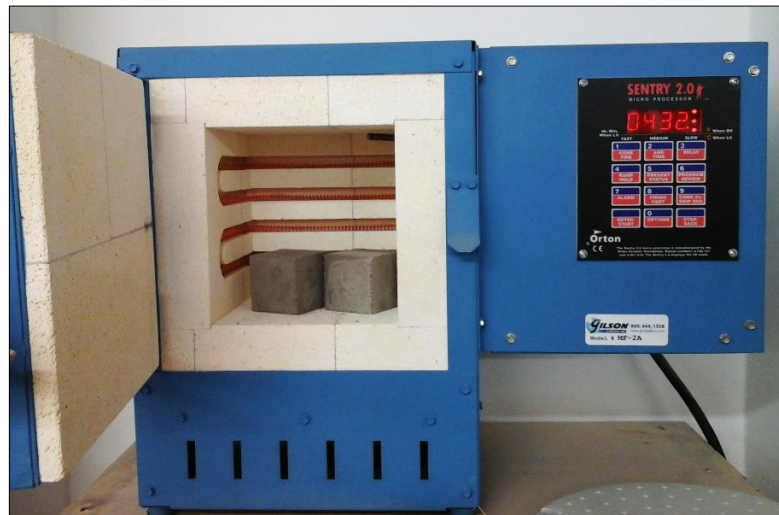
Fuente: propia

La gráfica anterior evidencia una disminución en la resistencias para los cubos de mortero elaborado con cemento Portland expuestas a la solución acida, en contraste con las resistencias obtenidas en el medio de referencia.

9.3.3 Comportamiento frente a altas temperaturas

Para estudiar la durabilidad de los cubos de mortero en ambientes de altas temperaturas, se realizaron cubos de mortero con el geopolímero y con cemento Portland como material de control. Los cubos fueron fallados los 7, 14 y 28 días de edad, previamente a este ensayo, los cubos fueron pesados para determinar su masa y estuvieron en horno a una temperatura de 450°C, por un periodo de 1 hora, inmediatamente se cumplió este tiempo fueron pesados nuevamente, para determinar si había pérdida de masa y luego pasaron a ser fallados mecánicamente.

Figura 19 Mufla para ensayo a altas temperaturas



Fuente: propia

Los resultados de pérdida de masa de los cubos sometidos a altas temperaturas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 16 pérdida de masa de los cubos expuestos a altas temperaturas

	Días	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	% de pérdida de masa
Cemento portland	7	260.2	241.4	7.23
	14	258.7	239.8	7.31
	28	252.3	230.1	8.80
Toba	7	186.8	172.6	5.28
	14	191.8	177.1	7.05
	28	188.9	175.6	7.33

Fuente: propia

Se evidencia que la pérdida de masa de los cubos elaborados con el geopolímero es bastante similar a los registrados para los cubos elaborados con cemento Portland. Los 450°C de temperatura no lograron afectar de forma significativa la estructura física de los cubos de mortero.

Los resultados de la prueba de resistencia a la compresión se muestran a continuación:

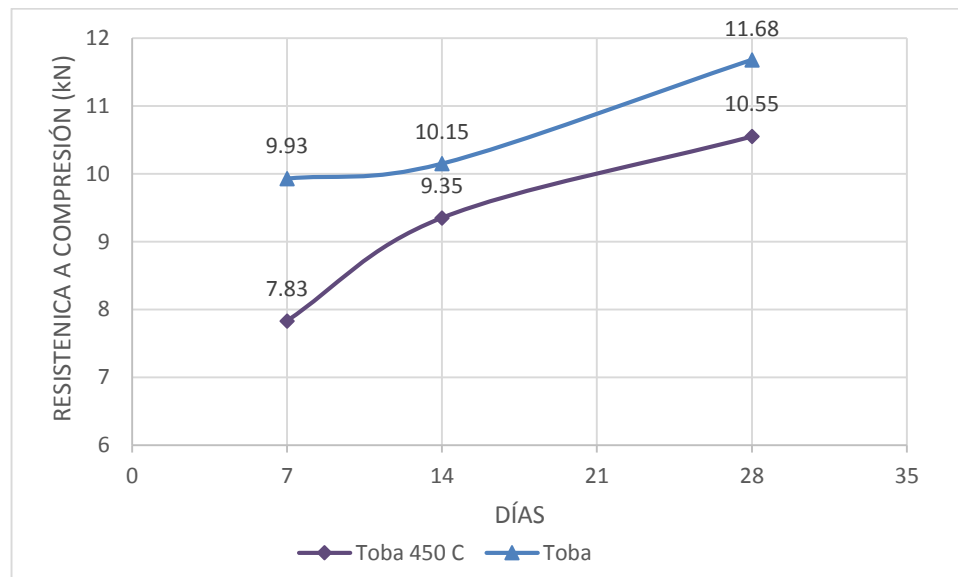
Tabla 17 Resistencia a la compresión (kN) a altas temperaturas

		Edad	Resistencia (kN)
Cemento Portland		7 días	19.18
		14 días	21.14
		28 días	25.12
$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 1$ NaOH	3 Mol	7 días	7.83
		14 días	9.35
		28 días	10.55

Fuente: propia

En las siguientes graficas se muestran los resultados de la prueba de resistencia a los que fueron sometidos los cubos expuestos a 450°C y los que no estuvieron expuestos a estas condiciones, con el fin de analizar su comportamiento mecánico en ambos escenarios.

Gráfica 6 Resistencia a la compresión del geopolímero expuesto a altas temperaturas

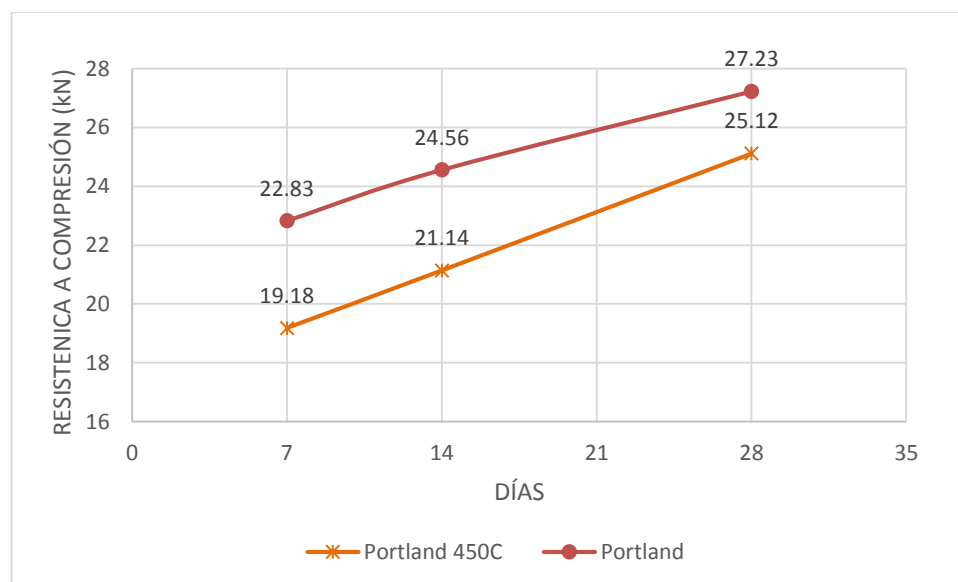


Fuente: propia

La grafica anterior nos muestra una caída de la resistencia de los cubos que estuvieron expuestos a 450°C respecto a los que no, está perdida de resistencia es de aproximadamente un 10% y no se encuentra evidencia que esté asociada a la pérdida de masa que sufrieron durante este ensayo.

En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a la compresión a los cubos elaborados con cemento Portland tradicional que fueron sometidos a altas temperaturas.

Gráfica 7 Resistencia a la compresión de cemento Portland sometido a altas temperaturas



Fuente: propia

El desempeño mecánico de los cubos de mortero elaborados con cemento Portland se ve afectado por las altas temperaturas, como lo evidencia la anterior gráfica, durante la observación visual de los cubos de morteros, no se evidencia fisuras o fracturamientos, por lo cual la disminución de la resistencia se atribuye a procesos internos, como pérdida de humedad relativa.

10. CONCLUSIONES

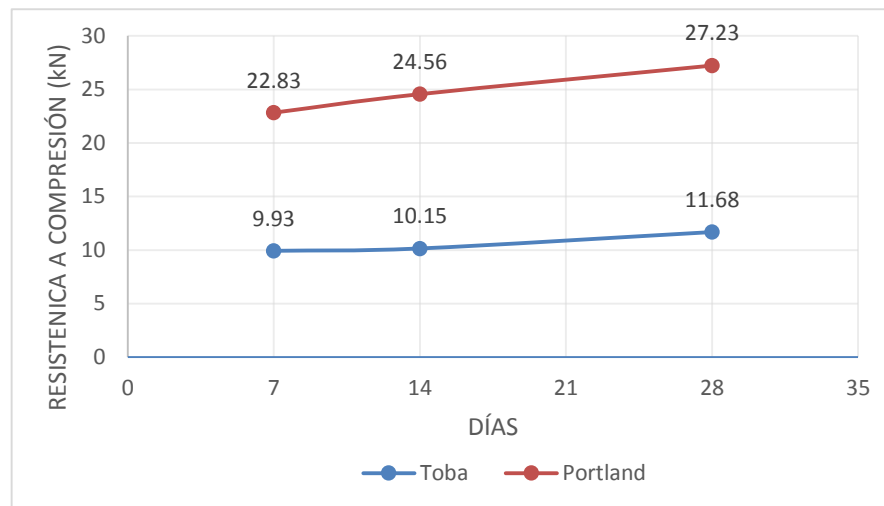
En la prueba preliminar de geopolimerización se evidenció que a medida que aumentaban las relaciones $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ el material estudiado no secaba con el paso del tiempo, por el contrario las relaciones bajas de la mezcla alcalina, secaron y desarrollaron dureza en el material. Adicionalmente se observó que las mezclas que tienen mayor cantidad de silicatos de sodio, necesitan mayor cantidad de activante para lograr un buen material, llegando a una relación activante/toba = 0.65

Durante la prueba de curado y relación arena/material cementante, se estableció la temperatura de curado, en la cual el material desarrollaba resistencia a la compresión. Los resultados de esta prueba indican que a una temperatura de 80°C el material desarrollaba una resistencia superior a 6 kN. En el estudio de la relación arena/material cementante se observó que a mayor cantidad de toba, los cubos de mortero desarrollaban mayor resistencia, para relación = 1.

Durante el estudio del material con diferentes concentraciones y relaciones del agente alcalino, se observó que la mezcla de NaOH desarrollaba resistencias inferiores a 6 kN a los 28 días de edad. Por el contrario las mezclas que contenían silicato de sodio desarrollaron resistencias superiores. La concentración del agente alcalino dio como resultado que las mezclas de 3M ofrecían las resistencias más altas; las concentraciones de 2M y 4M eran similares pero inferiores a las de 3M.

La resistencia a la compresión que desarrollaron los cubos de mortero elaborados con el geopolímero es inferior en un 50%, aproximadamente, a la que ofrecen los cubos de mortero elaborados con cemento Portland. También se evidencia que la tasa de crecimiento de resistencia de los cubos elaborados con cemento Portland tiene una pendiente mayor a la curva registrada por los cubos elaborados con el geopolímero. Esta evolución de la resistencia de los cubos elaborados con el geopolímero es típica en estos materiales, donde en los primeros días desarrollan altas resistencias y aumentan lentamente con el paso del tiempo. En la siguiente grafica se muestran la evolución de la resistencia de los materiales estudiados.

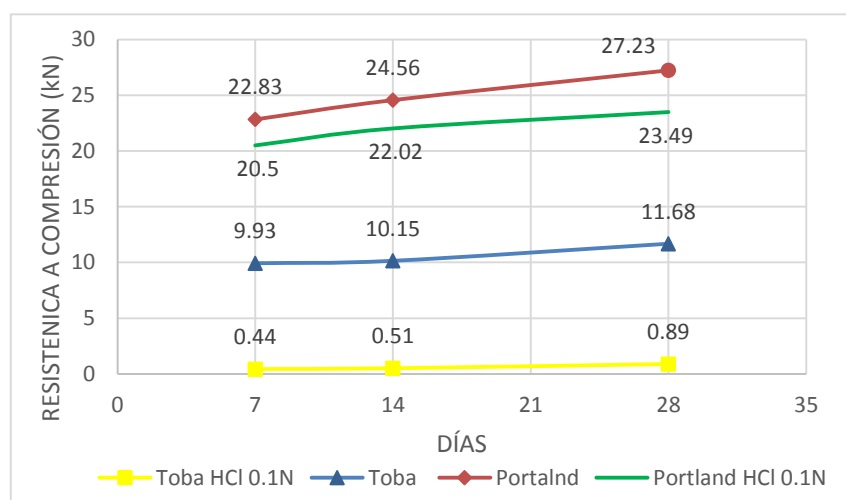
Gráfica 8 Resistencia a la compresión de la toba y el cemento Portland



Fuente: propia

En la prueba de resistencias a medios agresivos, donde se usó ácido clorhídrico HCl 0.1N, se notó el cambio de fase en los componentes de la mezcla del agente alcalino. Este fenómeno creó una grieta horizontal en los cubos de mortero, la cual fue responsable de una pérdida del 25% de su masa total. Como consecuencia, la resistencia a la compresión de los cubos disminuyó dramáticamente, reduciendo los valores de resistencia en un 92%. Los resultados obtenidos en las pruebas con los cubos de mortero elaborados con cemento Portland, la pérdida de masa fue de 7% aproximadamente, y los valores de la resistencia a la compresión disminuyeron en un 13.7%. En la siguiente gráfica se relacionan estos valores.

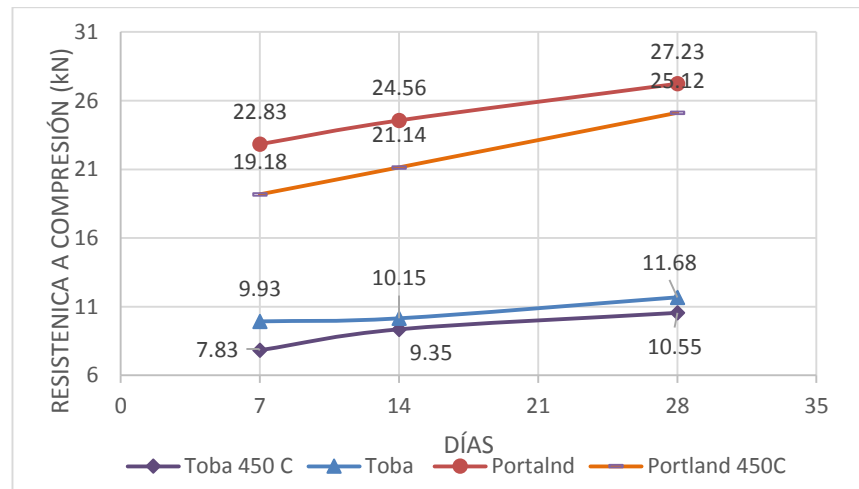
Gráfica 9 Comportamiento en medios agresivos



Fuente: propia

En la prueba de altas temperaturas, donde se evaluó la resistencia de los cubos de mortero después de ser sometidos a 450°C durante una hora se evidenció que la pérdida de masa es similar para los cubos elaborados con el geopolímero como para los cubos elaborados con cemento Portland, el cual es de en promedio 7%, respecto a su masa total. Esta temperatura no logra afectar de forma significativa la estructura física de los cubos de mortero. La resistencia a la compresión disminuyó un 10% en los cubos elaborados con el geopolímeros expuestos a altas temperaturas respecto a los que no; durante la inspección visual de los cubos, no se evidencia fisuras o fracturamientos. En la siguiente gráfica se relación los resultados obtenidos para los cubos elaborados con el geopolímero y con cemento Portland.

Gráfica 10 Comportamiento frente a altas temperaturas



Fuente: propia

11.RECOMENDACIONES

La finura está relacionada con la calidad y el proceso de geopolimerización, se recomienda utilizar materiales con una finura similar a la que ofrece el cemento Portland tradicional, la cual es de alrededor de 2800 Blaine (cm^2/gr).

Para optimizar la resistencia a la compresión en los cubos de mortero se recomienda utilizar la mezcla del agente alcalino inmediatamente sea elaborada, esto con el fin de evitar cambios de fase en la solución y posteriormente en los cubos de mortero.

12. BIBLIOGRAFÍA

Allahverdi, A., & Skvara, F. (2005). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements - Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations. *Ceramics Silikaty*, 49225-229.

Ana, F., & Ángel, P. (2009). Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos / Properties and uses of alkali cements. *Revista Ingeniería De Construcción*, (3), 213. doi:10.4067/S0718-50732009000300001

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Review: Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal Of Cleaner Production*, 51142-161. doi:10.1016/j.jclepro.2012.10.049

Deventer, J. (1999). The effect of metal contaminants on the formation and properties of waste-based geopolymers. doi:10.1016/S0008-8846(99)00032-0

Donatello, S., Kuenzel, C., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2014). High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste. *Cement And Concrete Composites*, 45234-242. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.010

Donatello, S., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2013). Durability of very high volume fly ash cement pastes and mortars in aggressive solutions. *Cement And Concrete Composites*, 3812-20. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.03.001

Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Deventer, J. J. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal Of Materials Science*, (9), 2917.

Escalante-García, J. I., Méndez-Nonell, J., Gorokhovskiy, A., Fraire-Luna, P. E., Mancha-Molinar, H., & Mendoza-Suárez, G. (2002). Reactividad y propiedades mecánicas de escoria de alto horno activada por álcalis. *Boletín De La Sociedad Española De Cerámica Y Vidrio*, (5), 451.

Fernández-Jiménez, A., Criado, M., & Palomo Sánchez, Á. (2006). Activación alcalina de cenizas volantes : estudio comparativo entre activadores sódicos y potásicos. 2006.

Fernandez-Jimenez, A., Pastor, J. Y., Martin, A., & Palomo, A. (2010). High-Temperature Resistance in Alkali-Activated Cement. *Journal Of The American Ceramic Society*, (10), 3411. doi:10.1111/j.1551-2916.2010.03887.x

Fernandez-Jimenez, A., Vazquez, T., & Palomo, A. (2011). Effect of Sodium Silicate on Calcium Aluminate Cement Hydration in Highly Alkaline Media: A Microstructural Characterization. *Journal Of The American Ceramic Society*, (4), 1297. doi:10.1111/j.1551-2916.2010.04242.x

Garcia-Lodeiro, I., Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. (2013). Variation in hybrid cements over time. Alkaline activation of fly ash-portland cement blends. *Cement And Concrete Research*, 112. doi:10.1016/j.cemconres.2013.03.022

Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Macphee, D. (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement And Concrete Research*, 41923-931. doi:10.1016/j.cemconres.2011.05.006

Granizo, N., Palomo, A., & Fernandez-Jimenez, A. (2014). Effect of temperature and alkaline concentration on metakaolin leaching kinetics. *Ceramics International*, (7), 8975. doi:10.1016/j.ceramint.2014.02.071

Johanna M, M., Erich D, R., & Ruby, M. G. (2014). Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros / Potential Utilization of a Low Quality-Fly Ash as an Aluminosilicate Source in the Production of Geopolymers. *Ingeniería Y Universidad*, (2), 309. doi:10.11144/Javeriana.IYU18-2.upcv

Krivenko, P. V., & Kovalchuk, G. Y. (2007). Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix. *Journal Of Materials Science*, (9), 2944.

Krivenko, P., & Kovalchuk, G. (2015). Achieving a heat resistance of cellular concrete based on alkali activated fly ash cements. *Materials And Structures*, (3), 599.

L., E., & I., E. (2008). Comparación de las propiedades del concreto utilizando escoria de alto horno como reemplazo parcial y total del cemento Pórtland ordinario. *Nexo*, (01), 11.

Martínez López, C. (2015). Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland.

Palomo Sánchez, Á., Criado, M., & Fernández-Jiménez, A. (2004). "Geopolimeros" : una única base química y diferentes microestructuras. 2004.

Ruiz-Santaquiteria, C., Skibsted, J., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of

aluminosilicates. Cement And Concrete Research, 421242-1251.
doi:10.1016/j.cemconres.2012.05.019

Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. Cement And Concrete Research, 41(Special Issue: 13th International Congress on the Chemistry of Cement), 750-763. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.016

Turanli, L., Uzal, B., & Bektas, F. (2004). Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. Cement And Concrete Research, 342277-2282. doi:10.1016/j.cemconres.2004.04.011

Xu, H., & Van Deventer, J. S. (2002). Geopolymerisation of multiple minerals. Minerals Engineering, 151131-1139. doi:10.1016/S0892-6875(02)00255-8

Xu, H., & Van Deventer, J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International Journal Of Mineral Processing, 59247-266. doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5