

DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN
GEOPOLÍMERO OBTENIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE LADRILLO DE
ARCILLA

CATHERINE ALEXANDRA BONILLA CHIRIVÍ
DIANA CAROLINA GONZÁLEZ VÁSQUEZ
ANYUL YINNETH LÓPEZ CAMACHO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017

DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN
GEOPOLÍMERO OBTENIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE LADRILLO DE
ARCILLA

CATHERINE ALEXANDRA BONILLA CHIRIVI
DIANA CAROLINA GONZÁLEZ VÁSQUEZ
ANYUL YINNETH LÓPEZ CAMACHO

Trabajo de grado como opción de grado para optar al título de: INGENIERO CIVIL

ASESOR DISCIPLINAR
MgCs. ANDRÉS MAURICIO LOTERO CAICEDO
ASESOR METODOLÓGICO
Lic. LAURA MILENA CALA CRISTANCHO

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2017

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por habernos permitido llevar a cabo el término de este gran logro.

A nuestros padres por su amor, consejos y apoyo en todas las decisiones a lo largo de nuestras vidas.

A nuestro asesor disciplinar Andrés Mauricio Lotero, quien con su conocimiento y apoyo nos direcciono en el desarrollo de esta investigación.

A nuestra asesora metodológica Laura Milena Cala, por su invaluable apoyo académico, tiempo y confianza para la realización de la tesis.

A todos aquellos y en general a todas las personas que influyeron en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	11
2. ANTECEDENTES	13
3. JUSTIFICACIÓN	15
4. OBJETIVOS	16
4.1 OBJETIVO GENERAL	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5. MARCO DE REFERENCIA	17
5.1 MARCO CONCEPTUAL	17
5.1.1 Geopolímeros.	17
5.1.2 Estructura de los geopolímeros.	17
5.1.3 Precursor (residuos de ladrillos de arcilla).	20
5.1.4 Agentes activadores (NaOH y Na ₂ SiO ₃).	21
5.1.5 Contenido de agua	22
5.1.6 Mecanismo de reacción	22
5.1.7 Propiedades generales de los geopolímeros.	23
5.2 MARCO LEGAL	24
Fuente: Archivo propio	24
5.2.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos INV E – 123 – 13.	24
5.2.2 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV E – 128 – 13.	25
5.2.3 Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado NTC – 220- 98.	25
5.2.4 Fluorescencia de rayos x (FRX)	25
5.2.5 Difracción de rayos x (DRX).	26
6. DISEÑO METODOLÓGICO	27
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	27
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	27
6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	27

6.4	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	28
6.4.1	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos INV E – 123 – 13.	28
6.4.2	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV E – 128 – 13.	29
6.4.3	Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado NTC – 220- 98.	31
6.5	FASES DE INVESTIGACIÓN	32
7.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	35
7.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICAMENTE LOS RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA.	35
7.1.1	Preparación del material de residuo de ladrillo de arcilla.	35
7.1.2	Ensayo de gravedad específica de sólidos de los residuos de ladrillo de arcilla.	37
7.1.3	Ensayo de granulometría por hidrómetro de los residuos de ladrillo de arcilla para conocer el tamaño de las partículas.	39
7.1.4	Ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX)	42
7.1.5	Ensayo de Difracción de rayos X (DRX)	43
7.2	SINTETIZACIÓN DEL MATERIAL GEOPOLIMÉRICO.	44
7.2.1	Matriz de dosificación	44
7.2.2	Síntesis de Geopolímero	48
7.3	DETERMINACIÓN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO.	52
7.3.1	Comportamiento resistencia a la compresión en función del tiempo de curado	55
7.3.2	Comportamiento resistencia a la compresión en función del Módulo de Silicato (Ms)	57
7.3.3	Comportamiento resistencia a la compresión en función de la concentración de Na ₂ O	58
7.3.4	Comportamiento resistencia a la compresión en función a la relación molar (SiO ₂ /Al ₂ O ₃)	60
7.3.5	Análisis relación A/P	62
7.3.6	Análisis efecto de carbonatación	63
7.3.7	Geopolímero óptimo en función a la resistencia a la compresión.	64

8. CONCLUSIONES	65
9. RECOMENDACIONES	66

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Ensayos de caracterización de material	24
Tabla 2. Definición y operacionalización de las variables	28
Tabla 3. Variaciones permisibles de los moldes de los especímenes	32
Tabla 4. Matriz de ensayos	33
Tabla 5. Datos ensayo INV-E 128	37
Tabla 6. Resultados Gravedad específica	38
Tabla 7. Ensayo hidrometría	39
Tabla 8. Resultados ensayo hidrometría 1	40
Tabla 9. Resultados ensayo hidrometría 2	40
Tabla 10. Resultados ensayo hidrometría 3	40
Tabla 11. Composición química del RLA	42
Tabla 12. Constitución RLA	43
Tabla 13. Matriz dosificación geopolímero	47
Tabla 14. Datos fallas a los 3 días del geopolímero	52
Tabla 15. Datos fallas a los 7 días del geopolímero	53
Tabla 16. Datos fallas a los 28 días del geopolímero	53
Tabla 17. Resumen de resistencias a la compresión del geopolímero activado alcalinamente (NaOH + Na ₂ SiO ₃)	54

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Representaciones de polisialatos.....	18
Figura 2. Modelo conceptual de la geopolímerización	19
Figura 3. Estructura de la caolinita presente en el caolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)	21
Figura 4. Formato UGC-LS-009	30
Figura 5. Fases de Investigación.....	34
Figura 6. Recolección de material	35
Figura 7. Lavado y secado de material	36
Figura 8. Máquina de los ángeles	36
Figura 9. Muestra en 0,075 mm	37
Figura 10. Ensayo de gravedad específica	38
Figura 11. Ensayo de granulometría por hidrómetro	39
Figura 12. Curva granulométrica de RLA	41
Figura 13. Difractograma de rayos X de RLA.....	44
Figura 14. Esfuerzo RLA inicial	45
Figura 15. Cantidad de Material	49
Figura 16. Mezcla de activadores alcalinos.....	49
Figura 17. Mezcla Geopolímero	50
Figura 18. Moldes para las probetas.....	51
Figura 19. Llenado de probetas.....	51
Figura 20. Gráfico resistencia a la compresión del geopolímero activado alcalinamente ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$).....	54
Figura 21. Gráficas de resistencia a la compresión en función del Módulo de Silicato (Ms)	55
Figura 22. Geopolímero a 3, 7 y 28 días de curado respectivamente	57
Figura 23. Gráficas de resistencia a la compresión para los diferentes módulos de silicato (Ms) de cada concentración de Na_2O	58
Figura 24. Gráficas de resistencia a la compresión en función de la concentración de Na_2O	59
Figura 25. Gráficas de Concentración Na_2O respecto a la relación molar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) y la resistencia a la compresión para tiempos de curado (3, 7 y 28 días)	61
Figura 26. Relación A/P	62
Figura 27. Porosidad en las probetas de geopolímero.....	63
Figura 28. Esquema proceso de carbonatación	63
Figura 29. Proceso de carbonatación en probetas de geopolímero	64

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el sector constructivo es uno de los principales responsables del cambio climático. El 40% de las materias primas en el mundo (3000 millones de toneladas por año), el 17% del agua potable y el 10% de la tierra son destinadas para la construcción; además, el 20% de la energía es consumida durante el proceso de construcción, elaboración de materiales y demolición de las obras; en cuanto a la generación de gases efecto invernadero, según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para el año de 2004 alcanzo 8.6 billones de toneladas métricas, cifra que podría alcanzar los 15.6 billones de toneladas métricas para el 2030 (en el caso que se continúe construyendo de manera actual), adicionalmente el 30% de residuos sólidos se atribuyen a este sector.¹

Es así como, problemas ambientales presentes en materiales tradicionales representan un desafío en la industria de la construcción con la búsqueda de materiales viables ecológicamente que minimicen el impacto durante su ciclo de vida y reincorporen a ciclos productivos materiales al final de su vida útil. De acuerdo a lo anterior y dentro de este contexto, los geopolímeros representan una alternativa de construcción sostenible con el fin de disminuir el cambio climático, en cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, el consumo de recursos y la pérdida de biodiversidad.

Los geopolímeros son una clase de polímeros inorgánicos formados por la reacción entre una solución alcalina (hidróxido de sodio, silicato de sodio, hidróxido de potasio, entre otros) y una fuente de aluminosilicato (cenizas volátiles, escoria de alto horno, cerámicas, entre otros). Este material emergente demuestra ser una alternativa para materiales conglomerantes tradicionales como el cemento portland debido a sus excelentes propiedades ingenieriles. Los geopolímeros atraen la atención del sector de la construcción por sus propiedades: aglutinantes, aislantes tanto térmicas como acústicas, mecánicas y de durabilidad, los cuales proyectan un paso hacia la construcción sostenible otorgando a este sector múltiples aplicaciones como: rehabilitación de infraestructura, mejoramiento de suelo, producción de prefabricados en hormigón y hormigón pretensado, producción de baldosas, ladrillos de cerámica y tejas, entre otras.

¹ ACEVEDO AGUDELO, Harlem et al. Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [En línea]. 2012. Vol. 15. [Citado en 01 agosto de 2017]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/xb4NyR>>.

Existen varios autores como Liew Yun-Ming et al² que se han centrado en el estudio de geopolímeros; ampliando el conocimiento sobre las propiedades y aplicaciones de este material; demostrando la viabilidad de su uso para la construcción por sus propiedades mecánicas de hasta 51,06 Mpa a 75°C de curado y 108,7 Mpa a 210°C de curado durante 30 h después de 7 días de pre-curado (25 ° C). Conviene, sin embargo enfocar la actual investigación en la evaluación del desarrollo de la resistencia a la compresión de geopolímeros construidos a partir de residuos de ladrillo de arcilla provenientes de la producción de una ladrillera de la ciudad de Bogotá; es pertinente identificar este comportamiento bajo diferentes dosificaciones de materia prima, activadores alcalinos y tiempo de curado a temperatura ambiente puesto que estas variables tienen efectos influyentes en la adquisición de resistencia en las etapas de reacción y curado.

² YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El cemento portland es columna vertebral en la industria de la construcción por sus propiedades de resistencia, durabilidad y versatilidad; siendo un material de producción a nivel mundial con proyección de crecimiento de 3% anual; según el reporte de actividades de CEMBUREAU se estima que la producción global de cemento alcanzo los 3,6 billones de toneladas para el año de 2012, de los cuales 180 millones de toneladas corresponde a América Latina y el Caribe posicionando a Colombia en el tercer lugar de este subgrupo con producción de 10,9 miles de toneladas para el mismo año.³ No obstante y pese a sus múltiples propiedades mecánicas, en la actualidad es prioridad global la búsqueda de materiales alternativos debido a efectos negativos de tipo ambiental que presenta su producción.

En la etapa de fabricación, la materia prima generalmente son minerales calcáreos, como la caliza, alúmina y sílice, tomadas de la arcilla; estos materiales hacen parte de recursos no renovables que se explotan diariamente como consecuencia del incremento de demanda, según Saeed Ahmari, et al.⁴, para producir una tonelada de cemento portland ordinario, se necesita alrededor de 1,5 toneladas de materias primas. Adicionalmente, la demanda de energía requerida en el proceso de producción es de 107 kWh por tonelada de cemento y libera grandes cantidades de CO₂, en cifras para una tonelada de cemento portland ordinario una tonelada de CO₂ se libera a la atmósfera.

Por otro lado, no menos importante y de consideración están los Residuos de la Construcción y Demolición (RCD), factor común e inevitable. Según Castaño Jesús O., et al.⁵ “en Bogotá, se producen cerca de 15 millones de ton/año de RCD, algo como 2000 kg.hab/año, una cifra alarmante, situándonos incluso por encima de grandes urbes en el mundo, convirtiéndose en un problema de impacto ambiental para la ciudad. Como si fuera poco cada vez es más difícil la búsqueda de zonas adecuadas como depósito final de estos residuos.

³ FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO. Informe Estadístico 2013. [En línea]. 2013. [Citado en 1 de agosto de 2017]. pp. 32. Disponible en internet: <<https://goo.gl/qmwm4z>>.

⁴ SAEED Ahmari, et al. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. Construction and Building Materials. [En línea]. Octubre 2012. Volume 35 [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 718–729. Disponible en internet: <<https://goo.gl/xKEEwa>>.

⁵ CASTAÑO, Jesus O., et al. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. [En línea]. Octubre – Diciembre 2013. Vol. 17 [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 121 -129. Disponible en internet: <<https://goo.gl/TInB0q>>.

En consecuencia, en la búsqueda de materiales alternativos en el sector de la construcción están los geopolímeros, polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos los cuáles se activan alcalinamente. En la presente investigación se evalúa la resistencia a la compresión de un material geopolimérico, activado alcalinamente mediante diferentes dosificaciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio, utilizando como material precursor desechos de ladrillo de arcilla, y curado a diferentes tiempos (3, 7 y 28 días)

PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo evoluciona la resistencia a la compresión de un geopolímero creado a partir de residuos de ladrillo de arcilla, variando el tiempo de curado y la dosificación de la solución activadora de hidróxido de sodio y silicato de sodio?

2. ANTECEDENTES

En la actualidad la búsqueda de materiales de construcción sostenibles es una necesidad a nivel mundial, entre los materiales sostenibles se encuentra los geopolímeros material tipo aluminosilicato activado alcalinamente por la reacción química conocida como geopolimerización. Este término de geopolímero fue designado por científico francés Joseph Davidovits en la década de 1980. En base a sus estudios se ha desarrollado varias investigaciones enfocadas en diferentes materiales precursores como el metacaolín, cenizas volantes, escorias de alto horno, entre otros; sin embargo los antecedentes y la revisión se centra en materiales cerámicos.

M.F. Zawrah et al.⁶, estudiaron el potencial de la utilización de residuos y subproductos procedentes de actividades industriales actuales para la producción de geopolímeros. El proceso de geopolimerización para los ladrillos de arcilla de desecho disparado (G) con una solución acuosa alcalina de NaOH / Na₂SiO₃ se llevó a cabo con éxito con la producción de matriz geopolímeros. El estudio también analiza su idoneidad para el proceso de síntesis en geopolimerización asociado con un porcentaje diferente de otro subproducto industrial, escoria granulada de alto horno granulada (S). En los resultados obtenidos en esta investigación se destaca la resistencia de 83 MPa alcanzada que consta principalmente de residuos 40% despedido ladrillos de arcilla (grog) y el 60% del suelo escoria granulada de alto horno (S).

Coronado Fabiola y Flórez Paola⁷, estudiaron el comportamiento fisicomecánico de mezclas a partir de materiales alternativos (ladrillo y granito) y material cementante tradicional (Cemento portland) en proporciones: 100% granito, 100% ladrillo, 80% cemento y 20% granito y 80% cemento y 20% ladrillo, considerando oportuna su utilización por su bajo costo y contribución a la disminución de gases contaminantes. Demostrando que a pesar que la resistencia a la compresión de los morteros fabricados con geopolímeros disminuye en comparación con la muestra patrón

⁶M.F. Zawrah, et al. Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. Process Safety and Environmental Protection. [En línea]. Septiembre 2016. Volume 103, Part A [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 237- 251. Disponible en internet: <<http://goo.gl/chk0TP>>.

⁷ CORONADO LIZARAZO, Fabiola Mariana y FLOREZ ARIAS, Paola Andrea. Estudio comparativo de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros utilizando granito y residuos de la industria ladrillera como materias primas alternativas al cemento portland tipo I. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2010. 81 p.

(100% cemento), el porcentaje de reemplazo de cemento que muestra mejores resultados es 20%.

Munera Jorge y Murford Alexandra⁸, quienes basaron su estudio en la obtención de un sistema geopolimérico simple a partir de la activación alcalina de residuos de ladrillo y un sistema híbrido con la adición de OPC (Cemento Portland Ordinario), con el propósito final de proponer un material cementante alternativo apto para la producción de elementos prefabricados de uso común en el sector de la construcción. Obteniendo como resultado una resistencia a los 7 días de 18,20 MPa para la activación alcalina del residuo de ladrillo (RL) con una solución de hidróxido de sodio, además de evaluar los sistemas híbridos con un porcentaje de adición de 10% de OPC y curados a temperatura ambiente, adquiriendo resistencia a la compresión a 28 días de 41,40 MPa para el sistema activado con hidróxido de sodio, y 82,40 MPa para el sistema activado alcalinamente con una solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio.

Wang ha llegado a la conclusión de que la relación $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ puede variar entre 0,24 hasta 2,2. En éste se recomienda la relación $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ de 0,24 para geopolímeros de metacaolín el cual presento una resistencia a la compresión máxima de 59 MPa. Por otro lado, Pelisser utilizará la mayor gama de la relación (1.0, 1.6 y 2.2) para hacer geopolímeros de metacaolín. En el cual la resistencia a la compresión más alta fue de 64 MPa después de 7 días con una relación de 1,6. Estos resultados fueron apoyados por Poowancum y Horpibulsuk para geopolímeros basado en sedimentos de arcilla calcinada. Sin embargo, el uso de la arcilla sedimentaria, la relación óptima a 0,5 fue de 27 MPa.⁹

⁸ MUNERA CANABAL, Jorge Alexander y MULFORD CARVAJAL, Alexandra Jimena. Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de materiales. Cali: Universidad Del Valle. Facultad de Ingeniería, 2015. p. 36.

⁹YUNG-MING, Op. Cit., p. 614.

3. JUSTIFICACIÓN

Materiales tradicionales empleados en la actualidad como el cemento portland, ladrillos cerámicos, madera, entre otros; son fabricados a partir de materia prima extraída de la naturaleza y de recursos no renovables, durante su transformación se emplea gran cantidad de energía y se genera emisiones de gases efecto invernadero; trayendo consigo repercusiones negativas en el medio ambiente agotando recursos, energía y calidad del entorno para próximas generaciones.

Por lo expuesto anteriormente emana la necesidad de salvaguardar el espacio natural y calidad del medio ambiente con la búsqueda de materiales alternativos en el sector de la construcción que contribuyan al reciclaje de materiales al final de su vida útil, disminución de la extracción de recursos naturales y reducción del impacto ambiental minimizando el consumo de energía y calentamiento global producto de las emisiones de CO₂. Esta investigación se centra en el desarrollo de un material tipo geopolimérico que de un uso alternativo a los residuos de ladrillo de arcilla RLA y contribuya a una construcción sostenible. Es pertinente concentrar el estudio en la activación alcalina de desechos cerámicos puesto que es escasa la investigación en este material precursor para la creación de materiales geopolimeros pese a sus propiedades potenciales para tal fin.

Materiales geopolimericos prometen posicionarse en el mercado de la construcción por sus múltiples ventajas frente a materiales tradicionales no solo por su aporte en la mitigación del impacto ambiental si no, por sus propiedades físicas y mecánicas. En la actualidad el 20% del cemento portland que se producen en el año, se utiliza para rehabilitar estructuras existentes, luego tiene problemas de durabilidad que geopolimeros cerámicos pueden mejorar, además sus propiedades de resistencia al fuego, ataques químicos, aislante térmico y acústico y baja conductividad térmica representan ventajas que permiten su inclusión en materiales ingenieriles.

Es oportuno que los resultados de este estudio contribuyan a posteriores investigaciones, pues son este tipo investigaciones las que dan pie para que se pueda incluir el aprovechamiento de residuos urbanos e industriales y además contribuir a una construcción ecológica. Así mismo, la sociedad, productores de ladrillo de arcilla y profesionales del sector constructivo serán beneficiarios de este estudio.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la resistencia a la compresión de un geopolímero creado a partir de residuos de ladrillo de arcilla, activado alcalinamente con soluciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar física y mineralógicamente los residuos de ladrillo de arcilla.
- Sintetizar un material geopolimérico a partir de diferentes dosificaciones de residuos de ladrillo de arcilla, soluciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio.
- Determinar la resistencia a la compresión del geopolímero sintetizado a diferentes tiempos de curado a temperatura ambiente.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

La investigación de los geopolímeros ha surgido por la necesidad de encontrar materiales alternativos para sustituir materiales tradicionales de la construcción. En las últimas décadas varias investigaciones se han centrado en el estudio de estos por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, dando un aporte significativo en para la consolidación de este nuevo material.

5.1.1 Geopolímeros.

En la década de los ochenta, el profesor Joseph Davidovits¹⁰, acuñó el término “geopolímero” para designar a polímeros inorgánicos de aluminosilicatos. En donde los geopolímeros se producen como consecuencia de la reacción química entre un aluminosilicato sólido y una solución líquida de silicatos o hidróxidos alcalinos, a temperatura ambiente o a temperatura ligeramente superior, para dar un nuevo aluminosilicato alcalino sintético. A la vez poseen una amplia variedad de propiedades y características como son su alta resistencia mecánica, resistencia al fuego, resistencia a los ácidos, baja conductividad térmica y rápidos tiempos de fraguado, dependiendo de las materias primas utilizadas, las combinaciones de las mismas y las condiciones de fabricación. Aunque no todos los geopolímeros poseen todas las propiedades citadas, el conocimiento alcanzado permite definir unas formulaciones en las condiciones adecuadas para obtener las propiedades idóneas para una aplicación específica.

5.1.2 Estructura de los geopolímeros.

En términos generales los geopolímeros consisten en una red de silicatos, los cuales están conformados por moléculas tetraédricas de SiO_4 y AlO_4 , enlazados de modo alterno con átomos de oxígeno compartidos; el conocimiento de su modelo estructural aun representa un desafío, por lo que el mecanismo exacto de su configuración y endurecimiento se encuentran en investigación.¹¹

¹⁰ RIVERA LAZCANO, Hector Ronald, Introducción Geopolímeros. [En línea]. Agosto 2014. [Citado en 7 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/fHQvRc>>.

¹¹ ÁLVAREZ MANTILLA, Hernando. Síntesis y caracterización de propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolanas para su aplicación en la industria. Proyecto de grado para optar al título de geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica, 2010. 118 p.

Según Davidovits¹², los anillos o cadenas de polímeros con Si⁴⁺ y Al⁴⁺ en número de coordinación IV con oxígeno se denominan polisialatos. Lo cual la terminología propuesta de estructura geopolímeros clasifica geopolímeros en tres formas básicas en función de sus relaciones de Si / Al, es decir, poli (sialato), poli (sialato-siloxo) y poli (sialato-disiloxo) como se muestra en la Fig.1, y de acuerdo con su estructura pueden ser expresados mediante la siguiente ecuación:

$$Mn \text{ } (-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2)^*w\text{H}_2\text{O} \text{ Ecuación (1)}$$

Donde:

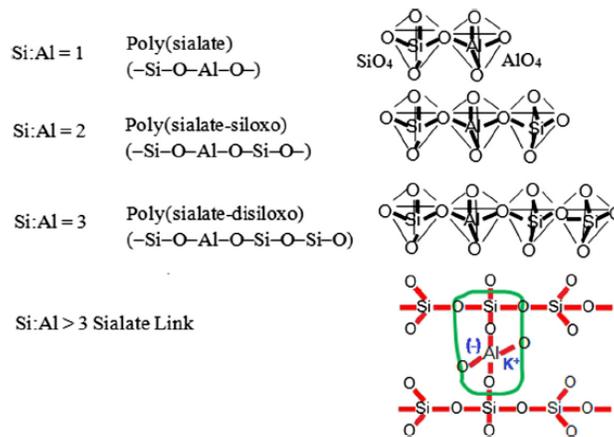
M hace referencia a un catión monovalente (K⁺ o Na⁺)

n es el grado de policondensación.

z puede tomar valores entre 1, 2 o 3, de este modo si z= 1 es de tipo polisialato, si z=2 la red será poli (sialato-siloxo), y z=3, la red será poli (sialato-disiloxo), como se muestra en la figura 1.

Es importante destacar que los iones que poseen carga positiva denominados cationes, tales como el Na⁺, K⁺ o Ca²⁺, cumplen un rol fundamental al neutralizar la carga negativa del Al³⁺ y se alojan en las cavidades de la estructura.

Figura 1. Representaciones de polisialatos

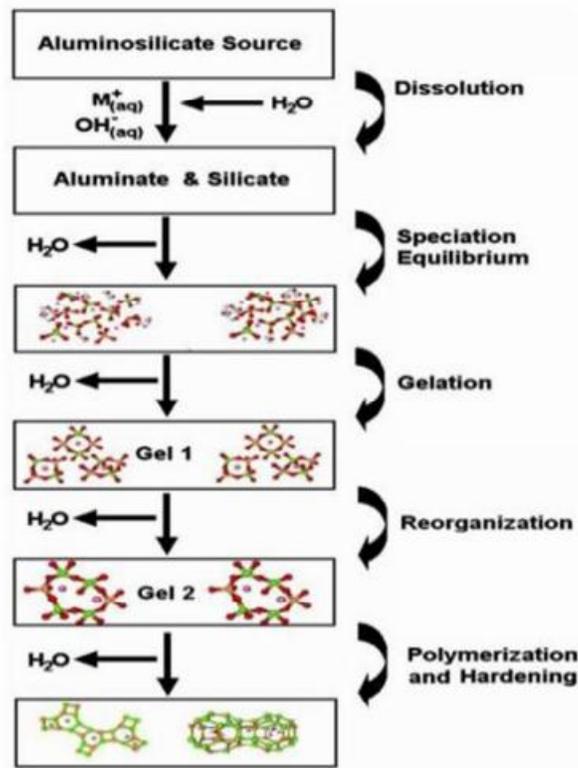


Fuente: Davidovits J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs.

¹² DAVIDOVITS J. et al. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. [En línea]. Julio 2009. Volumen 166. [Citado en 7 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/5KWbDv>>. Citado por MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial del cemento portland. Tesis Magister en Ingeniería ambiental. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Administración. Grupo de Investigación: Materiales y Medio Ambiente (GIMMA), 2015. 140 p.

Con base en lo propuesto por Davidovits, el proceso de geopolímerización tiene varias fases las cuales se ven representadas en la figura 2. Más recientemente se ha utilizado este modelo para explicar el proceso de geopolímerización.

Figura 2. Modelo conceptual de la geopolímerización



Fuente: P. Duxson. A. Fernandez-Jimenez. J. L. Provis. Geopolymer technology: the current state of the art.

La primera parte del proceso consiste en la disolución de la parte amorfa del aluminosilicato sólido, promovida por una solución activadora alcalina, consumiendo agua y formando a su vez las especies aluminato y silicato (monómeros), gracias a la acción de los iones hidroxilo. La disolución tiene lugar en la superficie de las partículas del sólido y éste puede quedar total o casi completamente consumido, pudiendo quedar partículas sin reaccionar.

Una vez que los monómeros están en solución acuosa (que puede contener también silicatos procedente de la solución activadora), se forma una mezcla compleja de aluminatos, silicatos y aluminosilicatos en equilibrio, originándose los primeros oligómeros de aluminosilicatos.

Cuando la solución está muy concentrada se forma un gel desordenado a partir de la condensación de grandes grupos de oligómeros. Durante este paso se libera

el agua consumida durante la disolución. El gel es una mezcla bifásica de agua y aluminosilicato que ocupa el espacio entre las distintas partículas sin reaccionar.

Tras la formación del gel, llamado “gel geopolimérico”, el sistema se reorganiza y reestructura, y se produce un aumento de las conexiones entre las cadenas, apareciendo una estructura tridimensional de aluminosilicato alcalino.

El último paso es la polimerización y posterior endurecimiento de todo el sistema en una estructura inorgánica polimérica.¹³

5.1.3 Precursor (residuos de ladrillos de arcilla).

El material precursor de este grupo de cerámicos es el silicoaluminato hidratado, es decir químicamente está compuesta de silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) e hidrógeno (H). En general, las materias primas deben de poseer un alto contenido de silicio y aluminio (materiales silicoaluminosos) y al mismo tiempo, que presenten alta inestabilidad termodinámica (estructura amorfa).

Según Shvarzman A., Kovler K.¹⁴, Las arcillas naturales calcinadas (como el caolín) son materiales que han sido analizados como precursores primarios de los geopolímeros. La calcinación del caolín para transformarlo al estado meta estable se lleva a cabo alrededor de los 600°C - 900°C dependiendo de las impurezas presentes. Esta calcinación ocasiona la pérdida de los grupos -OH en la estructura (deshidroxilación), lo que origina la pérdida del orden de largo alcance, por lo que el compuesto se vuelve amorfo.

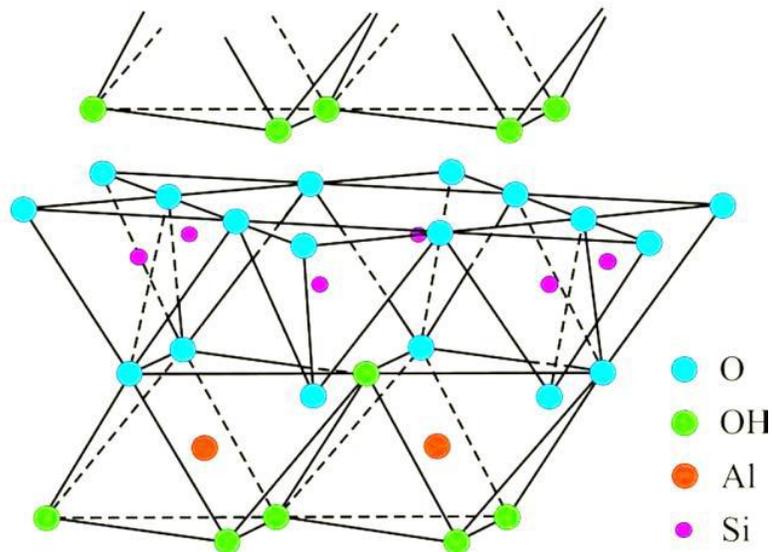
Se genera un estado de alta energía interna, ya que el aluminio sufre un cambio de coordinación octaédrica a tetraédrica. En la Figura 3 se puede observar la coordinación octaédrica del aluminio presente en la caolinita antes de la calcinación.¹⁵

¹³ RIVERA. Op. Cit., p. 12.

¹⁴ SHVARZMAN A. et al. The effect of Dehydroxylation/Amorphization Degree on Pozzolan Activity of Kaolinite. 2003. Volumen 33. Citado por BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2011. 114 p.

¹⁵ BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2011. 114 p.

Figura 3. Estructura de la caolinita presente en el caolín ($2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)



Fuente: BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores.

5.1.4 Agentes activadores (NaOH y Na_2SiO_3).

El hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na_2SiO_3), actúan como una disolución alcalina, lo cual al ser activada produce un efecto calórico. La proporción de solución de NaOH y Na_2SiO_3 líquido utilizado para hacer geopolímeros es importante. Esto es debido al hecho de que el hidróxido de sodio (NaOH) actúa como disolvente mientras el silicato de sodio (Na_2SiO_3), actúa como un aglutinante en la reacción de geopolimerización.¹⁶

En general, un aumento en la relación de reactivo alcalino aumenta la fuerza de geopolímeros. El aumento de contenido de Na_2SiO_3 favorece el proceso de polimerización que conduce a un producto de reacción con una mayor resistencia mecánica. Las proporciones de reactivos alcalinos determinan el grado y velocidad de reacción geopolimerización. Sin embargo, en cierta proporción alta, la trabajabilidad de la pasta es limitada y provoca una disminución subsiguiente en la fuerza.¹⁷

Además Yung_Ming encontró en su investigación a varios investigadores que coincidieron en que una alta alcalinidad es perjudicial para la resistencia de los geopolímeros.¹⁸

¹⁶YUNG-MING, Op. Cit., p. 614.

¹⁷Ibid., p. 614.

¹⁸Ibid., p. 612.

5.1.5 Contenido de agua

Yunsheng Z, Wei S, Zongjin L.¹⁹ comenta que el agua proporciona una buena fluidez a la mezcla de geopolímeros. La suficiente agua facilita el proceso de mezcla y proporciona un mecanismo para el transporte de iones.

Según Rahier et al.²⁰, alto y bajo contenido de agua disminuye la velocidad de reacción. Esto se cree debido a la disminución de OH⁻ en concentración a alto contenido de agua. En el otro lado, al bajo contenido de agua, a pesar de que el OH⁻ aumenta la concentración; las especies reactivas (H₃SiO₄⁻) para la reacción entre oligómeros de silicatos disminuyen y disminuye la velocidad de reacción geopolímerización.

Por lo general, la demanda de agua depende de la composición de sistema. En general, una baja relación sodio y aluminio requiere más agua. Esto aumenta la propensión a la fisuración en proceso curado.²¹ Además, el contenido de agua en el sistema geopolímeros afecta a la densidad y porosidad abierta de los productos finales.²²

La necesidad de agua depende de la característica de las materias primas utilizadas. Además, el contenido de agua en el sistema de geopolímeros debe ser acoplado con otros parámetros de mezcla, tales como concentración de álcali, relación sólido y líquido, y proporciones de reactivos alcalinos.²³

5.1.6 Mecanismo de reacción

Se han propuesto modelos que describen el proceso de activación alcalina de los materiales con alto contenido de aluminosilicatos. El primero de ellos fue propuesto

¹⁹ZHANG YUNSHENG, Sun Wei, Li Zongjin. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. [En línea]. Febrero 2010. Volume 47, [Citado en 30 septiembre de 2016]. pp. 271- 275. Disponible en internet: <<https://goo.gl/NmpZdP>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

²⁰RAHIER, H., WASTIELS, J., BIESEMANS, M. et al. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. [En línea]. Mayo 2007. Volumen 42. [Citado en 30 de septiembre de 2016]. pp 2982–2996. Disponible en internet: <<https://goo.gl/qy10BA>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

²¹PERERA, D.S., UCHIDA, O., VANCE, E.R. et al. Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. . [En línea]. Mayo 2007. Volumen 42. [Citado en 30 de septiembre de 2016]. pp 3099–3106. Disponible en internet: <<https://goo.gl/sRTiSI>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

²²Ibid., p. 621.

²³Ibid., p. 621.

por Glukhovsky en 1967²⁴. En resumen su modelo constaba de tres etapas: (1) rompimiento de los enlaces de los compuestos, (2) formación de núcleos y finalmente (3) crecimiento y cristalización. Otros científicos con nuevas investigaciones han retomado el modelo y añadido más detalles al proceso de geopolimerización²⁵ mostrado en la figura 2.

Provis²⁶ uno de los autores que retoma el modelo, explicó sus etapas. Lo primero que indicó es que el modelo no es lineal como se muestra en la figura 2, si no que todas las etapas pueden ocurrir a la vez. Sin embargo, en forma simplificada, menciona que la primera etapa involucra la disolución de los aluminosilicatos en monómeros. Posteriormente se forman dímeros, trímeros, tetrámeros, hasta llegar a la precipitación de un gel de aluminosilicatos. A este gel se le denomina gel 1 y es rico en Al. Fernandez propuso que esto se debe a que los enlaces Al-O son más débiles que los Si-O, por lo tanto se rompen fácilmente y el Al se disuelve rápidamente en la solución contribuyendo a la formación del gel 1. Retomando la explicación de Provis, la siguiente etapa es la formación del gel 2, en donde el Si comienza a disolverse y a incorporarse al gel ya presente. La reorganización que se lleva a cabo con la incorporación de silicio es la última etapa, la cual es crucial para las propiedades mecánicas del material. Sin embargo, la reacción es compleja y aún existen detalles por explicar cómo la influencia de las impurezas en la materia prima.²⁷

5.1.7 Propiedades generales de los geopolímeros.

Se ha buscado incluir los geopolímeros en casos particulares como el caso de la construcción, tal es el caso como un material cementante, debido a que este presenta propiedades como las siguientes: “Alta resistencia a compresión, llegando a alcanzar hasta 100 MPa y elevada integridad estructural; Buena resistencia a la abrasión; Curado y endurecimiento rápidos y controlados. En general, la integridad estructural y la resistencia se alcanzan a corto plazo. En la mayoría de los casos, el

²⁴ GLUKHOVSKY, V. Soil silicate articles and structures. 1967. [Citado en 01 de agosto de 2017]. Citado por GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. pp. 10 – 11.

²⁵ GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. pp. 10 – 11.

²⁶ PROVIS, J. Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications. 2009. [Citado en 01 de agosto de 2017]. Citado por GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. p.p. 10 – 11.

²⁷ GONZÁLEZ ACUÑA, Op. Cit., pp. 10 - 11.

70% de la resistencia a compresión se alcanza a las 4 horas, de ahí que se pueda hablar de cortos tiempos de fraguado o endurecimiento. Estos rápidos tiempos de curado pueden ser una ventaja o desventaja, dependiendo de las aplicaciones en las que vayan a ser utilizados los geopolímeros; Resistencia al fuego, superior a 1000°C, y no emisión de humos tóxicos cuando se calienta; Alto nivel de resistencia al ataque de diferentes ácidos y sales; Baja permeabilidad; Buena resistencia a ciclos de hielo-deshielo; Baja conductividad térmica; Fácil adhesión a hormigones, acero, vidrio y cerámicas”²⁸.

5.2 MARCO LEGAL

En los diferentes procesos de caracterización del material se van a realizar pruebas de laboratorio, las cuales se relacionan a continuación con su respectiva norma que la rige.

Tabla 1. Ensayos de caracterización de material

ENSAYO	NORMA
Granulometría por hidrómetro	INV E – 123 – 13
Gravedad específica de sólidos	INV E – 128 – 13
Resistencia a la compresión de cubos de mortero	NTC – 220 – 98
Fluorescencia de rayos x (FRX)	SEMIQ - 2016
Difracción de rayos x (DRX)	

Fuente: Archivo propio

5.2.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos INV E – 123 – 13.

Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores de 75 µm (retenidas en el tamiz No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75 µm se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro.²⁹

²⁸ RIVERA. Op. Cit., p. 14.

²⁹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INV-E – 123. 2 ed. Bogotá. 2015. 22 p.

5.2.2 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua INV E – 128 – 13. Esta norma de ensayo se utiliza para determinar la gravedad específica de los suelos que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4) y del llenante mineral de las mezclas asfálticas (*filler*), empleando un picnómetro.

Las partículas sólidas de los suelos a los cuales se les va a determinar la gravedad específica de acuerdo con esta norma, no podrán ser susceptibles de alteración por el procedimiento de ensayo, ni estar contaminadas con sustancias que prohíban el uso de estos métodos, o que sean altamente orgánicas, tales como la materia fibrosa que flota en el agua.³⁰

5.2.3 Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado NTC – 220- 98

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico y otros morteros. Los resultados pueden emplearse para determinar la conformidad con las especificaciones y métodos de ensayo.³¹

5.2.4 Fluorescencia de rayos x (FRX)

La fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.³²

³⁰INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua. INV-E – 128. 2 ed. Bogotá. 2015. 15 p.

³¹INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado. NTC – 220. Bogotá. 1198. 13 p.

³² UNIVERSIDAD DE ALICANTE. [En línea]. [Citado en 7 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/ESseVS>>

5.2.5 Difracción de rayos x (DRX).

El Difractómetro cuenta con tubos de generación de rayos X con ánodos de Cu (Cobre), Mo (Molibdeno) y Fe (Hierro) para los ensayos. Permite obtener información sobre las fases y estructura cristalina de todo tipo de materiales en polvo, película delgada y en bloque. Adicional a ello, a través del procesamiento de los datos de los difractogramas se puede obtener información de parámetros cristalográficos y de orientación preferencial de los planos de reflexión.³³

³³ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. [En línea]. [Citado en 23 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/xPuDLO>>

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El enfoque de la investigación es de tipo cuantitativo debido a que involucra un proceso sistemático y ordenado, consiste en la recolección de datos e información, el tipo de medición es numérica y requiere un análisis numérico.

Este tipo de enfoque parte de una idea que se delimita, de esta se definen objetivos y preguntas de investigación; a partir de una revisión de literatura se construye el marco; de acuerdo a las preguntas se determinan las variables, se traza un diseño para probarlas, se miden las variables; se analiza los resultados obtenidos utilizando métodos estadísticos y finalmente se extrae una serie de conclusiones.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación es experimental porque es un proceso sistemático y una aproximación científica. En el estudio se manipulan variables independientes, para analizar las consecuencias que tiene sobre las variables dependientes.

En este tipo de investigación es necesario:

- Definir variables independientes (causa) e independientes (efecto).
- Medir el efecto que la variable independiente tiene en la variable dependiente.
- Control de la situación experimental.

El contexto del experimento es de laboratorio, es decir que se realiza en condiciones controladas, el efecto de las variables independientes influyentes no relacionadas al problema se mantienen reducidas en lo más posible asegurando resultados con mayor confiabilidad.

6.3 DEFINICIÓN Y OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Las variables a definir son la independiente, la dependiente y la interviniente. La variable independiente es la manipulada, la dependiente mide el efecto o causa de la primera y la variable interviniente presentes en el objeto de estudio y su variación interviene en el estudio.

En cuanto a la operacionalización busca definir con mayor precisión estas variables.

En la siguiente tabla se ilustran las variables y su operacionalización de esta investigación:

Tabla 2. Definición y operacionalización de las variables

	VARIABLE	INDICADOR	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN
VARIABLE INDEPENDIENTE (X)	Activadores alcalinos y material precursor (RLA)	%NaOH y Módulo de silicato.	Variación en diferentes dosificaciones de RLA, hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃)	Peso (gr)
VARIABLE DEPENDIENTE (Y)	Comportamiento mecánico del geopolímero.	Resistencia a la compresión.	Ensayo en la máquina universal, registrando los valores de resistencia máximos alcanzados por cada muestra.	Esfuerzo (MPa)
VARIABLE INFLUYENTE	Curado del geopolímero.	Tiempo de curado.	Evaluación de la resistencia a la compresión del geopolímero en factor del tiempo de curado.	3, 7 y 28 días.

Fuente: Archivo propio.

6.4 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

6.4.1 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos INV E – 123 – 13.

6.4.1.1 Técnica

Para realizar este ensayo basado en el principio de la sedimentación de las partículas de suelo en el agua, se tomaron los datos de densidad de sólidos de la suspensión material en agua destilada por un periodo de 24 horas.

6.4.1.2 Instrumentos

- Hidrómetro. Conforme a los requisitos se usó el hidrómetro 151 H de la norma ASTM E 100, graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenía

grabada, la gravedad específica de la suspensión o los gramos por litro de suspensión.

- Cilindro de vidrio para sedimentación. De unos 457 mm (18") de alto y 63.5 mm (2½") de diámetro, y marcado para un volumen de 1000 ml a 20° C (68° F). El diámetro interior es tal, que la marca de 1000 ml se encuentre a 360 ± 20 mm (14 ± 1.0 ") del fondo, en el interior del cilindro.
- Termómetro de inmersión. Con apreciación de 0.5° C (0.9° F).
- Cronómetro o reloj.
- Horno. A temperatura uniforme y constante hasta 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F).
- Baño de agua o cuarto de temperatura constante. Se utilizó para mantener la suspensión de suelo a temperatura constante durante el análisis del hidrómetro, evitándose de esta forma las correcciones por temperatura.
- Vaso de precipitados (Beaker). Con una capacidad de 250 ml.
- Recipientes. Recipientes apropiados, hechos de material no corrosible y que no estén sujetos a cambio de masa o desintegración a causa de repetidos calentamientos y enfriamientos.
- Varilla de vidrio. Una varilla de vidrio apropiada para agitar la muestra.
- Cepillo y brocha. Para limpiar las mallas de los tamices.

6.4.2 Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua
INV E – 128 – 13.

6.4.2.1 Técnicas

Para la realización de este ensayo se recopilaron los datos solicitados en el formato UGC-LS-009, con los cuáles se establecerá el valor de gravedad específica y porcentaje de absorción.

Figura 4. Formato UGC-LS-009

FOR-UGC-LS-009	GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL NORMA I.N.V. E - 128 - 07	
PROYECTO:	_____	
REMITENTE:	_____	REF. ENVÍO: _____
Nº DE ORDEN:	_____	FECHA DE RECIBIDO: _____
OBSERVACIONES:	_____	
PRUEBAS	1	
Tx, TEMPERATURA DEL AGUA Y MUESTRA AL MOMENTO DE DETERMINAR EL Wb EN ° C	22	
Wa = PESO DEL PICNÓMETRO LLENO CON AGUA A LA TEMPERATURA, Tx, g	78,94	
Wb = PESO PICNÓMETRO AFORADO CON AGUA + MUESTRA, g	97,24	
K = FACTOR DE CORRECCIÓN	0,9995	
(Wa-Wb)	-18,3	
Wo = PESO SECO DE LA MUESTRA, g	29,7	
Wo+(Wa-Wb)	11,4	
Gs. PESO ESPECÍFICO APARENTE A Tx = Wo / (Wo+(Wa-Wb))	2,605	
K	0,9995	
Gs. PESO ESPECÍFICO A 20° C = K (Gs A Tx)	2,604	
<p>NOTA : LAS PRUEBAS NO DEBEN VARIAR MÁS DE 0.02 EN PESO ESPECÍFICO Y NO MÁS DE 0.05 EN ABSORCIÓN.</p>		
LABORATORISTA:	Ing. JEFE DE LABORATORIO	

Fuente: UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA. Formato UGC-LS-009

6.4.2.2 Instrumentos

- Picnómetro. El picnómetro es un frasco con tapón o un frasco volumétrico con una capacidad mínima de 250 ml. El volumen del picnómetro es de 2 a 3 veces mayor que el volumen de la mezcla del suelo con agua usada durante la actividad de extracción de aire en la prueba.
- Equipo para extraer el aire atrapado. Para extraer el aire atrapado se usó la bomba de vacío, para producir un vacío parcial de 100mm de mercurio.
- Horno. A temperatura uniforme y constante hasta 110 ± 5°C (230 ± 9°F).

- Balanzas. Con capacidad de 2000 g y sensibilidad de 0.01g
- Pipeta.
- Termómetro. Para medir temperaturas entre los límites en que se llevó a cabo la prueba, graduado con precisión de 0.1°C (0.18°F) y con una profundidad disponible para inmersión entre 25 y 80 mm.
- Desecador. Un recipiente desecador o una jarra desecadora de tamaño apropiado, con sílice gelatinosa o sulfato anhidro de calcio.
- Embudo. Un embudo de superficie anticorrosiva y lisa con un cuello que se extiende más allá de la marca de calibración del frasco volumétrico o el sello de taponamiento en los frascos con tapón. El diámetro del cuello del embudo fue lo suficientemente grande para permitir el paso fácil de los sólidos.
- Tubo para llenar el picnómetro. Con ventilaciones laterales. Un dispositivo que facilitó la adición de agua desaireada al picnómetro sin alterar la mezcla del precursor y agua.
- Tamiz de 4.75 mm (No.4)

6.4.3 Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado NTC – 220- 98.

6.4.3.1 Técnicas

Para el desarrollo de este ensayo se registraron los datos obtenidos de fallar cada probeta sintetizada en los tiempos de curado (3, 7 y 28 días), tomando como base 9 muestras de cada dosificación (3 por cada día de curado), registrando un total de 108 muestras a fallar en la máquina universal.

6.4.3.2 Instrumentos

- Pesas Y Equipos De Pesaje. Cumplieron con lo establecido en la NTC 4073 (ASTM C 1005).
- Probetas Graduadas. Con capacidad que permitió medir y entregar completamente el agua de amasado en una sola operación.
- Moldes. Los moldes para las probetas cúbicas fueron de 50 mm de lado. Las caras interiores de los moldes fueron planas y cumplieron con las tolerancias de la Tabla 3.

Tabla 3. Variaciones permisibles de los moldes de los especímenes

Parámetro	Cubos de 50,8 mm		Cubos de 50 mm	
	Moldes nuevos	Moldes en uso	Moldes nuevos	Moldes en uso
Planicie de los lados	< 0,025 4 mm	< 0,050 8 mm	< 0,025 mm	< 0,05 mm
Distancia entre los lados opuestos	50,8 mm ± 0,127 mm	50,8 mm ± 0,508 mm	50 mm ± 0,13 mm	50 mm ± 0,50 mm
Altura de cada compartimiento	50,8 mm + 0,254 mm a - 0,127 mm	50,8 mm + 0,254 mm a - 0,127 mm	50 mm + 0,25 mm a - 0,13 mm	50 mm + 0,25 mm a - 0,38 mm
Ángulo entre caras adyacentes ^(A)	90° ± 0,5°	90° ± 0,5°	90° ± 0,5°	90° ± 0,5°

Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de lado.

- Mezcladora. Se utilizará una mezcladora Hobart, la cual cumplió con los requisitos establecidos en la NTC 112 (ASTM C 305).
- Compactador. Se usó de un material de caucho, que no fue absorbente, abrasivo, ni quebradizo.
- Palustre. La hoja del palustre fue de acero, con una longitud de 100 mm a 150 mm y con los bordes rectos.
- Máquina de ensayo mecánica.

6.5 FASES DE INVESTIGACIÓN

FASE 1. Caracterizar física y mineralógicamente los residuos de ladrillo de arcilla.

Actividad 1.1 Moler residuo de ladrillo de arcilla.

Actividad 1.2 Realizar el ensayo de gravedad específica de sólidos de los residuos de ladrillo de arcilla.

Actividad 1.3 Realizar el ensayo de granulometría por hidrómetro de los residuos de ladrillo de arcilla para conocer el tamaño de las partículas.

Actividad 1.4 Realizar el ensayo de fluorescencia de rayos x (FRX) de los residuos de ladrillo de arcilla para determinar el contenido y la composición elemental del material, éste será realizado en un laboratorio certificado.

Actividad 1.5 Realizar el ensayo de difracción de rayos x (DRX) de los residuos de ladrillo de arcilla para determinar las fases y porcentaje de contenido amorfo, éste será realizado en un laboratorio certificado.

FASE 2. Sintetizar un material geopolimérico a partir de diferentes dosificaciones de residuos de ladrillo de arcilla, hidróxido de sodio y silicato de sodio.

Actividad 2.1 Generar matriz de dosificación con 12 dosificaciones de residuo de ladrillo de arcilla, agua y la activación alcalina con hidróxido de sodio y silicato de sodio (NaOH+ Na₂SiO₃).

Actividad 2.2 Realizar la síntesis del geopolímero en las probetas a partir de la matriz de dosificación.

Tabla 4. Matriz de ensayos

Ms/ Na ₂ O	0,5	1,0	1,5
6	9	9	9
7	9	9	9
8	9	9	9
9	9	9	9
Total de probetas	108		

Fuente: Archivo propio

FASE 3. Determinar la resistencia a la compresión del geopolímero sintetizado a diferentes tiempos de curado.

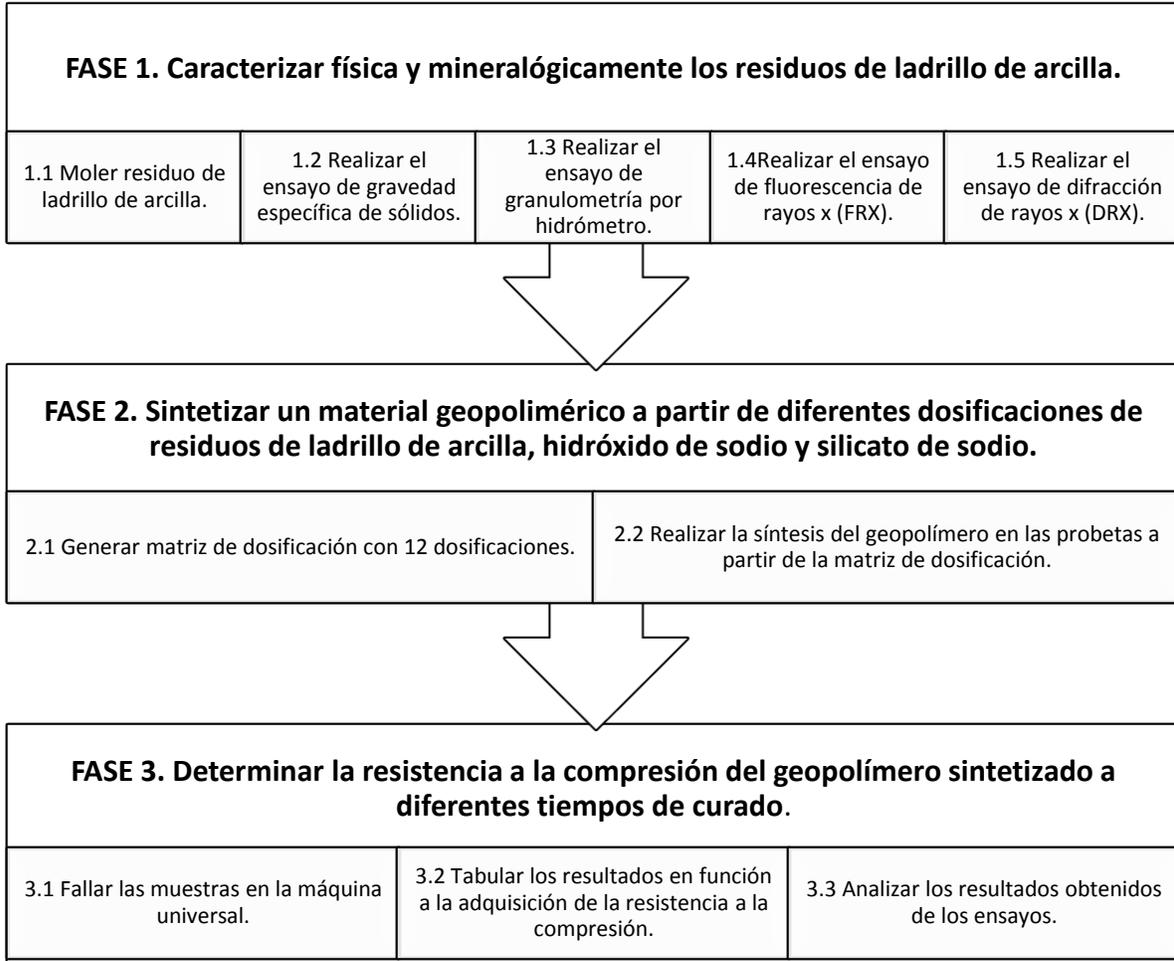
Actividad 3.1 Fallar las muestras en la máquina universal en sus respectivos tiempos de curado (3, 7 y 28 días), registrando los resultados.

Actividad 3.2 Tabular los resultados en función a la adquisición de la resistencia a la compresión.

Actividad 3.3 Analizar los resultados obtenidos de los ensayos en las diferentes dosificaciones y tiempos de curado.

A continuación, en la figura 5 se ilustra en forma gráfica las fases de investigación:

Figura 5. Fases de Investigación



Fuente: Archivo propio

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MINERALÓGICAMENTE LOS RESIDUOS DE LADRILLO DE ARCILLA

7.1.1 Preparación del material de residuo de ladrillo de arcilla

Se recolectaron los residuos de ladrillo de arcilla de la ladrillera La Sabana, los cuales tenían alto contenido de material orgánico como se muestra en la figura 6, por lo cual requirió un proceso de lavado para un análisis específico del material y potenciar su uso.

Figura 6. Recolección de material



Fuente: Archivo propio.

Luego del lavado del material se procedió a secarlo al horno a una temperatura de 69 °C con el fin de no alterar sus propiedades, (ver figura 7). Con el material seco se lleva a un proceso de trituración en la máquina de los ángeles donde se expuso a 1000 revoluciones, (ver figura 8); seguido de este proceso se llevó el material a un tamiz número 10, lo que nos permite hacer un proceso de pulverización y lograr que el tamaño de las partículas del residuo de ladrillo de arcilla llegue a un tamaño de 0.075 mm como se observa en la figura 8.

Figura 7. Lavado y secado de material



Fuente: Archivo propio.

Figura 8. Máquina de los ángeles



Fuente: Archivo propio.

Figura 9. Muestra en 0,075 mm



Fuente: Archivo propio.

7.1.2 Ensayo de gravedad específica de sólidos de los residuos de ladrillo de arcilla.

Se realizó el ensayo según el procedimiento explicado en la INV-E 128, arrojando los resultados presentados en la tabla 5.

Tabla 5. Datos ensayo INV-E 128

DATOS	
Masa del picnómetro + agua (g)	333,65
Masa del picnómetro + muestra + agua (g)	349,19
Peso platón (g)	115,19
Peso muestra seca + platón (g)	140,67

Fuente: Archivo propio.

Con los datos anteriores y según el ítem 8.2 de la INV-E 128, se calcula la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a la temperatura de ensayo, G_s , con la expresión:

$$G_s = \frac{\delta_s}{\delta_w} = \frac{M_s}{M\delta_{w,t} - (M\delta_{ws,t} - M_s)} \text{ Ecuación (2)}$$

Donde:

M_s : Masa de los sólidos del suelo secado en el horno (g)

$M_{pws, t}$: Masa del picnómetro con agua y sólidos a la temperatura de ensayo (g)

$M_{pw, t}$: Masa del picnómetro con agua a la temperatura de ensayo (g)

En la tabla 6 se encuentra el resultado de la gravedad específica, el cual se encuentra entre los rangos normales de este tipo de material.

Tabla 6. Resultados Gravedad específica

RESULTADOS	
Peso muestra seca (g)	24,71
Gravedad específica G_s (g/cm ³)	2,69

Fuente: Archivo propio.

Figura 10. Ensayo de gravedad específica



Fuente: Archivo propio.

7.1.3 Ensayo de granulometría por hidrómetro de los residuos de ladrillo de arcilla para conocer el tamaño de las partículas.

Se tomaron tres muestras como lo indica la norma INV-E 123 para este ensayo (ver figura 11), las cuales fueron analizadas sin defloculante con un peso de muestra de 50 g, a una temperatura de 19 °C y en agua totalmente destilada; a continuación se presentan los datos obtenidos de las respectivas muestras.

Figura 11. Ensayo de granulometría por hidrómetro



Fuente: Archivo propio.

Tabla 7. Ensayo hidrometría

Temperatura °C	Tiempo (min)	Lectura Hidrometro (R real)		
		1	2	3
19	2	35,5	36,5	36,5
19	5	30,5	31	31
19	10	27	27	25,5
19	15	24,5	24,5	24
19	30	21,5	21,5	20
19	60	18	18,5	17
19	120	15,5	16	14
19	180	14	14	13,5
18	250	13	13	13
18	300	12	12,5	12,5
18	1440	8	8	8

Fuente: Archivo propio.

Con los datos anteriores se calculó el tamaño de las partículas en cada muestra, arrojando los siguientes resultados.

Tabla 8. Resultados ensayo hidrometría 1

ENSAYO HIDROMETRÍA 1									
Temperatura °C	Tiempo (min)	R real	R corregido ceros y T	% mas fino	R menisco	L (cm) tabla 123-2	v = L/t (cm/min)	K tabla 123-3	D = K√L/t (mm)
19	2	35,5	35,5	70,29	36,5	10,5	5,25	0,01362	0,0312073
19	5	30,5	30,5	60,39	31,5	11,3	2,26	0,01362	0,0204753
19	10	27	27	53,46	28	11,9	1,19	0,01362	0,0148577
19	15	24,5	24,5	48,51	25,5	12,3	0,82	0,01362	0,0123334
19	30	21,5	21,5	42,57	22,5	12,8	0,42666667	0,01362	0,0088965
19	60	18	18	35,64	19	13,3	0,22166667	0,01362	0,0064125
19	120	15,5	15,5	30,69	16,5	13,75	0,11458333	0,01362	0,0046104
19	180	14	14	27,72	15	14	0,07777778	0,01362	0,0037984
18	250	13	13	25,74	14	14,2	0,0568	0,01379	0,0032865
18	300	12	12	23,76	13	14,3	0,04766667	0,01379	0,0030107
18	1440	8	8	15,84	9	15	0,01041667	0,01379	0,0014074

Fuente: Archivo propio.

Tabla 9. Resultados ensayo hidrometría 2

ENSAYO HIDROMETRÍA 2									
Temperatura °C	Tiempo (min)	R real	R corregido ceros y T	% mas fino	R menisco	L (cm) tabla 123-2	v = L/t (cm/min)	K tabla 123-3	D = K√L/t (mm)
19	2	36,5	36,5	72,27	37,5	10,3	5,15	0,01362	0,0309087
19	5	31	31	61,38	32	11,2	2,24	0,01362	0,0203845
19	10	27	27	53,46	28	11,9	1,19	0,01362	0,0148577
19	15	24,5	24,5	48,51	25,5	12,3	0,82	0,01362	0,0123334
19	30	21,5	21,5	42,57	22,5	12,8	0,42666667	0,01362	0,0088965
19	60	18,5	18,5	36,63	19,5	13,25	0,22083333	0,01362	0,0064004
19	120	16	16	31,68	17	13,7	0,11416667	0,01362	0,004602
19	180	14	14	27,72	15	14	0,07777778	0,01362	0,0037984
18	250	13	13	25,74	14	14,2	0,0568	0,01379	0,0032865
18	300	12,5	12,5	24,75	13,5	14,25	0,0475	0,01379	0,0030055
18	1440	8	8	15,84	9	15	0,01041667	0,01379	0,0014074

Fuente: Archivo propio.

Tabla 10. Resultados ensayo hidrometría 3

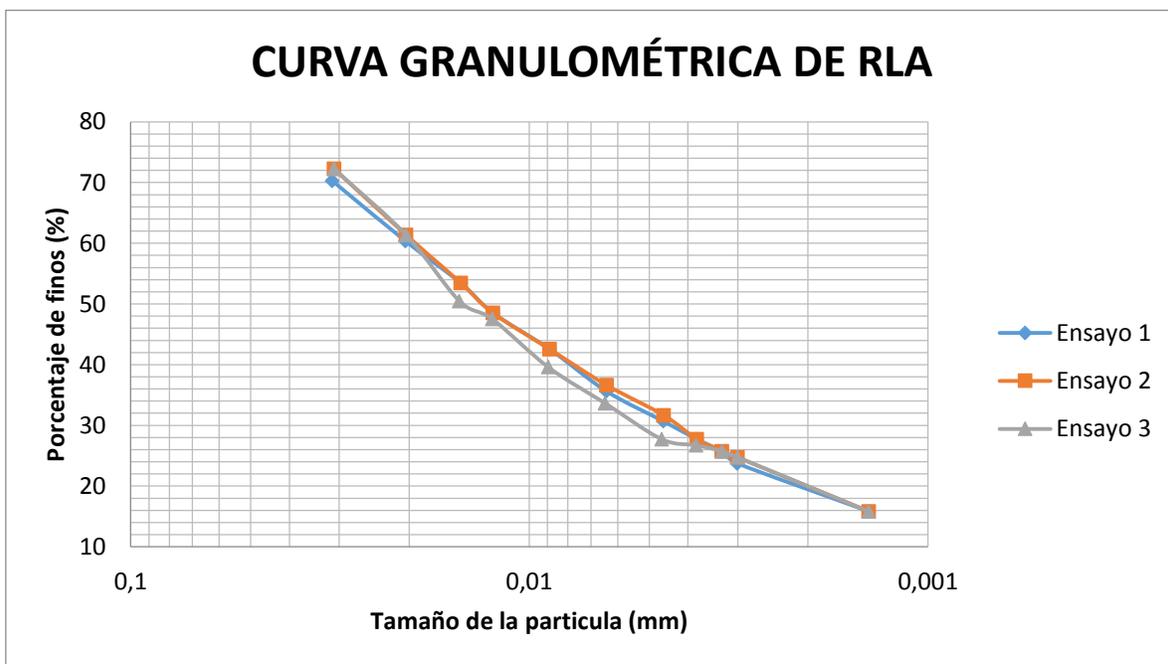
ENSAYO HIDROMETRÍA 3									
Temperatura °C	Tiempo (min)	R real	R corregido ceros y T	% mas fino	R menisco	L (cm) tabla 123-2	v = L/t (cm/min)	K tabla 123-3	D = K√L/t (mm)
19	2	36,5	36,5	72,27	37,5	10,3	5,15	0,01362	0,0309087
19	5	31	31	61,38	32	11,2	2,24	0,01362	0,0203845
19	10	25,5	25,5	50,49	26,5	12,1	1,21	0,01362	0,014982
19	15	24	24	47,52	25	12,4	0,82666667	0,01362	0,0123835
19	30	20	20	39,6	21	13	0,43333333	0,01362	0,0089658
19	60	17	17	33,66	18	13,5	0,225	0,01362	0,0064605
19	120	14	14	27,72	15	14	0,11666667	0,01362	0,0046521
19	180	13,5	13,5	26,73	14,5	14,1	0,07833333	0,01362	0,003812
18	250	13	13	25,74	14	14,2	0,0568	0,01379	0,0032865
18	300	12,5	12,5	24,75	13,5	14,25	0,0475	0,01379	0,0030055
18	1440	8	8	15,84	9	15	0,01041667	0,01379	0,0014074

Fuente: Archivo propio.

Considerando la reducción del tamaño de los residuos de ladrillo de arcilla, se realizó un proceso de trituración y molienda con el objetivo de adecuar el material a un tamaño de partícula pasante del tamiz #200 es decir, un tamaño de partícula igual o menor a $74\ \mu\text{m}$ ($0.074\ \text{mm}$) con el fin de obtener mayor reactividad debida al aumento de área específica.

El análisis granulométrico es un método utilizado para conocer la distribución granulométrica de un suelo cuyas partículas pasen por el tamiz N° 200, evitando la presencia de granos mayores ya que causan excesiva turbulencia en el fluido y de granos menores debido a que están sujetos a movimientos tipo Browniano (Fuerza de atracción y repulsión de las partículas).

Figura 12. Curva granulométrica de RLA



Fuente: Archivo propio.

Como lo indica la norma INV-E 123 se tomaron tres ensayos, a partir de la gráfica se puede evidenciar congruencia en los resultados con variables mínimas, por consiguiente no serán de consideración.

De acuerdo a los resultados obtenidos por el ensayo de granulometría por hidrómetro se puede evidenciar que el tamaño de partícula está entre $31\ \mu\text{m}$ y $1,4\ \mu\text{m}$; la adaptación del RLA para la obtención de un tamaño de partícula adecuado para garantizar la activación alcalina es óptimo, el rango de tamaño se considera

adecuado para la investigación puesto que existe mayor reactividad debido al incremento del área específica.

7.1.4 Ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Con el fin de conocer la composición química elemental del RLA (Tabla 10), se realizó la técnica de fluorescencia de rayos X de la muestra en polvo del RLA, desarrollada por el laboratorio de geociencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá.

Tabla 11. Composición química del RLA

Elemento y/o compuesto	RLA (% en peso)
SiO ₂	68,08%
Al ₂ O ₃	21,73%
Fe ₂ O ₃	6,03%
K ₂ O	1,59%
TiO ₂	0,93%
MgO	0,66%
Na ₂ O	0,27%
CaO	0,21%
P ₂ O ₅	0,14%
Ba	0,10%
SO ₃	0,06%
V	0,03%
MnO	0,03%
Zn	0,03%
Zr	0,03%
Ce	0,02%
Cr	139 ppm
Cl	129 ppm
Sr	113 ppm
Rb	90 ppm
Pb	63 ppm
Y	51 ppm
Cu	45 ppm
Nb	13 ppm

*Los valores en negrilla son informativos

Fuente: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Resultados composición química del RLA.

Los resultados del ensayo de FRX demuestran que el material precursor RLA es fuente potencial para la creación de geopolímeros por su alto contenido de aluminosilicatos (89,81%), característica principal de materiales precursores para la creación de geopolímeros según el estudio bibliográfico realizado.

7.1.5 Ensayo de Difracción de rayos X (DRX)

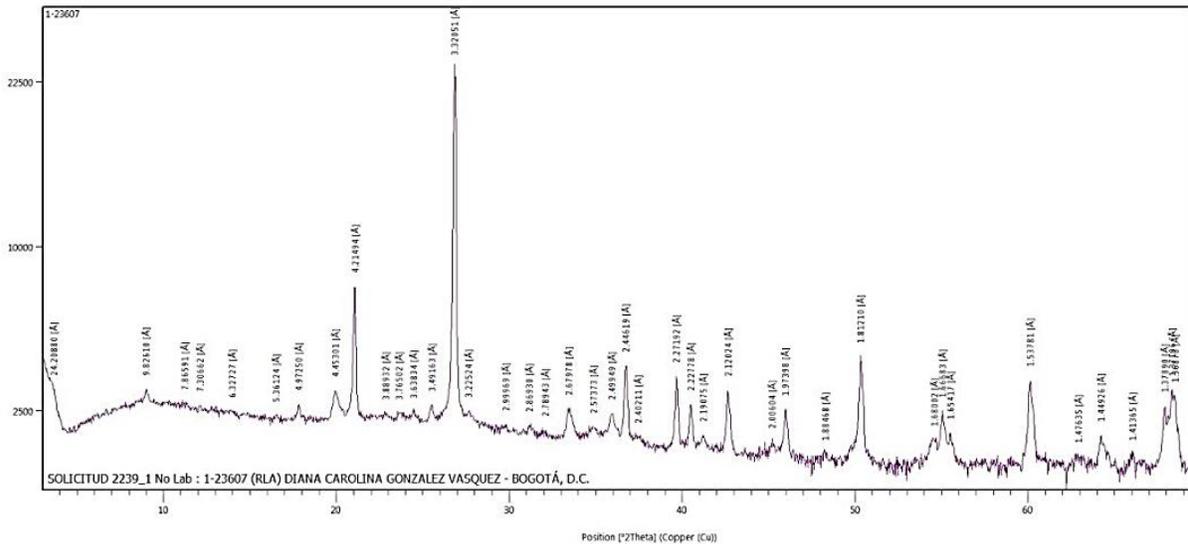
Con el objetivo de conocer las fases cristalinas y estructura del precursor RLA, en la figura 13 se observa los resultados del ensayo de Difracción de rayos X de la muestra en polvo del RLA, realizada por el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Tabla 12. Constitución RLA

CONSTITUCIÓN	
MICAS	1,53%
CAOLINITA	0,37%
CUARZO	94,37%
FELDESPATOS	0,85%
DOLOMITA	0,56%
HALITA	0,34%
HEMATITA	1,99%

Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Resultados mineralogía muestra total por DRX

Figura 13. Difractograma de rayos X de RLA



Fuente: INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. Resultados mineralogía muestra total por DRX

De acuerdo con el difractograma y la tabla 12 se evidencia que el residuo de ladrillo de arcilla RLA presenta una naturaleza semicristalina, así como la presencia de Cuarzo (SiO_2) como material dominante en un proporción de 94,37%. Los otros componentes cristalinos minoritarios identificados son: Hematita (Fe_2O_3) en 1,99%; Micas ($\text{AC}_{2-3}\text{T}_4\text{O}_{10}\text{X}_2$) en 1,53%; Feldespatos en 0,85%; Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ en 0,56%; Caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) en 0,37%; Halita (NaCl) en 0,34%.

7.2 SINTETIZACIÓN DEL MATERIAL GEOPOLIMÉRICO

7.2.1 Matriz de dosificación

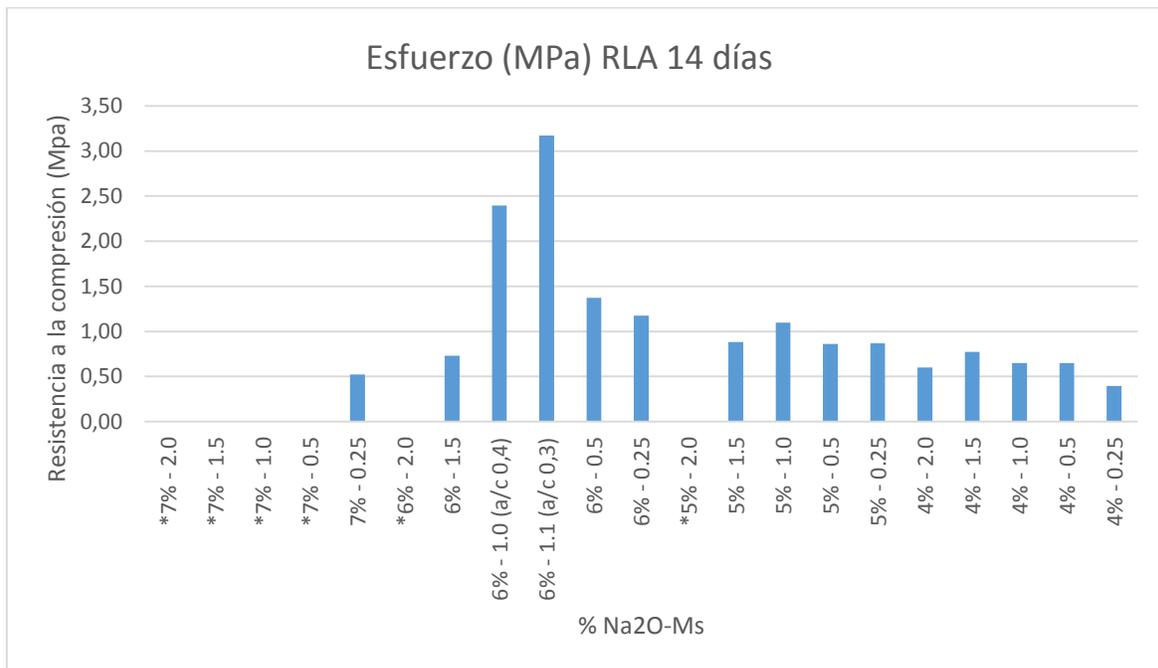
Esta fase se desarrolló con el fin de establecer una matriz a partir de diferentes dosificaciones de residuos de ladrillo de arcilla, hidróxido de sodio y silicato de sodio para posteriormente evaluar la resistencia a la compresión del material geopolimérico.

Se preparó la solución de Na_2O correspondiente a 10M (molar), ésta concentración utilizada durante toda la investigación, corresponde a la disolución de 400 gramos de hidróxido de sodio (NaOH) en agua destilada hasta completar un litro de solución.

Para la delimitación de la matriz se realizaron 20 muestras iniciales, en las cuales se tomó un rango de Na_2O entre 4% y 7% y Módulos de silicato entre 0,25 y 2,0;

inicialmente se usó una relación A/P de 0,4, en la cual las resistencias a los 14 días no superaron los 2,5 MPa como se muestra en la figura 14. La muestra que mayor resistencia a la compresión arrojó se volvió a sintetizar pero con relación A/P de 0,3 generando un aumento en su resistencia hasta los 3,2 MPa.

Figura 14. Esfuerzo RLA inicial



Fuente: Archivo propio.

Las muestras identificadas con (*) en la figura 14 presentaron fluidez y no alcanzaron consistencia para la falla a los 14 días, en relación con las muestras de concentraciones de 4% y 5% de Na₂O para su manejabilidad fue necesario adicionar agua hacia una proporción del 50% referente al total de los componentes, la cual disminuyó la resistencia del geopolímero.

En la sintetización de éstas primeras muestras se añadieron todos los componentes al tiempo a la mezcladora, lo cual generó una afectación al sistema ya que no permitía la reacción química del óxido de sodio con el silicato de sodio en primera instancia, puesto que el agua que se le agregaba disolvía las sustancias antes de su activación; esto a su vez disminuía notablemente la resistencia del geopolímero.

Por esta razón y en la búsqueda de optimizar el proceso de mezcla se optó inicialmente por hacer la disolución de activantes alcalinos y después agregarlos lentamente en el material precursor RLA para que éste se mezclara

homogéneamente, finalmente se le agregó agua adicional si se requería para su manejabilidad, este proceso es descrito con mayor claridad posteriormente.

Se realiza una delimitación de la matriz acorde a los resultados anteriormente mencionados, la activación alcalina del residuo de ladrillo de arcilla RLA se basó en la variación de Módulo de silicato Ms (Relación molar entre óxido de silicio y óxido de sodio: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) entre 0,5 y 1,5 y concentración en porcentaje de óxido de sodio Na_2O (porcentaje con respecto al contenido de RLA correspondiente a cada muestra) entre 6% y 9%.

En cuanto a la relación de agua y precursor (A/P) se procuró trabajar con la obtenida inicialmente, es decir sin adición de agua, sin embargo se adoptó una relación A/P variable para las muestras con baja manejabilidad y consistencia, aumentando el contenido de agua hasta alcanzar una trabajabilidad óptima y permitir la compactación de las muestras.

Adicionalmente se calcularon las relaciones molares de cada dosificación, entre las cuales se tuvieron en cuenta $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, la cual muestra la variación de silicato en las muestras teniendo en cuenta que el Al_2O_3 es constante debido a que solo es aportado por el RLA, además de las relaciones $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Es importante resaltar que los componentes de las anteriores relaciones están presentes en el RLA y en los activantes alcalinos. Se asignó a cada dosificación un número para su posterior identificación, enumerados del 1 al 12 (Tabla 13).

Tabla 13. Matriz dosificación geopolímero

CONCENTRACIÓN 6% Na₂O					
No. Dosificación	Ms	A/P	Relación molar		
			SiO₂ / Al₂O₃	Na₂O / SiO₂	H₂O / Na₂O
1	1,5	0,30	6,03	0,08	13,59
2	1,0	0,30	5,80	0,08	12,75
3	0,5	0,30	5,56	0,08	11,90
CONCENTRACIÓN 7% Na₂O					
No. Dosificación	Ms	A/P	Relación molar		
			SiO₂ / Al₂O₃	Na₂O / SiO₂	H₂O / Na₂O
4	1,5	0,30	6,15	0,09	13,59
5	1,0	0,29	5,87	0,09	12,75
6	0,5	0,27	5,60	0,10	11,90
CONCENTRACIÓN 8% Na₂O					
No. Dosificación	Ms	A/P	Relación molar		
			SiO₂ / Al₂O₃	Na₂O / SiO₂	H₂O / Na₂O
7	1,5	0,32	6,27	0,10	13,59
8	1,0	0,30	5,95	0,10	12,75
9	0,5	0,28	5,64	0,11	11,90
CONCENTRACIÓN 9% Na₂O					
No. Dosificación	Ms	A/P	Relación molar		
			SiO₂ / Al₂O₃	Na₂O / SiO₂	H₂O / Na₂O
10	1,5	0,36	6,38	0,11	13,59
11	1,0	0,33	6,03	0,11	12,75
12	0,5	0,31	5,68	0,12	11,90

Fuente: Archivo propio.

7.2.1.1 Determinación de la matriz de dosificación

A continuación se indican las ecuaciones implementadas para la determinación de la matriz de dosificación expuesta en la figura 13.

7.2.1.1.1 Módulo de silicato

El módulo de silicato es la relación molar entre óxido de silicio y óxido de sodio: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, representado de la siguiente manera:

$$Ms = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \text{ Ecuación (3)}$$

Donde,

SiO_2 : Óxido de silicio

Na_2O : Óxido de sodio

7.2.1.1.2 Concentración de porcentaje de óxido de sodio Na_2O

El porcentaje de óxido de sodio se determina con respecto al contenido total de RLA correspondiente a cada muestra. Seleccionando un rango de 6% al 9% de Na_2O a partir de revisión bibliográfica donde los rangos variaban de 4% al 12%.

7.2.1.1.3 Relación Agua y Precursor

La relación Agua y Precursor (A/P), toma como base el agua contenida en los activantes, hidróxido de sodio y silicato de sodio ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) y agua adicional que se incluyó con el fin de proporcionar manejabilidad en la fase de producción del geopolímero.

$$\text{Relación A/P} = \frac{\text{Agua presente en el geopolímero}}{\text{Contenido de RLA}} \text{ Ecuación (4)}$$

7.2.2 Síntesis de Geopolímero

Esta fase corresponde a la sintetización del material tipo geopolimérico, se siguió un mismo diseño para su fabricación con la finalidad de tener control de las variables en laboratorio y la optimización de la mezcla para cada dosificación teniendo en cuenta la manejabilidad y consistencia óptima. Este proceso se describe a continuación:

1. Pesar cantidad de residuos de ladrillo de arcilla, hidróxido de sodio, silicato de sodio y agua.

Figura 15. Cantidad de Material



Fuente: Archivo propio.

2. Mezclar en un recipiente las cantidades de activadores alcalinos (solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio) durante 5 minutos.

Figura 16. Mezcla de activadores alcalinos



Fuente: Archivo propio.

3. En la mezcladora se procede a agregar el contenido de RLA, se mezcla a velocidad (139RPM) por 30 segundos.
4. A continuación se agrega la mezcla de activadores alcalinos y agua lenta y constantemente a velocidad (139RPM), durante 1 minuto.
5. Se detiene la mezcladora por el lapso de 30 segundos durante el cual con el raspador, se pasa por las paredes para llevar al fondo del recipiente el material adherido.
6. Se mezcla a velocidad (285 RPM), durante 1 minuto.

Figura 17. Mezcla Geopolímero



Fuente: Archivo propio.

7. El geopolímero se compactó en moldes de dimensiones de 50X50 mm (Figura 18) en 3 capas, cada capa se apisono con 64 golpes en 8 etapas de 8 golpes adyacentes en cada etapa se golpeó siguiendo una dirección perpendicular a los del anterior como es descrito en la norma NTC220 (Resistencia cubos morteros) asegurando el llenado uniforme de cada compartimiento y evitando la presencia de vacíos en el material.

De acuerdo con el procedimiento descrito anteriormente y la matriz de dosificación definida se procedió a la fabricación del material tipo geopolimérico, para cada dosificación se realizaron 9 probetas (3 puntos de referencia para cada día de evaluación de resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días) realizando así en total 108 probetas.

Figura 18. Moldes para las probetas.



Fuente: Archivo propio.

Figura 19. Llenado de probetas



Fuente: Archivo propio.

7.3 DETERMINACIÓN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL GEOPOLÍMERO SINTETIZADO A DIFERENTES TIEMPOS DE CURADO

En esta fase se evaluó la resistencia a la compresión de cada probeta de la matriz de dosificación a tiempos de curado de 3, 7 y 28 días, de acuerdo a la tabla 13, los tres puntos de referencia para cada dosificación y tiempo de curado se promediaron obteniendo un único valor para cada muestra, como se evidencia en las tablas 14, 15 y 16, es válido aclarar que para algunas muestras no se obtuvieron datos a los 3 días puesto que aún conservaban un estado líquido.

Tabla 14. Datos fallas a los 3 días del geopolímero

Falla a 3 Días				
No. Dosificación	P. 1 - Fuerza (KN)	P. 2 - Fuerza (KN)	P. 3 - Fuerza (KN)	Prom. - Fuerza (KN)
1	1,28	1,21	1,27	1,25
2	3,63	2,59	2,68	2,97
3	7,24	8,30	7,60	7,71
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,60	0,68	0,58	0,62
6	10,25	10,95	9,70	10,30
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,20	1,43	1,33	1,32
9	9,96	8,24	11,58	9,93
10	0,00	0,00	0,00	0,00
11	3,29	2,88	2,58	2,92
12	37,00	35,98	37,13	36,70

*P: Probeta, Prom: Promedio

Fuente: Archivo propio.

Tabla 15. Datos fallas a los 7 días del geopolímero

Falla a 7 Días				
No. Dosificación	P. 1 - Fuerza (KN)	P. 2 - Fuerza (KN)	P. 3 - Fuerza (KN)	Prom. - Fuerza (KN)
1	8,22	8,13	10,83	9,06
2	21,67	24,79	19,80	22,09
3	6,91	5,25	6,37	6,18
4	0,47	0,43	0,45	0,45
5	1,09	0,95	1,04	1,03
6	8,22	7,23	8,36	7,94
7	0,60	0,62	0,61	0,61
8	1,27	1,09	1,17	1,18
9	9,25	13,28	8,38	10,30
10	0,00	0,00	0,00	0,00
11	1,89	1,98	1,48	1,78
12	18,93	16,79	19,04	18,25

*P: Probeta, Prom: Promedio

Fuente: Archivo propio.

Tabla 16. Datos fallas a los 28 días del geopolímero

28 Días				
No. Dosificación	P. 1 - Fuerza (KN)	P. 2 - Fuerza (KN)	P. 3 - Fuerza (KN)	Prom. - Fuerza (KN)
1	59,6	58,7	83,7	67,33
2	91,1	85,2	80,9	85,73
3	9,31	10,07	8,17	9,18
4	32,16	33,25	34,68	33,36
5	45,54	46,65	47,02	46,40
6	16,78	16,13	16,69	16,53
7	23,07	23,87	23,95	23,63
8	35,99	36,45	36,64	36,36
9	18,65	18,03	18,4	18,36
10	9,11	9,15	8,69	8,98
11	28,96	27,73	29,98	28,89
12	24,65	24,79	26,31	25,25

*P: Probeta, Prom: Promedio

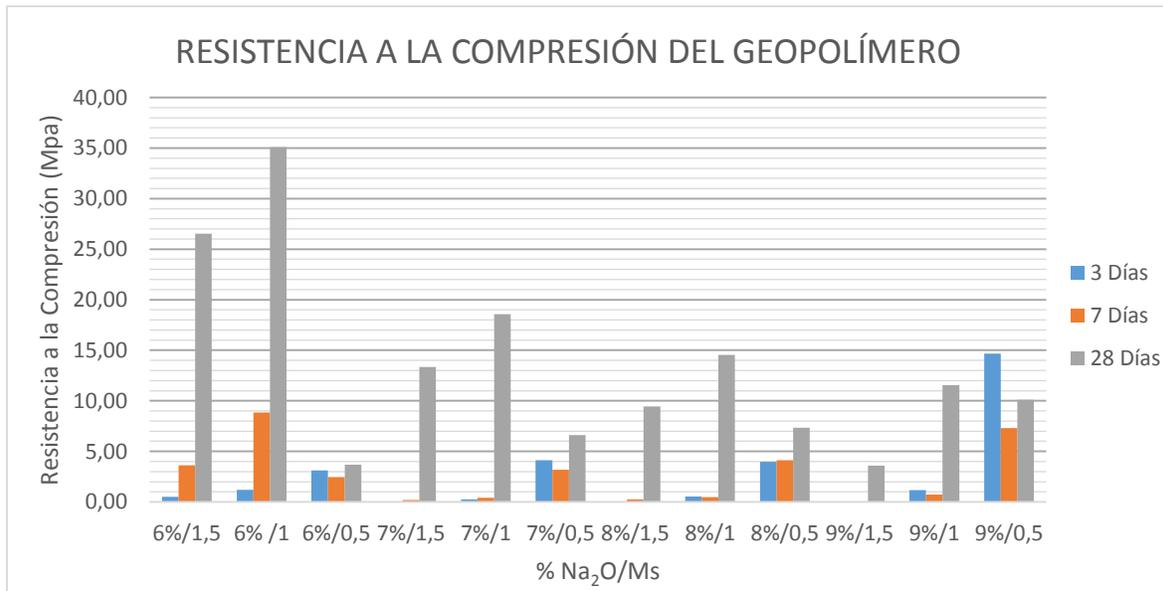
Fuente: Archivo propio.

Tabla 17. Resumen de resistencias a la compresión del geopolímero activado alcalinamente (NaOH + Na₂SiO₃)

No. Dosificación	% Na ₂ O/Ms	3 Días		7 Días		28 Días	
		Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)
1	6%/1,5	1,25	0,50	9,06	3,62	66,33	26,53
2	6% /1	2,97	1,19	22,09	8,83	87,73	35,09
3	6%/0,5	7,77	3,11	6,18	2,47	9,18	3,67
4	7%/1,5	0,00	0,00	0,45	0,18	33,36	13,34
5	7%/1	0,62	0,25	1,03	0,41	46,40	18,56
6	7%/0,5	10,30	4,12	7,94	3,17	16,53	6,61
7	8%/1,5	0,00	0,00	0,61	0,24	23,63	9,45
8	8%/1	1,32	0,53	1,18	0,47	36,36	14,54
9	8%/0,5	9,93	3,97	10,30	4,12	18,36	7,34
10	9%/1,5	0,00	0,00	0,00	0,00	8,98	3,59
11	9%/1	2,92	1,17	1,78	0,71	28,89	11,56
12	9%/0,5	36,70	14,68	18,25	7,30	25,25	10,10

Fuente: Archivo propio.

Figura 20. Gráfico resistencia a la compresión del geopolímero activado alcalinamente (NaOH + Na₂SiO₃)



Fuente: Archivo propio.

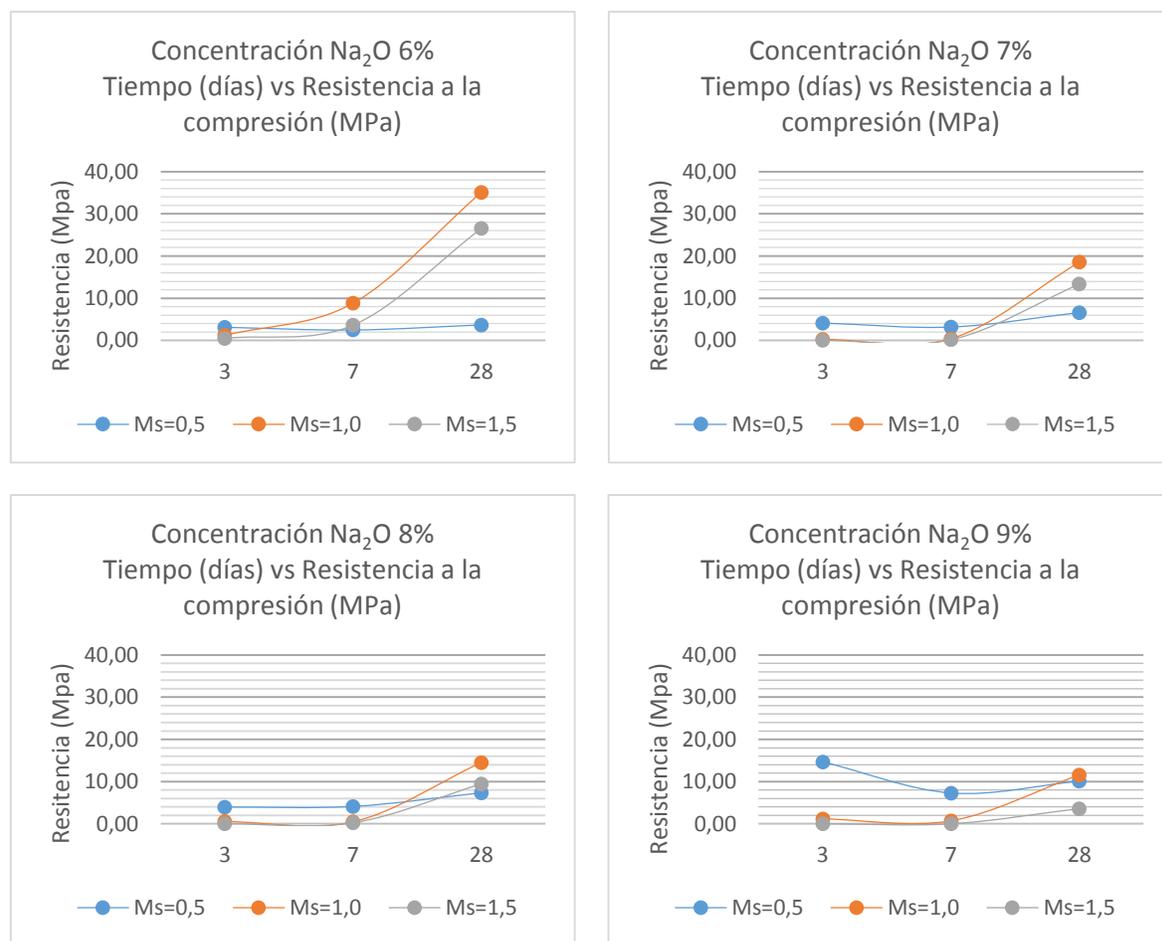
Los resultados de resistencia a la compresión obtenidos a 3, 7 y 28 días de curado para cada mezcla realizada permitieron la obtención del gráfico presentado anteriormente (Figura 20). En este se evidencia el comportamiento de la resistencia a la compresión en función del módulo de silicato y la concentración de Na₂O, siguiendo el diseño experimental descrito en el apartado 7.2.2., la explicación a

detalle del comportamiento del geopolímero será explicado mediante tendencias en gráficas con los datos de la tabla 17.

7.3.1 Comportamiento resistencia a la compresión en función del tiempo de curado

Se evaluó el comportamiento de la resistencia a la compresión en función del tiempo de curado a los 3, 7 y 28 días con variación de la concentración de Na_2O entre 6% y 9% y Modulo de silicato entre 0,5 y 1,5, los resultados se ilustran a continuación en la figura 21.

Figura 21. Gráficas de resistencia a la compresión en función del Módulo de Silicato (Ms)



Fuente: Archivo propio.

En lo que respecta a la influencia del tiempo de curado a los 3, 7 y 28 días del sistema geopolimérico, es posible observar según las figuras 19 y 20, como la

resistencia a edades tempranas del geopolímero (3 y 7 días) son muy bajas e inestables, depende principalmente de la consistencia inicial de la mezcla geopolimérica y su variación durante el proceso de geopolimerización. Evidenciándose en algunos casos disminución de la resistencia a los 7 días con respecto al registro de los 3 días y posteriormente su aumento a los 28 días. Este comportamiento puede estar influenciado por el tiempo que toma en llevarse a cabo el proceso de geopolimerización y el consumo o liberación de agua durante sus diferentes fases.

La primera fase del proceso de geopolimerización corresponde a una disolución del material precursor sólido rico en aluminosilicatos desde su superficie mediante hidrólisis alcalina, llevando a cabo la liberación de aluminatos y silicatos en forma de monómeros y creando una solución sobresaturada de aluminosilicatos, en esta fase se produce un consumo de agua y por lo tanto la consistencia de la mezcla geopolimérica podría ser mayor a edades tempranas. La segunda fase da lugar a la formación de un gel, mediante la generación de grandes redes de oligómeros por condensación de la solución sobresaturada de aluminosilicatos, este proceso libera el agua consumida nominalmente durante la disolución, el tiempo para la generación de un gel continuo depende de las propiedades del material precursor y la solución alcalina, llegando a casos en que los sistemas no se gelifiquen, en esta fase se podrían tener consistencias de mezclas geopoliméricas más fluidas a edades mayores. En la tercera fase se produce un aumento de las conexiones entre las cadenas, debido a un proceso de reorganización de los geles, dando lugar a una estructura tridimensional de aluminosilicato denominada geopolímero. El tiempo para que se llevan a cabo estas fases dependen principalmente de las propiedades del material precursor y las soluciones activantes.

Es así, como se puede apreciar que el proceso de geopolimerización para las muestras estudiadas adquieren un equilibrio, evaluada en función de su resistencia a la compresión, para los cuerpos de prueba evaluados a los 28 días e incluso para tiempos superiores a este, teniendo en cuenta la consistencia de algunas muestras observadas a los 28 días. Para las edades de 3 y 7 días se observa una fluctuación de la resistencia a la compresión y de la consistencia de las muestras en el tiempo, posiblemente asociadas al proceso de geopolimerización y el consumo o liberación de agua en sus diferentes fases, identificándose, de forma cualitativa, que algunas muestras ensayadas a los 3 días (Figura 22) presentaron una mayor consistencia que las muestras ensayadas a los 7 días, principalmente en los geopolímeros activados con concentraciones de Na_2O mayores al 7%, incidiendo esto directamente en los valores de resistencia.

Figura 22. Geopolímero a 3, 7 y 28 días de curado respectivamente

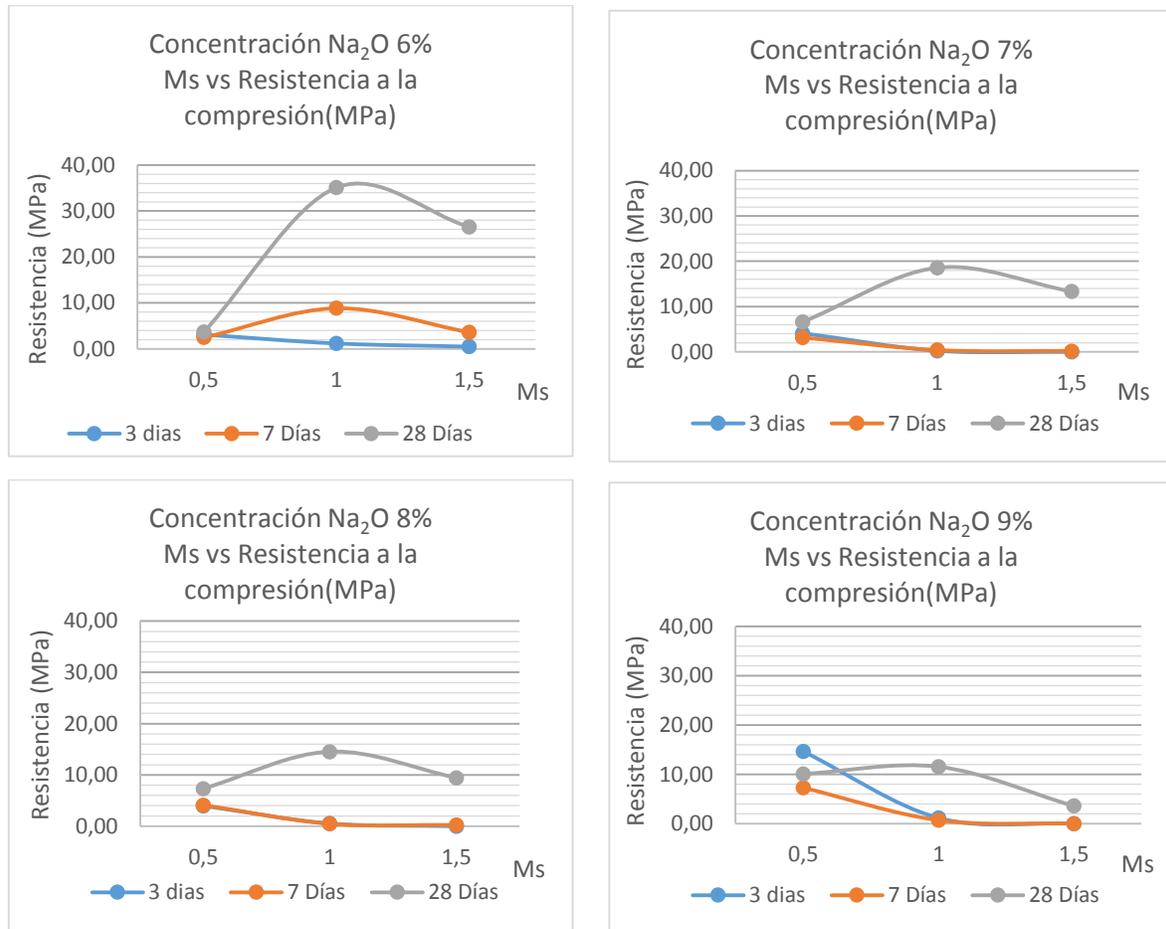


Fuente: archivo propio

7.3.2 Comportamiento resistencia a la compresión en función del Módulo de Silicato (Ms)

Para evaluar el comportamiento de la resistencia a la compresión en función del Módulo de silicato, se realizaron graficas que permitieran analizar su comportamiento para tiempos de curado de 3, 7 y 28 días con variación en porcentaje de la concentración de Na_2O entre 6% al 9%; los resultados se ilustran a continuación en la figura 23.

Figura 23. Gráficas de resistencia a la compresión para los diferentes módulos de silicato (Ms) de cada concentración de Na₂O



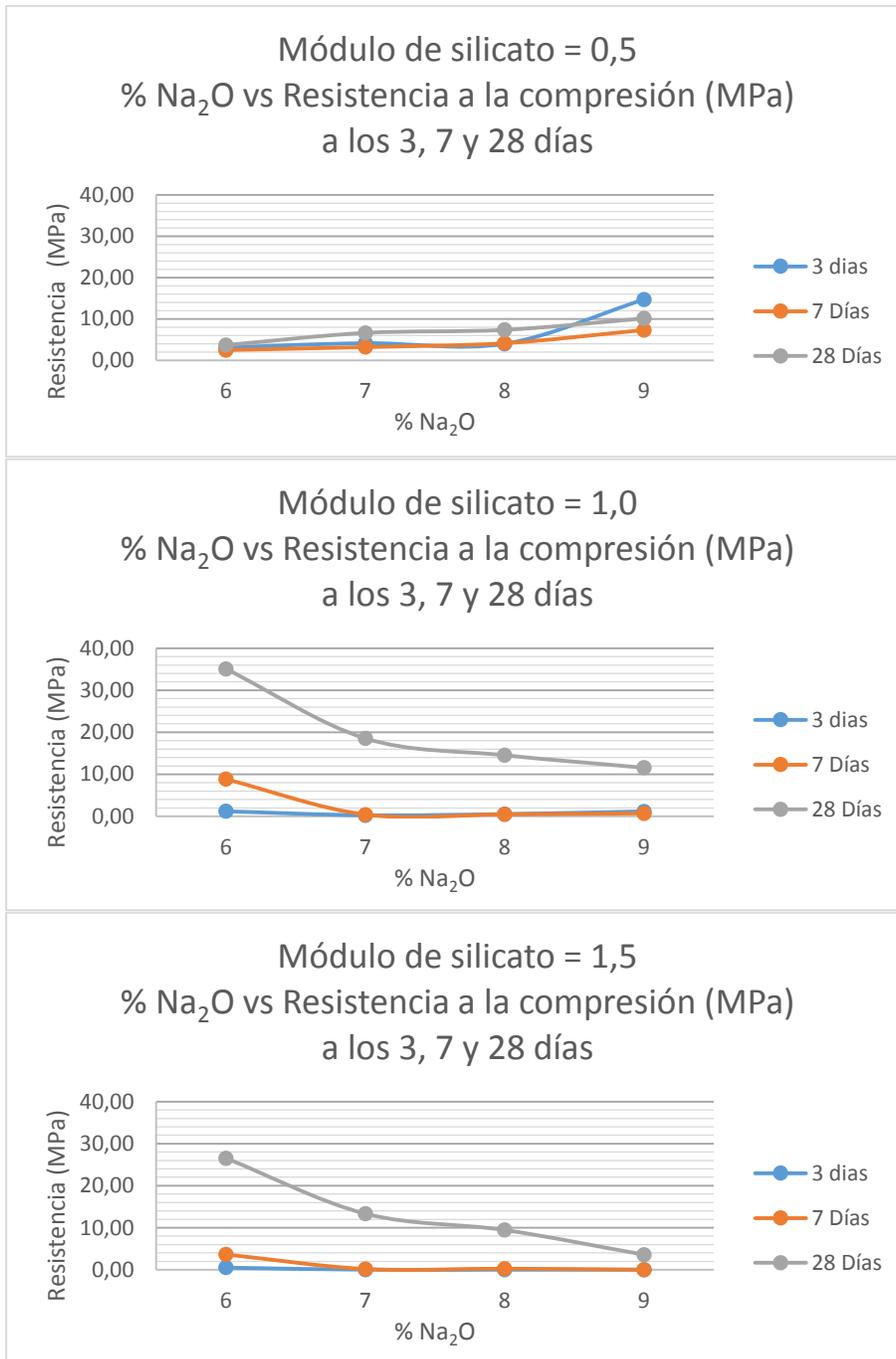
Fuente: Archivo propio.

Se evidencia en la figura 23, de forma generalizada, un aumento en la resistencia a la compresión para aquellas muestras sintetizadas con un módulo de silicato igual a la unidad (Ms = 1,0) independientemente del porcentaje de concentración de Na₂O, esto se debe a que con un Ms de 0,5 las muestras son demasiado secas y poco manejables, por el contrario con un Ms de 1,5 se obtienen mezclas geopoliméricas más fluidas.

7.3.3 Comportamiento resistencia a la compresión en función de la concentración de Na₂O

En lo que respecta a la evaluación de la influencia de las concentraciones de Na₂O en la resistencia a la compresión, se realizó las gráficas mostradas a continuación en la figura 24.

Figura 24. Gráficas de resistencia a la compresión en función de la concentración de Na₂O



Fuente: Archivo propio.

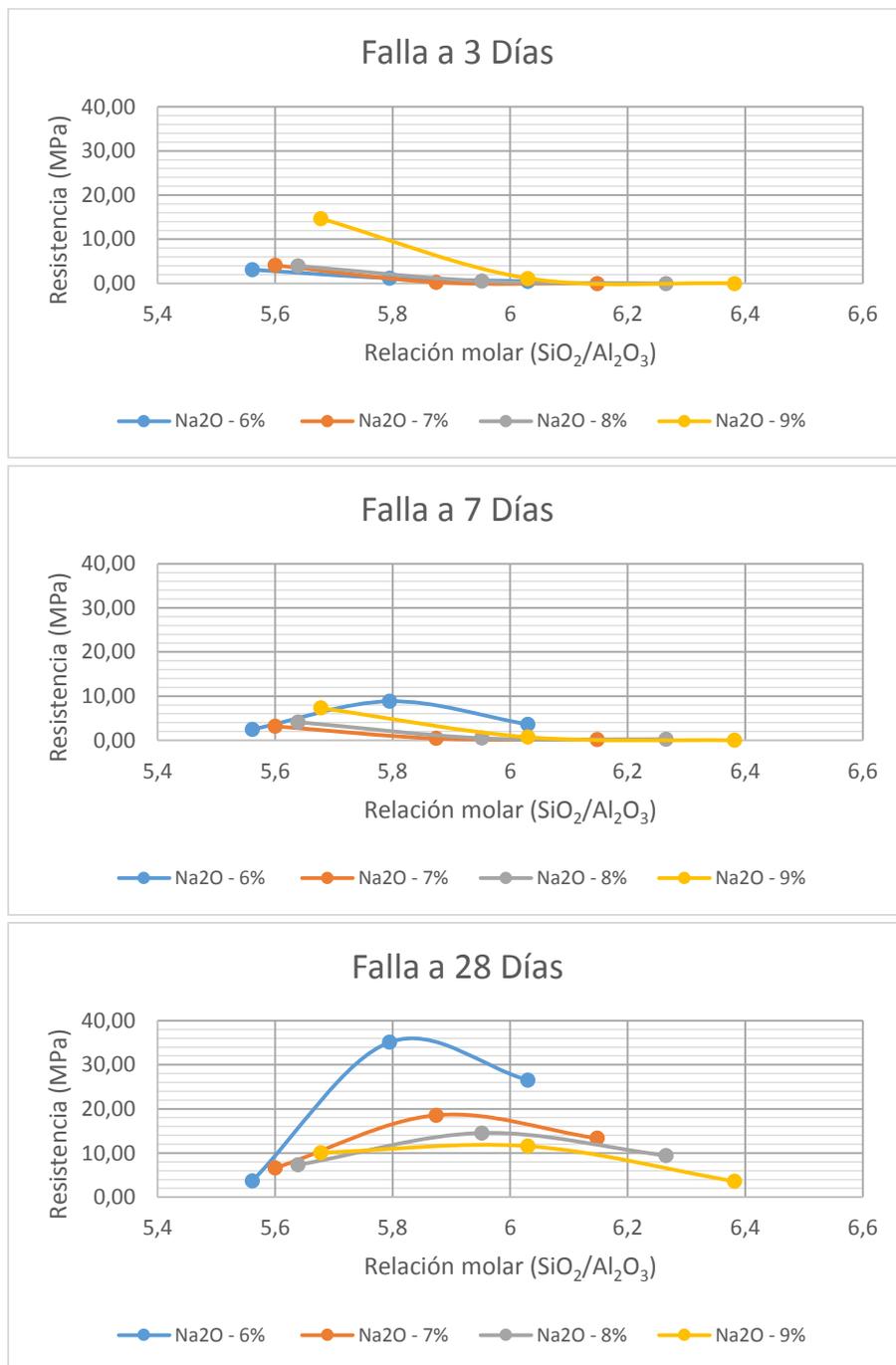
En la figura 24 se puede observar que a medida que aumenta la concentración Na_2O se ve una disminución en la resistencia para los casos de Ms de 1,0 y 1,5, puesto que estas muestras tienen mayor contenido de Na_2SiO_3 y por ende una consistencia más fluida; para el Ms de 0,5 se presenta un aumento de resistencia a medida que aumenta la concentración Na_2O este efecto se respalda en el proceso de geopolimerización pues el hidróxido de sodio contribuye a la solubilidad del aluminosilicato y por lo tanto al aumento de resistencia a la compresión. La concentración de Na_2O debe ser suficiente para equilibrar las cargas de Al y Si tetraédricos³⁴. Por lo cual la resistencia del geopolímero no solamente depende de las concentraciones de Na_2O y SiO_2 , también es función de la consistencia de la mezcla y su influencia en el proceso de geopolimerización.

7.3.4 Comportamiento resistencia a la compresión en función a la relación molar ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)

A continuación se ilustra en la figura 25 el comportamiento de la resistencia a la compresión del geopolímero para la relación molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, para los tiempos de curado 3, 7 y 28 días.

³⁴ MUNERA CANABAL, Jorge Alexander y MULFORD CARVAJAL, Alexandra Jimena. Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de materiales. Cali: Universidad Del Valle. Facultad de Ingeniería, 2015. P. 33

Figura 25. Gráficas de Concentración Na₂O respecto a la relación molar (SiO₂/Al₂O₃) y la resistencia a la compresión para tiempos de curado (3, 7 y 28 días)



Fuente: Archivo propio.

Con respecto a la figura 25 se puede analizar que el aumento de SiO₂ muestra a los 28 días una relación óptima adquiriendo mayor resistencia, este valor está alrededor

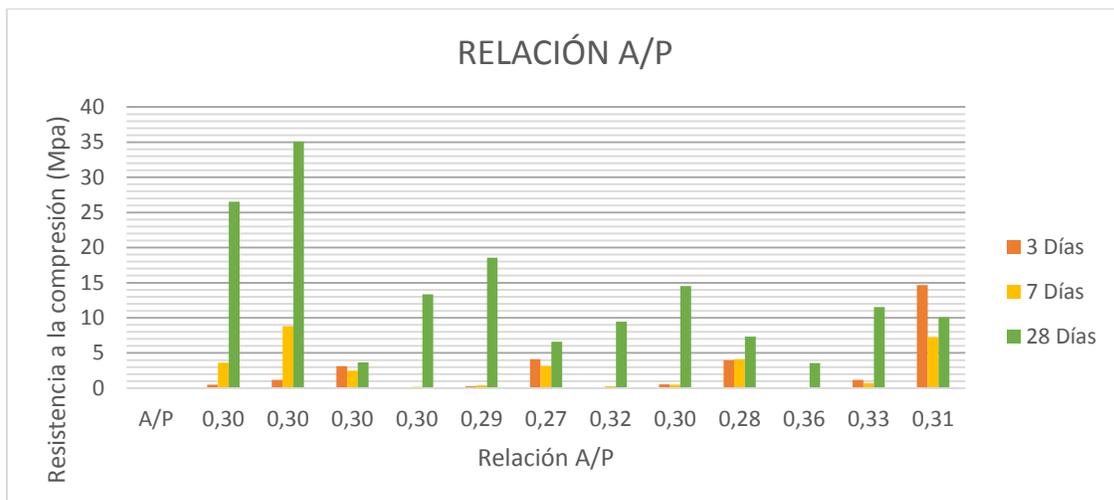
de 5,8 de relación molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, cabe aclarar cómo se mencionó anteriormente que la incidencia del Al_2O_3 no varía directamente en la resistencia del geopolímero puesto que es constante al solo estar presente en el RLA.

Adicionalmente entre los 3 y 7 días al aumentar la relación molar no se ve aumento en la resistencia pues sus valores son muy bajos, sin embargo a los 28 días estos tienen un incremento notable hasta 35,09 MPa.

7.3.5 Análisis relación A/P

Durante la síntesis del geopolímero un aspecto a considerar fue la relación A/P (agua/precursor) y el efecto que esta relación tiene en la manejabilidad. La relación A/P vario entre rangos de 0,27 y 0,36 como se ilustra en la figura 26.

Figura 26. Relación A/P



Fuente: Archivo propio

En consideración a los resultados anteriores y con base a la variable de respuesta de resistencia a la compresión es posible observar que una disminución de la relación A/P afecta notoriamente la resistencia puesto que una pasta poco fluida carece de manejabilidad generando porosidad (Figura 27) por su dificultad de compactar, esta propiedad a su vez tiende a fracturar internamente el material geopolimérico. Así mismo, se evidencia que un aumento de la relación A/P, tiende a incrementar la manejabilidad, no obstante tiende a disminuir la resistencia a la compresión. De acuerdo a la figura anterior es posible definir que la relación A/P óptima es de 0,3.

Figura 27. Porosidad en las probetas de geopolímero

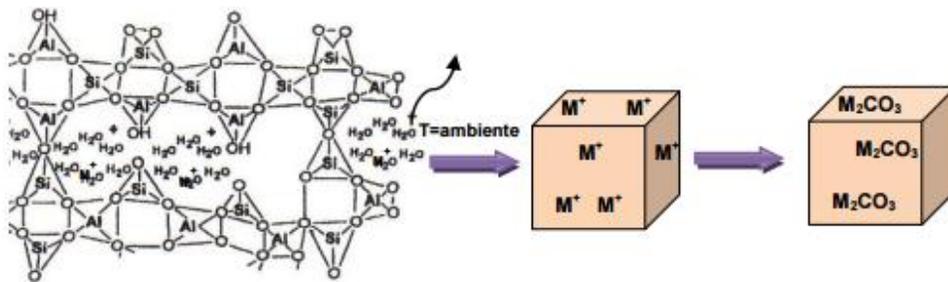


Fuente: Archivo propio.

7.3.6 Análisis efecto de carbonatación

El efecto de carbonatación se da en las muestras que presentan cantidades excesivas de álcalis, éstos reaccionan con el CO_2 de la atmósfera formando carbonatos, la carbonatación (Figura 28) ocurre cuando existe pérdida de agua en la superficie del material y el catión M^+ queda libre e interactúa con el CO_2 del medio ambiente formando carbonatos del metal³⁵ en este caso Na^+ o K^+ , como es el caso de la dosificación número 3 (Figura 29).

Figura 28. Esquema proceso de carbonatación



Fuente: BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores.

³⁵ GARCÍA, Gabriela. Materiales geopoliméricos de Ceniza Volante Activados con Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio. Tesis de Maestría. CINVESTAV, Saltillo, 2006. Citado por BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2011. 17-18 p.

Figura 29. Proceso de carbonatación en probetas de geopolímero



Fuente: Archivo propio.

7.3.7 Geopolímero óptimo en función a la resistencia a la compresión

En consideración a la evaluación de la resistencia a la compresión de un geopolímero creado a partir de residuos de ladrillo de arcilla, activado alcalinamente con soluciones de hidróxido de sodio y silicato de sodio, el geopolímero que presenta mejor comportamiento mecánico es el de concentración $\text{Na}_2\text{O}=6\%$ y $M_s=1,0$ en relación a los valores máximos encontrados. Debido a la resistencia alcanzada este material geopolimérico es potencialmente óptimo para su uso en la industria de la construcción, por su origen de tipo arcilloso conviene su aprovechamiento en la estabilización de suelos debido a la naturaleza de los dos materiales proporcionando mayor reacción entre estos.

8. CONCLUSIONES

Se caracterizó física y mineralógicamente el RLA, donde se evidenció que los residuos de ladrillo de arcilla tomados de la sabana de Bogotá son fuente potencial para la creación de materiales tipo geopolimérico, ya que el rango de tamaño de partículas obtenido en la hidrometría es apto puesto que existe mayor reactividad debido al incremento del área específica; por otra parte, su composición química elemental, las fases y porcentaje de contenido amorfo son características de materiales ricos en aluminosilicatos, los cuáles son la base del geopolímero.

Se sintetizó un material geopolimérico a partir de una matriz de dosificación planteada, en ella se tuvieron en cuenta las variaciones de hidróxido de sodio, silicato de sodio y agua. El proceso para la sintetización de éste se tomó arbitrariamente con base a la experiencia en el laboratorio, observando el comportamiento del material y el tiempo en que se demoraba en formar una masa compacta sin que esta se secase rápidamente.

Se determinó la resistencia a la compresión de cada una de las probetas propuestas en la matriz de dosificación a diferentes tiempos de curado, algunas de éstas probetas no pudieron ser falladas en la máquina universal a los 3 días debido a que por su alto contenido de humedad no permitían ser desmoldadas. Se tuvieron rangos de resistencias para los 3 días entre 0 MPa y 14,68 MPa, a los 7 días entre 0 MPa y 8,83 MPa y a los 28 días entre 0,82 MPa y 35,09 MPa.

Finalmente, el desarrollo de la investigación permitió evaluar la resistencia a la compresión de un geopolímero creado a partir de residuos de ladrillo de arcilla, activado alcalinamente con hidróxido de sodio y silicato de sodio, donde se demuestra que el material precursor RLA de origen arcilloso es adecuado para la creación de un geopolímero de uso ingenieril por su buen comportamiento mecánico. El RLA se encuentra fácilmente en las demoliciones de construcciones, canteras de fabricación de ladrillo, siendo este un recurso no aprovechado actualmente. La dosificación que mejores resultados dio fue la activación alcalina de 1,0 como módulo de silicato y 6% de concentración Na_2O , con ésta dosificación se proporcionó una resistencia a la compresión a los 28 días de 35,09 MPa, superando este valor a la de un concreto portland en el mismo tiempo que es de 21 MPa.

9. RECOMENDACIONES

Este tipo de investigaciones contribuyen a posteriores estudios sobre el aprovechamiento de residuos y construcción sostenible, encaminado a la creación de materiales que contribuyan a una mejor calidad ambiental promoviendo la disminución de extracción de recursos naturales, gasto energético, contaminación del aire con gases efecto invernadero y no menos importante, fomentar el uso de residuos del sector de la construcción para reincorporarlos en la cadena productiva de los materiales de la construcción.

Es así que a partir de esta investigación se dan las siguientes recomendaciones:

- Evaluar la durabilidad del geopolímero a través del tiempo, se sugiere sumergir en agua por determinados días y evaluar su comportamiento frente a este cambio.
- Evaluar la durabilidad del geopolímero llevándolo a secado por horno por determinado tiempo y evaluar su comportamiento frente a este cambio.
- Evaluar el volumen de porosidad del geopolímero, ya que este factor puede influir en la resistencia.
- Identificar el cambio de masa y variación de la longitud de las probetas al ser sumergidas en soluciones de ácidos y sulfatos para posteriormente reevaluar su resistencia a la compresión frente a ataques químicos.
- Sintetizar el geopolímero a partir de las resistencias más altas obtenidas en la presente investigación y evaluar la resistencia a la compresión en tiempos posteriores (90 y 120 días), puesto que se desconoce el tiempo en el cual adquiere la totalidad de resistencia.
- Sintetizar el geopolímero con adición de una fuente significativa de calcio o material puzolánico que permita la reacción con el agua y así garantice un aumento de la resistencia puesto que el agua para este sistema afecta directamente el comportamiento mecánico.

REFERENCIAS

ACEVEDO AGUDELO, Harlem et al. Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. [En línea]. 2012. Vol. 15. [Citado en 01 agosto de 2017]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/xb4NyR>>.

BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2011. 114 p.

CASTAÑO, Jesús O., et al. Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. [En línea]. Octubre – Diciembre 2013. Vol. 17 [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 121 -129. Disponible en internet: <<https://goo.gl/TInB0q>>.

CORONADO LIZARAZO, Fabiola Mariana y FLOREZ ARIAS, Paola Andrea. Estudio comparativo de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros utilizando granito y residuos de la industria ladrillera como materias primas alternativas al cemento portland tipo I. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, 2010. 81 p.

DAVIDOVITS J. et al. Coal fly ash-slag-based geopolymers: Microstructure and metal leaching. [En línea]. Julio 2009. Volumen 166. [Citado en 7 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <<https://goo.gl/5KWbDv>>. Citado por MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina. Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial del cemento portland. Tesis Magister en Ingeniería ambiental. Palmira: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería y Administración. Grupo de Investigación: Materiales y Medio Ambiente (GIMMA), 2015. 140 p.

FEDERACIÓN INTERAMERICANA DEL CEMENTO. Informe Estadístico 2013. [En línea]. 2013. [Citado en 1 de agosto de 2017]. pp. 32. Disponible en internet: <<https://goo.gl/qmwm4z>>.

GARCÍA, Gabriela. Materiales geopoliméricos de Ceniza Volante Activados con Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio. Tesis de Maestría. CINVESTAV, Saltillo, 2006. Citado por BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de

estudios de posgrado, 2011. 17-18 p. HERNANDEZ SAMPIERI, Roberto. Metodología de la investigación. Sexta edición. México D.F: McGRAW-HILL, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0.

GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. pp. 10 – 11.

GLUKHOVSKY, V. Soil silicate articles and structures. 1967. [Citado en 01 de agosto de 2017]. Citado por GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. pp. 10 – 11.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado. NTC – 220. Bogotá. 1198. 13 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua. INV-E – 128. 2 ed. Bogotá. 2015. 15 p.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. INV-E – 123. 2 ed. Bogotá. 2015. 22 p.

LERMA, Héctor. Metodología de la investigación. Propuesta, anteproyecto y proyecto. Cuarta Edición. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2009.

M.F. Zawrah, et al. Recycling and utilization assessment of waste fired clay bricks (Grog) with granulated blast-furnace slag for geopolymer production. Process Safety and Environmental Protection. [En línea]. Septiembre 2016. Volume 103, Part A [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 237- 251. Disponible en internet:<<http://goo.gl/chk0TP>>.

MANTILLA, H.A., Síntesis y caracterización de las propiedades físicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica, 2010.

MUNERA CANABAL, Jorge Alexander y MULFORD CARVAJAL, Alexandra Jimena. Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero.

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de materiales. Cali: Universidad Del Valle. Facultad de Ingeniería, 2015. p. 36.

PERERA, D.S., UCHIDA, O., VANCE, E.R. et al. Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. . [En línea]. Mayo 2007. Volumen 42. [Citado en 30 de septiembre de 2016]. pp 3099–3106. Disponible en internet: <<https://goo.gl/sRTiSI>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

PROVIS, J. Geopolymers Structure, processing, properties and industrial applications. 2009. [Citado en 01 de agosto de 2017]. Citado por GONZÁLEZ ACUÑA, Rolando Enrique. Caracterización De Geopolímeros Base Ceniza Volante y Escoria Granulada de Alto Horno. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2012. p.p. 10 – 11.

RAHIER, H., WASTIELS, J., BIESEMANS, M. et al. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers. [En línea]. Mayo 2007. Volumen 42. [Citado en 30 de septiembre de 2016]. pp 2982–2996. Disponible en internet: <<https://goo.gl/qy10BA>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <<https://goo.gl/2sEVDn>>.

SAEED Ahmari, et al. Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. Construction and Building Materials. [En línea]. Octubre 2012. Volume 35 [Citado en 7 septiembre de 2016]. pp. 718–729. Disponible en internet: <<https://goo.gl/xKEEwa>>.

SHVARZMAN A. et al. The effect of Dehydroxylation/Amorphization Degree on Pozzolanic Activity of Kaolinite.2003. Volumen 33. Citado por BALANDRÁN TORRES, María de Lourdes. Síntesis De Geopolímeros Mediante Diferentes Precursores. Tesis Maestría en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad en materiales. Monterrey: Universidad autónoma de nuevo león. Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. División de estudios de posgrado, 2011. 114 p.

UNIVERSIDAD DE ALICANTE. [En línea]. [Citado en 7 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <https://goo.gl/ESseVS>

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. [En línea]. [Citado en 23 de septiembre de 2016]. Disponible en internet: <https://goo.gl/xPuDLO>

WANG, M, et al. Microstructural and mechanical characterization of fly ash cenosphere/metakaolin-based geopolymeric composites. *Ceramics International*. [En línea]. 2011. [Citado en 29 septiembre de 2016]. pp.1661–1666. Disponible en internet: <https://goo.gl/yLVhv8>.

YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <https://goo.gl/2sEVDn> >.

ZHANG YUNSHENG, Sun Wei, Li Zongjin. Composition design and microstructural characterization of calcined kaolin-based geopolymer cement. [En línea]. Febrero 2010. Volume 47, [Citado en 30 septiembre de 2016]. pp. 271- 275. Disponible en internet: <https://goo.gl/NmpZdP>>. Citado por YUN-MING, Liew, et al. Progress in materials science. Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. [En línea]. Julio 2016. Vol. 83. [Citado en 28 septiembre de 2016]. pp. 595 - 629. Disponible en internet: <https://goo.gl/2sEVDn>>.