

Desarrollo de morteros de construcción con geopolímeros obtenidos a partir de suelos degradados por la minería en El Bajo Cauca Antioquia

Development of construction mortars with geopolymers obtained from soils degraded by mining in Bajo Cauca Antioquia

Julián Lenis-Rodas^{1a,2}, Álvaro Aleán-Vásquez^{1b}, Faber Villa-Cardona³,
Juan Córdoba-Castro⁴, Maryory Gómez-Botero⁵

¹ Grupo de investigación Minero Ambiental de El Bagre (GIMAB), Centro de Formación Minero Ambiental (CFMA), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia. Orcid: 0000-0002-6831-4992^a. Correos electrónicos: jalenis@sena.edu.co^a, alaleanv@sena.edu.co^b

² Grupo de Investigación en Ingeniería Sostenible (GIS), Facultad de Ingeniería, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín, Colombia.

³ Colegio Mayor de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0001-8683-8063. Correo electrónico: faber.villa@colmayor.edu.co

⁴ Centro para el desarrollo del hábitat y la construcción (CDHC), Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Colombia. Correo electrónico: jdcordoba@sena.edu.co

⁵ Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo de Materiales (CIDEMAT), Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, Colombia. Orcid: 0000-0001-9685-3080. Correo electrónico: maryory.gomez@udea.edu.co

Recibido: 4 agosto, 2022. Aceptado: 30 abril, 2023. Versión final: 17 junio, 2023.

Resumen

En el presente trabajo fueron obtenidos morteros con geopolímero a partir de suelos degradados de la actividad minera como proceso de economía circular. Para ello, se realizó inicialmente una clasificación granulométrica del suelo degradado que permitió obtener partículas con tamaños menores a 750 μm , las cuales fueron utilizadas en la mezcla como agregados finos. Para la fase cementante, se utilizaron mezclas de suelo degradado con tamaños menores a 45 μm (obtenido mediante un proceso de molienda del agregado fino) y ceniza volante (con tamaño < 45 μm), activadas alcalinamente. El tamaño de partícula de los suelos fue determinado por difracción láser. Además, se realizó una evaluación química de los precursores de geopolímero mediante Fluorescencia de rayos X y se utilizó la microscopía electrónica de barrido tanto para el análisis de los suelos como de los morteros con geopolímero fabricados; también se realizaron pruebas de densidad y resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos indican la obtención partículas de suelo molido con tamaños menores a 45 μm en porcentajes mayores al 91,7%, las cuales presentaron un alto contenido de aluminosilicatos: SiO_2 (81,7 % en peso) y Al_2O_3 (12,51 % en peso). Además, se observó una morfología de granos irregulares y bastones en los morteros con geopolímeros desarrollados.

Palabras clave: geopolímero; activador alcalino; morteros; suelos degradados; residuos mineros; ceniza volante.

Abstract

In the present work, mortars with geopolymer were obtained from degraded soils from mining activities as a circular economy process. For this purpose, a granulometric classification of the degraded soil was initially carried out to obtain particles with a size of less than 750 μm , which were used in the mixture as fine aggregates. For the cementitious phase, mixtures of degraded soil with size less than 45 μm (obtained through a grinding process of the fine aggregate) and fly ash (with size < 45 μm), alkaline activated, were used. The particle size of the soils was determined by laser diffraction. In addition, a chemical evaluation of the geopolymer precursors was carried out by X-ray fluorescence and scanning electron microscopy was used for the analysis of both the soils and the manufactured geopolymer mortars; density and compressive strength tests were carried out. The results obtained indicate that ground soil particles with a size smaller than 45 μm were obtained in percentages higher than 91.7 %, which presented a high content of aluminosilicates: SiO_2 (81.7 % p/p) and Al_2O_3 (12.51 % p/p). In addition, a morphology of irregular grains and sticks was observed in the mortars with developed geopolymers.

Keywords: geopolymer; alkaline activator; mortars; degraded soils; mining waste; fly ash.

1. Introducción

En el departamento de Antioquia se extrae una gran proporción del oro que es comercializado en el ámbito nacional y exportado (59,3% de la producción nacional en el año 2019) [1]. De acuerdo con el reporte, la producción de oro en Antioquia se concentró en la subregión de El Bajo Cauca, con un 49%. Como subproducto de la actividad minera, se genera día a día una gran cantidad de residuos sólidos, los cuales son depositados en áreas abiertas, generando focos de contaminación ambiental y ocupación indebida del espacio terrestre [2].

Entre los principales tipos de minería aplicados en la subregión se encuentran: el dragado, la explotación a cielo abierto y subterránea. Esta última, que predomina en la subregión, genera un gran volumen de material removido de la tierra, conocido como suelo degradado o estéril, los cuales son minerales ricos en óxidos tales como el SiO_2 , Al_2O_3 , y el Fe_2O_3 . A nivel mundial y en el ámbito nacional, se están buscando alternativas de uso para estos residuos, en el marco de la economía circular, para transformar estos pasivos ambientales en nuevos productos, con valor agregado. Uno de los sectores objetivo, que ha tomado fuerza en los últimos años, es la industria de la construcción, donde los suelos degradados, gracias a sus características físicas, podrían brindar un buen soporte mecánico en mezclas de mortero y concreto con cemento hidráulico, siendo usados como agregados finos y gruesos. Además, la química de dichos materiales, con alto contenido de aluminosilicatos, es apropiada para la obtención de geopolímeros, que podrían ser utilizados como material estructural en aplicaciones donde normalmente viene siendo usado el cemento hidráulico, cuya obtención implica una gran cantidad de liberación de CO_2 al ambiente, contaminando y favoreciendo el calentamiento global [3].

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos sintéticos obtenidos a partir de aluminosilicatos, los cuales, en presencia de un activador alcalino reaccionan químicamente y generan especies activas que se precipitan y posteriormente se policondensan para formar una estructura tridimensional [4]. Las características y propiedades de estos materiales dependen de parámetros tales como su composición química y mineralógica. La resistencia mecánica de estos compuestos está ampliamente relacionada a la presencia de grandes cadenas poliméricas unidas por fuerzas intermoleculares de tipo dipolo – dipolo, entre puentes de hidrógeno [5].

En la literatura se ha reportado la obtención de geopolímeros a partir de desechos industriales ricos en aluminosilicatos, tales como, la ceniza volante producida a partir de combustión de carbón en plantas termoeléctricas, ceniza volcánica, escorias de alto horno, cenizas de aceite de palma, entre otras, las cuales confieren a los materiales, una adecuada resistencia mecánica [6], [7], [8]. Tsaousi et al. [9] desarrollaron geopolímeros a partir de la sustitución parcial de cemento por escoria de minería (29 % en peso), la cual fue activada alcalinamente con KOH (8 M), obteniendo una resistencia a la compresión de 2 MPa, la cual fue aumentada hasta valores cercanos a 4,7 MPa mediante la incorporación de humo de sílice en la mezcla cementante (7 % en peso).

En el presente trabajo se desarrollaron morteros con geopolímeros a partir de suelos degradados de la actividad minera en la subregión de El Bajo Cauca Antioqueño, estudiando el efecto de la composición química (relación molar Na/Al) en muestras de suelo degradado molido y mezclas de éste con ceniza volante, sobre la densidad y la resistencia a la compresión de los materiales desarrollados.

2. Metodología

2.1. Muestreo y clasificación granulométrica

En el presente estudio, se utilizaron dos muestras de suelo degradado de la actividad minera en la región de El Bajo Cauca Antioqueño: muestra de la empresa Emijom (M1) y muestra de la empresa Asoagromicauca (M2). Para ambas muestras, se realizó una reducción por cuarteo (ASTM C702/C702M-18) y posteriormente, una clasificación de tamaño de partícula (ASTM C136/C136M-19), lo que permitió obtener material que se utilizó como agregados finos, con tamaño inferior a 750 µm, para ser utilizados en mezclas de mortero. El módulo de finura de las muestras fue calculado de acuerdo a la norma ASTM C136, ecuación (1):

$$\begin{aligned} \text{Módulo de finura} \\ = \frac{\sum \% \text{ Retenido acumulado}}{100} \end{aligned} \quad (1)$$

2.2. Molienda de los suelos degradados y determinación del tamaño de partícula

Se realizó una disminución de tamaño de partícula de los suelos degradados mediante un molino de bolas (fabricado según la norma ASTM C131) a una velocidad de operación de 57,5 rpm por un tiempo de 3 horas usando cuerpos molidores de acero con tamaños de 1,91 cm, 3,11 cm, 4,2 cm y 5,14 cm. El tamaño de partícula fue evaluado por difracción láser (Mastersizer 2000).

2.3. Composición química

Se evaluó la composición química de los suelos degradados mediante la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) (Thermo ARL Optim'X WDXRF).

2.4. Diseño de mezcla para morteros con geopolímeros

Se fabricaron morteros geopoliméricos utilizando moldes cilíndricos de 1" de diámetro y 2" de altura. Para su obtención se utilizó una relación sólido/líquido de 5,6. Las relaciones molares Si/Al y Na/Al fueron ajustadas mediante la adición de mezclas de activadores alcalinos: NaOH, Na₂SiO₃ y Na₂Al₂O₄, ver Tabla 1. Las muestras fueron fabricadas por triplicado. Se utilizó como referencia una mezcla de suelo + Cemento Portland tipo I (CPO). Las muestras fabricadas fueron curadas por 28 días a 24 ± 2 °C y humedad mayor al 95 % en una cámara de curado fabricada según las normas ASTM C109 y C511.

2.5. Densidad volumétrica de los geopolímeros

Para determinar la densidad de los materiales fabricados, se midió su diámetro y altura con un calibrador Stanley, mientras que el peso fue determinado usando una balanza de precisión Mix-A3000. La evaluación fue realizada por triplicado.

2.6. Ensayos de resistencia a la compresión de los geopolímeros

La resistencia a la compresión de las muestras fue realizada por triplicado, usando una máquina universal de ensayos (YOID INSTRUMENTS EZ 20). Los ensayos fueron realizados usando una velocidad de desplazamiento de 5 mm/min y una tasa de carga de 0,1 MPa/s, de acuerdo con la norma ASTM C109, obteniendo gráficos de carga vs deformación, de donde fueron extraídos los valores de carga máxima en cada muestra.

Tabla 1. Diseño de experimentos

Muestra	Agregado fino (S) (%p/p)	Suelo degradado molido (SM) (%p/p)	Ceniza volante (CZ) (%p/p)	Relaciones molares	
				Si/Al	Na/Al
Geopolímero obtenido a partir de M1 (G-M1)	85	15	0	2,0	1,5 2,0 2,5
		10	5		
		7,5	7,5		
		5	10		
		0	15		
Geopolímero obtenido a partir de M2 (G-M2)	85	15	0	2,0	1,5 2,0 2,5
		10	5		
		7,5	7,5		
		5	10		
		0	15		

Fuente: elaboración propia.

2.7. Análisis morfológico y de composición elemental

Tanto la morfología de las muestras después del proceso de molienda, como la superficie de falla de las muestras fue observada por microscopía electrónica de barrido (SEM), usando un equipo JEOL (JSM-6490LVS). Adicionalmente, la composición elemental de los geopolímeros fue evaluada por espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS), usando este mismo equipo.

3. Resultados

3.1. Módulo de finura de las muestras

En la Figura 1 se presenta el módulo de finura de las muestras M1 y M2, con valores de 1,7 y 1,3, respectivamente. Estos valores se deben a la clasificación granulométrica realizada en las diferentes muestras, debido a que para el presente estudio sólo se utilizaron partículas < 750 μm , pasante tamiz N°4, buscando obtener suelos para morteros con acabado liso.

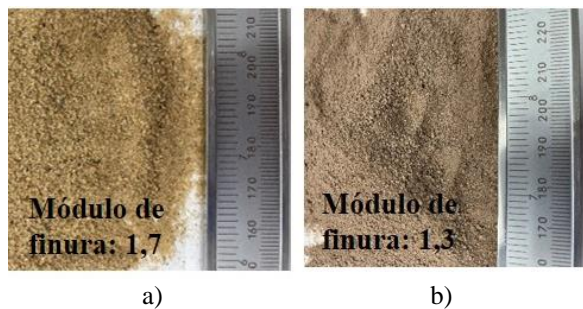


Figura 1. Módulo de finura: a) M1 y b) M2. Fuente: elaboración propia.

3.2. Composición química y mineralógica de los suelos y la ceniza volante

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis composicional realizado sobre las dos muestras de suelo degradado, M1 y M2, y la ceniza volante utilizada en las mezclas para los geopolímeros. Allí se observa que los compuestos predominantes en las tres muestras son el SiO_2 y Al_2O_3 , óxidos ampliamente deseados en precursores geopoliméricos [10], [12]. [13].

A partir del análisis FRX, se determinaron las relaciones molares Si/Al y Na/Al de los suelos degradados y la ceniza volante en su estado inicial. De acuerdo con la literatura, la resistencia de los geopolímeros depende en gran medida de su composición química. Se ha reportado que las relaciones molares Si/Al entre 1 y 3 proporcionan a estos materiales un buen comportamiento mecánico [14] encontrando los mejores resultados para los valores

cercanos a 2,0 [15]. Las muestras de suelo degradado presentan valores superiores, siendo mucho mayor en la muestra M1. Por otro lado, la ceniza volante presentó un valor menor a 2,0. Con la activación alcalina de los suelos y las mezclas de suelo con ceniza volante, se buscó controlar las relaciones molares en los compuestos de acuerdo con el diseño definido en la Tabla 1.

Tabla 2. Composición química de las muestras: M1, M2 y Ceniza.

Muestra	Compuesto	M1	M2	Ceniza
Óxidos %p/p	SiO_2	81,70	68,31	43,32
	Al_2O_3	12,51	22,39	35,46
	Fe_2O_3	1,73	2,79	5,17
	TiO_2	1,26	0,82	1,31
	K_2O	0,83	2,60	1,71
	Na_2O	0,189	0,30	1,78
	CaO	0,09	0,20	3,95
	P_2O_5	0,08	---	0,09
	ZrO_2	0,03	0,02	0,01
	Cr_2O_3	0,02	0,01	0,04
	SO_3	0,02	---	0,88
	BaO	0,01	0,07	0,26
	WO_3	0,01	0,01	0,01
Relaciones molares en las muestras	Si/Al	5,5	2,6	1,0
	Na/Al	0,01	0,02	0,09

Fuente: elaboración propia.

3.3. Tamaño de la partícula

La Tabla 3 presenta el análisis de tamaño de partícula realizado sobre las muestras de suelo y ceniza volante. Allí se observa que el proceso de molienda fue efectivo, debido a que el 96,1%, 91,6 % y 96,7 %, de las partículas de M1, M2 y la ceniza, respectivamente, se encuentran por debajo de 45 μm de diámetro, lo cual es muy importante en aluminosilicatos precursores de geopolímeros porque a menor tamaño de partícula, mayor es el área superficial que estará en contacto con los activadores alcalinos durante el proceso de geopolimerización, aumentando la eficiencia del proceso [14], [16], [17].

La Figura 2 muestra la morfología por SEM de los suelos (M1 y M2) y la ceniza, luego del proceso de molienda. Las muestras M1 y M2 presentan una morfología irregular, mientras que en la muestra de ceniza volante se observan algunas partículas con morfología esférica, que es característica de este tipo de material [18]. Por otro

lado, las imágenes SEM permiten comprobar que el tamaño de partícula de las muestras es inferior 45 μm .

Tabla 3. Tamaño de la partícula de los precursores geopoliméricos

Muestra	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	D_{90} (μm)	% menor a 45 μm
M1	1,36	8,591	32,775	96,1
M2	1,832	11,347	41,883	91,7
Ceniza volante	1,312	6,818	28,231	96,7

Fuente: elaboración propia.

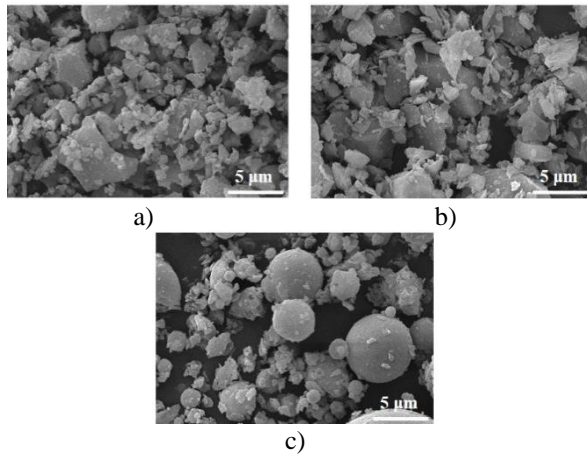


Figura 2. Morfología de las muestras después del proceso de molienda: (a) M1, (b) M2 y (c) Ceniza volante. Fuente: elaboración propia.

3.4. Densidad volumétrica de los geopolímeros

La Figura 3 presenta la densidad volumétrica de los geopolímeros fabricados a partir del suelo M1 (G-M1) y mezclas de M1 con ceniza volante en función de la composición química (relación molar Na/Al) y la proporción de M1 y ceniza en la mezcla. Los resultados fueron comparados con el sistema de referencia de M1 + CPO. Del análisis de los resultados se destaca lo siguiente: I) En función de la proporción entre suelo molido de la muestra 1 (SM1) y ceniza (CZ), se observa que, al cambiar un 5 % y 7,5 % de SM1 por CZ, se observa una disminución muy similar en la densidad volumétrica y cuando se reemplaza un 10 % y 15 % ocurre otra ligera disminución mostrando valores muy similares estas dos últimas proporciones.

Lo anterior puede deberse a que la densidad de la ceniza es inferior a la del suelo, con valores respectivos de 2060 Kg/m^3 y 2610 Kg/m^3 . II) en función de la composición química, la variación de la relación Na/Al en los geopolímeros no evidencia una clara tendencia en los valores de densidad, para cada una de las proporciones de mezcla realizadas. III) Al comparar los resultados de los geopolímeros con la muestra de referencia M1 + CPO, se observa que, en casi todos los casos, la densidad es mucho menor, aunque el CPO tiene una densidad más alta (3080 Kg/m^3) que las muestras SM1 y CZ. Este comportamiento podría estar relacionado con la química del CPO, debido a que durante el proceso de hidratación ocurren reacciones exotérmicas que conllevan a la formación de microfisuras por retracción de la pasta, mientras que con los geopolímeros no ocurre esto.

De igual manera, la Figura 4 presenta los resultados de densidad volumétrica de los geopolímeros obtenidos a partir de la muestra M2 (G-M2) en comparación con el sistema de referencia M2 + CPO.

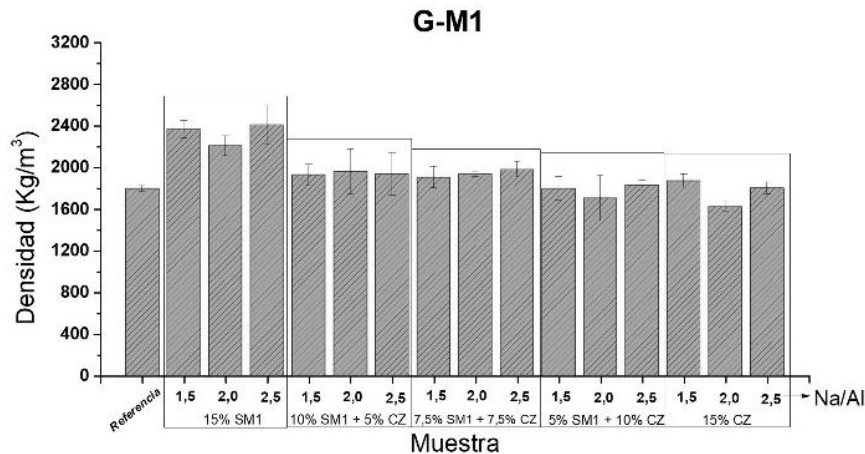


Figura 3. Densidad volumétrica de G-M1. Fuente: elaboración propia.

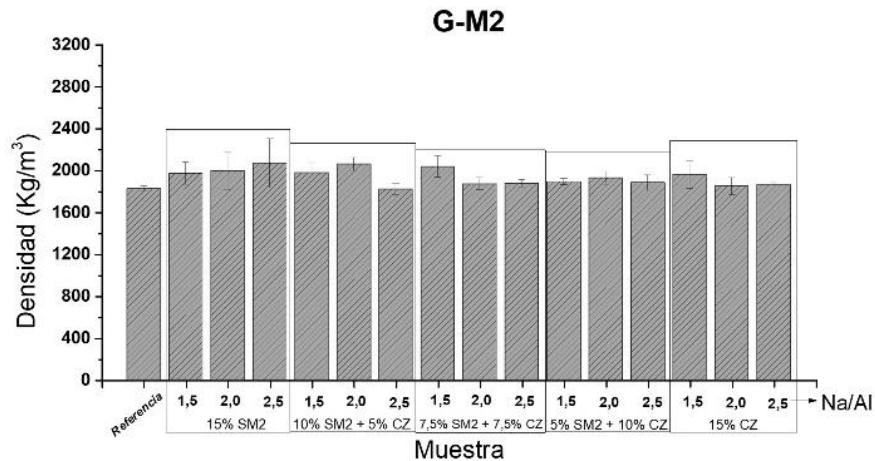


Figura 4. Densidad volumétrica de G-M2. Fuente: elaboración propia.

Allí se observa que: I) En función de la proporción entre el suelo molido de M2 (SM2) y CZ, no hay diferencias significativas, como las observadas en G-M1, aunque las muestras SM1 y SM2 presentan densidades muy similares. II) En función de la composición química, al igual que en G-M1, no hay tendencias definidas en la densidad de los geopolímeros al modificar su relación Na/Al. III) En comparación con el sistema de referencia M2 + CPO, las muestras de G-M2 presentaron densidades superiores en la mayoría de los casos.

3.5. Resistencia a la compresión de los geopolímeros

La Figura 5 presenta los resultados obtenidos para el ensayo de compresión de G-M1 en comparación con el sistema de referencia M1 + CPO. Allí se observa que: I) En función de la proporción entre SM1 y CZ se observa una tendencia al aumento en la resistencia a la compresión de los geopolímeros a medida que el contenido de CZ en la mezcla es mayor, alcanzando los mayores valores para un 15 % CZ y 0 % SM1. Este resultado indica que CZ tiene un mayor potencial para la formación de geopolímeros, lo que puede deberse tanto a su geometría, como a su composición química inicial y a su naturaleza puzolánica, ver Tabla 2. En la literatura, se han reportado buenos resultados en geopolímeros fabricados a partir de CZ, lo que ha sido atribuido principalmente a su alto contenido de aluminosilicatos y fase amorfa, que favorece la disolución de Al y Si para generar una nueva matriz con elementos tales como el Na de los activadores alcalinos [19]. II). En función de la composición química, no hay una clara tendencia en la resistencia a la compresión de los geopolímeros con relación al cambio en la relación molar de Na/Al, pues mientras que para las proporciones de 10 % SM1 + 5 % CZ y 7,5 % SM1 + 7,5 % CZ, hay una disminución en la resistencia a la compresión al aumentar la relación Na/Al

de 1,5 a 2,5, la muestra de 15 % CZ muestra la mayor resistencia a la compresión respecto a las muestras que contienen SM1. III) En comparación con la muestra de referencia de M1 + CPO, la cual presentó una resistencia a la compresión cercana a los 4,4 MPa, los geopolímeros presentaron valores de resistencia inferiores, en la mayoría de los casos < 1 MPa. En la literatura, se ha reportado que la reactividad alcalina de los residuos mineros es generalmente baja debido a su cristalinidad, lo que hace necesario, en la mayoría de los casos, el uso de pretratamientos [20].

El mejor resultado de G-M1 fue obtenido para la mezcla con 15 % CZ y relación Na/Al de 2,5, la cual presentó un valor de 2,9 MPa (34 % menor que la referencia). Jenni Kiventerä *et al.* [16] desarrollaron geopolímeros a partir de relaves de minas sulfurosas activados con NaOH a concentraciones de 5 M, 10 M y 15 M, obteniendo resistencias a la compresión cercanas a 1,8 MPa, los cuales pueden ser utilizados como relleno en sitios de minería o como materia prima en la industria de la construcción.

3.6. Morfología de los geopolímeros

La Figura 7 presenta las superficies de fractura en SEM de la muestra de G-M1 en comparación con la referencia de M1 + CPO a diferentes magnificaciones. En la imagen izquierda de la Figura 7a se observa un grano de S1 impregnado de una matriz, cuya ampliación (imagen derecha) permite observar una morfología característica de la fase Etringita, que se da como producto de la hidratación del CPO [22], [23].

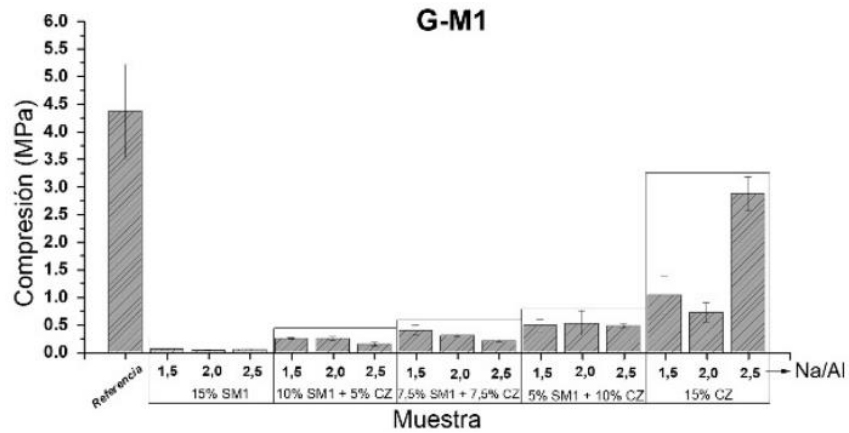


Figura 5. Resistencia a la compresión de G-M1. Fuente: elaboración propia.

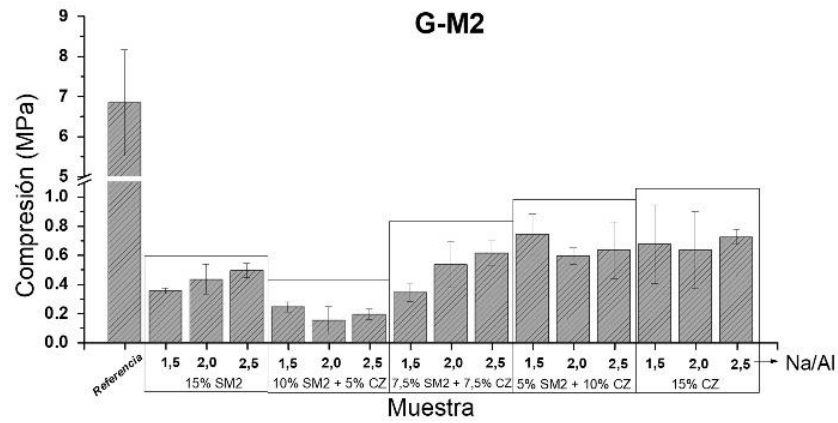


Figura 6. Resistencia a la compresión de G-M2. Fuente: elaboración propia.

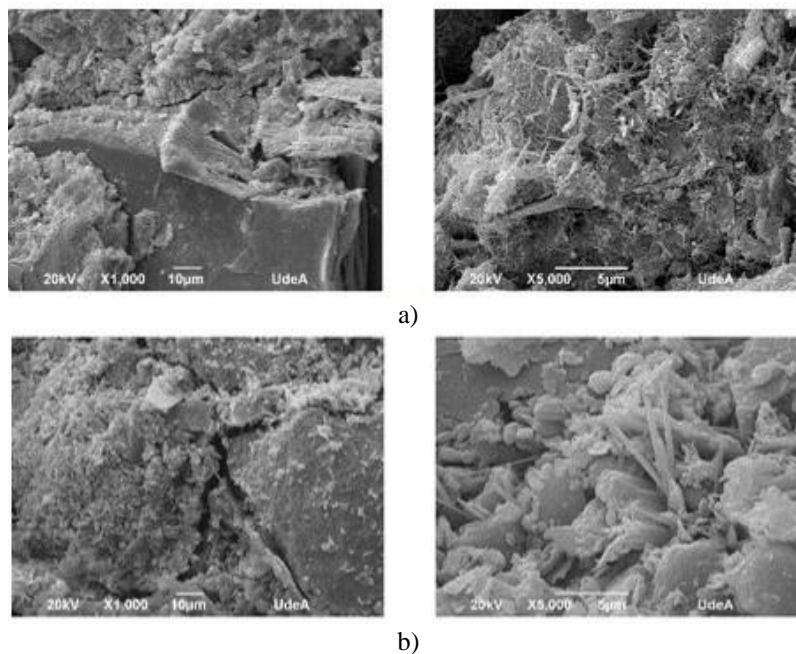


Figura 7. Micrografía SEM de la superficie de fractura de las muestras: (a) M1 + CPO, (a) G-M1. Fuente: elaboración propia.

Figura 7b permite observar también algunos granos de S1 impregnados de una pasta, que, al ser observada a mayor aumento en la imagen derecha, evidencia granos irregulares y morfologías de tipo bastón, generados como producto de reacción entre M1 y los activadores alcalinos.

La Figura 8 presenta las superficies de fractura en SEM de la muestra de G-M2 y la muestra de referencia de M2 + CPO a diferentes magnificaciones. En la Figura 8a (imagen izquierda) se observa un grano de S2 inmerso en una matriz de pasta de cemento, la cual es presentada en detalle en la imagen derecha, donde se observa nuevamente la fase Etringita, aunque esta vez, los sulfatos generados presentan una mayor longitud y hay una mayor cantidad de éstos. En la Figura 8b se observa la morfología de la muestra de G-M2, donde nuevamente se aprecian granos de S2 impregnados de pasta (imagen izquierda), que, de igual manera, presenta una morfología de granos irregulares.

La Figura 9 presenta el análisis composicional de la pasta generada en las muestras de G-M1 y G-M2. Para G-M1 (Figura 9a) el espectro permite identificar elementos tales como O, Al y Si, de S1 y M1, ya que de acuerdo con la composición química (Tabla 2), esta muestra está conformada mayoritariamente por óxidos de estos metales. Sin embargo, de acuerdo con el EDS, en la zona evaluada, hay una mayor cantidad de Na (11,14 % p/p) que Al (10,65 % p/p) y Si (41,88), lo que podría indicar

que hubo una reacción entre el Na de las soluciones alcalinas y los aluminosilicatos de M1. Se ha encontrado que el Na además de promover la formación de la red de aluminosilicatos, utiliza los iones Na^+ para equilibrar la carga negativa de dicha red que consiste en grupos SiO_4 y AlO_4 [20]. Para para G-M2 (Figura 9b), se observa un comportamiento similar en la composición elemental, aunque en este caso, la presencia de Na en los productos observados fue significativamente mayor, alcanzando un 27,35 % p/p, seguido del Si (33,3 % p/p) y Al (6,24 % p/p).

4. Conclusiones

Se obtuvieron morteros de 85 % p/p de suelo degradado y 15 % p/p de CPO, con resistencias a la compresión entre 4,4 MPa y 6,8 MPa. El reemplazo del CPO como material cementante en la mezcla, por suelo degradado molido con tamaño de partícula $< 45 \mu\text{m}$, disminuyó la resistencia a la compresión de los cilindros a valores $< 1 \text{ MPa}$, encontrando para la muestra M2, un efecto creciente de dicha propiedad a medida que la relación Na/Al aumentaba.

A nivel morfológico, se evidenció la presencia de la fase Etringita en las muestras de referencia de suelo con CPO, y una relación de ésta con la respuesta mecánica de los cilindros, obteniendo la mayor resistencia para la muestra M2, la cual presentó una mayor cantidad de sulfatos de calcio y de mayor longitud.

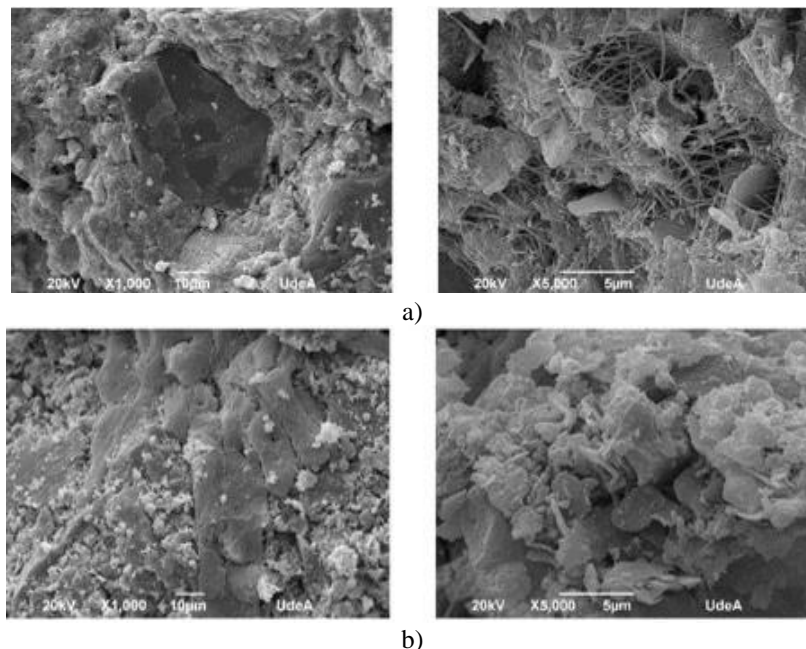


Figura 8. Micrografía SEM de la superficie de fractura de las muestras: A) M2 + CPO, B) G-M2. Fuente: elaboración propia.

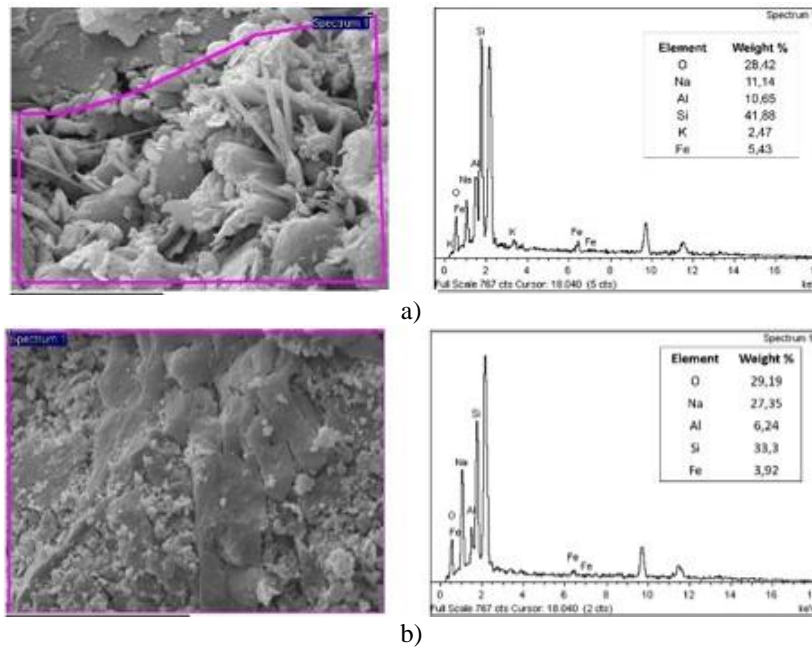


Figura 9. Análisis EDS de los geopolímeros: A) G-M1 y B) G-M2. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en los geopolímeros se observó una morfología de granos irregulares y bastones generados como producto de reacción de los activadores alcalinos y los aluminatos de los suelos molidos, lo que fue comprobado mediante la espectroscopía EDS.

Con el objetivo de aumentar la resistencia de los morteros con geopolímeros, es importante evaluar el efecto del aumento en el módulo de finura del agregado fino y proporciones mayores de la fase cementante.

Financiación

Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA, proyecto SGPS 8842 de 2021, Centro del Diseño y Manufactura del Cuero – SENA.

Contribuciones de los autores

J. P. Castaño-Serna: conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, redacción – borrador original. E. Chica-Arrieta: validación, visualización, redacción – borrador original, redacción – revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] J. L. O. Rivera, J. J. M. Galvis, “Producción y exportaciones de metales preciosos en Colombia,” 2019.
- [2] L. N. Beltrán-Rodríguez, J. M. Larrahondo, D. Cobos, “Tecnologías emergentes para disposición de relaves: oportunidades en Colombia,” *Boletín Ciencias la Tierra*, no. 44, pp. 5–20, 2018, doi: <https://doi.org/10.15446/rbct.n44.66617>
- [3] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, G. D. Corder, “Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 9–10, pp. 1080–1090, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>

- [4] MARCY ELIZABETH VALENZUELA HERRERA, “Estudio experimental de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural,” Universidad de Chile, 2013.
- [5] J. Coreño-Alonso, M. Méndez-Bautista, “Relación estructura-propiedades de polímeros,” *Educ. Química*, vol. 21, pp. 291–299, 2010, doi: [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30098-3](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30098-3)
- [6] J. A. M. Canabal, A. J. M. Carvajal, “Aprovechamiento de desechos de ladrillo para la síntesis de geopolímero,” trabajo de grado, Universidad del Valle, 2015.
- [7] L. A. V. Coraspe, “Situación actual de la síntesis y utilización de geopolímeros,” *Gac. técnica*, vol. 22, no. 2, pp. 23–38, 2021.
- [8] S. A. D. Suarez, “Desarrollo de un procedimiento para la elaboración de geopolímeros optimizados,” trabajo de grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2018.
- [9] G.-M. Tsaousi, K.-M. Sakkas, D. Panias, “Development of advanced materials from industrial waste, with high thermal performance,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 315, p. 125779, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125779>
- [10] J. L. Provis, J. S. J. van Deventer, “Geopolymerisation kinetics Reaction kinetic modelling,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, no. 9, pp. 2318–2329, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2007.01.028>
- [11] M. Torres-Carrasco, F. Puertas, “La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros,” *Rev. Ing. construcción*, vol. 32, no. 2, pp. 05–12, 2017, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- [12] J. D. Yepes, O. N., Bedoya, C. M. & Gómez, “Hacia un avance ambiental y tecnológico de la construcción con tierra como patrimonio futuro. Del bloque de suelo cemento (bsc) al bloque de tierra con geopolímeros (btg)Em direção a um progresso ambiental e tecnológico da construção com terra como hera,” [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10554/23195>
- [13] A. G. G. TORRES, “Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento Portland,” trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [14] L. Zhang, S. Ahmari, and J. Zhang, “Synthesis and characterization of fly ash modified mine tailings-based geopolymers,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 9, pp. 3773–3781, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.005>
- [15] P. Duxson, J. L. Provis, G. C. Lukey, S. W. Mallicoat, W. M. Kriven, J. S. J. van Deventer, “Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties,” *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 269, no. 1–3, pp. 47–58, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.06.060>
- [16] J. Kiventerä, L. Golek, J. Yliniemi, V. Ferreira, J. Deja, and M. Illikainen, “Utilization of sulphidic tailings from gold mine as a raw material in geopolymerization,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 149, pp. 104–110, Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.02.012>
- [17] M. A. Longhi, E. D. Rodríguez, B. Walkley, Z. Zhang, A. P. Kirchheim, “Metakaolin-based geopolymers: Relation between formulation, physicochemical properties and efflorescence formation,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 182, p. 107671, Feb. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107671>
- [18] P. Ambiente, “Materiales zeolíticos obtenidos a partir de cenizas volantes activadas por fusión alcalina Zeolitic materials obtained from fusion activated fly ashes,” en *XII Jornadas Argentinas de Tratamientos Minerale*s, pp. 285–290, 2014.
- [19] P. Kinnunen et al., “Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 174, pp. 634–649, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.280>
- [20] Y.-M. Liew, C.-Y. Heah, A. B. Mohd Mustafa, H. Kamarudin, “Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 83, pp. 595–629, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>
- [21] M. M Giraldo, J. Tobón, “Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación,” *Dyna*, vol. 73, no. 69-82, 2006.

[22] T. Pique, A. Vázquez, “Uso de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento,” *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 3, pp. 62–71, 2012.