

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Cementos alternativos basados en geopolímeros de zeolitas naturales

Néstor Ulloa ¹   José Luis Allauca ²  David Reinoso ³ 

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Orellana, El Coca EC220001, Ecuador

² Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro, Sede Orellana, El Sacha EC220001, Ecuador

 Correspondencia: nestor.ulloa86@gmail.com  + 593 99 941 0414

DOI/URL: <https://doi.org/10.53313/gwj42022>

Resumen: La optimización del tiempo y temperatura de curado en las propiedades térmicas y mecánicas de geopolímeros sintetizados a partir de zeolita natural se evaluó mediante técnicas analíticas instrumentales, XRD, SEM-EDS y TGA-DSC. Se utilizó hidróxido de sodio (NaOH) a 7M e hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) en proporciones de 1-3%, para la activación de la zeolita natural, con una relación de activador/aglutinante de 0,5. Los resultados demostraron que un aumento de la temperatura en las primeras 24h afecta al geopolímero en la deshidratación, pérdida excesiva de humedad y estrés térmico. Los resultados de la caracterización de difracción de rayos X, se pudo observar la presencia de las fases cristalinas del 68% de Mordenita, 16,9% de Cuarzo y 15,1% de material Amorfo. Los análisis SEM-EDS reveló la presencia de Na, Ca y un aumento en la relación Si/Al de 3-6,5, esto se debe a la incorporación de los activadores. En los resultados del análisis TGA-DSC no se observó una pérdida significativa de la estructura cristalina de la zeolita utilizada en esta investigación, pero en cambio se verificó la eliminación del agua en los poros del geopolímero, lo cual mejora la reacción con el (Ca(OH)₂), produciendo más hidratos, además la cal no sólo fue fijada por reacción puzolánica, sino también por la carbonatación. Los resultados de las propiedades mecánicas demostraron un aumento significativo en su resistencia desde el primer día de curado (5,92 MPa) hasta 7 días de reposo del geopolímero (9,41 MPa).

Palabras claves: Geopolímero; zeolita; caracterización instrumental; materiales alternativos; activación alcalina; compresión mecánica

Alternative cements based on natural zeolite geopolymers

Abstract: The optimization of curing time and temperature on the thermal and mechanical properties of geopolymers synthesized from natural zeolite was evaluated by instrumental analytical techniques, XRD, SEM-EDS and TGA-DSC. Sodium hydroxide (NaOH) at 7M and calcium hydroxide (Ca(OH)₂) in ratios of 1-3% were used for the activation of



Cita: Ulloa, N., Allauca, J. L., & Reinoso, D. (2021). Cementos alternativos basados en geopolímeros de zeolitas naturales. *Green World Journal*, 4(2), 22.

<https://doi.org/10.53313/gwj42022>

Recibido: 25/Julio/2021

Aceptado: 29/Agosto/2021

Publicado: 31/Agosto/2021

Prof. Carlos Mestanza-Ramón, PhD.
Editor en Jefe / CaMeRa Editorial
editor@greenworldjournal.com

Nota del editor: CaMeRa se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones legales resultado del contenido publicado. La responsabilidad sobre la información publicada es íntegra de los autores.



© 2021 Licencia CaMeRa, Green World Journal. Este artículo es un documento de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

natural zeolite, with an activator/agglutinant ratio of 0.5. The results showed that an increase in temperature in the first 24h affects the geopolymer in dehydration, excessive moisture loss and heat stress. X-ray diffraction characterization results showed the presence of crystalline phases of 68% Mordenite, 16.9% Quartz and 15.1% Amorphous material. SEM-EDS analysis revealed the presence of Na, Ca and an increase in the Si/Al ratio of 3–6.5, this is due to the incorporation of the activators. In the TGA-DSC analysis results, no significant loss of the crystalline structure of the zeolite used in this research was observed, but instead the elimination of water in the pores of the geopolymer was verified, which improves the reaction with the $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$, producing more hydrates, in addition the lime was not only fixed by pozzolanic reaction, but also by carbonation. The results of the mechanical properties showed a significant increase in strength from the first day of curing (5.92 MPa) to 7 days of geopolymer rest (9.41 MPa).

Keywords: Geopolymer; zeolite; instrumental characterization; alternative materials; alkaline activation; mechanical compression

1. Introducción

El hormigón de cemento portland ordinario (CPO) se ha utilizado tradicionalmente como material de construcción en todo el mundo, alcanzando una producción anual de cemento global de 2,8 mil millones de toneladas, y se espera que aumente a unos 4 mil millones de toneladas por año [1], estudios prevén que para el año 2050 la demanda mundial de producción de CPO aumenten pronunciadamente hasta 5,5 mil millones de toneladas por año [1,2]. Esto implicaría significativamente grandes impactos ambientales y consumo masivo de recursos naturales.

Se estima que hasta unas 0,54 toneladas de CO_2 por tonelada de Clinker se libera durante la calcinación y 0,46 toneladas de CO_2 emitido es el resultado de la quema de combustible para proporcionar la energía térmica necesaria para la calcinación aproximadamente el 7% de las emisiones antropogénicas de CO_2 globales liberadas a la atmosfera [3], [1,4].

Esto conlleva a numerosas investigaciones en intentos de desarrollar nuevos ligantes sin cemento para reducir las emisiones de CO_2 en la producción de CPO, reemplazando el Clinker con materiales cementantes suplementarios dando origen al desarrollo de un nuevo material [5]. Estos nuevos materiales son llamados geopolímeros y desarrollados por primera vez por Joseph Davidovits en 1982 [6], los geopolímeros son polímeros inorgánicos tridimensionales de silicato de aluminio compuesto por tetraedros de $[\text{AlO}_4]$ y $[\text{SiO}_4]$ que se preparan principalmente de silicatos de aluminio o de desechos industriales, tales como cenizas volantes [2,7,8], puzolana natural [9,10], metacaolín [11], zeolita natural [12–14], etc. y se mezcla con una solución de silicato alcalino en condiciones altamente alcalinas.

Los geopolímeros son una clase de materiales aglutinantes de aluminosilicatos cementosos sintetizados mediante una reacción de geopolimerización de minerales de aluminosilicatos (tales como residuos sólidos industriales, arcillas calcinadas, minerales naturales y así sucesivamente) con soluciones de activador alcalino a temperatura ambiente o superior [15]. Ellos se han considerado poco a poco a ser potencialmente materiales revolucionarios en los últimos años para obtener grandes ventajas, como la preparación de zeolitas naturales para utilizarla como reemplazo del cemento tradicional Portland, en cuanto a sus propiedades de resistencia térmica, mecánica y química suelen ser similares e incluso superiores. [11].

A pesar de que la mayoría de los avances recientes de los materiales cementantes químicamente activados se han llevado a cabo mediante el uso de desechos de minas, desperdicios de las

construcciones, lodos rojos y residuos de procesos metalúrgicos, existe un interés considerable en la evaluación de otros materiales ricos en minerales de Al-Si. Este interés es compartido por la industria minera debido a la extensa área de depósitos de materiales aluminosilicatos y la búsqueda de nuevos mercados y productos para su aplicación, especialmente para el caso de las zeolitas naturales en las zonas costeras ecuatorianas. Debido a este hecho, algunos yacimientos de zeolitas están parcialmente explotados o no tienen una aplicación comercial. Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos con una estructura basada en unidades repetitivas tetraédricas de silicio-oxígeno (SiO_4) y aluminio-oxígeno (AlO_4) [14,16–18]. Según la literatura, la activación de las zeolitas sólo se ha realizado empleando compuestos alcalinos con hidróxido de calcio en particular. Sin embargo, la literatura carece de un estudio extenso del efecto de las concentraciones de Si/Al.

La síntesis de geopolímeros depende de la utilización de materias primas reactivas ricas en silicatos de aluminio que presentan un grado de inestabilidad termodinámica que se manifiesta en una estructura amorfa en el material. Por consiguiente, el objetivo principal de la presente investigación fue estudiar las condiciones de la síntesis para la geopolimerización bajo la optimización de los parámetros de activadores alcalinos, tiempo y temperatura de curado, a partir zeolitas naturales ecuatorianas para obtener materiales cementantes alternativos.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

La zeolita se obtuvo de un yacimiento natural en la ciudad de Guayaquil-Ecuador, se tomaron muestras en rocas que fueron trituradas hasta un tamaño homogéneo de $\sim 300 \mu\text{m}$ y secado a 100°C durante 24 h. Luego de este proceso se pulverizó hasta conseguir un tamaño de partícula $< 60 \mu\text{m}$.

Los activadores alcalinos fueron seleccionados según la literatura en las cuales mencionan altas resistencia a la compresión [14,19–22], la utilización de NaOH y Ca(OH)_2 como hidratante en diferentes porcentajes. Se utilizó NaOH en pallets con grado de pureza del 99.0 % acorde con la Organización Internacional de Normalización (ISO), de procedencia MERKC MILLIPORE, Ca(OH)_2 en polvo con grado de pureza del 97.2 % de procedencia J.T. Baker.

2.2. Métodos

La zeolita natural se activó con una solución de NaOH a 7M con diferentes porcentajes de Ca(OH)_2 , del 1, 2, 3% de la masa de zeolita para preparar cada muestra, estos componentes se mezclaron con el objetivo de analizar el efecto en la resistencia a la compresión de los especímenes. Se realizaron las pruebas mediante una relación de activador/aglutinante de 0,5. Para obtener la pasta de geopolímero se utilizó un mezclador mecánico HOBART modelo N-50 con velocidades de mezcla y tipo de agitador según la norma estándar ASTM C305 [23], la pasta de geopolímero obtenida se vació en moldes cúbicos de 50 mm, según norma estándar ASTM C109/C109 M-05 [24,25] y se curaron en el molde durante 24 h a 60°C , para posterior desmoldar y curar a temperatura ambiente durante 7 días.

Se realizó los ensayos de resistencia a la compresión mecánica utilizando una máquina de Ensayos Universales marca SHIMADZU modelo UTM-600KN a los cubos para los tiempos de curado

mencionados anteriormente con el fin de evaluar la fuerza de compresión de acuerdo con la ASTM C109/C109 M-05 [24].

La caracterización de la zeolita, así como el material activado se llevó a cabo por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), junto con el análisis químico por espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X. Las micrografías SEM-EDS se obtuvieron utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido equipado con un Espectrómetro de Energía Dispersiva, marca FEI, modelo Inspect S. Para el análisis de SEM-EDS se utilizó un portamuestras de aluminio sobre un disco de carbono adhesivo para mejorar la transferencia de electrones, no se utilizó recubrimiento metálico sobre la muestra para su análisis, se utilizó un voltaje de aceleración de 12,5 kV y una atmósfera de 80 Pa de vapor de agua, con dos tamaños de spot para las imágenes y un tamaño de spot de 4 para el análisis de EDS.

Para cuantificar el contenido amorfo en la zeolita se utilizó un difractómetro de rayos X (DRX) PANalytical® X'Pert PRO, junto con el software X'Pert High Score Plus®. Las condiciones de operaciones fueron de 40 mA y 45 kV, con un tamaño de paso de 0,02°, un tubo de rayos X convencional (radiación Cu_K α) y un detector multicanal X'Celerator con protección antidispersión. Además, se utilizó el procedimiento experimental del método de Rietveld para cuantificar el contenido mineralógico y amorfo de acuerdo a técnicas experimentales encontradas en [26–29]. La preparación de la muestra para DRX se utilizó un tamaño de partícula inferior a 45 μ m.

Las mediciones del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido (TGA-DSC) simultaneo, se realizaron utilizando un equipo TA Instruments STD Q-600, dentro de crisoles de alúmina. La muestra fue tomada en polvo y para cada análisis se utilizó la cantidad de 8 a 10 mg aproximadamente. El ensayo se realizó con un rango de temperatura desde el ambiente hasta 1000°C, a diferentes velocidades de calentamiento de 5, 7.5, 10, 15 y 20°C/min, con una velocidad de flujo de nitrógeno de 100 ml/min [30]. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el software Advantage TA Universal Analysis 4.5^a.

3. Resultados

3.1. Caracterización de la zeolita

Se encontró que el contenido total de zeolita es aproximadamente 83% y esto es típico de algunos otros materiales puzolánicos tales como ceniza volante y escoria de alto horno, como se muestra en la Tabla 1.

El difractograma de la zeolita natural (ver Fig. 1) muestra la presencia de las fases cristalinas en una mayor cantidad de mordenita (68%) y en una menor cantidad cuarzo (16,9%). El halo que se presenta entre 20 y 30 (2θ), indica la presencia de una pequeña fracción de material amorfo (15,1%).

Tabla 1. Composición química de la zeolita natural utilizada en esta investigación y otros materiales puzolánicos (tomados de [16,19,20,31,32])

	Zeolita natural (%)	Clinker (%)	Rango cenizas volantes silíceas	Rango cenizas volantes calcáreas	Rango escorias de alto horno
SiO ₂	68.72	20.98	47—54	18—25	30—40
Al ₂ O ₃	13.86	5.55	28—35	12—15	5—17

Fe ₂ O ₃	0.89	3.85	4—12	6—8	0.2—1.0
MgO	0.08	1.12	1—4	43—49	0.3—1.0
CaO	1.76	65.85	1—2.5	2—3	35—48
Na ₂ O	1.38	0.14	0.2—2	2.5	—
K ₂ O	4.09	0.53	1—6	2.5	—
SO ₃	0.02	0.97	0.1	0.1	—
*LOI	9.20	2.23	0.84	0.84	0.75

*LOI: Loss on ignition.

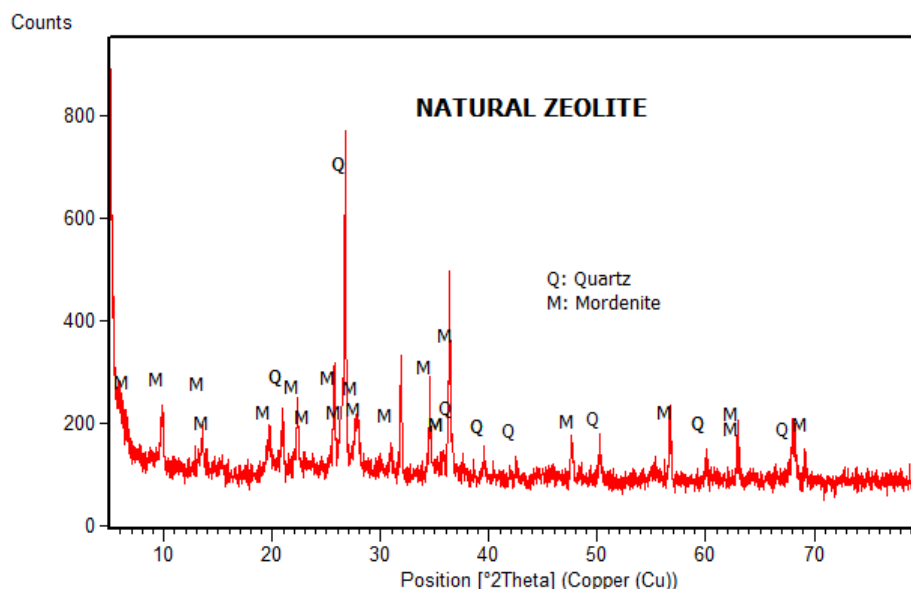


Figura. 2. XRD de la materia prima, zeolita.

3.2. Propiedades mecánicas

La resistencia a la compresión se midió para la mezcla CG1 de nueve replicas de especímenes con el 1% de Ca(OH)₂, al igual que para CG 2 y CG 3 con el 2 y 3% de Ca(OH)₂ respectivamente, dando un total de 27 muestras de geopolímero sintetizadas.

Tabla 2. Resultados de la resistencia a la compresión

Identificación de mezcla	Ca(OH) ₂ (%w/w)	Relación activador/ligante	Resistencia a la compresión (MPa)	
			1 día	7 días
CG1	1	0.5	5.12	8.26
CG2	2	0.5	5.41	8.37
CG3	3	0.5	5.92	9.41

CG: Cemento de Geopolímero.

La Tabla 2 muestra los resultados de la resistencia a la compresión en promedio de las muestras analizadas de geopolímeros sintetizados. En general se puede observar que los geopolímeros sintetizados muestran un aumento en la resistencia a la compresión cuando existe un aumento en el porcentaje de Ca(OH)₂ y tiempo de curado. Durante las primeras 24 h se curó a una temperatura de 60°C, para posterior curar a temperatura ambiente durante 7 días y así evitar la deshidratación, pérdida excesiva de humedad y el estrés térmico en la estructura del geopolímero (ver Fig. 2), producto de la cual ocasiona baja resistencia a la compresión. La máxima resistencia a la compresión se registró en las muestras CG 3, alcanzando 5,92 y 9,41 MPa en promedio, en las primeras 24 horas y 7 días de reposo respectivamente.



Figura 2. Geopolímeros sintetizados

3.3. Caracterización por microscopía electrónica de barrido y espectroscopia de energía dispersiva.

Las imágenes muestran las micrografías (ver Fig. 3) obtenidas por SEM de una muestra del geopolímero que registró mayor resistencia a la compresión y del residuo del análisis de TGA calcinado a una rampa de temperatura de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (ver Fig. 4). Estas micrografías fueron tomadas con el objetivo de analizar la composición química y la evolución microestructural del geopolímero. La muestra de geopolímero activado y calcinado fueron tomadas en piezas pequeñas resultantes del ensayo mecánico.

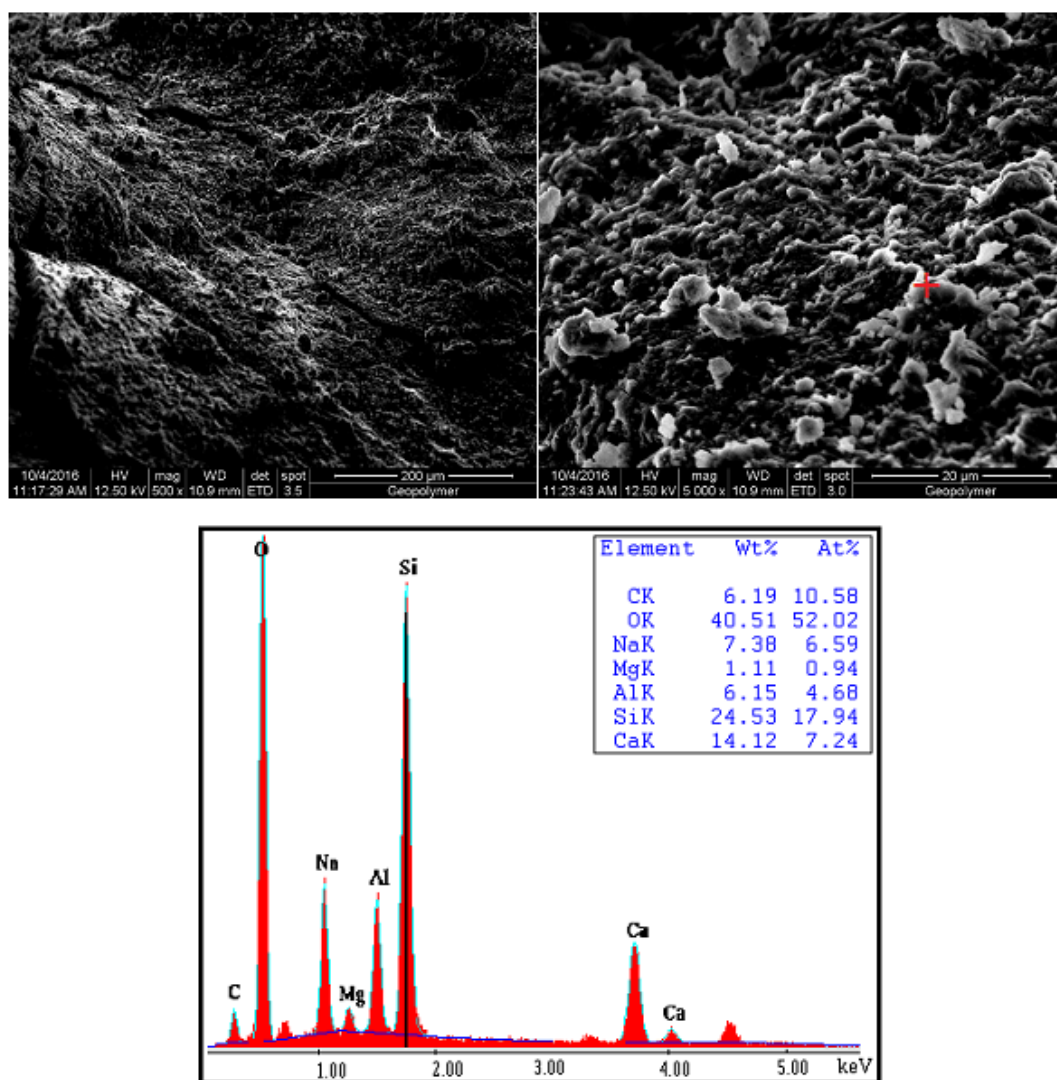


Figura 3. Micrografías SEM-EDS del geopolímero de máxima resistencia a la compresión

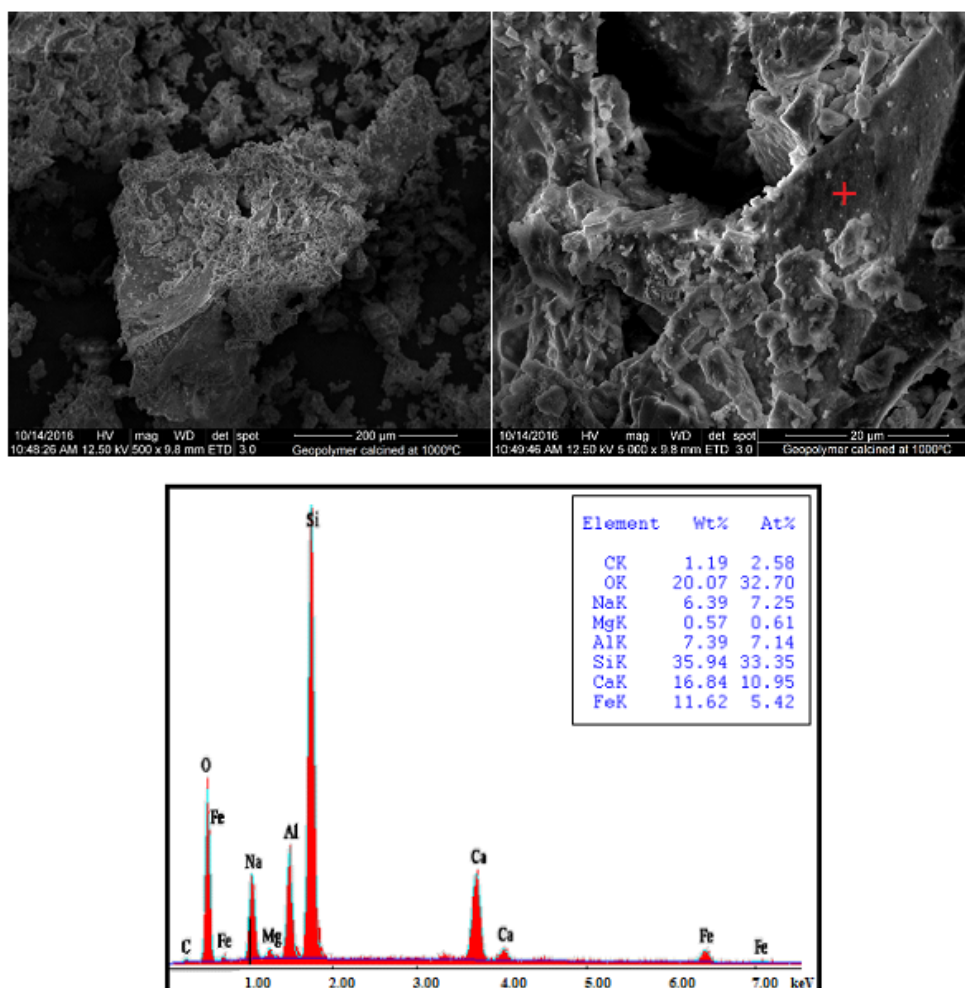


Figura 4. Micrografías SEM del geopolímero calcinado a 20°C/min

La Figura 3 y 4 muestran las micrografías SEM y el EDS de la muestra de geopolímero codificada como CG3, en la cual se puede observar en el análisis de espectroscopía de energía dispersiva la incorporación de Na, Ca que provienen de los activadores alcalinos, y los porcentajes de los otros elementos. Además, se puede observar una matriz de productos muy densos y muy poca porosidad. También se pueden observar algunas fases cristalinas que se pueden atribuir al SiO₂ y mordenita no reaccionada o no activada que se atribuye a una muestra de geopolímero de edad temprana.

3.4. Análisis termogravimétrico y Calorimetría diferencial de barrido (TGA-DSC)

Se realizaron los análisis de TGA-DSC en diferentes rampas de calentamiento, a una de las muestras de los geopolímeros tomada en polvo resultante después del ensayo de resistencia a la compresión. Los resultados de termogravimetría (TG) se presentan en la Fig. 5. Se puede observar que todos los análisis mostraron tendencias características similares hasta 1000°C. Una pérdida de peso insignificante se observó desde la temperatura ambiente hasta 300°C en cada análisis. Esta pérdida de peso es un resultado de la evaporación de agua adsorbida en la superficie y el agua dentro de los poros del geopolímero. Entre 300°C y 600°C, se registró una pérdida de peso adicional que se atribuyó a la liberación de agua por condensación/polimerización de los grupos Si-OH y Al-OH [30,33,34]. Cuando se aumenta la temperatura, exhibió un cambio de peso de 3 % entre 600°C y 1000°C.

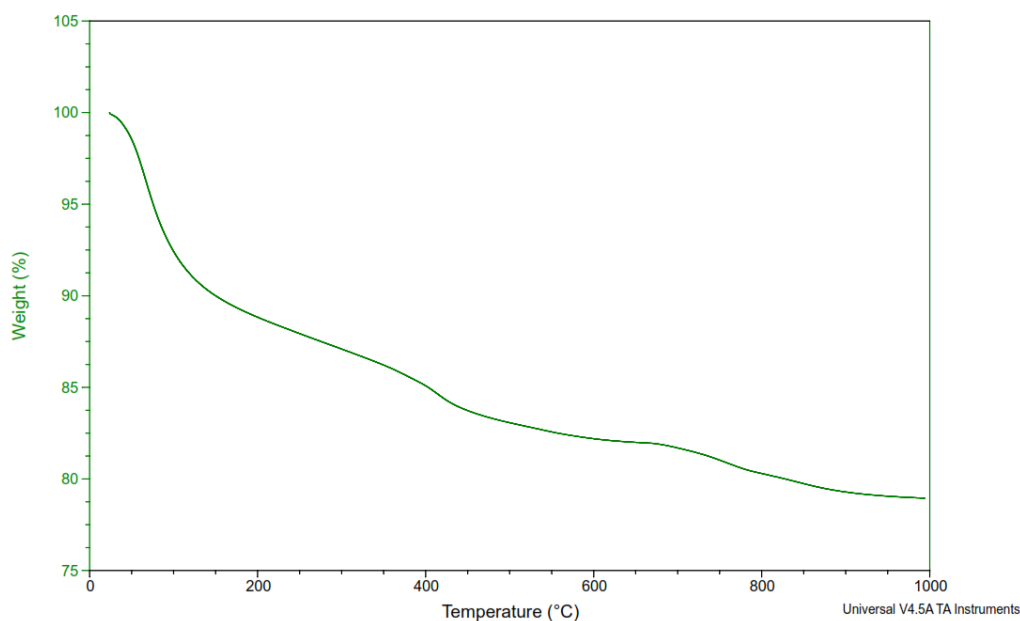


Figura 5. Termogramas TGA del geopolímer.

Todos los análisis exhibieron termogramas de DSC similares, sin embargo, a medida que la rampa de temperatura aumenta, el pico endotérmico crece considerablemente y viceversa para el pico exotérmico (decrece). Se observaron dos rasgos característicos en todos los termogramas; un gran pico endotérmico en la región de temperatura más baja y un pequeño pico exotérmico en la región de temperatura más alta.

4. Conclusiones

Los resultados muestran que la zeolita natural utilizada en esta investigación reacciona positivamente con la adición de activadores alcalinos (NaOH y Ca(OH)_2) para dar lugar a la formación de la gelación del geopolímero, esto está de acuerdo con el análisis DRX y la caracterización SEM-EDS.

El material sintetizado a una temperatura de 60 °C por 24 h y durante 7 días de curado a temperatura ambiente, presentó alta resistencia a la compresión, en comparación con las demás muestras.

En el análisis de TGA-DSC no se observó una pérdida significativa de la estructura cristalina de la zeolita, esto indica que los picos endotérmico y exotérmico es debido a la eliminación del agua en la superficie y poros del geopolímero y una posible formación de una nueva fase o debido a la cristalización de la muestra respectivamente. Esto indica una mejora en la reacción con el Ca(OH)_2 , produciendo más hidratos.

Mediante el análisis de las micrográficas SEM-EDS, se encontró la presencia de Na, Ca y un aumento en la relación Si/Al de 3–6.5, esto es debido a la adición de los activadores alcalinos, lo cual indica que su utilización en la síntesis de geopolímeros es ideal para la mejora en propiedades mecánicas.

Contribución de autores: Los autores contribuyeron en todos los apartados investigativos.

Financiamiento: Los autores financiaron a integridad el estudio.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias:

- Schneider, M.; Romer, M.; Tschudin, M.; Bolio, H. Sustainable cement production-present and future. *Cem. Concr. Res.* **2011**, *41*, 642–650, doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.019.
- Babaei, M.; Castel, A. Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Cem. Concr. Res.* **2016**, *88*, 96–107, doi:10.1016/j.cemconres.2016.05.012.
- Duan, P.; Yan, C.; Zhou, W.; Luo, W. Fresh properties, mechanical strength and microstructure of fly ash geopolymer paste reinforced with sawdust. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *111*, 600–610, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.091.
- Petrillo, A.; Cioffi, R.; Ferone, C.; Colangelo, F.; Borrelli, C. Eco-sustainable Geopolymer Concrete Blocks Production Process. *Agric. Agric. Sci. Procedia* **2016**, *8*, 408–418, doi:10.1016/j.aaspro.2016.02.037.
- Yang, K.H.; Song, J.K.; Song, K. II Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. *J. Clean. Prod.* **2013**, *39*, 265–272, doi:10.1016/j.jclepro.2012.08.001.
- Davidovits, J. Geopolymers. *J. Therm. Anal.* **1991**, *37*, 1633–1656, doi:10.1007/BF01912193.
- Monticelli, C.; Natali, M.E.; Balbo, A.; Chiavari, C.; Zanotto, F.; Manzi, S.; Bignozzi, M.C. A study on the corrosion of reinforcing bars in alkali-activated fly ash mortars under wet and dry exposures to chloride solutions. *Cem. Concr. Res.* **2016**, *87*, 53–63, doi:10.1016/j.cemconres.2016.05.010.
- Sukmak, P.; Horpibulsuk, S.; Shen, S.L.; Chindaprasit, P.; Suksiripattanapong, C. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 1125–1136, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.104.
- Haddad, R.H.; Alshbuol, O. Production of geopolymer concrete using natural pozzolan: A parametric study. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *114*, 699–707, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.04.011.
- Najimi, M.; Sobhani, J.; Ahmadi, B.; Shekarchi, M. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 1023–1033, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038.
- Mo, B.H.; Zhu, H.; Cui, X.M.; He, Y.; Gong, S.Y. Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Appl. Clay Sci.* **2014**, *99*, 144–148, doi:10.1016/j.clay.2014.06.024.
- Jo, B.W.; Choi, J.S.; Yoon, K.W.; Park, J.H. Material characteristics of zeolite cement mortar. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *36*, 1059–1065, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.061.
- Cornejo, M.H.; Elsen, J.; Paredes, C.; Baykara, H. Hydration and strength evolution of air-cured zeolite-rich tuffs and siltstone blended cement pastes at low water-to-binder ratio. *Clay Miner.* **2015**, *50*, 133–152, doi:10.1180/claymin.2015.050.1.12.
- Villa, C.; Pecina, E.T.; Torres, R.; Gómez, L. Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite. *Constr. Build. Mater.* **2010**, *24*, 2084–2090, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052.
- Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J.L.; Lukey, G.C.; Palomo, A.; Van Deventer, J.S.J. Geopolymer technology: The current state of the art. *J. Mater. Sci.* **2007**, *42*, 2917–2933, doi:10.1007/s10853-006-0637-z.
- Vigil de la Villa, R.; Fernández, R.; García, R.; Villar-Cociña, E.; Frías, M. Pozzolanic activity and alkaline reactivity of a mordenite-rich tuff. *Microporous Mesoporous Mater.* **2009**, *126*, 125–132, doi:10.1016/j.micromeso.2009.05.029.
- Ulloa, N.A.; Baykara, H.; Cornejo, M.H.; Rigail, A.; Paredes, C.; Villalba, J.L. Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *174*, 138–149, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.101.
- Xu, H.; Van Deventer, J.S.J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *Int. J. Miner. Process.* **2000**, *59*, 247–266, doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
- Karakurt, C.; Topu, L.B. Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 906–911, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.045.
- Ortega, E.A.; Cheeseman, C.; Knight, J.; Loizidou, M. Properties of alkali-activated clinoptilolite. *Cem. Concr. Res.* **2000**, *30*, 1641–1646, doi:10.1016/S0008-8846(00)00331-8.
- Suwan, T.; Fan, M.; Braimah, N. Micro-mechanisms and compressive strength of Geopolymer-Portland cementitious system under various curing temperatures. *Mater. Chem. Phys.* **2016**, *180*, 219–225, doi:10.1016/j.matchemphys.2016.05.069.
- Ryu, G.S.; Lee, Y.B.; Koh, K.T.; Chung, Y.S. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *47*, 409–418, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069.
- ASTM C305–11 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *ASTM International* **2011**, 1–3, doi:10.1520/C0305–13.2.

24. ASTM C109/C109M-05 *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*; 2005; p. 9.
25. Cabinets, M.; Rooms, M.; Statements, B.; Mass, D. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens) 1. *Chem. Anal.* **2010**, 1–9, doi:10.1520/C0109.
26. Snellings, R.; Mertens, G.; Cizer, Ö.; Elsen, J. Early age hydration and pozzolanic reaction in natural zeolite blended cements: Reaction kinetics and products by in situ synchrotron X-ray powder. *Cem. Concr. Res.* **2010**, 40, 1704–1713, doi:10.1016/j.cemconres.2010.08.012.
27. Machiels, L.; Morante, F.; Snellings, R.; Calvo, B.; Canoira, L.; Paredes, C.; Elsen, J. Zeolite mineralogy of the Cayo formation in Guayaquil, Ecuador. *Appl. Clay Sci.* **2008**, 42, 180–188, doi:10.1016/j.clay.2008.01.012.
28. Snellings, R.; Machiels, L.; Mertens, G.; Elsen, J. Rietveld refinement strategy for quantitative phase analysis of partially amorphous zeolitized tuffaceous rocks. *Geol. Belgica* **2010**, 13, 183–196.
29. Machiels, L.; Garcés, D.; Snellings, R.; Vilema, W.; Morante, F.; Paredes, C.; Elsen, J. Zeolite occurrence and genesis in the Late-Cretaceous Cayo arc of Coastal Ecuador: Evidence for zeolite formation in cooling marine pyroclastic flow deposits. *Appl. Clay Sci.* **2014**, 87, 108–119, doi:10.1016/j.clay.2013.10.018.
30. Villaquirán-Caicedo, M.A.; de Gutiérrez, R.M.; Sulekar, S.; Davis, C.; Nino, J.C. Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources. *Appl. Clay Sci.* **2015**, 118, 276–282, doi:10.1016/j.clay.2015.10.005.
31. Özen, S.; Göncüoğlu, M.C.; Liguori, B.; De Gennaro, B.; Cappelletti, P.; Gatta, G.D.; Iucolano, F.; Colella, C. A comprehensive evaluation of sedimentary zeolites from Turkey as pozzolanic addition of cement- and lime-based binders. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 105, 46–61, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.055.
32. Karakurt, C.; Kurama, H.; Topçu, I.B. Utilization of natural zeolite in aerated concrete production. *Cem. Concr. Compos.* **2010**, 32, 1–8, doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.002.
33. He, P.; Jia, D.; Wang, M.; Zhou, Y. Effect of cesium substitution on the thermal evolution and ceramics formation of potassium-based geopolymer. *Ceram. Int.* **2010**, 36, 2395–2400, doi:10.1016/j.ceramint.2010.07.015.
34. Duxson, P.; Mallicoat, S.W.; Lukey, G.C.; Kriven, W.M.; van Deventer, J.S.J. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* **2007**, 292, 8–20, doi:10.1016/j.colsurfa.2006.05.044.
35. Auqui, N.U.; Baykara, H.; Rigail, A.; Cornejo, M.H.; Luis, J. An investigation of the effect of migratory type corrosion inhibitor on mechanical properties of zeolite-based novel geopolymers. *J. Mol. Struct.* **2017**, doi:10.1016/j.molstruc.2017.06.066.

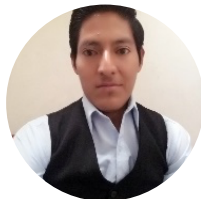
Reseña de los autores:



Nestor Ulloa. Ingeniero mecánico y Magister en Ciencia e Ingeniería de Materiales, graduado de la ESPOL en 2017. Profesor de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Investigador en las áreas de ciencia de los materiales en especial materiales alternativos de construcción respetuosos con el medio ambiente.



José Luis Allauca. Ingeniero mecánico, graduado ESPOCH 2009, Magister en Seguridad Ingeniería mención prevención de riesgos y salud ocupacional, graduado en la UNACH 2015. Miembro del Órgano Colegiado Superior del ISTGEA, Profesor del Instituto Superior Tecnológico General Eloy Alfaro. Investigador en las áreas de la Ingeniería mecánica, Coordinador e investigador Académico.



David Reinoso. Ingeniero en Biotecnología Ambiental, graduado de la ESPOCH 2021. Consultor y asesor en sistemas de gestión de calidad, ambiental y seguridad de Chimborazo.