

Síntesis de geopolímeros a partir de caolín activado con hidróxidos de Na y K para la evaluación de su resistencia mecánica

Synthesis of geopolymers from kaolin activated with Na and K hydroxides for the evaluation of their mechanical strength

Marissa Vargas Ramírez ^a, Iván Cano Romero ^b, Cynthia Aristeo Domínguez ^c, Macaria Hernández Chávez ^d

Abstract:

This study presents the synthesis and characterization of geopolymers produced from kaolin sourced in Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo, Mexico. The objective was to evaluate the effect of the type of alkaline activator (NaOH, KOH, and NaOH + Na₂SiO₃), the Si/Al molar ratio, and the addition of sand on the compressive strength of the resulting materials. Six experimental formulations were designed, using 12 M alkaline solutions and thermal treatment of the precursor at 700 °C, followed by curing at room temperature for 7, 14, and 28 days. The samples were characterized using XRD, FTIR, SEM and compressive strength tests. Results show that the formulation activated with KOH (Series C) achieved a compressive strength >22 MPa without aggregate, while the addition of sodium silicate in Series B significantly enhanced matrix polymerization. The mortar in Series E (NaOH + Na₂SiO₃ + sand) even surpassed the performance of conventional Portland cement. Structural analysis revealed that a higher silica content promotes the development of a dense and continuous amorphous network, which directly correlates with improved mechanical strength. These findings position the synthesized geopolymers as a viable and sustainable alternative to traditional cement-based materials.

Keywords:

Geopolymers, kaolin, alkaline, activators, compressive strength, cement alternatives

Resumen:

Este trabajo presenta la síntesis y caracterización de geopolímeros elaborados a partir de caolín extraído del municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo, México. El objetivo fue evaluar el efecto del tipo de activador alcalino (NaOH, KOH y NaOH + Na₂SiO₃), la relación molar Si/Al y la adición de arena sobre la resistencia a la compresión de los materiales obtenidos. Se diseñaron seis formulaciones experimentales, con curado a temperatura ambiente durante 7, 14 y 28 días, utilizando soluciones alcalinas a 12 M y tratamiento térmico del precursor a 700 °C. Las muestras fueron caracterizadas mediante DRX, FTIR, MEB y ensayos mecánicos. Los resultados indican que la formulación activada con KOH (Serie C) alcanzó una resistencia >22 MPa sin agregado, mientras que la adición de silicato de sodio en la Serie B mejoró significativamente la polimerización de la matriz. El mortero de la Serie E (NaOH + Na₂SiO₃ + arena) superó incluso al cemento Portland convencional. El análisis estructural mostró que una mayor proporción de sílice promueve una red amorfa densa y continua, lo que se correlaciona directamente con el aumento de la resistencia mecánica. Estos resultados posicionan a los geopolímeros sintetizados como una alternativa viable y sostenible frente a los materiales cementantes tradicionales.

Palabras Clave:

Geopolímeros, caolín, activadores alcalinos, resistencia a la compresión, materiales alternativos al cemento.

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0007-0350-1432>, Email: lo447202@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0007-0398-1675>, Email: ca440786@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0001-9041-7795>, Email: cynthiaaristeo@gmail.com

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Área Académica de Ciencias de la Tierra | Pachuca de Soto-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-8164-2835>, Email: macariahernandez@gmail.com

Introducción

El caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) es un mineral compuesto por silicatos de aluminio hidratados, derivado de la descomposición de rocas feldespáticas. Esta arcilla, presente principalmente en forma de caolinita, suele ser blanca, aunque puede presentar diversas tonalidades según las impurezas presentes, como óxidos de hierro. Una de sus propiedades características es su naturaleza higroscópica, lo que facilita su hidratación rápida al contacto con el agua; por ello, para su uso en síntesis geopolimérica, es recomendable un secado previo que mejore su reactividad (Olvera Venegas & Hernández Cruz, 2014).

El caolín ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) es un mineral compuesto por silicatos de aluminio hidratados, derivado de la descomposición de rocas feldespáticas. Esta arcilla, presente principalmente en forma de caolinita, suele ser blanca, aunque puede presentar diversas tonalidades según las impurezas presentes, como óxidos de hierro. Una de sus propiedades características es su naturaleza higroscópica, lo que facilita su hidratación rápida al contacto con el agua; por ello, para su uso en síntesis geopolimérica, es recomendable un secado previo que mejore su reactividad (Olvera Venegas & Hernández Cruz, 2014).

La activación alcalina de materiales ricos en aluminosilicatos como el caolín mediante hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) permite la formación de geopolímeros, estructuras amorfas con propiedades mecánicas y térmicas sobresalientes. El tipo de catión alcalino (Na^+ o K^+) influye directamente en las características del producto final, especialmente en la formación y estabilidad del gel geopolimérico (Villaquirán, 2015).

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos amorfos con amplias aplicaciones en diversas industrias. Su desarrollo fue propuesto por Joseph Davidovits en 1972 como una alternativa potencial al cemento Portland, debido a sus ventajas ambientales y mecánicas (Allaf & Kamal, 2009; Selmani et al., 2017). Desde entonces, se ha incrementado el interés en su estudio, especialmente utilizando materias primas naturales como el caolín y el metacaolín. La síntesis geopolimérica se basa en un proceso de policondensación entre una fuente de aluminosilicatos y una solución alcalina, generando una matriz tridimensional con alta resistencia mecánica y durabilidad química.

Estudios previos han demostrado que la activación

alcalina con soluciones de NaOH y silicato de sodio permite obtener materiales con resistencias a la compresión entre 400 y 500 kg/cm², comparables al cemento Portland. Además, la aplicación de condiciones térmicas controladas (60 °C y 90 °C) reduce significativamente el tiempo de fraguado y acelera la deshidratación del gel, logrando curados eficientes en solo tres días (Van Chanh, 2008).

Asimismo, se ha reportado que otras materias primas como escorias de fundición, cenizas volantes, arcillas alternativas, vidrio y cerámica reciclados, pueden ser empleadas en la síntesis de geopolímeros, siempre que presenten una composición química adecuada. Esta variabilidad en las fuentes precursoras incide directamente en las propiedades físicas del producto final, registrándose resistencias a la compresión entre 19 MPa y 67 MPa, y hasta 152 MPa en materiales desarrollados con residuos vítreos (Sambucci, 2021; Murali, 2024).

En este contexto, el presente estudio propone la síntesis de geopolímeros a partir de una arcilla rica en aluminosilicatos proveniente del municipio de Agua Blanca de Iturbide, Hidalgo, utilizando como activadores alcalinos soluciones de NaOH y KOH a 12 M. Esta investigación representa una propuesta innovadora al emplear una materia prima local poco explorada, activada térmicamente a 700 °C, con el propósito de evaluar su reactividad y desempeño mecánico para aplicaciones en la industria de la construcción.

Metodología

El presente trabajo se enfoca en la síntesis de materiales geopoliméricos a partir de arcillas ricas en aluminosilicatos, extraídas del municipio de Agua Blanca de Iturbide, en el estado de Hidalgo, México. Para ello, se aplicaron los principios de geopolimerización con el objetivo de obtener materiales alternativos para su uso en la industria de la construcción.

Materiales

Los materiales empleados en este estudio fueron los siguientes:

- Caolín proveniente del municipio de Agua Blanca de Iturbide, con una composición química de 46.18 % SiO_2 y 46.65 % Al_2O_3 (Hernández-Chávez, 2020).
- Hidróxido de sodio (NaOH), con una pureza del 97 % (marca comercial).
- Hidróxido de potasio (KOH), con una pureza del 90.9 % (marca comercial).
- Silicato de sodio (Na_2SiO_3), con un contenido de 61.29 % de SiO_2 y 19.43 % de Na_2O .
- Arena común para construcción (marca

comercial).

- Cemento Portland CPC 30R (marca CEMEX).
- Agua destilada.

Síntesis de geopolímeros

Para la obtención de los geopolímeros (GP's), se emplearon soluciones de NaOH y KOH a una concentración de 12 M, trabajando bajo condiciones de curado a temperatura ambiente durante 7, 14 y 28 días. Se diseñaron seis series experimentales, cuyas características se ilustran en la Figura 1.

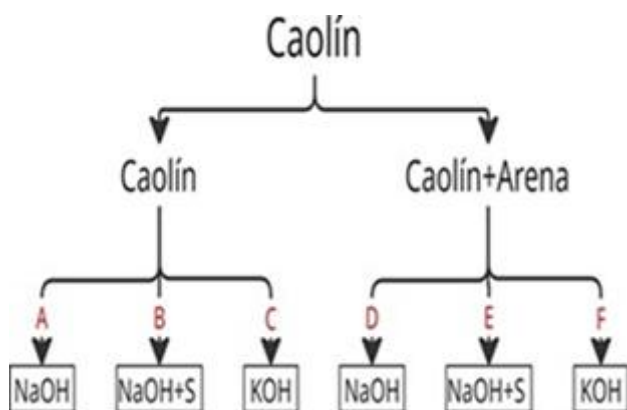


Figura 1. Diseño experimental de Caolín y Caolín+Arena como precursores y tres activadores alcalinos.

En la Figura 2 se presenta el diagrama de flujo correspondiente a las series experimentales, en el cual se detalla la ruta de obtención de los geopolímeros y la elaboración de las probetas para ensayo.

El procedimiento consistió en mezclar el caolín con el activador alcalino (MOH), utilizando la cantidad necesaria para alcanzar una concentración de 12 M. Las mezclas obtenidas se sometieron a un tratamiento térmico a 700 °C durante 2 horas. Una vez transcurrido este tiempo, las muestras se dejaron enfriar, se molieron finamente y se les añadió agua destilada para obtener una consistencia adecuada. Posteriormente, se vertieron en moldes cúbicos de 4 cm de lado, dejándose reposar durante 24 horas. Tras el desmoldeo, las probetas se curaron a temperatura ambiente durante 7, 14 y 28 días. Esta metodología busca minimizar la formación de fases cristalinas como el cuarzo, promoviendo una estructura amorfa más densa y, en consecuencia, una mayor resistencia a la compresión del material geopolimérico.

Cabe destacar que el caolín utilizado, extraído del municipio de Agua Blanca de Iturbide (Hidalgo, México),

posee una razón molar Si/Al = 0.84. Para modificar esta proporción y alcanzar un valor Si/Al = 1.5, se adicionó silicato de sodio (Na_2SiO_3), con el objetivo de evaluar el efecto de dicha relación sobre el desempeño mecánico del geopolímero.

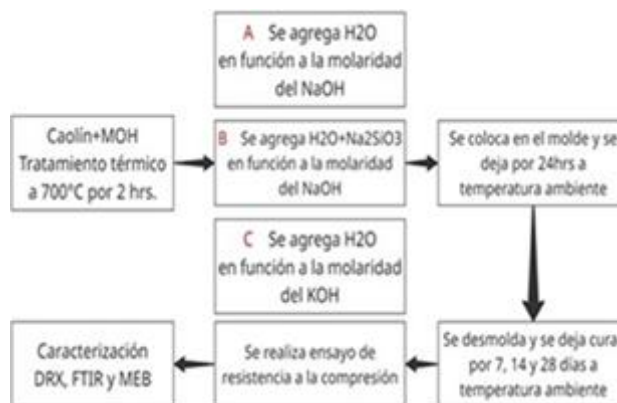


Figura 2: Diagrama de flujo del método mediante el Caolín como precursor, utilizando como activador alcalino A)NaOH , B)NaOH + Na_2SiO_3 y C)KOH, para la obtención del GP's y la obtención de probetas.

A las series experimentales A, B y C se les adicionó arena en una proporción 1:3 (geopolímero:arena) para la elaboración de los morteros correspondientes a las series D, E y F. El propósito de esta modificación fue evaluar el efecto de la incorporación de un agregado mineral sobre la resistencia a la compresión de los materiales geopoliméricos.

Reacción de geopolimerización

Se llevó a cabo un análisis visual para evaluar la formación de gel geopolimérico en muestras preparadas con 5 g de caolín o metacaolín y 5 mL de diferentes soluciones activadoras (NaOH, NaOH + Na_2SiO_3 y KOH), empleando concentraciones molares de 11 M, 12 M y 13 M. Las muestras fueron dejadas en reposo durante 4 días, tras lo cual se obtuvieron las imágenes presentadas en la Figura 3.

Cada serie experimental incluye tres viales que corresponden a las concentraciones mencionadas: 11 M (izquierda), 12 M (centro) y 13 M (derecha). A partir de las imágenes, se cuantificó la sección transparente o más clara asociada a la formación de gel en cada vial, utilizando herramientas de medición digital por imagen. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Reacción de geopolimerización de Caolín (A, B, C) y MK (D,E,F), concentraciones 11 M (izquierda), 12 M

(centro) y 13 M (derecha)

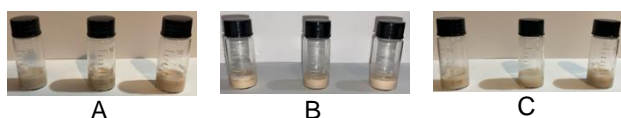


Tabla 4. Volumen de gel (ml) generado en cada serie experimental, A, B y C, a concentraciones de 11M, 12M y 13M.

Serie	11M	12M	13M
A	0.500	0.682	0.5
B	0.545	1.182	0.963
C	0.682	1.909	1.227

La muestra que presentó la mayor formación de gel entre las series elaboradas con caolín fue la Serie C (Caolín + KOH) a una concentración de 12 M. En general, para cada una de las series experimentales, se observó que la concentración de 12 M favoreció la mayor formación de gel geopolimérico en comparación con 11 M y 13 M. Por esta razón, en el presente estudio se decidió mantener constante la molaridad del agente alcalino en 12 M para las etapas posteriores de síntesis y caracterización.

Resultados experimentales

Difracción de rayos X

Las muestras de caolín sin tratamiento térmico, junto con las tres series experimentales A, B y C, fueron analizadas a los 7, 14 y 28 días de curado mediante difracción de rayos X en polvo (DRX), con el objetivo de identificar las transformaciones de fase inducidas durante el proceso de geopolymerización. Los resultados se presentan en la Figura 3.

La muestra de caolín contiene picos correspondientes a caolinita (PDF 01-078-1996), tridimita (PDF 00-016-0152), cuarzo (PDF 01-089-8938), cristobalita (PDF 01-085-0621) y alunita (PDF 01-071-1776).

En la Serie A (NaOH), con una relación molar Si/Al de 0.87, se observa una notable disminución de los componentes cristalinos característicos del caolín debido a su disolución en el medio alcalino, como ha sido reportado por Alshaaer (2013). Esta disolución indica una transformación estructural significativa, evidenciada por la desaparición completa de los picos correspondientes a caolinita y alunita. Sin embargo, persisten señales difractométricas asociadas a tridimita, cuarzo y cristobalita.

Adicionalmente, se identifica la aparición de una banda ancha entre 21.65° y 48.85° en 2θ , característica de una fase amorfa tipo geopolímero, lo cual confirma la formación de una nueva matriz aluminosilicatada (Autef et al., 2013; He et al., 2013). Dentro de esta banda amorfa se detectan picos asociados a zeolita A (PDF 01-078-0040), zeolita X (PDF 01-089-8235) y sodalita (PDF 00-002-0052), además de los remanentes de tridimita, cuarzo y cristobalita.

En la Serie B (NaOH + Na_2SiO_3), donde la relación molar Si/Al fue incrementada a 1.57, se observa una notable reducción de los componentes cristalinos del caolín como consecuencia del medio altamente alcalino (Alshaaer, 2013). En particular, se registra la desaparición total de los picos característicos de la caolinita.

En su lugar, emergen picos correspondientes a zeolita A (PDF 01-078-0040), zeolita X (PDF 01-089-8235), sodalita (PDF 00-002-0052) y albita (PDF 01-089-6426), lo cual sugiere la formación de nuevas fases cristalinas inducidas por la adición de silicato de sodio y el aumento en la relación Si/Al.

En la Serie C (KOH), con una relación molar Si/Al de 0.84, se observa la disolución completa de los componentes cristalinos del caolín, lo que indica una transformación estructural significativa del material precursor. Como resultado de esta reacción, se identifican nuevas fases cristalinas correspondientes a silicato de aluminio y potasio (PDF 00-018-0987), kaliofilita sintética (PDF 00-012-0134), ilita (PDF 00-043-0685) y zeolita L (PDF 01-080-1580).

Estas fases reflejan la interacción específica del ion potasio con la matriz aluminosilicática, promoviendo la formación de estructuras cristalinas distintas a las observadas en las series activadas con sodio.

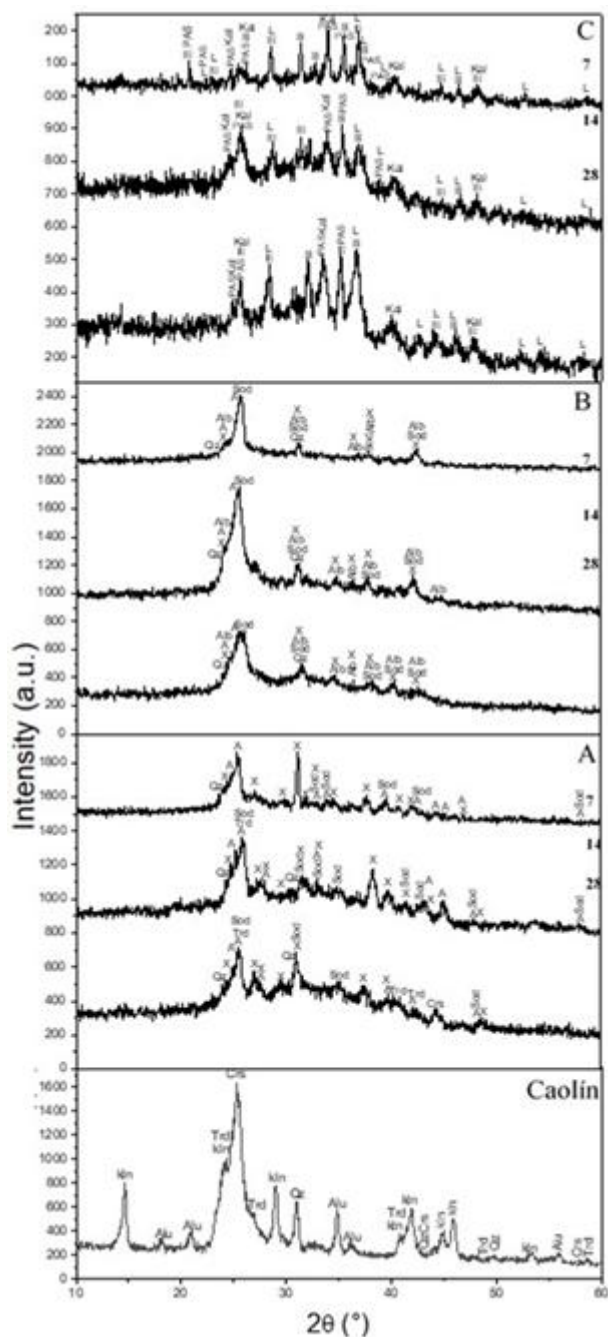


Figura 3: Patrones de DRX del caolín de agua blanca Hidalgo, de la muestra A, B y C a 7, 14 y 28 días.

Resultados de FTIR

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) fue empleada para identificar los grupos funcionales presentes en el caolín original y en las muestras sintetizadas mediante activación alcalina. En la Figura 4 se presentan los espectros correspondientes al caolín sin tratamiento térmico y a las tres series experimentales obtenidas con diferentes activadores: A)

NaOH, B) NaOH + silicato de sodio (Na_2SiO_3) y C) KOH, analizadas a 7, 14 y 28 días de curado.

El espectro del caolín muestra bandas características a 3688 y 3620 cm^{-1} , correspondientes al estiramiento O–H de grupos hidroxilo estructurales, así como una banda en 1640 cm^{-1} atribuida a la flexión de H–O–H, asociada a agua físicamente adsorbida. La región comprendida entre 1100 y 1000 cm^{-1} exhibe una banda intensa correspondiente al estiramiento asimétrico de enlaces Si–O–T (T = Si o Al), mientras que la señal en torno a 915 cm^{-1} se relaciona con la vibración de Al–OH propia del caolín. Las bandas observadas entre 540 y 440 cm^{-1} son indicativas de modos de deformación de enlaces Si–O–Si y Si–O–Al, (X. Chen 2017, Autef 2013).

En la Serie A (NaOH), con una relación molar Si/Al incrementada a 0.87 , se observa una disminución progresiva de las bandas características del caolín, acompañada de un ensanchamiento y desplazamiento de la banda principal hacia $1000\text{--}950\text{ cm}^{-1}$, lo cual indica la formación progresiva de un gel tipo N–A–S–H (sódico-aluminosilicatado) (Wan 2017, Panias2007). A lo largo de los 28 días de curado, las bandas se tornan más amplias y menos definidas, reflejando la transición hacia una estructura más amorfa y polimerizada.

Por su parte, la Serie B (NaOH + Na_2SiO_3), con una relación molar Si/Al incrementada a 1.57 , muestra un desplazamiento más notorio e intenso en la región de $1100\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ (H. Xiao 2016). Este comportamiento sugiere una mayor formación de enlaces Si–O–Si, lo que está relacionado con un grado de polimerización superior. La reducción significativa de las señales atribuibles al caolín residual indica una conversión más efectiva del precursor. La evolución temporal también evidencia un desarrollo más completo de la matriz geopolimérica con el avance del curado.

En contraste, la Serie C (KOH), con una relación molar Si/Al incrementada a 0.84 , presenta un comportamiento distinto. Aunque se identifican cambios en la región de $1000\text{--}950\text{ cm}^{-1}$, las bandas entre 700 y 600 cm^{-1} se tornan más prominentes, lo que puede estar asociado a la formación de estructuras intermedias o fases no completamente amorfas, (G. Roviello 2015.). El desarrollo de la red geopolimérica es más lento, probablemente debido al menor grado de disolución inducido por el ion potasio, lo que se refleja en la persistencia de señales relacionadas con especies residuales.

En general, los espectros FTIR indican que la presencia de silicato de sodio como fuente adicional de sílice favorece la formación de una red geopolimérica más

desarrollada, mientras que el uso de KOH como activador presenta una cinética distinta y posiblemente menos eficiente en condiciones similares. Estos resultados son consistentes con estudios previos que vinculan la intensidad y posición de las bandas de estiramiento Si–O–T con el avance del proceso de geopolimerización (Davidovits, 1991; Fernández-Jiménez & Palomo, 2003, Madejová, J. 2003).

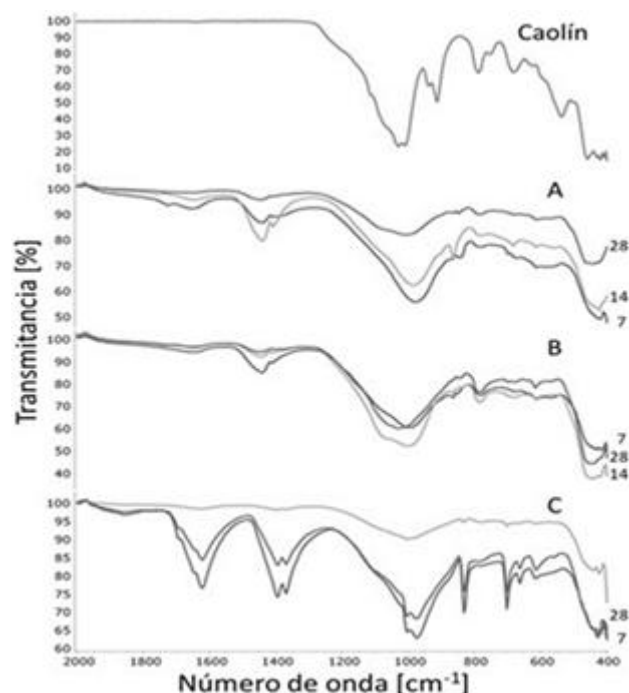


Figura 4: FTIR del caolín de agua blanca Hidalgo, de la muestra A, B y C a 12M a 7, 14 y 28 días.

Con base en el análisis de los espectros FTIR, se midieron las posiciones de la banda principal asociada al estiramiento asimétrico de los enlaces Si–O–T (T = Si o Al), correspondiente a la formación de estructuras tipo geopolímero. En la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos a 7, 14 y 28 días de curado para cada una de las tres series experimentales:

La Serie A muestra un desplazamiento progresivo de la banda hacia mayores números de onda, lo que indica una evolución gradual del proceso de geopolimerización. En la Serie B, dicho desplazamiento es más marcado debido al mayor contenido de sílice proporcionado por el silicato de sodio, lo cual favorece la formación de una red aluminosilicatada más polimerizada, Tabla 4. Por otro lado, la Serie C muestra valores constantes en las tres etapas, sugiriendo una evolución estructural limitada bajo activación con KOH en las condiciones estudiadas.

Tabla 5. Numero de ondas cm^{-1} (FIR) de los M-geopolímeros obtenidos en la serie experimental A, B y C, a 7, 14 y 28 días, a 12M de activador alcalino con Caolín como precursor.

Muestra	7	14	28
A	978.6	985.2	1008.0
B	996.1	1003.0	1028.0
C	1003.0	1003.0	1003.0

Resultados de MEB

En esta sección se presentan las imágenes obtenidas por MEB, para las series experimentales A, B, C a $(1000 \times 10 \mu\text{m})$.

Las imágenes se obtuvieron por electrones retro dispersados, presentando un contraste composicional, donde la brillantez es proporcional al número atómico promedio de la zona irradiada.

Se presentan las imágenes de MEB para la serie experimental con caolín y activadores A) NaOH, B) NaOH+SS y C) KOH, se presentan en la Tabla 6 a $10 \mu\text{m}$. Para la serie A, a lo largo del curado (7 a 28 días), se observa una estructura porosa con partículas parcialmente aglomeradas. No se evidencia un desarrollo notorio de una matriz continua. A los 28 días aún se distinguen granos individuales, lo que sugiere una baja conversión a fase geopolimérica.

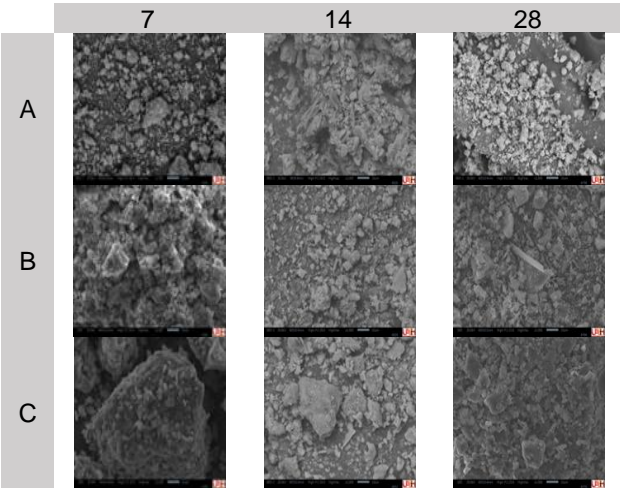
La relación Si/Al varía poco (4.23 a 3.38), y el contenido de sodio (Na) se mantiene alrededor de 15–19%. La relación Si/Na se encuentra entre 1.2–1.5 es baja, indicando que no todo el Na fue incorporado eficientemente a la red, lo cual podría explicar la baja densificación observada en MEB.

Para la serie B, se observa una clara evolución morfológica: a los 7 días ya hay una matriz parcialmente homogénea, que a los 14 y 28 días se vuelve más densa y compacta, con menor presencia de partículas sueltas. Esto indica una mayor formación de gel geopolimérico. La relación Si/Al es más alta (hasta 8.27), con una notable disminución de Na a 8.84% a los 28 días. La relación Si/Na aumenta significativamente hasta 3.95, lo cual sugiere una mejor integración del silicato de sodio en la red y una conversión más eficiente del material. Esta composición se relaciona con la alta resistencia a la compresión observada.

Para la serie C, se aprecia una microestructura heterogénea, con fragmentos grandes y poca cohesión entre fases. Aunque hay una ligera consolidación entre 7 y 14 días, a los 28 días la estructura no mejora, mostrando una posible retracción o disgregación.

Se observa una disminución en el contenido de Al y Si a lo largo del tiempo, mientras que Na (probablemente contaminante de silicato) se mantiene alto (~40% al final). La relación Si/Al es baja (~3.2) y la relación Si/Na cae drásticamente a 0.04, indicando una pobre integración química del sistema, lo cual concuerda con la morfología poco consolidada.

Tabla 6. Imágenes de MEB para la serie experimental A, B, C base Caolín a 12 M del activador NaOH, NaOH+SS y KOH (1000x10µm).

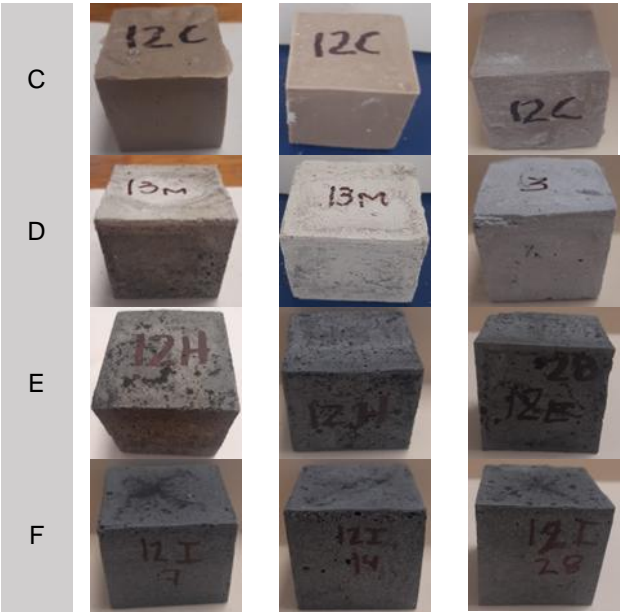
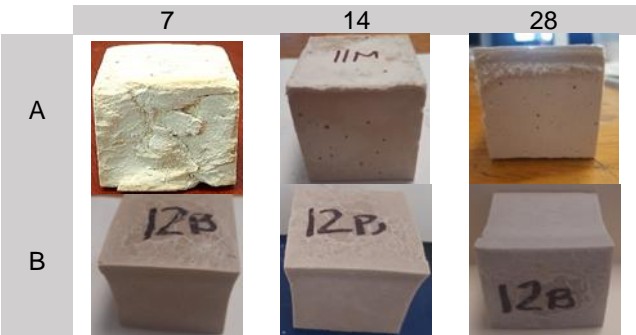


Resultados de Resistencia a la compresión de las probetas

En esta sección se presentan las muestras a las cuales se les determino resistencia a la compresión en una prensa marca Pilot, siendo las series A, B, C sin arena y D, E, F con arena

En la Tabla 7 se presentan las probetas físicas, donde se observa que las muestras de la serie B presentan notable contracción.

Tabla 7. Probetas de GP's de las series experimentales A, B, C y de los morteros correspondientes D, E y F.



La Figura 5 muestra la evolución de la resistencia a la compresión de los geopolímeros sintetizados a partir de caolín activado con A)NaOH, B)NaOH + SS y C)KOH, comparados con el cemento Portland CEMEX CPC 30R (Serie S).

Serie A: Resistencia muy baja y estable, por debajo de 5 MPa.

Serie B: Disminuye progresivamente, de ~18 MPa a ~15 MPa.

Serie C: Resistencia superior a 22 MPa a los 28 días, superando al cemento Portland al final del curado.

Serie S: Cemento Portland (CEMEX CPC 30R) muestra alta resistencia inicial, pero disminuye a 18 MPa a los 28 días.

En conclusión, la serie C fue la más eficiente, demostrando una resistencia comparable y hasta superior al cemento Portland.

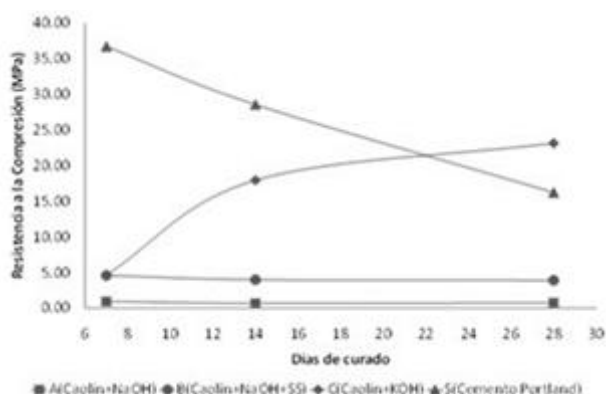


Figura 5. Resistencia a la Compresión (MPa) de las series experimentales A, B, C y del Cemento Portland a 7, 14 y 28 días de reposo a temperatura ambiente.

En la Figura 6 se muestra el comportamiento mecánico de los morteros elaborados con geopolímeros de las series D (NaOH), E (NaOH + SS) y F (KOH), reforzados con arena en una proporción 3:1 (arena:geopolímero), en comparación con el cemento Portland (SCA). La arena funciona como árido para evaluar la transferencia de esfuerzos en una matriz más cercana a condiciones constructivas reales.

En la Serie D, la resistencia se mantiene baja a lo largo del tiempo (<5 MPa), sin incremento apreciable. La matriz no logra cohesionar adecuadamente con el agregado, lo que refleja una conversión incompleta de la pasta geopolimérica. La adición de arena no mejora el desempeño, posiblemente por falta de gelificación efectiva.

En la serie E, se observa una mejora sustancial de la resistencia con el tiempo, alcanzando más de 20 MPa a los 28 días. Este sistema presenta una excelente compatibilidad entre la matriz y el agregado. La presencia de mayor sílice contribuye a una red más densa que logra transmitir esfuerzos de manera eficiente, supera incluso al mortero de cemento Portland.

En la serie F, la resistencia inicial es aceptable (~12 MPa), pero a partir de los 14 días se estanca o decrece ligeramente. Aunque la adición de arena mejora la resistencia respecto a la pasta pura, no alcanza los valores de la serie E. La red formada es menos eficiente en términos de cohesión interna y transferencia de esfuerzos, pero llega a semejar al mortero de cemento Portland.

Cemento Portland, presenta alta resistencia inicial (~17 MPa) que permanece constante a 14 días, pero muestra leve disminución hacia 28 días (~15 MPa). Refleja un comportamiento típico del cemento convencional bajo

posible falta de curado húmedo, con tendencia a retracción.

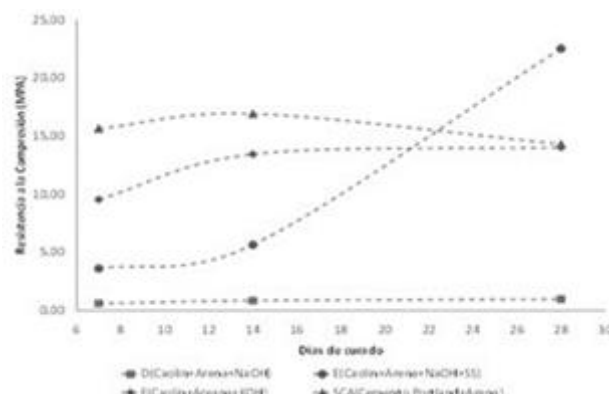


Figura 6. Resistencia a la Compresión (MPa), de las series experimentales, E y F a 7, 14 y 28 días de reposo a temperatura ambiente.

Conclusiones

Este estudio evaluó la síntesis de geopolímeros a partir de caolín activado con diferentes soluciones alcalinas (NaOH, KOH y NaOH + Na_2SiO_3), con y sin adición de arena, empleando un tratamiento térmico a 700 °C y curado a temperatura ambiente durante 7, 14 y 28 días. Se aplicaron técnicas de caracterización como DRX, FTIR, MEB y ensayos de compresión para establecer relaciones estructura-propiedad en los materiales obtenidos.

Los principales hallazgos son los siguientes:

- Difracción de rayos X (DRX) mostró una transformación estructural significativa en todas las series, con desaparición de picos de caolinita y aparición de fases secundarias (zeolitas, sodalita, albita, kaliofilita, etc.). La Serie B, con mayor contenido de sílice, presentó fases cristalinas más complejas y diversas, mientras que la Serie C evidenció productos típicos de la activación potásica.
- FTIR confirmó la formación progresiva de estructuras tipo geopolímero a través del desplazamiento de la banda Si-O-T hacia mayores números de onda. La Serie B mostró los desplazamientos más marcados, asociados a un mayor grado de polimerización y desarrollo de una red amorfa densa. En cambio, la Serie C presentó cambios menos pronunciados, reflejando una estructura menos consolidada.
- La resistencia a la compresión se correlacionó directamente con los resultados estructurales. La

Serie C (KOH) alcanzó la mayor resistencia sin arena (>22 MPa), superando al cemento Portland a los 28 días, a pesar de su microestructura heterogénea. La Serie B (NaOH + Na₂SiO₃) presentó una microestructura más densa y homogénea según MEB, y obtuvo altos valores de resistencia al incorporar arena (Serie E), incluso superiores al mortero convencional. La Serie A fue la menos eficiente en términos de cohesión estructural y desempeño mecánico.

- La incorporación de silicato de sodio favoreció el desarrollo de una matriz aluminosilicatada más cohesionada, como evidenciaron los espectros FTIR, la evolución morfológica en MEB y el incremento de la resistencia a la compresión.

En conjunto, los resultados indican que el tipo de activador alcalino, la relación molar Si/Al y la presencia de agregados son factores críticos para controlar la microestructura y optimizar las propiedades mecánicas de los geopolímeros. La estrategia de síntesis empleada, basada en el uso de un caolín local con activación térmica, demuestra ser efectiva y representa una alternativa sostenible al cemento Portland, con aplicaciones potenciales en la industria de la construcción.

Referencias

- Allaf, K., & Kamal, I. (2009). Geopolymers: Prospects for polymer industry. AES ATEMA.
- Autef, A., Joussein, E., Gasgnier, G. and Rossignol, S. (2013) Role of the Silica Source on the Geopolymerization Rate: A Thermal Analysis Study. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 366, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2013.01.034>
- Autef, A., Joussein, E., Gasgnier, G., & Rossignol, S. (2013). Role of the silica source on the geopolymerization rate: A thermal analysis study. *Journal of Non Crystalline Solids*, 366, 16–22.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Farmer, V. C. (1974). The infrared spectra of minerals. Mineralogical Society.
- Fernández Jiménez, A., & Palomo, A. (2003). Characterisation of fly ashes: Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*, 82(18), 1351–1359. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00194-7](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00194-7)
- G. Roviello, L. Ricciotti, C. Ferone, F. Colangelo y O. Tarallo (2015), Fire resistant melamine based organic-geopolymer hybrid composites, *Cement & Concrete Composites*, p. 11, 17.
- He, J.; Jie, Y.; Zhang, J.; Yu, Y.; Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 37(1):108–118. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.11.010>
- Hernández Chávez, M., Vargas, M., Herrera González, A. M., Serrano, J., Cruz Ramírez, A., Romero, A., & Sánchez Alvarado, R. G. (2020). Thermodynamic analysis of the influence of potassium on the thermal behavior of kaolin raw material. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57, 39–52. <https://doi.org/10.37190/ppmp/128393>
- H. Xiao, H. Tao y S. Li, «Immobilization of chromite ore processing residue with alkali-activated blast furnace slag-based geopolymer,» *Ceramics International*, p. 12, 05 Marzo 2016.
- Madejová, J. (2003). FTIR techniques in clay mineral studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(02\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(02)00065-6)
- Murali, G. (2024). Recent research in mechanical properties of geopolymer based ultra high performance concrete: A review. *Defence Technology*, 32, 67–88.
- Olvera Venegas, P. N., & Hernández Cruz, L. E. (2014). El caolín y sus aplicaciones industriales. PADI, UAHE. <https://doi.org/10.29057/icbi.v1i2.503>
- Panias, D., Giannopoulou, I. P., & Perraki, T. (2007). Effect of synthesis parameters on the mechanical properties of fly ash based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301(1–3), 246–254.
- Sambucci, M., Sibai, A., & Valente, M. (2021). Recent advances in geopolymer technology: A potential eco friendly solution in the construction materials industry – A review. *Journal of Composites Science*, 5(4), 109. <https://doi.org/10.3390/jcs5040109>
- Selmani, S., Sdiri, A., Bouaziz, S., Joussein, E., & Rossignol, S. (2017). Effects of metakaolin addition on geopolymer prepared from natural materials. *Applied Clay Science*, 146, 457–467.
- Van Chanh, N., Trung, B. D., & Van Tuan, D. (2008). Recent research in geopolymer concrete. En 3ª Conferencia Internacional ACF/VCA, Vietnam, p. 235–241.
- Villaquirán Caicedo, M. A., Rodríguez Erich, D., & Mejía De Gutiérrez, R. (2015). Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(1), 113–122. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)72112-8](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)72112-8)
- Wan, Q., Rao, Q., Song, F., García, S., Estrella, R. E., Pati, R. M., Patiño, C. L., & Zhang, Y. (2017). Geopolymerization reaction, microstructure and simulation of metakaolin based geopolymers at extended Si/Al ratios. *Materials*, 10(6), 579. <https://doi.org/10.3390/ma10060579>