

Efecto de las condiciones de curado en el desempeño mecánico de los cementos geopoliméricos: una revisión

Effect of curing conditions on the mechanical performance of geopolymer cements: a review

Carlos A. Bedoya-Henao¹
Jorge I. Tobón²
Ary A. Hoyos-Montilla³

¹Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (Colombia).
Correo electrónico: cabedoyah@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0009-0006-8219-6714>

²Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (Colombia). Correo electrónico: jitobon@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5115-7233>

³Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín (Colombia). Correo electrónico: aahoyosm@unal.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1451-1309>

Recibido: 15-09-2023 Aceptado: 15-02-2024

Cómo citar: Bedoya-Henao, Carlos A. ; Tobón, Jorge I. ; Hoyos-Montilla, Ary A. (2024). Efecto de las condiciones de curado en el desempeño mecánico de los cementos geopoliméricos: una revisión. *Informador Técnico*, 88(1), 88-102.
<https://doi.org/10.23850/22565035.5933>

Resumen

Teniendo en cuenta el potencial de los cementos geopoliméricos como una alternativa para sustituir parcialmente al cemento Portland, este artículo presenta el análisis del efecto que tienen las condiciones de curado de los cementos geopoliméricos sobre su desempeño mecánico. Las variables evaluadas durante el proceso de curado fueron tiempo, humedad y temperatura. Además, se describe el comportamiento de estas variables de acuerdo con los métodos de curado que han sido estudiados y evaluados hasta el momento en los cementos geopoliméricos con base de ceniza volante. Para llevar a cabo la revisión bibliográfica fue usado Scopus como herramienta principal de búsqueda, a partir de la palabra clave “cementos geopoliméricos”. Se identificaron más de 90 documentos relevantes tras aplicar filtros específicos y revisar sus resúmenes. Finalmente, se realizó una lectura y análisis detallado de los datos bibliográficos, que aportaron información relevante para el tema de estudio. Los procedimientos publicados muestran que no hay unanimidad para definir el mejor método de curado para este tipo de material; sin embargo, las condiciones más aceptadas para el desarrollo de mayores resistencias a la compresión son temperaturas entre 60 y 80 °C, con humedad controlada (sellado), durante un periodo de 4 a 12 horas. En general, esta revisión sirve como una guía para proponer, estudiar y aplicar diferentes procesos de curado en cementos geopoliméricos con base de ceniza volante, buscando optimizar su desempeño mecánico.

Palabras clave: cementos geopoliméricos; ceniza volante; métodos de curado; material cementante alternativo; desempeño mecánico.

Abstract

Considering the potential of geopolymer cements as an alternative to partially substitute Portland cement, this article presents a brief review, where the curing conditions of geopolymer cements are analyzed based on three variables: time, humidity, and temperature. In addition, the behavior of these variables is described according to the curing methods that have been studied and evaluated so far in fly ash-based geopolymer cements. The literature review was conducted using Scopus as the primary search tool, starting from the keyword 'geopolymeric cements.' More than 90 relevant documents were identified after applying specific filters and reviewing their abstracts. Finally, a thorough reading, and analysis of the bibliographic data were performed to extract relevant information for the study topic. The published procedures show that there is no conclusive trend in the curing method for this type of material; however, the most accepted conditions for the development of higher compressive strengths are temperatures between 60 and 80 °C, with controlled humidity (sealed), for a period of 4 to 12 hours. In general, this brief review serves as a guide to propose, study, and apply different curing processes in fly ash-based geopolymer cements.

Keywords: geopolymer cements; fly ash; curing methods; alternative cement; mechanical performance.

1. Introducción

El cemento Portland es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo; sin embargo, su fabricación tiene un gran impacto sobre el medio ambiente. Emite a la atmósfera entre 0,62 y 0,97 toneladas de CO₂, y requiere alrededor 4 GJ por t de cemento (Damineli *et al.*, 2010; Damtoft *et al.*, 2008). Lo anterior implica que genera cerca del 8 % del total de CO₂ antropogénico, y requiere alrededor del 14 % de la energía global total usada en el sector industrial (Chen *et al.*, 2023; Hasanbeigi *et al.*, 2012).

En los últimos años, el interés por el estudio de materiales que reemplacen parcialmente, o que sean una alternativa, al cemento Portland ha aumentado considerablemente (Juenger; Siddique, 2015; Lothenbach *et al.*, 2011; Johari *et al.*, 2011). Los cementos geopoliméricos han sido algunos de los materiales más estudiados como alternativa (Adjei *et al.*, 2022; Aranda *et al.*, 2013; Nodehi; Taghvae, 2021; Ruiz-Santaquiteria *et al.*, 2016). Estos cementos son inorgánicos, formados por un activador alcalino, agua y un precursor que es la fuente de aluminio y silicio reactivos (Shi *et al.*, 2011; Zhuang *et al.*, 2016). El precursor puede ser de diferente naturaleza, como la escoria granulada de alto horno, ceniza volante de la combustión del carbón o puzolanas naturales, entre otros (Shi *et al.*, 2011). La ceniza volante es uno de los materiales más utilizados por su alto contenido de fase amorfa, composición química, tamaño adecuado de partícula, morfología redondeada (cenósferas) y alta reactividad (Chindaprasirt *et al.*, 2014). Estos cementos geopoliméricos han demostrado desarrollar mayor resistencia a la compresión y mejor desempeño frente a agentes agresores que el cemento Portland (Fernández-Jiménez *et al.*, 2008; Kovalchuk *et al.*, 2008; Rashad, 2014).

La microestructura (Fernández-Jiménez *et al.*, 2005; Fernández-Jiménez; Palomo, 2009; Krivenko *et al.*, 2006; Nath *et al.*, 2016; Puertas; Fernández-Jiménez, 2003), el comportamiento mecánico (Diaz-Loya *et al.*, 2011; İlkentapar *et al.*, 2017; Okoye *et al.*, 2015a, 2015b; Ryu *et al.*, 2013; Swanepoel; Strydom, 2002) y las propiedades físicas (Diaz-Loya *et al.*, 2011; Steveson; Sagoe-Crentsil, 2005) dependen, entre otros factores, de la fuente de aluminio y silicio (Fernández-Jiménez; Palomo; Sobrados; *et al.*, 2006; Fletcher *et al.*, 2005; Hossain *et al.*, 2015; Provis *et al.*, 2015), el tipo de activador (Fernández-Jiménez; Palomo; Criado, 2006; Fernández-Jiménez; Palomo, 2005; Phair; van Deventer, 2002; Provis, 2009; Singh *et al.*, 2016), la relación líquido-sólido (Criado *et al.*, 2007, 2008; García-Lodeiro *et al.*, 2015; Parthasarathy *et al.*, 2016; Ruiz-Santaquiteria *et al.*, 2012; Williamson; Juenger, 2016; Zhou *et al.*, 2016), la temperatura (Bakharev, 2005; Al Bakri *et al.*, 2011; Kovalchuk *et al.*, 2007; Nagral *et al.*, 2014; Noushini; Castel, 2016; Wardhono *et al.*, 2015), la humedad y el tiempo de curado (Criado *et al.*, 2010; Görhan *et al.*, 2016; Nagral *et al.*, 2014; Riahi *et al.*, 2012; Satpute-Manesh *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2016). Sin embargo, la literatura analizada muestra que, para la activación de ceniza volante existen diferentes métodos

para llevar a cabo el proceso de curado (Bakharev, 2005; Görhan *et al.*, 2016; Salih *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2016), principalmente en el manejo de las variables de temperatura, humedad y tiempo.

La temperatura tiene un efecto significativo en las transiciones estructurales de amorfo a cristalino de los geles cementantes que se forman durante el proceso de activación. Un control adecuado de la humedad impide los procesos de carbonatación, formación de fases no deseadas y estabilización del pH. Un adecuado tiempo de curado optimiza el crecimiento de los geles cementantes y previene procesos de deshidratación y variaciones volumétricas (Kovalchuk *et al.*, 2007). En las últimas décadas se han publicado numerosas investigaciones que exploran el efecto de temperatura, humedad y tiempo sobre el curado en cementos geopoliméricos. Sin embargo, no se detectan resúmenes sobre los diferentes tipos de curados, su variabilidad y la correlación entre las variables de temperatura, humedad y tiempo con el desarrollo de la resistencia a compresión, que logren sintetizar de manera integral la información presente en la literatura, y le brinden una herramienta útil a la comunidad científica para el desarrollo de futuras investigaciones.

En este documento, se presenta una breve revisión crítica de la literatura sobre el efecto de temperatura, humedad y tiempo de curado en las características finales de los cementos geopoliméricos con base de ceniza volante. En conclusión, la recopilación de la información permitió identificar tendencias en cuanto a las condiciones más adecuadas para curar estos cementos, con el fin de obtener el mejor desarrollo en la resistencia a la compresión.

2. Metodología de la revisión

La revisión se realizó teniendo en cuenta la plataforma de base de datos más popular: Scopus (Asghar *et al.*, 2023). La compilación se hizo a partir de la ecuación de búsqueda (“Cementos geopoliméricos” or “Geopolímeros”) & (“Base ceniza volante” or “Ceniza volante”) & (“Curado” or “Condiciones de curado”) & (“Temperatura”) & (“Humedad”). Después se aplicaron varios filtros que llevaron a detectar literatura más específica sobre cementos geopoliméricos con base de ceniza volante y condiciones de curado a partir de las variables de temperatura, humedad y tiempo. Se detectaron más de 90 documentos específicos, cuyos resúmenes fueron atentamente examinados, para asegurarse de que correspondieran al tema de discusión. Finalmente, se realizó una lectura más detallada y se analizaron las características de los datos bibliográficos proporcionados, para ser presentados en los capítulos subsiguientes.

3. Cementos geopoliméricos

La estructura de un cemento geopolimérico incluye constituyentes químicos formadores y modificadores de red (Hoyos-Montilla *et al.*, 2021). Los primeros están contenidos en los materiales precursores, como la ceniza volante, los cuales están compuestos principalmente por aluminosilicatos reactivos (AlO_4 y SiO_4). Los segundos hacen parte de los materiales activadores, compuestos principalmente por cationes alcalinos (Na^+ y K^+ entre otros), que modifican la estructura de los constituyentes formadores de red (Echeverri-Aguirre *et al.*, 2022; Ettahiri *et al.*, 2023). Al mezclar dichos constituyentes, el equilibrio eléctrico se configura en una estructura con orden de corto y mediano alcance, que presenta características mecánicas y de durabilidad, al menos, iguales a las del cemento Portland. Las etapas del proceso de reacción o geopolimerización esencialmente incluyen (Bahraq *et al.*, 2022; Hoyos-Montilla *et al.*, 2021):

Disolución: empieza cuando entran en contacto el precursor y el activador alcalino. El precursor libera inicialmente unidades de aluminio y posteriormente de silicio, dando paso a la formación de los elementos formadores de red en forma de oligómeros de $\text{Si}(\text{OH})_4$ y $\text{Al}(\text{OH})_4$ en la solución.

Reorganización: en esta etapa, la concentración de elementos formadores y modificadores de red y la pérdida de agua aumenta el contacto entre ellos. Como consecuencia, se da inicio a los procesos de nucleación y coagulación que participan en la generación de los geles cementantes. Las características físicas y químicas del material cementante se definen en gran medida en esta etapa.

Policondensación: la formación de dímeros se acelera para formar partículas coloides. Cuando se alcanza el grado de saturación de los elementos formadores de red, se precipitan los geles. Dichos geles inicialmente son ricos en aluminio y gradualmente se enriquecen en silicio. A medida que la cantidad de gel aumenta, el material se solidifica formando una gran molécula en todas las direcciones.

Los principales geles formados en este tipo de cementos corresponden a un silicoaluminato de sodio/calcio hidratado (gel C,N-A-S-H). La microestructura dependerá, en gran medida, del desarrollo de las etapas del mecanismo de formación ya expuestas. El proceso de curado (temperatura, humedad y tiempo) es igualmente determinante en la configuración de dicho gel (Bahraq *et al.*, 2022).

4. Factores que influyen en el proceso de curado

En este numeral se analizó la influencia en las reacciones de geopolimerización y en el desarrollo de la resistencia a la compresión de temperatura, humedad y tiempo de curado en cementos geopoliméricos con base de ceniza volante.

4.1. Temperatura

En el curado, la temperatura controla la cinética de reacción y afecta significativamente las transiciones estructurales de amorfo a cristalino de los polímeros sintetizados (Criado *et al.*, 2010; Hoyos-Montilla *et al.*, 2018). Esta juega un papel muy importante como promotora de las reacciones que conducen a la precipitación del gel C,N-A-S-H (principal responsable de las resistencias mecánicas) (García-Lodeiro *et al.*, 2011). Las reacciones de geopolimerización que ocurren a temperaturas relativamente altas ($> 45\text{ }^{\circ}\text{C}$) resultan en una mayor formación de gel, que a su vez propician una estructura más orientada y con mayor resistencia mecánica tras la policondensación (Kani; Allahverdi, 2009). Si la temperatura no es lo suficientemente alta, la cantidad de ceniza que se disuelve es baja, al igual que la cantidad de gel C,N-A-S-H que se forma (García-Lodeiro *et al.*, 2011).

La temperatura tiene un efecto directo en el proceso de policondensación. Es aquí donde se forman los geles que proporcionan la resistencia mecánica del material. Para producir estos compuestos, la ceniza volante requiere de la suficiente energía para superar las barreras energéticas implicadas en los procesos de activación (Hoyos-Montilla *et al.*, 2018). Para algunas cenizas, los valores de energía de activación aparente están entre 50 y 365 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (Görhan; Kürklü, 2014; Hoyos-Montilla *et al.*, 2018a; Nath *et al.*, 2017; Villar-Cociña *et al.*, 2011). Mediante estudios calorimétricos, la literatura reporta que dicha barrera es superada a partir de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (para activación con NaOH), mientras que otros investigadores reportan que dicha temperatura es de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Zhang *et al.*, 2014).

Davidovits *et al.* (1989) aseguran que este proceso se da a temperaturas inferiores a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, en un rango recomendable entre 60 y $95\text{ }^{\circ}\text{C}$, dependiendo de las demás condiciones de curado (humedad y tiempo), el tipo de precursor y el activador. Geles tipo C,N-A-S-H con una variedad en su estequiometría se pueden formar según las temperaturas en las que se cure el material. A velocidades de reacción lenta (baja temperatura de curado, cercanas o menores a temperatura ambiente), el sistema tiende a incorporar una mayor cantidad de aluminio y calcio al gel. Mientras que reacciones más rápidas, tiende a incorporar una mayor cantidad de silicio y sodio (García-Lodeiro *et al.*, 2011). El silicio determina el grado de polimerización y la estabilidad termodinámica del gel. El aluminio controla la reactividad del material y el catión mantiene la neutralidad y

estabilidad de la estructura (Hoyos-Montilla *et al.*, 2018b). La temperatura de curado condiciona el tipo de gel formado, afectando las prestaciones mecánicas del material, dependiendo del tipo y concentración en los geles de los elementos formadores y modificadores de red. La mayoría de los autores afirman que, al aumentar la temperatura de curado, el desarrollo mecánico también lo hace (Caballero; Sánchez, 2010; Görhan *et al.*, 2016; Kani; Allahverdi, 2009; Palomo *et al.*, 1999). Temperaturas entre 60 y 85 °C se citan como las que permiten la mayor polimerización y resistencia mecánica. Sin embargo, el no controlar otras variables como el tiempo o la humedad puede generar efectos adversos. Salih *et al.* (2015) realizaron un estudio del efecto de la temperatura de curado en pastas de ceniza de palma de aceite (similar a la ceniza volante) activada alcalinamente.

Los resultados de resistencia a la compresión a edades tempranas fueron positivos al curar a temperaturas elevadas (50 y 80 °C). Sin embargo, tiempos excesivos de curado a altas temperaturas (mayores de 80 °C) ocasionaron un rompimiento estructural, deshidratación y contracciones excesivas en las muestras. Otros investigadores observaron un agrietamiento debido a un curado rápido a temperaturas altas (mayores a 80 °C) (van Jaarsveld *et al.*, 2002). Igualmente, un deterioro en las muestras curadas a altas temperaturas durante un largo periodo de tiempo. Posiblemente las altas temperaturas no permiten que se conserve la cantidad de agua necesaria dentro de la estructura para evitar el agrietamiento y colapso del cementante. El análisis anterior coincide con el realizado por Khalil y Merz (1994), quienes observaron una disminución en la resistencia de las muestras, cuando fueron curadas a temperaturas elevadas (mayores a 80 °C) por tiempos prolongados. Dicho fenómeno se atribuyó al papel que juega el agua dentro de la estructuración del geopolímero. Salih *et al.* (2015), en el mismo estudio, también lograron altas resistencias a la compresión en muestras curadas a temperatura ambiente y tiempos de exposición largos (7, 28, 90 y 180 días).

Si bien la reacción de activación está influenciada notablemente por la relación de temperatura y tiempo de curado, el curado a bajas temperaturas puede desarrollar una alta resistencia a la compresión y menor agrietamiento a edades tardías (mayores a 28 días). Sin embargo, se ha reportado que temperaturas menores a 65 °C y bajos tiempos de curado (< 2 h) no generan un correcto desarrollo microestructural (Palomo *et al.*, 1999). Queda claro que la velocidad de reacción varía dependiendo de la temperatura de curado, influenciando en la microestructura al alterar la cantidad de agua disponible para que las reacciones procedan. Qureshi y Ghosh (2013) mostraron una tendencia a la disminución de la absorción en muestras curadas en agua a temperatura ambiente, en comparación con especímenes curados en horno (40, 50 y 60 °C). Esto sugiere que la estructura formada por las primeras es más homogénea y compacta. De acuerdo con lo anterior, para tener un menor efecto negativo en las propiedades mecánicas en los cementos analizados, se propone un intervalo de temperatura de curado entre 60 y 80 °C. No obstante, el curar a temperatura ambiente puede desarrollar iguales resistencias mecánicas, pero a edades tardías.

4.2. Humedad

Como se explicará más adelante, si las condiciones de humedad durante el curado no son las adecuadas, se puede favorecer un rápido proceso de carbonatación (Criado *et al.*, 2010; García-Lodeiro *et al.*, 2011; Hoyos-Montilla *et al.*, 2018). Debido a la carbonatación, los niveles de pH en el sistema se reducen y, por lo tanto, la velocidad de activación de la ceniza y el desarrollo de resistencia mecánica descienden (Hoyos-Montilla *et al.*, 2018). Las investigaciones muestran que en valores de humedad relativa durante el curado mayores al 80 %, los poros se saturan y se convierten en conectores de agua que obstaculizan la difusión del CO₂. Por el contrario, si el ambiente es demasiado seco (humedad relativa < 25 %), la escasez de agua disponible para disolver CO₂ impide la entrada al sistema (Criado *et al.*, 2005).

Otro método de curado reportado en la literatura es el aislamiento de las muestras con la atmósfera mediante el sellado (Criado *et al.*, 2005). El resultado obtenido fue un mayor grado de reacción durante el tiempo de curado. En las muestras no asiladas, parte del activador (NaOH) reaccionó con el CO₂ atmosférico, produciendo fases solubles que limitan la concentración de Na⁺ en la formación del aluminosilicato alcalino.

Los investigadores sugieren que ciertas condiciones de curado (muestras no asiladas) pueden favorecer los procesos de carbonatación, la formación de fases no deseadas y un cambio en el pH. Lo anterior puede generar una activación alcalina menos eficaz y, por lo tanto, una reducción en la formación del gel alcalino con la consecuente reducción de la resistencia a compresión. Giasuddin *et al.* (2013) también encontraron mejores resultados en la resistencia mecánica en muestras de cemento curadas por sellado, en comparación con muestras curadas por inmersión (agua ordinaria y salina). Dicho resultado se atribuyó a que el proceso de sellado protegió a los especímenes de la lixiviación de materiales reactivos, efecto que no se dio para los cementos con resultados de resistencia más baja (curadas por inmersión).

Por el contrario, van Jaarsveld *et al.* (2002) observaron que, en las muestras curadas por sellado, se favorece la formación de enlaces ligeramente más débiles, que podrían contribuir a resistencias a la compresión más bajas. Dicha observación se basó en ensayos de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), al detectar un desplazamiento hacia valores menores en el número de onda del pico entre 1005-1035 cm^{-1} , correspondiente a vibraciones por tensión de los geles C,N-A-S-H, en comparación con las muestras no selladas. Igualmente, se ha reportado que el curado por sellado impide la evaporación del agua en las muestras, y el exceso de esta disminuye la resistencia a la compresión (Xie; Ozbakkaloglu, 2015). Teniendo en cuenta la información anterior, las condiciones de humedad adecuadas para llevar a cabo el proceso de curado en los cementos geopoliméricos deben ser valores superiores al 80 %. Aún no es claro si el sellado de las probetas es un factor positivo o negativo a la hora de evaluar las propiedades mecánicas finales en los cementos geopoliméricos en estudio.

4.3. Tiempo

Aunque en la literatura analizada no se encontró que el tiempo de curado se haya estudiado como una variable independiente, varios autores la relacionan con la humedad y la temperatura de curado. Por ejemplo, los investigadores concuerdan en que un exceso de tiempo de curado a altas temperaturas no favorece el desarrollo de las propiedades mecánicas. La presencia de grietas, debilitamiento de la estructura, cambios volumétricos, deshidratación, entre otros, pueden ser causados por la cristalización de los geles cementantes, en tiempos de curado prologados, a estructuras tipo zeolitas. Guo *et al.* (2010) observaron que la resistencia a la compresión comenzó a disminuir después de curar más de 8 horas a una temperatura de 75 °C. Tiempos superiores propician la desintegración del material. Regímenes óptimos de curado van de 30 a 80 °C, en un periodo entre 2 horas y 14 días, donde existe una relación inversa entre el tiempo y la temperatura.

Las investigaciones sugieren que el tiempo de endurecimiento está ligado con una mayor tasa de geopolimerización, generando cadenas más largas sin llegar a la cristalización. Por su parte, Sajan *et al.* (2021) concluyeron que la relación entre la temperatura y el tiempo de curado es un factor de mayor impacto sobre la ganancia de resistencia a la compresión en comparación con el efecto de la relación entre la concentración alcalina y la temperatura de curado. Esto se debe a que, a altas temperaturas, la tasa de geopolimerización es mayor y requiere tiempos de curado más cortos para formar estructuras más resistentes, siendo necesaria una menor concentración alcalina. Sin embargo, el modelo de predicción de la resistencia a la compresión para geopolímeros, bajo diferentes condiciones de curado, propuesto por Liu *et al.* (2023), no contempla el tiempo de curado como variable dentro del modelo, que está en función de la cantidad de activador, la relación agua/precursor y el módulo de activador alcalino como factores influyentes en el desarrollo de la resistencia a la compresión en cementos geopoliméricos.

5. Análisis y discusión final

Si bien en la literatura estudiada las condiciones de curado más reportadas son temperaturas elevadas en periodos de tiempos cortos, por ejemplo, 70 °C durante 12 horas a humedad relativa controlada, no necesariamente son

las condiciones más favorables a la hora de alcanzar propiedades mecánicas óptimas. Al graficar algunos de los datos reportados en la literatura, en la Figura 1 no se observa una tendencia clara de la variación de la temperatura de curado frente a la resistencia a la compresión. Aunque pareciera que es posible obtener altas resistencias, tanto a bajas como a altas temperaturas, es necesario incorporar otras variables al análisis, como la humedad y el tiempo de curado.

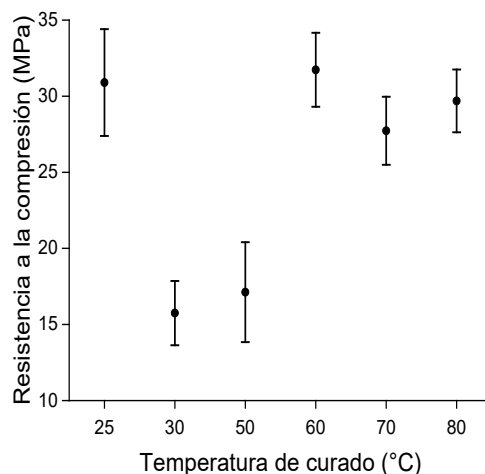


Figura 1. Representación de la resistencia a la compresión con respecto a la temperatura de curado

Fuente: Giasuddin *et al.* (2013), Guo *et al.* (2010), Salih *et al.* (2015), van Jaarsveld *et al.* (2002) y Xie y Ozbakkaloglu (2015).

En la Figura 2 se incluyó el tiempo de curado. Se observa que existe una relación entre la temperatura y el tiempo de curado con la resistencia a compresión. Altas temperaturas requieren menos tiempo de curado para lograr altas resistencias (línea roja). Bajas temperaturas reflejan mejor desempeño mecánico a edades avanzadas (línea verde) y en altas temperaturas (línea azul), la tasa de pérdida de resistencia es más notoria a partir de las 24 h. Las tendencias de la gráfica acentúan que el tiempo de endurecimiento está ligado a una mayor tasa de geopolimerización. Existen valores a partir de los cuales la desintegración del material da inicio, todo dependerá de la temperatura de trabajo y las características de los reactivos utilizados.

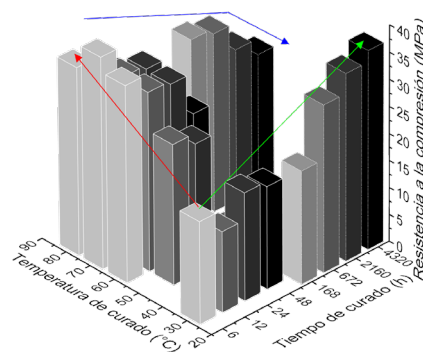


Figura 2. Relación entre la temperatura y tiempo de curado, frente al desarrollo de resistencia a la compresión

Fuente: Giasuddin *et al.* (2013), Guo *et al.* (2010), Salih *et al.* (2015), van Jaarsveld *et al.* (2002) y Xie y Ozbakkaloglu (2015).

No existe claridad en el método para controlar la humedad. Algunos autores reportan efectos negativos por el sellado de los especímenes durante el curado, ya que evita la evaporación del agua, propiciando la formación de enlaces más débiles (van Jaarsveld *et al.*, 2002). Mientras que otros autores afirman que el proceso

de sellado impide la formación de fases no deseadas y lixiviaciones de elementos formadores y modificadores de red (Criado *et al.*, 2005; Giasuddin *et al.*, 2013). Sin embargo, a partir de los resultados obtenidos en los trabajos experimentales, y del análisis planteado en el presente estudio, se pudo establecer una relación entre temperatura, humedad y tiempo de curado. Con la información que se muestra en la Tabla 1, es posible determinar qué condiciones son las más adecuadas a la hora de obtener un correcto desarrollo en las propiedades mecánicas del material. Por ejemplo, altas temperaturas de curado solo son favorables si se cura a edades cortas en un régimen de humedad controlada.

Tabla 1. Relación entre las variables de curado y su favorabilidad en el desarrollo de la resistencia a la compresión

Temperatura	Humedad			Tiempo		
	Baja (< 25 %)	Media	Alta (> 75 %)	Horas (< 12 h)	Semanas	Meses
Baja (~35 °C)	+	++	+++	+	++	+++
Alta (> 60 °C)	++	++	++++	++++	++	+

Nota. +++++ Muy favorable, +++ favorable, ++ poco favorable, + no favorable.

Fuente: elaboración propia.

Finalmente, a partir de la tabla anterior, la condición más favorable de curado será aquella que se lleve a cabo a altas temperaturas y humedad, durante un periodo de tiempo en horas.

6. Conclusiones

La revisión sobre las condiciones de curado en cementos geopoliméricos con base de ceniza volante se ha llevado a cabo. La influencia de temperatura, humedad y tiempo sobre el proceso de curado fue analizada. Las conclusiones más significativas de este proceso se presentan a continuación.

Cuando las condiciones de curado no son las adecuadas, se puede favorecer los procesos de carbonatación, formación de fases no deseadas y cambios en el pH, por lo tanto, se establecen los siguientes rangos como las condiciones de curado más aceptadas: temperaturas entre 60 y 80 °C, con humedad controlada (sellado), durante un periodo de 4 a 12 horas. Bajo estas condiciones se logra una mayor tasa de geopolimerización y mejores resultados en el desarrollo de resistencia a compresión.

La naturaleza de los elementos formadores y modificadores de red influyen sobre el desarrollo mecánico en este tipo de cementos. Se requiere, entonces, profundizar en el estudio de las condiciones de curado con el fin de normalizarlas o establecer una metodología.

Agradecimientos

Este proyecto de investigación fue soportado financieramente bajo la subvención n.º BPIN 2020000100407.

Referencias

Adjei, Stephen; Elkatatny, Salaheldin; Aggrey, Wilberforce; Abdelraouf, Yasmin (2022). Geopolymer as the future oil-well cement: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109485. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109485>

- Al Bakri, Mohd; Kamarudin, Hussin; BinHussain, Mohammed; Khairul, Ismail; Zarina, Yahya; Rafiza, Abdul (2011). The Effect of Curing Temperature on Physical and Chemical Properties of Geopolymers. *Physics Procedia*, 22, 286-291.
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.11.045>
- Aranda, Alfonso; López-Sabirón, Ana; Ferreira, Germán; Llera, Eva (2013). Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 242-260.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.024>
- Asghar, Raheel; Khan, Mohsin; Alyousef, Rayed; Javed, Muhammad; Ali, Mujahid (2023). Promoting the green Construction: Scientometric review on the mechanical and structural performance of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 368, 130502.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130502>
- Bahraq, Ashraf; Al-Osta, Mohammed; Al-Amoudi, Omar; Saleh, Tawfik; Obot, Ime (2022). Atomistic simulation of polymer-cement interactions: Progress and research challenges. *Construction and Building Materials*, 327, 126881.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126881>
- Bakharev, Tatiana (2005). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224-1232.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.031>
- Caballero, Erich; Sánchez, Wilson (2010). *Síntesis de nuevos cementos geopoliméricos a partir de subproductos del proceso de extracción de oro en la mina La Baja, distrito de California, Santander* [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Chen, Gai; Zheng, Dong-ping; Chen, Yi-wu; Lin, Jia-xiang; Lao, Wei-jian, Guo, Yong-chang; Chen, Zhan-biao; Lan, Xue-wei. (2023). Development of high performance geopolymer concrete with waste rubber and recycle steel fiber: A study on compressive behavior, carbon emissions and economical performance. *Construction and Building Materials*, 393, 131988.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131988>
- Chindaprasirt, Prinya; Jenjirapanya, Supichart; Rattanasak, Ubolluk (2014). Characterizations of FBC/PCC fly ash geopolymeric composites. *Construction and Building Materials*, 66(2), 72-78.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.067>
- Criado, María; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2007). Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio: Part I: FTIR study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 106(1), 180-191.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.02.055>
- Criado, María; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2010). Alkali activation of fly ash. Part III: Effect of curing conditions on reaction and its graphical description. *Fuel*, 89(11), 3185-3192.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.03.051>
- Criado, María; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel; Sobrados, Isabel; Sanz, Jesús (2008). Effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash. Part II: 29Si MAS-NMR Survey. *Microporous and Mesoporous Materials*, 109(1), 525-534.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.05.062>

- Criado, María; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, 84(16), 2048-2054.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>
- Damineli, Bruno; Kemeid, Fernanda; Aguiar, Patricia; John, Vanderley (2010). Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 555-562.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>
- Damtoft, Jesper; Lukasik, Jacques; Herfort, Duncan; Sorrentino, Danielle; Gartner, Ellis (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115-127.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>
- Davidovits, Nicolas; Davidovics, Michel; Davidovits, Joseph (1989). *Ceramic-ceramic composite material and production method* (Patente EE. UU. Pat 4 888 3111989). Oficina de Patentes y Marcas Registradas.
- Diaz-Loya, Ivan; Allouche, Erez; Vaidya, Saiprasad (2011). Mechanical properties of fly-ash-based geopolymer concrete. *ACI Materials Journal*, 108(3), 300-306.
<https://doi.org/620.1u40492-dc22>
- Echeverri-Aguirre, Mauled; Molina, Jarol; Hoyos-Montilla, Ary; Carvajal, Henry; Rudas, Sebastián (2022). Heat flow modelling of the alkaline activation of fly ash with sodium hydroxide in the presence of portlandite. *Construction and Building Materials*, 357, 129248.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129248>
- Ettahiri, Youssef; Bouargane, Brahim; Fritah, Kamal; Akhsassi, Brahim; Pérez-Villarejo, Luis; Aziz, Ayoub; Bouna, Lahcen; Benlhachemi, Abdeljalil; Novais, Rui (2023). A state-of-the-art review of recent advances in porous geopolymer: Applications in adsorption of inorganic and organic contaminants in water. *Construction and Building Materials*, 395, 132269.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132269>
- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 1984-1992.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.003>
- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2009). *6-Nanostructure/microstructure of fly ash geopolymers*. En Provis, John; van Deventer, Jannie (Eds.), *Geopolymers* (pp. 89-117). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9781845696382.1.89>
- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel; Criado, María (2005). Microstructure development of alkali activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204-1209.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.08.021>
- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel; Criado, María (2006). Alkali activated fly ash binders. A comparative study between sodium and potassium activators. *Materiales de Construcción*, 56(281), 51-65.
<https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i281.92>
- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel; Pastor, José; Martín, Antonia (2008). New Cementitious Materials Based on Alkali-Activated Fly Ash: Performance at High Temperatures. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(10), 3308-3314.
<https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02625.x>

- Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel; Sobrados, Isabel; Sanz, Jesús (2006). The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91(1), 111-119. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.11.015>
- Fletcher, Ross; MacKenzie, Kenneth; Nicholson, Catherine; Shimada, Shiro (2005). The composition range of aluminosilicate geopolymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(9), 1471-1477. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.06.001>
- García-Lodeiro, Inés; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana (2015). 3-Crucial insights on the mix design of alkali-activated cement-based binders. En Pacheco, Fernando; Labrincha, João; Chindapasirt, Prinya (Eds.), *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes* (pp. 49-73). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781782422884.1.49>
- García-Lodeiro, Inés; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana; Macphee, Donald (2011). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 923-931. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.006>
- Giasuddin, Haider; Sanjayan, Jay; Ranjith, Pathegama (2013). Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions. *Fuel*, 107, 34-39. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.035>
- Görhan, Gökhan; Aslaner, Ridvan; Şinik, Osman (2016). The effect of curing on the properties of metakaolin and fly ash-based geopolymer paste. *Composites Part B: Engineering*, 97, 329-335. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.05.019>
- Görhan, Gökhan; Kürklü, Gökhan (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites Part B: Engineering*, 58, 371-377. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.082>
- Guo, Xiaolu; Shi, Huisheng; Dick, Warren (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- Hasanbeigi, Ali; Price, Lynn; Lin, Elina (2012). Emerging energy-efficiency and CO₂ emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6220-6238. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.019>
- Hossain, Md. Maruf; Karim, Md. Rezaul; Hossain, Mustaque; Islam, Md. Nazrul; Zain, Muhammad (2015). Durability of mortar and concrete containing alkali-activated binder with pozzolans: A review. *Construction and Building Materials*, 93, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.094>
- Hoyos-Montilla, Ary; Arias-Jaramillo, Yhan; Tobón, Jorge (2018). Evaluation of cements obtained by alkali-activated coal ash with NaOH cured at low temperatures. *Materiales de Construcción*, 68(332), e170. <https://doi.org/10.3989/mc.2018.10117>

- Hoyos-Montilla, Ary; Puertas, Francisca; Tobón, Jorge (2018a). Microcalorimetric study of the effect of calcium hydroxide and temperature on the alkaline activation of coal fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2395-2410.
<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6715-4>
- Hoyos-Montilla, Ary; Puertas, Francisca; Tobón, Jorge (2018b). Microcalorimetric study of the effect of calcium hydroxide and temperature on the alkaline activation of coal fly ash. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 131(3), 2395-2410.
<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6715-4>
- Hoyos-Montilla, Ary; Puertas, Francisca; Tobón, Jorge (2021). Study of the reaction stages of alkali-activated cementitious materials using microcalorimetry. *Advances in Cement Research*, 33(1), 1-13.
<https://doi.org/10.1680/jadcr.19.00025>
- İlkentapar, Serhan; Atiş, Cengiz; Karahan, Okan; Görür, Ela (2017). Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 151, 363-369.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.041>
- Johari, Megat; Brooks, Jeffrey; Kabir, Shahid; Rivard, Patrice (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2639-2648.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.013>
- Juenger, Maria; Siddique, Rafat (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, 78(Parte A), 71-80.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>
- Kani, Ebrahim; Allahverdi, Ali (2009). Effects of curing time and temperature on strength development of inorganic polymeric binder based on natural pozzolan. *Journal of Materials Science*, 44, 3088-3097.
- Khalil, Muhammad; Merz, Erich (1994). Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers. *Journal of Nuclear Materials*, 211(2), 141-148.
[https://doi.org/10.1016/0022-3115\(94\)90364-6](https://doi.org/10.1016/0022-3115(94)90364-6)
- Kovalchuk, Georgiy; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II. *Fuel*, 86(3), 315-322.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>
- Kovalchuk, Georgiy; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana (2008). 1-Alkali-activated fly ash. Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry. *Materiales de Construcción*, 58(291), 35-52.
<https://doi.org/10.3989/mc.2008.v58.i291.101>
- Krivenko, Pavel; Kovalchuk, Georgiy; Palomo, Ángel; Fernández-Jiménez, Ana (2006). *Fly Ash Based Geocements: Genesis of Microstructure and Properties at Hydration-Dehydration Process*. En Brandt, Andrzej (Ed.), *Brittle Matrix Composites 8* (pp. 55-64). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9780857093080.55>
- Liu, Jinliang; Shi, Xiaohui; Zhang, Guanhua; Li, Linfei (2023). Study the Mechanical Properties of Geopolymer under Different Curing Conditions. *Minerals*, 13(5), 690.
<https://doi.org/10.3390/min13050690>

- Lothenbach, Barbara; Scrivener, Karen; Hooton, Douglas (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244-1256.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Nagral, Mohammed; Ostwal, Tejas; Chitawadaji, Manojkumar (2014). Effect of temperature and curing hours on the properties of geo-polymer concrete. *International Journal of Computational Engineering Research*, 4(9), 2250-3005.
- Nath, Susanta; Maitra, Saikat; Mukherjee, Siddhartha; Kumar, Sanjay (2016). Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 111, 758-765.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.106>
- Nath, Susanta; Mukherjee, Siddhartha; Maitra, Saikat; Kumar, Sanjay (2017). Kinetics study of geopolymerization of fly ash using isothermal conduction calorimetry. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(3), 1953-1961.
<https://doi.org/10.1007/s10973-016-5823-x>
- Nodehi, Mehrab; Taghvaei, Vahid (2021). Alkali-Activated Materials and Geopolymer: A Review of Common Precursors and Activators Addressing Circular Economy. *Circular Economy and Sustainability*, 2(1), 165-196.
<https://doi.org/10.1007/S43615-021-00029-W>
- Noushini, Amin; Castel, Arnaud (2016). The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 464-477.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210>
- Okoye, Francis; Durgaprasad, Janjanam; Singh, Nakshatra (2015a). Fly ash/Kaolin based geopolymer green concretes and their mechanical properties. *Data in Brief*, 5, 739-744.
<https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.10.029>
- Okoye, Francis; Durgaprasad, Janjanam; Singh, Nakshatra (2015b). Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 98, 685-691.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009>
- Palomo, Ángel; Grutzeck, Michael; Blanco-Varela, Mariateresa (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Parthasarathy, Pavithra; Srinivasula, Maddula; Dinakar, Pasala; Hanumantha, Bendadi; Satpathy, Bijaylaxmi; Mohanty, A. (2016). A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *Journal of Cleaner Production*, 133, 117-125.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.041>
- Phair, John; van Deventer, Jannie (2002). Characterization of fly-ash-based geopolymeric binders activated with sodium aluminate. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 41(17), 4242-4251.
- Provis, John (2009). *4-Activating solution chemistry for geopolymers*. En Provis, John; van Deventer, Jannie (Eds.), *Geopolymers* (pp. 50-71). Woodhead Publishing.
<https://doi.org/10.1533/9781845696382.1.50>

- Provis, John; Palomo, Ángel, Shi, Caijun (2015). Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 78 (Parte A), 110-125.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- Puertas, Francisca; Fernández-Jiménez, Ana (2003). Mineralogical and microstructural characterisation of alkali-activated fly ash/slag pastes. *Cement and Concrete Composites*, 25(3), 287-292.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00059-8](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00059-8)
- Qureshi, Mohd. Nadeem; Ghosh, Sommath (2013). Alkali-activated blast furnace slag as a green construction material. *IOSR, Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014, 24-28.
- Rashad, Alaa (2014). A comprehensive overview about the influence of different admixtures and additives on the properties of alkali-activated fly ash. *Materials & Design*, 53, 1005-1025.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.074>
- Riahi, Shadi; Nazari, Ali; Zaarei, Davood; Khalaj, Gholamreza; Bohlooli, Hamid; Kaykha, Mohammad (2012). Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by Taguchi method. *Materials & Design*, 37, 443-449.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.030>
- Ruiz-Santaquiteria, Cristina; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2016). Alternative prime materials for developing new cements: Alkaline activation of alkali aluminosilicate glasses. *Ceramics International*, 42(8), 9333-9340.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.111>
- Ruiz-Santaquiteria, Cristina; Skibsted, Jørgen; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2012). Alkaline solution/binder ratio as a determining factor in the alkaline activation of aluminosilicates. *Cement and Concrete Research*, 42(9), 1242-1251.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.05.019>
- Ryu, Gum; Lee, Young; Koh, Kyung; Chung, Young (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Sajan, Pudasaini; Jiang, Tengyao; Lau, ChooiKim; Tan, Gang; Ng, Kam (2021). Combined effect of curing temperature, curing period and alkaline concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer. *Cleaner Materials*, 1, 100002.
<https://doi.org/10.1016/j.clema.2021.100002>
- Salih, Moslih; Farzadnia, Nima; Abang-Ali, Abang-Abdullah; Demirboga, Ramazan (2015). Effect of different curing temperatures on alkali activated palm oil fuel ash paste. *Construction and Building Materials*, 94, 116-125.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.052>
- Satpute-Manesh, B.; Wakchaure-Madhukar, R.; Patankar Subhash, V. (2012). Effect of Duration and Temperature of Curing on Compressive Strength of Geopolymer Concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 1(5), 152-155.
- Shi, Caijun; Fernández-Jiménez, Ana; Palomo, Ángel (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750-763.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>

- Singh, Brajeshwar; Rahman, Md. Reyazur; Paswan, Rakesh; Bhattacharyya, Sriman (2016). Effect of activator concentration on the strength, ITZ and drying shrinkage of fly ash/slag geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 171-179.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.008>
- Stevenson, Michael; Sagoe-Crentsil, Kwesi (2005). Relationships between composition, structure, and strength of inorganic polymers. Part 2. Fly ash-derived inorganic polymers. *Journal of Materials Science*, 40, 4247-4259.
- Swanepoel, J. C.; Strydom, Christien (2002). Utilisation of fly ash in a geopolymeric material. *Applied Geochemistry*, 17(8), 1143-1148.
[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00005-7)
- Van Jaarsveld, J.; van Deventer, Jannie; Lukey, Grant (2002). The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers. *Chemical Engineering Journal*, 89(1), 63-73.
[https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00025-6)
- Villar-Cociña, Ernesto; Morales, Eduardo; Santos, Sergio; Savastano, Holmer; Frías, Moisés (2011). Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 68-73.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.003>
- Wardhono, Arie; Law, David; Strano, Anthony (2015). The Strength of Alkali-activated Slag/fly Ash Mortar Blends at Ambient Temperature. *Procedia Engineering*, 125, 650-656.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.095>
- Williamson, Trevor; Juenger, Maria (2016). The role of activating solution concentration on alkali-silica reaction in alkali-activated fly ash concrete. *Cement and Concrete Research*, 83, 124-130.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.008>
- Xie, Tianyu; Ozbakkaloglu, Togay (2015). Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*, 41(4), 5945-5958.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.01.031>
- Zhang, Zuhua; Li, Liangfeng; Ma, Xue; Wang, Hao (2016). Compositional, microstructural and mechanical properties of ambient condition cured alkali-activated cement. *Construction and Building Materials*, 113, 237-245.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.043>
- Zhang, Zuhua; Wang, Hao; Zhu, Yingcan; Reid, Andrew; Provis, John; Bullen, Frank (2014). Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Applied Clay Science*, 88-89, 194-201.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.025>
- Zhou, Wei; Yan, Chunjie; Duan, Ping; Liu, Yi; Zhang, Zuhua; Qiu, Xiumei; Li, Dan (2016). A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials & Design*, 95, 63-74.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.084>
- Zhuang, Xiao-Yu; Chen, Liang; Komarneni, Sridhar; Zhou, Chun-Hui; Tong, Dong-Shen; Yang, Hui-Min; Yu, Wei-Hua; Wang, Hao (2016). Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>