

# Materiales de construcción sostenibles. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros con cenizas volantes activadas alcalinamente

*Building construction materials. Mechanic performance  
and durability of fly ash alkali-activated mortars*

**JESÚS ORLANDO CASTAÑO TABARES**

Magíster en Ingeniería del hormigón. Docente de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Contacto: [jesus.castano@javeriana.edu.co](mailto:jesus.castano@javeriana.edu.co)

**ESTEFANÍA ROBAYO NÚÑEZ**

Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia.

Contacto: [erobayo@javeriana.edu.co](mailto:erobayo@javeriana.edu.co)

**ÉDGAR HUMBERTO SÁNCHEZ COTTE**

Magíster en Ingeniería Civil. Docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: [esanchezc@udistrital.edu.co](mailto:esanchezc@udistrital.edu.co)

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2013

Financiamiento: Pontificia Universidad Javeriana

**Palabras clave:** materiales de construcción, sostenibilidad, materiales no basados en cemento, mortero geopolimérico.

**Key words:** Construction materials, sustainability, non-cement based materials, geopolymer mortar.

## RESUMEN

La sostenibilidad de los materiales constituye uno de los temas fundamentales en el que se investiga actualmente en busca de adaptación al cambio climático. En el ámbito mundial se trabaja en el

desarrollo de materiales de alto desempeño, que generen bajo impacto, que sean competitivos con las tecnologías actuales y en su mayoría basados en materias primas locales. En este estudio se emplearon mezclas con dosificaciones diferentes, sometiendo dichas mezclas a pruebas de laborato-

rio que determinaron las propiedades mecánicas y de durabilidad de las probetas de mortero y de esta forma se pudo dar un estimativo del desempeño y posible uso de dichos materiales. Este proyecto principalmente se basó en la sustitución de cemento hidráulico convencional por cenizas volantes activadas alcalinamente para la producción de mortero, donde se pudo obtener un producto que cumple con los requerimientos físicos y mecánicos especificados en las normas NTC.

Por otro lado, se trabajaron mezclas con cenizas volantes provenientes del proceso energético de la empresa textil era Fabricato, las cuales fueron activadas alcalinamente con hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) en diferentes proporciones. De este modo, mediante la evaluación del desempeño mecánico y de la durabilidad de las diferentes mezclas de mortero con cenizas volantes activadas alcalinamente, se pretende dar un paso hacia la implementación de materiales ecológicos de bajo impacto, puesto que algunas mezclas cumplieron con parámetros

mecánicos y de durabilidad reglamentarios en nuestro país.

## ABSTRACT

The development of “green” materials constitutes one of the fundamental topics in research to adaptation to climate change. Researchers worldwide are investigating in the development of high performance materials, which generate low-impact, that are competitive with current technologies and mostly based on local raw materials.

Various mixtures of sodium hydroxide and sodium silicate were used in this study, and their mechanical properties and durability tests were determined by standard test, where it was found that the product meets the specified mechanical physical requirements and Colombian regulations. Thus, their use is validated as building materials with low environmental impact, matching the mechanical properties of conventional cement mortars.

\* \* \*

## INTRODUCCIÓN

Actualmente se dedican esfuerzos para estudiar la sostenibilidad de los materiales a base de cemento, fundamentalmente el concreto y la aplicabilidad de nuevos materiales que brinden un mayor grado de sostenibilidad a la construcción en general. Es por ello que resulta muy atractivo ver cómo algunos materiales de desecho y subproductos pueden brindarles una alternativa a las matrices base cemento, lo cual disminuiría la huella de carbono (Davidovits, 1993), puntos esenciales que van tomando forma en el desarrollo sostenible de la industria de la construcción (Moreno, 2002). Esta última es considerada como uno de los sectores que genera mayor consumo de materiales, recursos naturales y consumo de energético (Camacol, 2012). Se habla de un sector profundamente impactante sobre el medio

económico, ecológico y social (Upme, 2012); sin embargo, su importancia en el desarrollo de una sociedad, nos da idea de los esfuerzos que debemos llevar a cabo para conseguir avanzar hacia un modelo de constructivo que no desperdicie energía, ni recursos naturales y a la vez no genere gran cantidad de residuos, saturando vertederos y rellenos sanitarios (Ramirez, 2009). Es entonces pertinente la implementación de un modelo y sistema de construcción sostenible, que optimice procesos y recursos, y que cree así materiales alternativos de bajo impacto, eficientes tanto económicamente como ambientalmente, con iguales o mejores propiedades a las de los materiales existentes.

Desde la implementación de concretos de suelo silicato a finales de los años cincuenta (Gluchovskij, 1959), hasta la actualidad, se investigan

los factores que intervienen en estas mezclas geopoliméricas. De esta forma, con el desarrollo de nuevos materiales cementantes a base de cenizas volantes activadas con un agente alcalino, se quiere mejorar y superar problemas como la alta retracción por secado presentada en el cemento portland convencional (Bernal, 2011), utilizando como activadores de la reacción polimérica NaOH (soda cáustica) y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (silicato sódico), los cuales en su mayoría son subproductos de procesos industriales o de fácil y económica fabricación (Davidovits, 2011). Inclusive en algunos países como Australia se comprobó que elementos prefabricados a base de cenizas volantes y escorias de siderurgia presentan grandes propiedades frente al ataque de sulfatos o agentes agresivos o inclusive al fuego.

La universidad de Melbourne por medio de varias pruebas comprobó que morteros con contenidos cenizas volantes activadas alcalinamente tienen una resistencia al fuego de más de cuatro horas, en comparación con el mortero convencional de cemento portland que tiene una resistencia al fuego promedio de 2,5 horas (Van Deventer, 2006). Zeobond es el primer promotor y líder mundial en la producción a gran escala, ya que produce elementos prefabricados a base de ceniza volante y escorias de alto horno, lo que logra reducir en un 80 % y 90 % las emisiones de  $\text{CO}_2$ , y mejora su comportamiento a temperaturas elevadas y productos químicos agresivos. Por medio de los estudios revisados y después de observar la aplicabilidad de los materiales geopoliméricos, se puede evidenciar el gran potencial de estos materiales en posibles aplicaciones constructivas, dada su resistencia a medios agresivos con el concreto convencional (Puertas, 2002).

## METODOLOGÍA

### Materiales

Se evaluó la efectividad de los morteros geopoliméricos en comparación con morteros de cemento

hidráulico, en cuanto a su comportamiento mecánico, comportamiento frente a altas temperaturas y frente a un ataque en medios agresivos. En el presente estudio se utilizó ceniza volante tipo F (según la clasificación ASTM C618, proveniente de Fabricato, cemento portland (ASTM C150) y cemento de uso general (ASTM C1157).

En la activación alcalina de las cenizas volantes se utilizaron dos disoluciones: NaOH a 10M y 70 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ -30 % agua. Para la preparación de las disoluciones se utilizó NaOH (en escamas de 98 % pureza) y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (8,2 %  $\text{Na}_2\text{O}$ , 27 %  $\text{SiO}_2$  y 64,8 %  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Se trabajaron cuatro mezclas geopoliméricas, y dos mezclas de control, así:

Mezcla 1: con cemento portland.

Mezcla 2: con ceniza volante activada 100 % NaOH.

Mezcla 3: con ceniza volante activada 75 % NaOH y 25 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Mezcla 4: con ceniza volante activada 50 % NaOH y 50 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Mezcla 5: con ceniza volante activada 25 % NaOH y 75 %  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .

Mezcla 6: con cemento de uso general.

### Ensayos y métodos

Se evaluó el comportamiento de los morteros geopoliméricos, en cuanto a resistencia mecánica, resistencia en temperaturas altas y en medios agresivos. Estas son descritas a continuación:

*Resistencia mecánica:* para las seis mezclas planteadas se evaluó la resistencia a compresión a edades de 2, 7, 28, y 56 días de curado, en cubos de mortero de 5cm de lado, de acuerdo con la norma NTC 121, y resistencia a flexión a edades de 7, 28 y 56 días de curado, en viguetas de 4 cm de lado y

16 cm de largo; se falla con una carga en la mitad de la luz, teniendo como luz libre 12 cm.

*Resistencia en altas temperaturas:* para evaluar el desempeño de las mezclas frente a altas temperaturas, se determinó su resistencia a compresión en probetas cúbicas 5 cm de lado y resistencia a flexión en probetas rectangulares de 4 cm de lado y 16 cm de largo. Dichas probetas previamente cumplieron un proceso de curado de 28 días, y fueron sometidas durante un periodo de dos (2) horas a temperaturas de 400 °C y 700 °C; posteriormente, se determinó su resistencia a compresión y flexión.

*Resistencia en medios agresivos:* para evaluar el desempeño de las mezclas frente a un ataque de medios agresivo, se implementó una solución de ácido sulfúrico en concentración de 50 ml/L, se sumerge totalmente la probeta en la solución, por un periodo de 24 horas; posteriormente, se lava y se lleva al horno para luego tomar su peso. Antes de dicha inmersión la probeta por ensayar se seca en horno a 105±5°C, con el fin de tomar el peso seco. En este proceso se determinara la resistencia a compresión y la pérdida de masa. Las probetas cumplieron un curado de 28 días.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resistencia mecánica

Los resultados obtenidos para las distintas edades evaluadas, se presentan en la tabla 1. Se puede observar el desarrollo de las resistencias de cada una de las seis mezclas en el tiempo (ver figura 1).

Se puede ver que para la mezcla de control mezcla 1 se obtienen resistencias elevadas a edades iniciales, en contraste con la otra mezcla de control que obtiene una resistencia de 9,44 MPa a edad de 2 días. Por su parte, muestra un mejor resultado a esta misma edad la mezcla 2 (con ceniza volante), que obtiene a 2 días una resistencia de 13,65 MPa. No obstante, para edades intermedias y finales, la

mezcla 6 logra resistencias de hasta 27,22 MPa, y está a la par con la mezcla 2 con 27,88 MPa. Para morteros de cemento portland, según la NTC 121 especificaciones físicas y mecánicas, fija que para cementos tipo I sus resistencias no deben ser menores a 15,0 MPa y 24 MPa para unas edades de 7 y 28 días, respectivamente. Aquí se puede destacar que la mezcla 2 alcanza mayores resistencias que las especificadas en la norma, hecho que demuestra un gran desempeño a compresión, inclusive esta mezcla supera las resistencias alcanzadas por el mortero de cemento de uso general a una edad de 28 días, y así obtiene similar comportamiento en el desarrollo de las resistencias. Las probetas de mezcla 4 y 5 no obtienen resistencias significativas a ninguna de las edades evaluadas.

**Tabla 1.** Resistencia a compresión de cubos de mortero

Mezcla	Resistencia a compresión (Mpa)			
	2 días	7 días	28 días	56 días
Mezcla 1	15,243	28,926	38,726	41,102
Mezcla 2	13,653	20,555	25,025	27,883
Mezcla 3	8,480	16,597	18,947	21,716
Mezcla 4	0,277	0,677	0,768	0,731
Mezcla 5	0,592	0,723	1,072	1,086
Mezcla 6	9,447	23,277	24,147	27,222

Fuente: elaboración propia.

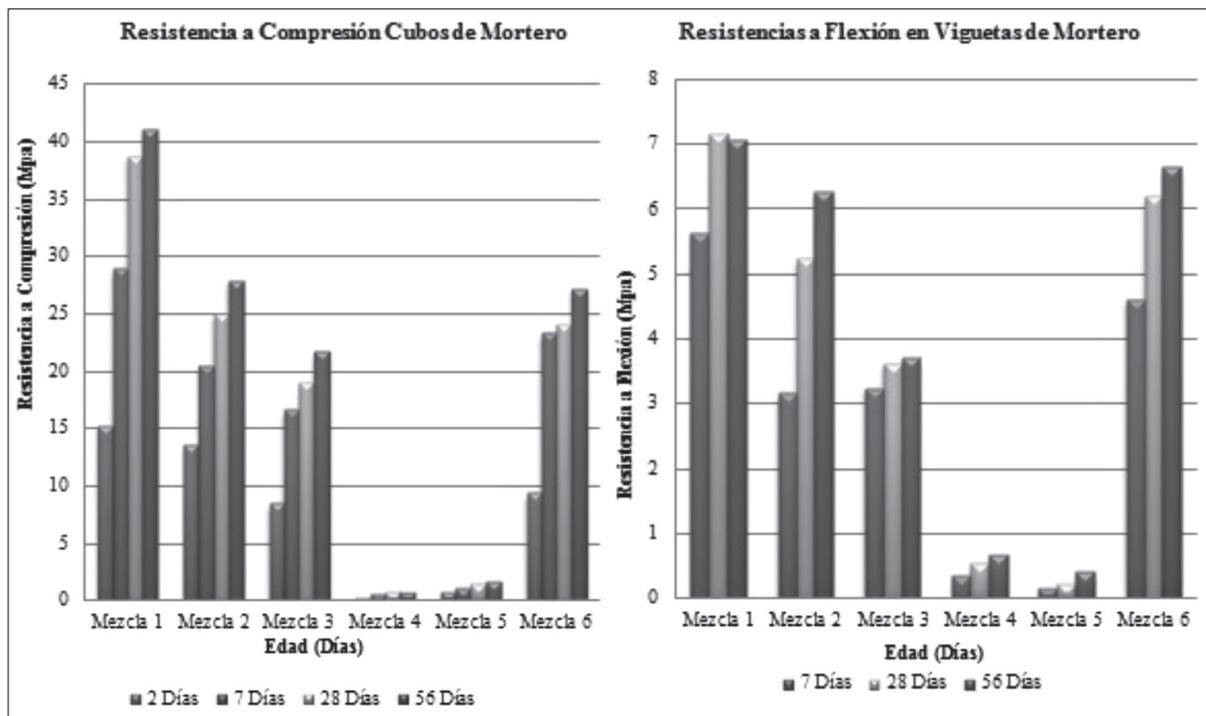
En cuanto a la flexión, se observa similar comportamiento al de compresión (ver tabla 2). En la mezcla 2 sigue destacándose entre las mezclas geopoliméricas la que obtiene 5,23 MPa a 28 días, y aunque no supera ninguna de las resistencias obtenidas por las mezclas de control cumple con el mínimo fijado en la NTC 2017 de 5 MPa. Tampoco se evidencian resistencias significativas para las mezclas 4 y 5 (ver figura 1); esto se le puede atribuir a que con el aumento de silicato en la mezcla la trabajabilidad de esta misma disminuía y se dificultaba la producción de especímenes de calidad.

**Tabla 2.** Resistencia a flexión de viguetas de mortero

MEZCLA	Resistencia a Flexión (MPa)		
	7 días	28 días	56 días
Mezcla 1	5,643	7,156	7,075
Mezcla 2	3,162	5,234	6,284
Mezcla 3	3,244	3,626	3,708

MEZCLA	Resistencia a Flexión (MPa)		
	7 días	28 días	56 días
Mezcla 4	0,354	0,545	0,668
Mezcla 5	0,164	0,218	0,409
Mezcla 6	4,621	6,202	6,652

Fuente: elaboración propia



**Figura 1.** Resistencia a compresión y a flexión de probetas de mortero en las distintas edades evaluadas

Fuente: elaboración propia.

### Resistencia en altas temperaturas

Los resultados obtenidos para compresión y flexión a temperaturas de 400 y 700 °C, se presentan en la tabla 3, donde se puede observar la particularidad de los resultados y su diferencia con las resistencias de las probetas sin exposición a temperatura. Las figuras 4 y 5 muestran el

aspecto físico de las probetas ensayadas a compresión y a flexión luego del tratamiento térmico correspondiente.

Se destacan sobresalientes resistencias para las mezclas 2 y 3, que a compresión y a flexión alcanzan mejores resistencias que las obtenidas por las mezclas de control (ver figura 2 y figura 3).

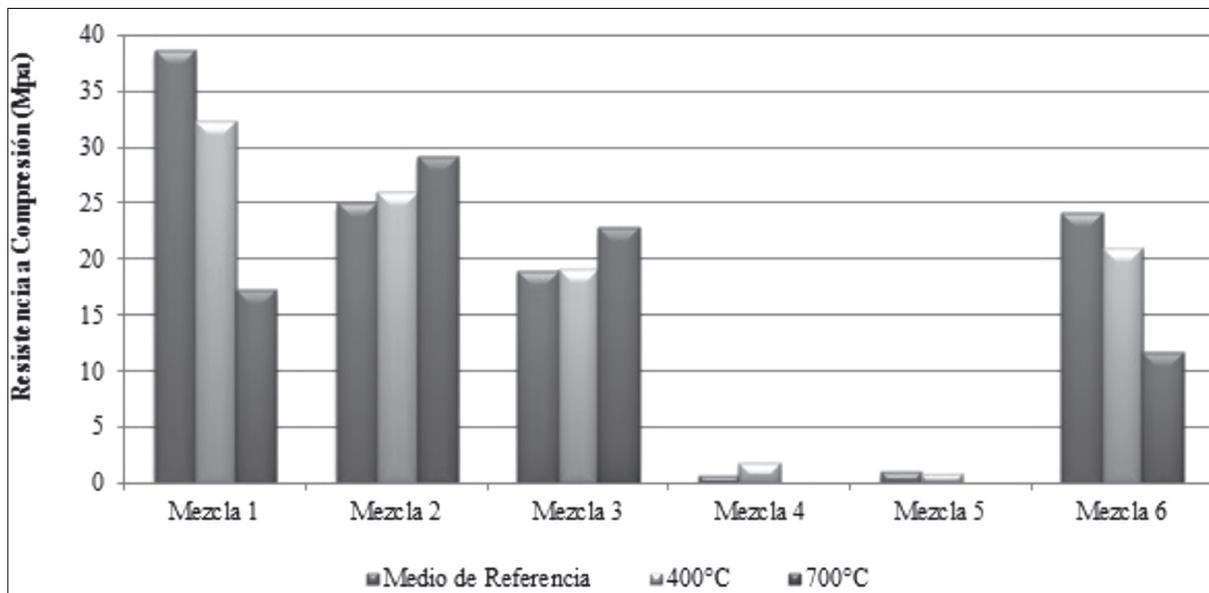
**Tabla 3.** Resistencia a compresión de cubos de mortero expuestos a altas temperaturas

Ensayo Mezcla 1		Mezclas					
		Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	
Resistencia compresión (Mpa)	Temperatura de 400 °C	32,366	26,039	19,144	1,827	0,886	21,011
	Temperatura de 700 °C	17,236	29,193	22,753	0,000	0,000	11,705
Resistencia flexión (Mpa)	Temperatura de 400 °C	5,835	3,435	2,631	0,545	0,000	4,158
	Temperatura de 700 °C	0,879	4,403	3,408	0,000	0,000	0,954

Fuente: elaboración propia.

El desempeño a compresión, como se indica en la sección anterior, como estipula la norma NTC 121, a 28 días una resistencias de 24 MPa para cemento tipo I, resistencia que fue mejorada por la mezcla 2 con 29,16 MPa sometida a una tempe-

ratura de 700 °C y de 26,03 MPa ante 400 °C de temperatura. En cuanto a la resistencia a flexión, se muestra un comportamiento similar al mostrado a compresión, las resistencias aumentan en función del aumento de temperatura.



**Figura 2.** Resistencia a compresión, comparación con las probetas no expuestas a altas temperaturas

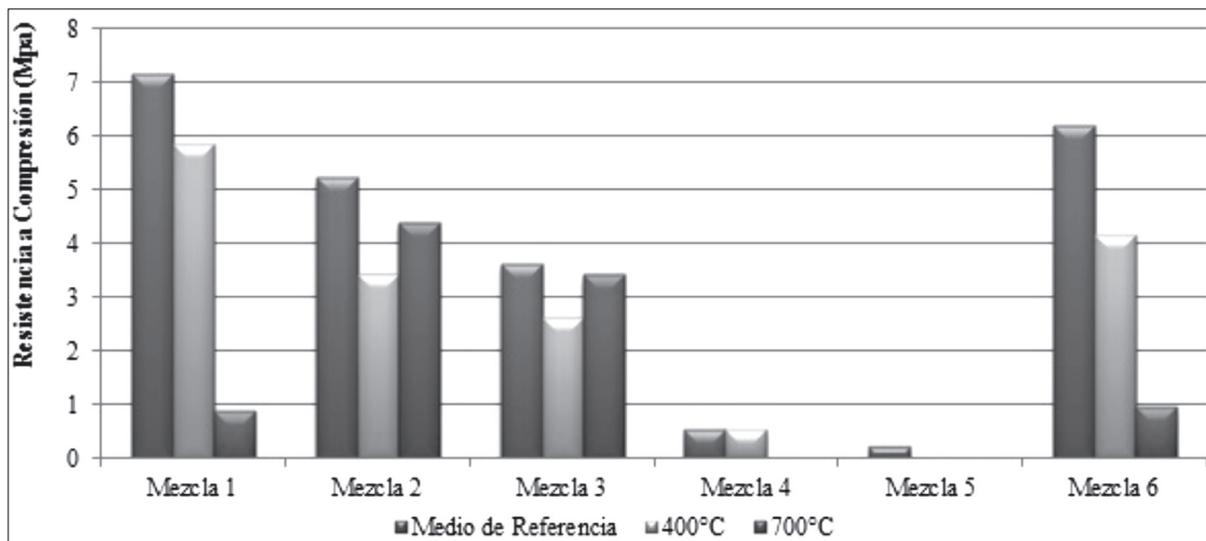
Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta estudios adicionales realizados (Fernández-Jiménez, 2009), (Krivenko, 2007), se ha podido mostrar que la disminución de resistencias a flexión, observada en los cementos obtenidos por activación alcalina de cenizas volantes para temperaturas superiores a 600 °C (valor a partir del cual las propiedades mecánicas del cemento

portland comercial se degradan rápidamente), se debe principalmente a que en torno a 600 °C estos materiales presentan un punto de sinterización parcial, que afecta a su estabilidad dimensional. Sin embargo, una vez que el material se ha enfriado, la solidificación del fundido hace que se forme una matriz más compacta y por tanto que aumenten las

resistencias mecánicas a compresión, debido a la disminución de la porosidad inicial. De esta manera, se da un proceso de recristalización y a la vez se destaca formación de nuevas fases en el material cementante (Fernández-Jiménez, 2009). En el proceso de exposición a altas temperaturas, se da paralelamente a las reacciones químico-físicas el desarrollo de nuevas fases cristalinas y vítreas, y tiene lugar una serie de cambios microestructurales en los especímenes. El cambio en la forma y

tamaño de los poros es uno de los más importantes, ya que gran parte de las propiedades físicas del producto son dependientes de este parámetro (Gourley, 2005). Podría ser esta la razón por la que los morteros geopoliméricos aumentan su resistencia a compresión, algunos en mayores proporciones (mezcla 2 y 3) otros en menores (mezcla 4 y 5), como se puede evidenciar en los resultados obtenidos.



**Figura 3.** Resistencia a flexión, comparación con las probetas no expuestas a altas temperaturas

Fuente: elaboración propia.



**Figura 4.** Mufla con especímenes geopoliméricos, mezclas 4 y 5 desintegradas durante la exposición

Fuente: elaboración propia.

Se pudo evidenciar que las mezclas de control con cemento portland y cemento de uso general perdieron sus resistencias a flexión en más de un 80%, para una temperatura de exposición de 700°C, en contraste con las probetas de ceniza volante activada 100% con NaOH, que solo disminuyeron en un 15% sus resistencias.

### Resistencia en medios agresivos

En la tabla 4 se presentan los resultados obtenidos para las probetas sumergidas en solución de

ácido sulfúrico. Como era de esperarse, los morteros perdieron masa y resistencia; no obstante,

los morteros activados con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  fueron los más afectados.

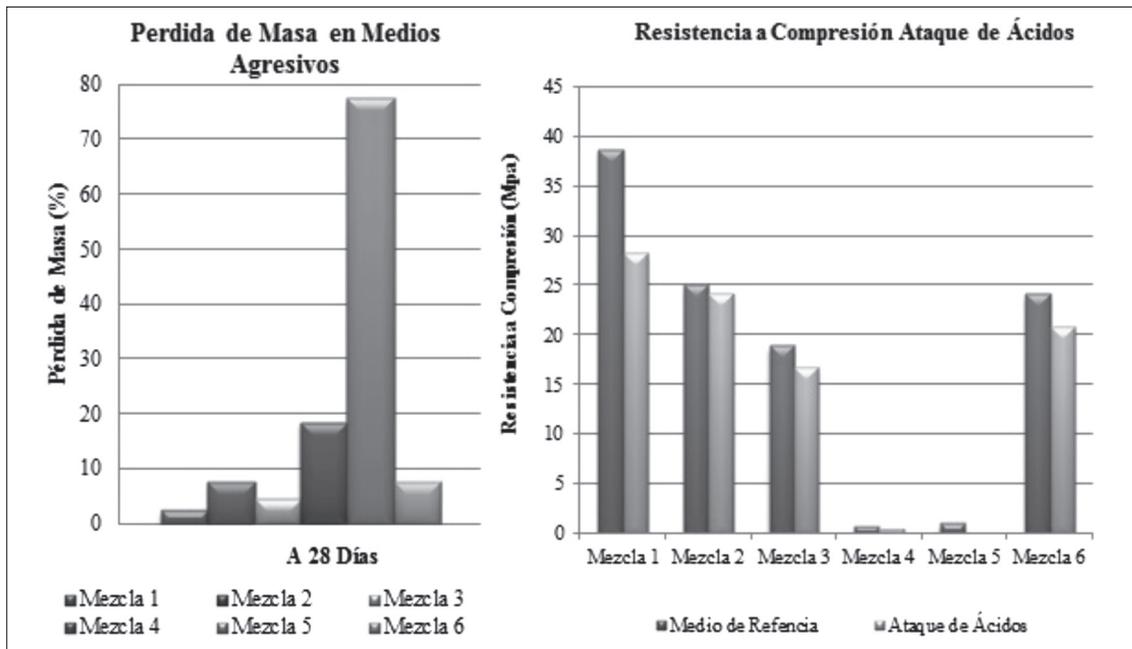
**Tabla 4.** Resistencia a compresión y pérdida de masa de cubos de mortero expuesto en medios agresivos

Ensayo Mezcla 1		Mezclas					
		Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5	Mezcla 6	
Ataque en medios agresivos	Resistencia compresión (Mpa)	28,267	24,123	16,791	0,449	0,000	24,728
	Pérdida de masa (%)	2,54	7,73	4,67	18,40	77,53	7,76

Fuente: elaboración propia.

Para las mezclas se evidenció que la mayor pérdida de masa se registra en la mezcla 5, donde durante las 24 horas de exposición al ácido la probeta se fue desintegrando como muestra la figura 5. Debido a esto no fue posible evaluar el comportamiento a compresión. Ninguna otra mezcla presentó este comportamiento, y aunque la mezcla 4 perdió masa considerable, fue posible evaluar su resistencia. Se puede distinguir en todas las mezclas un proceso acelerado de deterioro debi-

do a la alta concentración de ácido sulfúrico, y se puede evidenciar el deterioro de las probetas de mortero en la figura 6, según ASTM C1012, recomendado tanto para cementos portland puros, como para adicionados. Esta corresponde a una técnica de ensayo de agresividad de sulfatos de carácter acelerado, al exponer las probetas SO4 50 ml/l, lo que equivale a que corresponde a una exposición muy severa (superior a 10.000 ppm), según la ASTM.



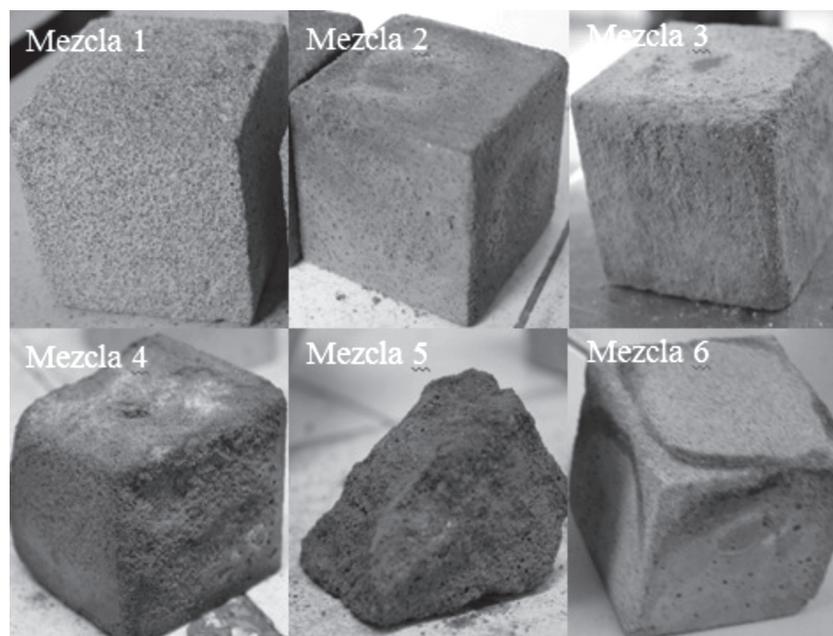
**Figura 5.** Pérdida de masa por exposición ante ácido sulfúrico y resistencia a compresión ante exposición de ácido sulfúrico vs. medio de referencia

Fuente: elaboración propia.

Las mezclas con ceniza volante no experimentan variaciones significativas en los valores de resistencia respecto a las resistencias obtenidas para las probetas, sin sumergir en ácido sulfúrico; incluso se puede observar que para todas las mezclas disminuye la resistencia. En la mezcla 5 no se registró ningún valor de resistencia debido a que durante la inmersión la probeta se deshizo dentro del ácido (ver figura 5). Las resistencias de las mezclas de control cayeron en más de un 15 % en comparación con las probetas que

no estuvieron inmersas; por su parte, la mezcla geopolimérica 2 obtuvo una pérdida de resistencia de 3,6 %.

Un examen visual de las probetas expuestas a ácido muestra un buen estado físico para las mezclas de control, solo con pérdida de un pequeño porcentaje de la capa superficial; de igual forma se muestra en la mezcla 2 y 3. Por el contrario, las 4 y 5 evidencian un gran deterioro luego de 24 horas de inmersión.



**Figura 6.** Pérdida de masa de cubosexpuestas a ataque de ácidos (a) mezcla 1; (b) mezcla 2; (c) mezcla 3; (d) mezcla 4; (e) mezcla 5, y (f) mezcla 6

Fuente: elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Una de las principales conclusiones que se puede extraer del presente estudio es la estabilidad de la mezcla geopolimérica activada alcalinamente con hidróxido de sodio 100 % (mezcla 2), debido a que tuvo un desempeño sobresaliente en todos los aspectos evaluados al igualar y mejorar propiedades de las dos mezclas de control con cemento hidráulico. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la capacidad mecánica y durable

mostrada por la mezcla geopolimérica activada con NaOH, que fue la que alcanzó mejores desempeños, podría enfocarse el uso de este material hacia la fabricación de morteros premezclados y elementos prefabricados. En este campo, dicha pasta podría desempeñar un óptimo trabajo para morteros premezclados. La NTC 3356 especifica una resistencia mínima a compresión de 17,5MPa a 28 días y para adoquines en concreto la NTC 2017 fija un mínimo de módulo de rotura de 5,0 MPa a 28 días. Adicionalmente, el hecho de que

su resistencia mejore gradualmente con el aumento de temperatura es un aspecto a favor que puede ser aprovechado en estructuras especiales donde se requiera o pueda estar en exposición a altas temperaturas.

Por otro lado, las mezclas geopoliméricas que fueron activadas alcalinamente en un 50 % y 75 % con silicato de sodio no reflejaron resultados favorables en ninguno de los aspectos evaluados (mecánico, exposición a altas temperaturas, exposición a ataque de ácido). No consiguieron tampoco aumentar sus resistencias en el transcurso del tiempo, y una de las razones a las cuales se le atribuye este deficiente comportamiento es la trabajabilidad presentada durante la elaboración de las probetas, lo que dificulta la producción de especímenes de calidad y, de igual forma, la temperatura en la cual fueron curadas las mezclas (60 °C) pudo haber afectado el desempeño de las mezclas.

Aunque la procedencia de la ceniza volante es de gran importancia para la definición de las propiedades de las pastas de mortero, se puede concluir que el tipo de activador alcalino influye contundentemente en el desarrollo de las propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros geopoliméricos. De la mano de este factor se encuentran el tiempo y la temperatura de curado, los cuales definen la estructura del geopolímero, como lo reportó (Mannan, 2002). Estudios realizados también demuestran que la temperatura de curado afecta de manera importante el comportamiento mecánico de la mezcla que, a mayor

temperatura de curado, mejores comportamientos mecánicos se obtienen; sin embargo, el aumento excesivo de temperatura puede afectar la estructura cristalina de la mezcla geopolimérica, por esto son recomendables las temperaturas entre 60 °C y 150 °C (Criado Saenz, 2007).

Los resultados dejan ver el gran potencial con el que cuentan estos materiales geopoliméricos en una posible aplicación, ya que sustituyen al cemento hidráulico de uso general tipo I. De esta manera, se obtiene una idea del aprovechamiento constructivo que se le puede dar por la facilidad con la que se puede adecuar a las instalaciones existentes en la industria actualmente.

Se puede presentar un amplio campo para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación, con el objeto de profundizar en el perfeccionamiento y manejo de la amplia gama de factores que afectan las propiedades de los geopolímeros, y de esta forma pautar una guía hacia el desarrollo de materiales más competitivos técnica, económica y ambientalmente.

## AGRADECIMIENTOS

Al laboratorio de pruebas y ensayos de la Pontificia Universidad Javeriana, en el Departamento de Ingeniería Civil, por la disponibilidad de recursos técnicos para el desarrollo satisfactorio de la presente investigación y a la empresa Manufacturas de Cemento por la colaboración con el material utilizado en este trabajo.

---

## REFERENCIAS

- Bernal, S. A. (2011). Mechanical and thermal characterisation of geopolymers based on silicate-activated metakaolin/slag blends. *Journal of Materials Science*, 46, 5477-5486.
- Bouzoubaâ, M. Z. (october, 2001). Mechanical properties and durability of concrete made with high-volume fly ash blended cements using a coarse fly ash Original Research.

- Cement and Concrete Research*, 31(10), 1393-1402.
- Camacol (2012). *Construcción en cifras*. Bogota: Camacol.
- Criado Saenz, M. (2007). *Nuevos materiales cementantes basados en la activación alcalina de cenizas volantes. Caracterización del Gel N-A-S-H en función del contenido de sílice soluble. Efecto del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>* Tesis doctoral). Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid.
- Davidovits, J. (march, 1993). Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement. (P. C. Association, Ed.). *Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment*, 21.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications. En *Geopolymer Chemistry and Applications* (3rd edition). Editorial: Geopolymer Institute.
- Rodríguez, E. (2009). Efecto de los módulos SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>O/SiO<sub>2</sub> en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, 49, 30-40.
- Fernández-Jiménez, A. A. (diciembre, 2009). Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24 (3), 213-232.
- Gluchovskij, V. (1959). Gruntosilikaty . Gosstrojizdat Kiev1959, Patent USSR 245 627 (1967), Patent USSR449894 (Patent appl. 1958, filled 1974)
- Gourley G., J. G. (2005). Developments in geopolymer precast concrete. En *World Congress 2005 Geopolymer and sustainable development solution* (pp. 139-143). France: Geopolymer Institute.
- Krivenko, P.V. and Kovalchuk, G. Y. (2007). *Directed synthesis of alkaline aluminosilicate minerals in a geocement matrix. Journal Materials Science*, 42, 2944-2952.
- Mannan M. A., Basri, B. H., Zain, M. F. M. and Islam, M. N. (2002). Effect of curing conditions on the properties of OPS-concrete. *Building Env*, 37, 1167-1171.
- MinAmbiente. (2000). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf>
- Moreno, N. (2002). *Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales*. (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña.
- Puertas, F. G. J. (2002). Morteros de cementos alcalinos. Resistencia química al ataque por sulfatos y al agua de mar. *Materiales de Construcción*, 52(267), 55-71 doi: 10.3989/mc.2002.v52.i267
- Ramirez, C. S. (2009). *Diagnostico sobre estado y manejo de escombros en el distrito Capital Bogota; Estudio de caso escombrera reserva ecologica privada La Fiscala*. Bogota: Pontificia Universidad Javeriana.
- Van Deventer, J. S. (2006). The Zeobond Group. Recuperado de <http://www.zeobond.com>.