

Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: Sulfatos y ácidos

Chemical resistance of alkali-activated fly ash/slag concrete: sulfates and acids

William Gustavo Valencia-Saavedra¹
Daniela Eugenia Angulo-Ramírez²
Ruby Mejía de Gutiérrez³

¹Colombiano. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co

²Colombiana. PhD en Ingeniería de Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: daniela.eugenia.angulo@correounivalle.edu.co

³Colombiana. PhD en Ciencias Químicas. Profesora Titular de la Universidad del Valle, Grupo de Materiales Compuestos (CENM), Cali, Colombia. e-mail: ruby.mejia@correounivalle.edu.co

Recibido: 02-09-2017 Aceptado: 05-05-2018

Resumen

Una de las características más importantes del concreto en adición a sus propiedades mecánicas es su durabilidad, que se asocia con la vida en servicio de las estructuras expuestas a ciertas condiciones o ambientes; esta propiedad es requerida para definir los potenciales campos de aplicación y facilitar la comercialización de nuevos materiales cementantes. En este estudio, se evaluó la resistencia química de un concreto de activación alcalina basado en cenizas volantes (CV) y escoria de alto horno (ESC) en relación 80/20; como material de referencia se utilizó un concreto a base de cemento convencional (OPC). La resistencia a la compresión del concreto Geo CV /ESC a 28 días de curado normal fue de 42,9 MPa, 26% superior a la reportada por el concreto OPC. Geo CV/ESC expuesto a sulfatos hasta la edad de 180 días no muestra expansión y la pérdida de resistencia a la compresión no es significativa (2%) en comparación con OPC (39%). En el caso de la exposición a los ácidos, Geo CV/ESC presenta una pérdida de resistencia del 39% y OPC de hasta el 80%. Estas características demuestran una mayor resistencia química del concreto de activación alcalina y por tanto su potencial uso en ambientes agresivos.

Palabras Clave: Ácidos; ceniza volante; geopolímeros; propiedades mecánicas; resistencia química; sulfatos.

ABSTRACT

One of the most important features of concrete, in addition to its mechanical properties, is its durability, which is associated to the in-service life of structures exposed to certain conditions or environments; this property is required to define the potential application fields and facilitate the commercialization of new cementing materials. In this study, the chemical resistance of a concrete based on a binary mixture of fly ash (FA) and blast furnace slag (GBFS) in an 80/20 ratio was evaluated. A concrete based on Portland cement (OPC) was used as a reference material. The compressive strength of Geo FA/GBFS at 28 days cured at room temperature was 42.9 MPa, 26% higher than that reported by the OPC concrete. Geo FA/GBFS exposed to sulfates does not show expansion, and the loss of compressive strength at 180 days aged of exposure was not significant (2%) compared to OPC concrete (39%). In the case of exposure to acids, FA/GBFS had a loss of resistance

Como citar: Valencia-Saavedra, W., Angulo-Ramírez, D., y Mejía de Gutiérrez, R. (2018). Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: sulfatos y ácidos. *Informador Técnico*, 82(1), 67-77. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1351>

of 39% and OPC of up to 70%. These characteristics show the best performance of the activated material and its potential use in aggressive environments.

Keywords: Acids; geopolymers; mechanical properties; chemical resistance; sulfates.

Introducción

Aunque el cemento Portland ordinario (OPC) es el material más comúnmente utilizado en la construcción, su resistencia a los ataques químicos tales como ácidos y sulfatos es aún un tema de interés en la comunidad científica. Los materiales cementicios pueden afectarse significativamente en presencia de ácidos dada la reacción ácido-base con el hidróxido de calcio presente en los poros e inclusive la potencial afectación de algunos de los productos de hidratación. El ataque por sulfato, por su parte, es generalmente causado por la exposición de los concretos a los sulfatos alcalinos o alcalinotérreos que están presentes en el suelo, en aguas subterráneas, aguas superficiales y aguas de mar, los cuales pueden ingresar al concreto y reaccionar con los componentes de la matriz cementicia. Este ataque da lugar a la aparición de grietas, delaminación, generación de productos expansivos, tales como etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), y ocasionan la pérdida de resistencia en las estructuras del concreto (Crammond, 2003; Irassar, Bonavetti, Trezza, y González, 2005). En las últimas décadas, los cementos geopoliméricos han surgido como una de las posibles alternativas a los cementos de OPC debido a su alta resistencia a tempranas edades y sus buenas propiedades de durabilidad tales como la resistencia al ataque ácido y a sulfatos (Palomo, Grutzeck, y Blanco, 1999). Entre estos, los cementos de activación alcalina basados en ceniza volante (CV) como precursor vienen siendo investigados desde los años 1990, con resultados altamente prometedores; especialmente en algunas condiciones agresivas en los que concretos de cemento portland son vulnerables (Song, Marosszeky, Brungs, y Munn, 2005).

Los cementos geopoliméricos podrían ser una alternativa, por ejemplo, en el desarrollo de concretos resistentes a los ácidos. Davidovits, (2005); Van Jaarsveld, Van Deventer, y Lorenzen, (1997) encontraron que cementos de activación alcalina basados en metacaolín presentan una pérdida de masa muy baja cuando las muestras se sumergen en soluciones de ácido sulfúrico al 5% durante 4 semanas. Bakharev (2005b) estudió la resistencia de este tipo de materiales y concluye que presentan mejor resistencia que sus homólogos producidos con cemento portland. En el mismo sentido, Song *et al.*, (2005) utilizando ensayos acelerados demostraron la mayor durabilidad de concretos de activación alcalina en una solución de ácido sulfúrico al 10% durante 56 días, lo cual está igualmente reportado por otros investigadores (Wallah y Rangan, 2006; Thokchom, Ghosh, y Ghosh, 2009; Allahverdi y Skvara, 2005, 2006). Sin embargo, la falta de métodos normalizados para evaluar el desempeño de los cementos en ambientes ácidos ha dado lugar a que sea difícil el correlacionar los resultados obtenidos por los diferentes investigadores.

En cuanto el desempeño en presencia de sulfatos, los estudios son escasos y en su gran mayoría han sido llevados a cabo en pastas y morteros y muchos de estos a concentraciones variables (Abora *et al.*, 2014; Singh, Ishwarya, Gupta, y Bhat-tacharyya, 2015). Škvára, Jílek, y Kopecký, (2005) investigaron la resistencia a sulfatos de pastas y morteros de CV activada hasta edad de 720 días, y reportan incrementos resistentes a lo largo del ensayo, indicando que no se observaron cambios dimensionales ni tampoco formación de fases expansivas, se presume que el sulfato de sodio actúa como activante en la mezcla. Puertas, Gutiérrez, Fernández-Jiménez, Delvasto, y Maldonado (2002), estudiaron el comportamiento de morteros de escoria siderúrgica y de mezclas de Escoria/CV 50/50 activadas con silicato de sodio y con hidróxido de sodio, se concluye que en ambos casos los morteros activados presentan alta resistencia al ataque por sulfatos, sin embargo las muestras activadas con NaOH son más susceptibles a la degradación, lo cual atribuyen a la presencia de fases expansivas tales como yeso y etringita. Ismail, Bernal, Provis, Hamdan, y van Deventer (2012), reportan en pastas activadas de escoria/CV 50/50 expuestas a sulfatos de sodio y magnesio al 5% por un periodo de tres meses, una mayor agresividad del sulfato de magnesio que atribuyen a la mayor descalcificación del gel silicato cálcico hidratado y a la formación de yeso, coincide así con el tipo de acción que ha sido reportada para concretos de cemento portland (Aye y Oguchi, 2011).

Con base en lo anterior, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el desempeño de concretos de activación alcalina basados en la mezcla binaria de una ceniza volante colombiana (CV), procedente de una caldera industrial, con escoria de alto horno (ESC) en proporciones 80/20, luego de su exposición a sulfato de sodio y de magnesio (Na_2SO_4 y MgSO_4) y ácidos

acético (CH_3COOH) y sulfúrico (H_2SO_4) a edad hasta de 180 días, y comparar este comportamiento con el correspondiente de un concreto convencional. Para ello se determinó el nivel de expansión longitudinal y el cambio de resistencias mecánicas para el caso de los concretos expuestos a sulfatos; para las muestras expuestas a ácidos se midió la pérdida de resistencia mecánica, el cambio de peso y se realizó una inspección visual de las muestras.

Materiales y metodología experimental

Materiales

En el presente estudio se utilizó como precursor del concreto de activación alcalina una ceniza volante (CV), subproducto de la combustión del carbón en una caldera ubicada en una planta papelera. La composición química de CV, determinada por fluorescencia de rayos X, se presenta en la Tabla 1, donde se aprecia que se compone de óxidos de sílice, alúmina y hierro aproximadamente en un 56,5% cumpliendo así el requisito definido en la norma ASTM C618-12 (2012) (50% mínimo) para ceniza volante tipo C, sin embargo su contenido en óxido de calcio es bajo (6,68%) y generalmente este tipo de cenizas reportan órdenes superiores al 10%. Es de destacar el alto contenido de inquemados ($\text{LOI}=20,67\%$), valor que supera ampliamente el definido en la norma (6% máximo), al igual que un contenido relativamente alto en óxidos de sodio (7,94%). Estas últimas características limitan el uso de este material como adición puzolánica al cemento portland y justifican la búsqueda de otras alternativas de valorización.

Tabla 1. Características físicas y químicas de los materiales utilizados

Características, %	CV	ESC	Cemento (OPC)
SiO_2	28,53	31,99	20,20
Al_2O_3	19,18	14,54	7,00
Fe_2O_3	8,80	1,12	4,80
Na_2O	7,94	0,23	--
CaO	6,68	46,86	58,40
S	2,71	0,82	--
MgO	2,24	1,05	--
TiO_2	1,62	0,54	--
Otros	1,65	1,03	--
LOI	20,67	1,82	9,60

Fuente: Los autores

Adicionalmente se utilizó una escoria siderúrgica de alto horno (ESC) como reemplazo parcial de la CV en el material geopolimérico, constituyendo así una mezcla de tipo binario. La escoria procede de la empresa Acerías Paz del Río, y acorde con la composición química incluida en la misma Tabla 1, presenta un coeficiente de calidad ($(\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2)$) y un coeficiente de basicidad ($\text{Kb} = \text{CaO} + \text{MgO}/\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) de 1,92 y 1,03 respectivamente; esto permite su clasificación como una escoria de tipo neutra. Como material cementante de referencia se utilizó un cemento portland (OPC), cuyas características (Tabla 1), indican que corresponde a un cemento altamente adicionado, en este caso con un material calizo. Como activante se empleó una mezcla de silicato de sodio comercial ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) de composición SiO_2 : 32,24%; Na_2O : 11,18%; H_2O : 55,85% e hidróxido de sodio industrial (NaOH) del 96,7% de pureza.

Preparación de los especímenes y ensayos realizados

Los concretos de activación alcalina se elaboraron con la mezcla binaria ceniza volante (CV) y escoria de alto horno (ESC) en relaciones de 80/20, utilizando como activante alcalino una mezcla de silicato de sodio e hidróxido de sodio; la dosificación del activante se ajustó para obtener proporciones molares en la mezcla de $\text{Si}/\text{Al}=3,85$ y $\text{Na}/\text{Si}=0,25$. Para la producción de los concretos se utilizó un agregado grueso de tipo silíceo (tamaño máximo: 19 mm, densidad aparente: 2440 kg/m^3 , y absorción: 2,55%), y una arena de río como agregado fino (módulo de finura: 3,1, densidad aparente: 2510 kg/m^3 , y absorción: 1,72%). La proporción de agregados grueso y fino fue del 42% y 58% respectivamente (ver Tabla 2).

La relación (L/S) utilizada fue de 0,48. Cabe aclarar que L representa el contenido de agua presente en la mezcla, además de la aportada por el activante y S incluye la fase sólida representada por los precursores (CV+ESC) y el activante anhidro. Como material de referencia se utilizó un concreto basado en OPC, tal como se aprecia en la Tabla 2. Las muestras de Geo CV/ESC se curaron por 28 días a temperatura ambiente, con una humedad relativa mayor al 90% y las muestras de OPC se curaron bajo agua por igual tiempo. A edad de 28 días, y previo a la exposición en sulfatos, se evaluó la resistencia a compresión y el coeficiente de succión capilar para cada mezcla de concreto; este último se determinó con base en la Norma Suiza EMPA-SIA 162/1 (1989).

Tabla 2. Proporciones de componentes por m³ de concreto

Mezclas	Cemento (Kg)	CV (Kg)	ESC (Kg)	NaOH (Kg)	SS (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Relación L/S
Control (OPC)	400	-	-	-	-	972,72	704,39	0,48
GEO(CV/ESC)	0	320	80	28,55	158,37	972,72	704,39	0,48

Fuente: Los autores

La resistencia química al ataque por sulfatos se realizó con base en la norma ASTM C1012-13 (2012), exponiendo las muestras a soluciones de sulfato de sodio (Na_2SO_4) y sulfato de magnesio (MgSO_4) al 5%, a una temperatura de 25°C hasta por un periodo de 180 días; el pH de las soluciones a lo largo del estudio se mantuvo entre 6 y 8. Se utilizaron especímenes prismáticos (50,8 x 50,8 x 285 mm) para evaluar la expansión longitudinal y cubos de concreto (50,8 x 50,8 x 50,8 mm) para determinar la pérdida de resistencia a la compresión (ASTM C109, 2012). Las soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido acético (CH_3COOH) se prepararon a una concentración 1 M. Las muestras se sumergieron durante un período de 180 días en cada una de las soluciones; durante todo el estudio, se llevó a cabo un control de pH para evitar la neutralización del medio ambiente. En diferentes edades de la prueba, se registró la pérdida de peso, para lo cual la muestra previamente lavada se somete a un proceso de secado a 60 °C durante 24 horas, y se determinó la pérdida de resistencia a la compresión en cubos (50,8 x 50,8 x 50,8 mm). Complementariamente se realizó una inspección visual de las muestras.

Resultados y discusión

Propiedades físico-mecánicas

La Tabla 3 muestra los valores de resistencia a la compresión de los concretos a los 7 y 28 días de curado, previo a la inmersión en sulfatos y ácidos, en la que se puede observar que los Geo CV/ESC presentan una mayor resistencia a la compresión a los 7 días de curado hasta de un 59% en comparación con el concreto de control (OPC). Estos resultados son consistentes con los reportados en la literatura, donde los concretos activados a bases de CV y ESC presentan elevadas resistencias a edades tempranas de curado (Fernández-Jiménez y Palomo, 2009; Gao, Yu, y Brouwers, 2015; Kovalchuk, Fernández-Jiménez, y Palomo, 2007; Nath y Sarker, 2014; Ranjbar, Mehrali, Behnia, Alengaram, y Jumaat, 2014; Ryu, Lee, Koh, y Chung, 2013). A los 28 días de curado los concretos de Geo CV/ESC logran obtener resistencia de 43 MPa, la cual supera la reportada por el concreto de control en un 39%, este comportamiento coincide con lo expresado por otros investigadores (Fernández-Jiménez y Palomo, 2009; Gao *et al.*, 2015), quienes atribuyen este comportamiento a la coexistencia de los geles de activación alcalina N-A-S-H y C-A-S-H. En cuanto a las propiedades de absorción al agua, las muestras Geo CV/ESC presentan una reducción en la absorción capilar de 44%, en comparación al concreto de OPC, y la resistencia a la penetración de agua es a su vez superior en órdenes de hasta un 70%, este comportamiento está relacionado a la estructura más densa que presenta el sistema de activación alcalina y a una red de poros de mayor tortuosidad (Valencia, Mejía de Gutiérrez, y Gordillo, 2018).

Tabla 3. Propiedades físico-mecánicas de los concretos antes de ser expuestos a los ambientes agresivos

Resistencia a la Compresión (MPa)		
Días	Control OPC	Geo CV/ES
7	21,90	34,75
28	30,93	42,92
Propiedades físicas		
Coefficiente de Absorción capilar, k, (kg/m ² s ^{1/2})	0,0292	0,0162
Resistencia a la penetración de agua, m, (s/m ²)	1,899	3,242

Fuente: Los autores

Ataque por sulfatos

En la Figura 1 se presentan los resultados del ensayo de expansión realizado siguiendo la norma ASTM C1012 (2012) en las muestras de concreto de referencia (OPC) y de activación alcalina Geo CV/ESC, luego de su inmersión en una solución de Na_2SO_4 y MgSO_4 a una concentración de 50g/L y temperatura de 25°C. Los concretos inmersos en la solución de Na_2SO_4 presentan una mayor expansión en comparación con las muestras inmersas en MgSO_4 para las dos mezclas. A los 28 días de exposición en la solución de Na_2SO_4 se observa que la muestra de OPC presenta una expansión del 0,05%, la cual se mantiene estable hasta los 120 días, a diferencia de la muestra de Geo CV/ESC que revela una expansión de 0,005% (diez veces inferior) hasta los 120 días. A partir de esta edad las muestras de OPC presentaron un incremento significativo en el porcentaje de expansión (0,31 %) con respecto a las muestras de Geo CV/ESC (0,013%) tal como se observa hasta los 270 días de exposición a este medio. El mayor deterioro de los concretos a base de cemento portland se debe a la reacción del sulfato con el hidróxido de calcio y los monosulfoaluminatos de calcio para formar yeso y etringita, el cual conduce a la pérdida de resistencia, expansión, aparición de grietas, y desprendimiento de las capas superficiales en los concretos (Snelson y Kinuthia, 2010; Yang, Zhongzi, y Mingshu, 1996). Los concretos de activación alcalina, sin embargo, exhiben un mecanismo diferente, donde los principales productos de hidratación son menos susceptibles al ataque del Na_2SO_4 . (Sata, Sathonsaowaphak, y Chindaprasirt, 2012).

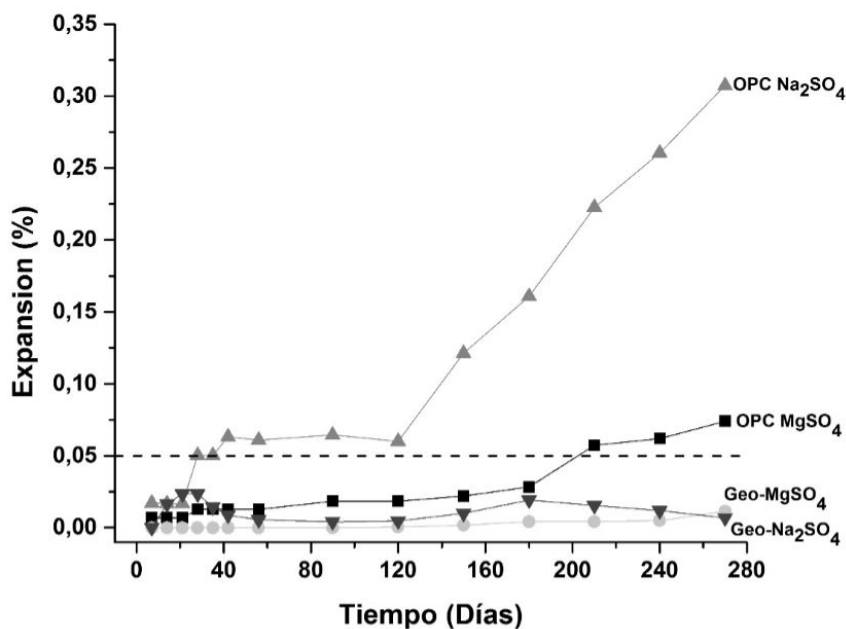


Figura 1. Gráfico de expansión vs Tiempo de concretos expuestos a Na_2SO_4 y MgSO_4

Fuente: Los autores

Las muestras de Geo CV/ESC inmersas en la solución de $MgSO_4$ no presentaron expansión a los 21 días de exposición, a diferencia de los concretos de control los cuales muestran una expansión de 0,007%. Los concretos Geo CV/ESC expuestos en Na_2SO_4 inician el proceso de expansión a tempranas edades, diferente a lo observado en $MgSO_4$, las cuales empiezan la expansión a los 120 días con un 0,0006% de expansión, a esta edad las muestras de OPC presentan valores de expansión de 0,0184%, triplicando la expansión de las muestras de activación alcalina. A los 270 días de exposición los concretos de Geo CV/ESC no presentan un incremento significativo en el porcentaje de expansión (0,0114%), caso contrario a lo ocurrido con los concretos a base de cemento portland (OPC) los cuales exhiben valores de expansión relativamente altos (0,074%) superando aproximadamente 6 veces los concretos de Geo CV/ESC. En general, tomando en consideración los límites de expansión recomendados para cemento portland y cemento adicionado con escorias luego de la exposición a sulfatos por un periodo de seis meses (ASTM C1012-13, 2012), se puede afirmar que el concreto de activación alcalina Geo CV/ESC clasifica como un material de alta resistencia a sulfatos, debido a que presenta una expansión inferior a 0,05% en los dos medios evaluados (normativa ACI 201, 2016).

La Figura 2 muestra el comportamiento de resistencia a la compresión de los concretos de activación alcalina (Geo CV/ESC) y de cemento portland a 60, 120 y 180 días de exposición en las soluciones de sulfato de magnesio y sulfato de sodio ($MgSO_4$ y Na_2SO_4). Entre los 60 y 120 días los concretos de Geo CV/ESC y OPC no presentan pérdidas de resistencia en ninguno de los dos medios de sulfatos; y en general logran mantener e incluso superar a la muestra curada en agua (OPC control, Geo CV/ESC control) en órdenes hasta del 12%; este comportamiento en las muestras de activación alcalina concuerda con lo obtenido por Bakharev (2005a) quien reportó incrementos resistentes de hasta un 4%, además este resultado es coherente con lo obtenido en el ensayo de expansión (Valor máximo de 0,05% para las muestras de OPC y de 0,005% para las muestras de Geo CV/ESC) hasta los 120 días de exposición. En el caso de OPC esto puede atribuirse a la formación de los compuestos expansivos que en las primeras etapas podrían densificar a la matriz, mientras que en el caso de Geo CV/ESC se atribuye a la participación de los sulfatos en el proceso de activación de especies no-activadas lo que conduce a nuevos compuestos de reacción. Después de los 180 días de exposición se observa que todas las muestras presentan pérdida en las resistencias, siendo mayor para las muestras de OPC, este comportamiento puede atribuirse a la presencia de portlandita (CH), la cual reacciona con los iones SO_4^{2-} para dar origen a la etringita, ocasionando agrietamiento en la estructura y un incremento en la porosidad (Mehta y Monteiro, 2006). Se observa que en la solución de Na_2SO_4 las muestras Geo CV/ESC presentan una pérdida en la resistencia a la compresión de apenas un 2,65%, valor poco significativo, lo cual concuerda con el reducido nivel de expansión (0,019%), este comportamiento coincide con lo encontrado por Ismail *et al.* (2012). Por otra parte la muestra de OPC expuesta a este medio presentó una pérdida de resistencia del 18,4%, lo cual era de esperarse debido a su elevado porcentaje de expansión. A los 180 días de exposición en la solución de $MgSO_4$ se observa igualmente una caída en la resistencia a la compresión pero esta vez en un mayor porcentaje, para las muestras de Geo CV/ESC se encontró una pérdida de 4,03%, lo cual se puede deber a la presencia de magnesio en el agente agresivo, el cual conduce a la descalcificación de las fases del gel rico en Ca presente en el sistema de activación alcalina, causando la degradación del sistema y la formación de yeso (Ismail *et al.*, 2012; Komljenović, Baščarević, Marjanović, y Nikolić, 2013; Chindaprasirt, Paisitsrisawat, y Rattanasak, 2014). Para los concretos de OPC se observó una caída en las resistencias más elevada, del orden de 31,87%, esto se atribuye a que hay una mayor descalcificación del C-S-H debido al potencial reemplazo del Ca^{2+} por Mg^{2+} para producir el silicato de magnesio hidratado.

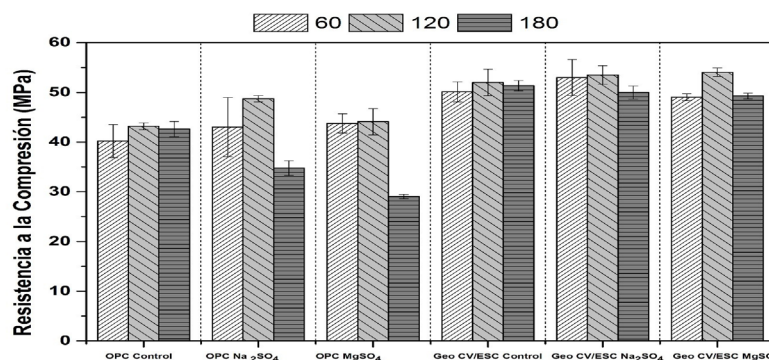


Figura 2. Resistencia a la compresión de concretos expuestos a Na_2SO_4 y $MgSO_4$
Fuente: Los autores

Ataque por ácidos

La exposición de los concretos a los diferentes medios ácidos generalmente conduce a un deterioro que es particularmente visible en la superficie expuesta. Se establece que los productos de reacción son hidrogeles de sílice, óxidos de aluminio y de hierro, y sales de ácido, que en el caso de ser solubles se retiran de la solución; la generación de un proceso de descalcificación se refleja en pérdidas en peso y de propiedades físico-mecánicas (Izquierdo, Rodríguez, y Mejía de Gutiérrez, 2015). Se identifican como factores que influyen en la velocidad de ataque: los relacionados con la solución (resistencia a los ácidos, la solubilidad de la sal de calcio, la concentración, pH, la difusividad del ácido y su sal), los relacionados con el material cementante (tipo y cantidades de cemento, la naturaleza de los agregados, la permeabilidad, el tiempo de curado, y las condiciones de servicio), y los que son externos tales como la temperatura (Allahverdi y Skvara, 2005). Los resultados de resistencia a compresión de las muestras expuestas a los ácidos se muestran en la Figura 3. De acuerdo con estos resultados, los valores de resistencia para todos los concretos estudiados siguió un patrón de pérdida de resistencia en los dos medios (ácido acético (CH_3COOH) y ácido sulfúrico (H_2SO_4)). En los Geo CV/ESC, sin embargo, la resistencia se redujo en aproximadamente entre un 40% y 50% hasta los 180 días de exposición en los dos medios (CH_3COOH y H_2SO_4), mientras que en los concretos de control (OPC) la resistencia se redujo hasta en un 82%.

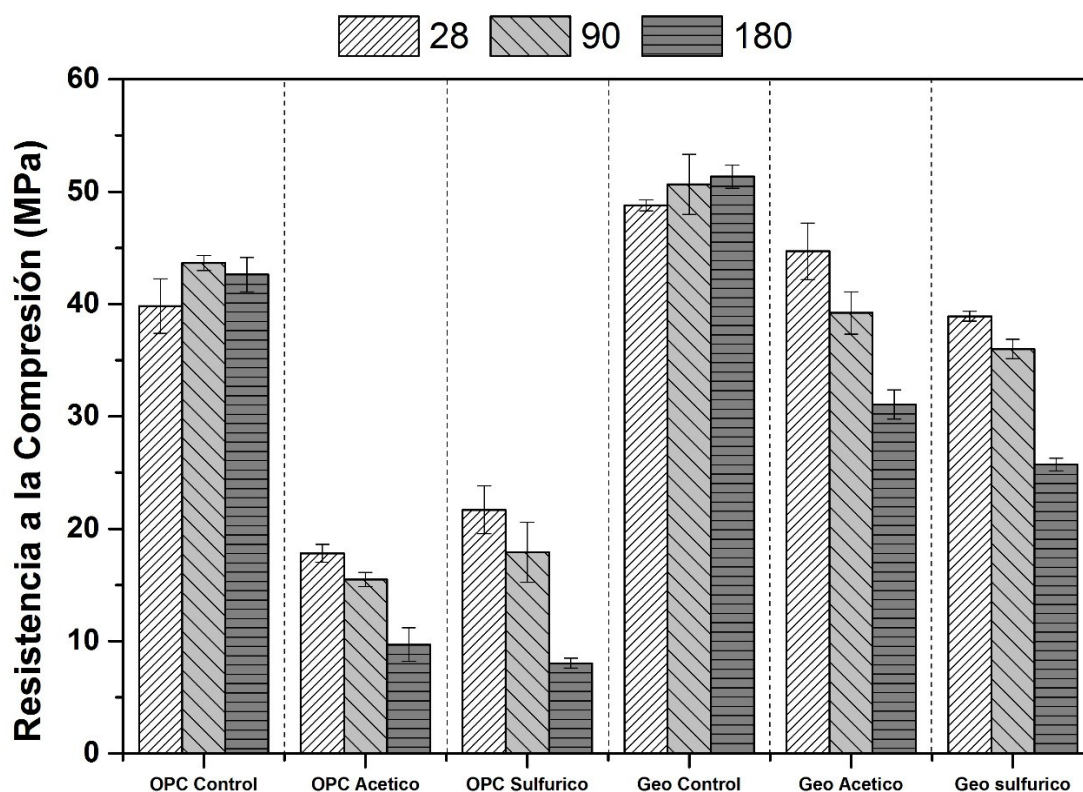


Figura 3. Resistencia a la compresión de concretos expuestos a Ácido acético y sulfúrico
Fuente: Los autores

Se destaca el buen comportamiento de los Geo CV/ESC inmersos en el ácido acético, con una menor pérdida de resistencia en comparación con las inmersas en ácido sulfúrico, caso contrario al que sucede con los concretos de OPC donde en los dos medios las muestras presentan un deterioro muy similar de las resistencias. Esta disminución en los valores de resistencia concuerda con la pérdida de la masa de los especímenes, los concretos sumergidos en la solución de CH_3COOH mostraron pérdidas de peso de alrededor del 5% después de 180 días de exposición para los Geo CV/ESC y una pérdida de hasta un 14% para los concretos de control. Sistemas inmersos en H_2SO_4 , sin embargo, mostraron una ganancia de peso entre los 7 y 90 días de exposición para las muestras de Geo CV/ESC, que se atribuye a la solubilidad reducida de la sal formada (sulfato de calcio hidratado o yeso), a los 180 días la pérdida resistente fue de 2,5% para las muestras de Geo CV/ESC y de 16% para las muestras de OPC. Cabe señalar que las muestras de Geo CV/ESC mostraron una menor pérdida de peso en la solución

de H_2SO_4 . La disminución de la masa de los concretos se atribuye a la solubilización de algunos productos de hidratación y el posterior aumento de la porosidad. Esto incluye el proceso de descalcificación y la solubilidad de los óxidos de alúmina y de hierro (Allahverdi y Skvara, 2006). Un examen visual de las probetas expuestas a las disoluciones ácidas muestra que los concretos Geo CV/ESC presentan buen aspecto físico hasta los 180 días de exposición en ambos medios (Figura 4). Sin embargo, los concretos de control (OPC) presentan un deterioro severo después de los 90 días de inmersión en CH_3COOH y a partir de los 7 días en H_2SO_4 , lo cual coincide con su elevada pérdida de resistencia mecánica y su alta pérdida de masa.

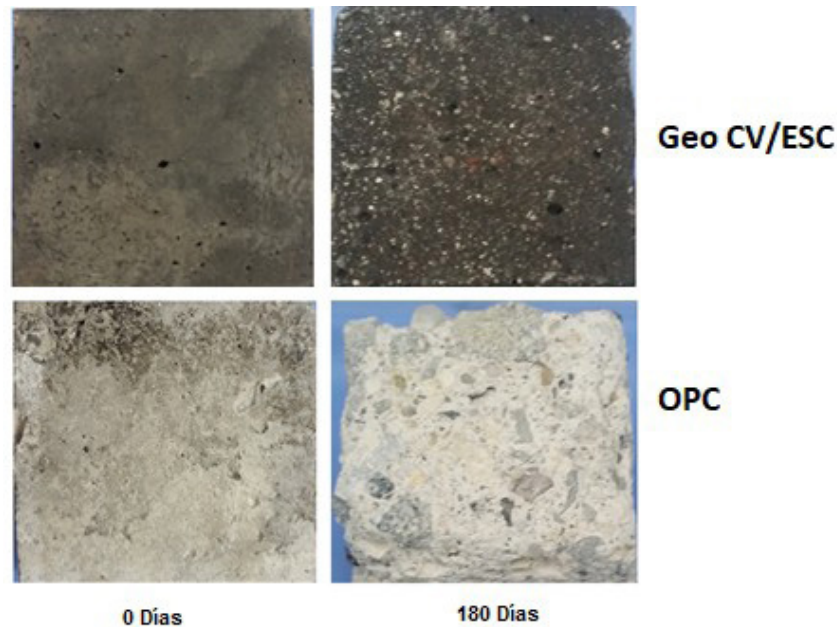


Figura 4. Concretos en ácido sulfúrico: Condición inicial y 180 días de exposición.
Fuente: Los autores

Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio confirman que el concreto de activación alcalina evaluado (Geo CV/ESC 80/20) es menos susceptible al ataque de sulfatos y ácidos, comparado con el concreto de cemento portland tradicional, esto se puede relacionar a su mayor resistencia a la compresión, a su baja absorción capilar y su mayor resistencia a la penetración de agua, lo cual puede ocasionar una mayor resistencia al ataque de agentes agresivos.

En el ataque por sulfatos se destaca el mayor deterioro observado en las probetas expuestas a sulfato de magnesio, lo que indica su mayor agresividad. Este ataque trae como consecuencia la pérdida de propiedades mecánicas atribuible a la formación de nuevas fases cristalinas, particularmente yeso, en presencia de sulfato de magnesio. Esta pérdida de resistencia para Geo CV/ESC es del 4% a edad de 180 días de exposición a $MgSO_4$ comparado con el 32% reportado por el concreto OPC. Los porcentajes de expansión de los concretos Geo CV/ESC y OPC fueron de 0,005 y 0,062% respectivamente. Para los concretos expuestos en sulfato de sodio se observa para Geo CV/ESC una disminución de resistencia del 2% después de 180 días, mientras en OPC la reducción resistente es del 19%. El porcentaje de expansión reportado por Geo CV/ESC en Na_2SO_4 es despreciable (0,0012%) comparado con el de los especímenes de OPC (0,2604%).

En el ataque químico por ácidos, se encontró que los dos sistemas muestran un deterioro en sus propiedades, pero se resalta el mejor comportamiento de los Geo CV/ESC, los cuales presentaron la menor pérdida de resistencia y de masa en los dos medios de exposición ácidos (CH_3COOH y H_2SO_4), en comparación con el concreto de control.

Agradecimientos

Los autores, miembros del Grupo Materiales Compuestos agradecen a la Universidad del Valle (Cali, Colombia) y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias) por el soporte financiero para la realización del presente trabajo investigativo, a través del proyecto “Construcción de prototipo a escala de vivienda rural utilizando materiales innovadores de baja huella de carbono”, Contrato No. 0696-2016.

Referencias

- Abora, K., Beleña, I., Bernal, S. A., Dunster, A., Nixon, P. A., Provis, J. L., ... Winnefeld, F. (2014). Durability and Testing – Chemical Matrix Degradation Processes. En J. L. Provis y J. S. J. van Deventer (Eds.), *Alkali Activated Materials* (177-221). Netherlands: Springer. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_8
- ACI 201.2R-16 (2016). *American Concrete Institute. Guide to Durable Concrete*. Reported by ACI Committee 201. American Concrete Institute: Michigan, Estados Unidos.
- Allahverdi, A., y Skvara, F. (2005). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-Part 1. Mechanism of corrosion at relatively high concentrations. *Ceramics Silikaty*, 49(4), 225.
- Allahverdi, A., y Skvara, F. (2006). Sulfuric acid attack on hardened paste of geopolymer cements-part 2. Corrosion mechanism at mild and relatively low concentrations. *Ceramics Silikaty*, 50(1), 1.
- ASTM C618-12 (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C1012 / C1012M (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a sulfate Solution*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C109 / C109M (2012). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Sécomens)*. American Society for Testing and Materials: Philadelphia, Estados Unidos.
- Aye, T., y Oguchi, C. T. (2011). Resistance of plain and blended cement mortars exposed to severe sulfate attacks. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2988-2996. doi: https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_8
- Bakharev, T. (2005a). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233-1246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.002>
- Bakharev, T. (2005b). Resistance of geopolymer materials to acid attack. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 658-670. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.005>
- Chindaprasirt, P., Paisitsrisawat, P., y Rattanasak, U. (2014). Strength and resistance to sulfate and sulfuric acid of ground fluidized bed combustion fly ash-silica fume alkali-activated composite. *Advanced Powder Technology*, 25(3), 1087-1093. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.02.007>
- Crammond, N. J. (2003). The thaumasite form of sulfate attack in the UK. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 809-818. doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00106-9)
- Davidovits, J. (2005). *Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions: Proceedings of the World Congress Geopolymer 2005*. Geopolymer Institute.

- EMPA -SIA 162/1 (1989). *Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technologies. Test No. 5 –Water Conductivity*. Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technologies: Zurich, Suiza
- Fernández-Jiménez, A., y Palomo, Á. (2009). Propiedades y aplicaciones de los cementos alcalinos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(3), 213-232. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732009000300001>
- Gao, X., Yu, Q. L., y Brouwers, H. J. H. (2015). Reaction kinetics, gel character and strength of ambient temperature cured alkali activated slag-fly ash blends. *Construction and Building Materials*, 80, 105-115. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.065>
- Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Trezza, M. A., y González, M. A. (2005). Thaumasite formation in limestone filler cements exposed to sodium sulphate solution at 20 °C. *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 77-84. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.003>
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., Hamdan, S., y van Deventer, J. S. J. (2012). Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure. *Materials and Structures*, 46(3), 361-373. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9906-2>
- Izquierdo, S., Rodríguez, E. D., y Mejía de Gutiérrez, R. (2015). Resistance to acid corrosion of blended cements mortars with spent fluid catalytic cracking (sFCC) catalyst. *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(3), 169–176. doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-50732015000300002>
- Komljenović, M., Baščarević, Z., Marjanović, N., y Nikolić, V. (2013). External sulfate attack on alkali-activated slag. *Construction and Building Materials*, 49, 31-39. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.013>
- Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., y Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – Part II. *Fuel*, 86(3), 315-322. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>
- Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete Microestructure, Properties, and Material* (Third Edit, p. 647). The McGraw Hill Companies.
- Nath, P., y Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163-171. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Palomo, A., Grutzeck, M. W., y Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323-1329. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- Puertas, F., Gutiérrez, R., Fernández-Jiménez, A., Delvasto, S., y Maldonado, 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: <https://doi.org/10.3989/mc.2002.v52.i267.326>
- Ranjbar, N., Mehrali, M., Behnia, A., Alengaram, U. J., y Jumaat, M. Z. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials & Design*, 59, 532-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.037>
- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., y Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409-418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069>
- Sata, V., Sathonsaowaphak, A., y Chindaprasirt, P. (2012). Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack. *Cement and Concrete Composites*, 34(5), 700-708. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010>

- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., y Bhattacharyya, S. K. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials*, 85, 78-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Škvára, F., Jílek, T., y Kopecký, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, 49(3), 195–204.
- Snelson, D. G., y Kinuthia, J. M. (2010). Resistance of mortar containing unprocessed pulverised fuel ash (PFA) to sulphate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 523-531. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.001>
- Song, X. J., Marosszeky, M., Brungs, M., y Munn, R. (2005). Durability of fly ash based geopolymer concrete against sulphuric acid attack. *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France (123–129). Recuperado de <http://www.irbnet.de/daten/iconda/06059017363.pdf>
- Thokchom, S., Ghosh, P., y Ghosh, S. (2009). Resistance of fly ash based geopolymer mortars in sulfuric acid. *arPN Journal of engineering and applied Sciences*, 4(1), 65-70. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.8765&rep=rep1&type=pdf>
- Valencia, W., Mejía de Gutiérrez, R., y Gordillo, M., (2018). Geopolymeric concretes based on fly ash with high unburned content. *Construction and Building Materials*, 165, 697–706. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.071>
- Van Jaarsveld, J. G. S., Van Deventer, J. S. J., y Lorenzen, L. (1997). The potential use of geopolymeric materials to immobilise toxic metals: Part I. Theory and applications. *Minerals Engineering*, 10(7), 659-669. doi: [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00046-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00046-0)
- Wallah, S. E., y Rangan, B. V. (2006). *Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties*. Res. Report-GC2, Curtin University, Australia. pp, 76–80.
- Yang, S., Zhongzi, X., y Mingshu, T. (1996). The process of sulfate attack on cement mortars. *Advanced Cement Based Materials*, 4(1), 1-5. doi: [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90057-7](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90057-7)