

Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente basados en altos contenidos de ceniza volante: un análisis a largas edades

Engineering properties of alkali-activated hybrid concretes based on fly ash high contents: an analysis at long ages

William G. Valencia-Saavedra ^{1a}, Rafael Robayo-Salazar ^{1b}, Ruby Mejía de Gutiérrez ^{1c}

¹ Grupo de Materiales Compuestos (GMC-CENM), Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad del Valle, Colombia. Correos electrónicos: ^a william.gustavo.valencia@correounivalle.edu.co, ^b rafael.robayo@correounivalle.edu.co, ^c ruby.mejia@correounivalle.edu.co
Orcid: ^a 0000-0002-8918-2132, ^b 0000-0003-1687-2885, ^c 0000-0002-5404-2738

Recibido: 11 julio, 2020. Aceptado: 10 enero, 2021. Versión final: 15 marzo, 2021.


Resumen

Este artículo presenta un análisis a largas edades (≤ 4 años) de las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de concretos híbridos basados en la activación alcalina de una ceniza volante (CV) colombiana de alto contenido de escoria siderúrgica (sin valor comercial). Se evaluó el efecto del tipo de fuente de calcio, utilizando adiciones del 20 % de escoria siderúrgica de alto horno (ESC) y cemento portland (OPC), en comparación con un concreto basado 100 % en CV. Las propiedades evaluadas incluyen la resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción, densidad, porosidad, sorptividad, resistencia a sulfatos, resistencia al ataque ácido, permeabilidad al ion cloruro, susceptibilidad a la carbonatación y resistencia residual a elevadas temperaturas. Los resultados obtenidos demostraron la viabilidad de alcanzar valores de resistencia a la compresión que ascienden a valores entre 40 y 93 MPa a edades de curado de 4 años. En general, se demostró el buen desempeño físico-mecánico y durable de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC.

Palabras clave: materiales de activación alcalina; híbridos; ceniza volante; escoria de alto horno; cemento portland; propiedades mecánicas; durabilidad.

Abstract

This article presents an analysis at long ages (≤ 4 years) of the physical-mechanical properties and durability of concrete hybrids. All of them based on the alkaline activation of Colombian fly ash (FA) with a high content of unburned content (without commercial value). The effect of the type of calcium source was evaluated using 20% additions of Ground-granulated Blast-furnace Slag (GGBFS) and Ordinary Portland Cement (OPC), compared to 100% FA-based concrete. The evaluated properties include compressive strength, splitting tensile strength, absorption, density, porosity, sorptivity, sulfate resistance, acid attack resistance, chloride ion permeability, carbonation susceptibility, and residual resistance at elevated temperatures. The results obtained demonstrate the feasibility of reaching compressive strength values that reach values between 40 and 93 MPa at curing ages of 4 years. In general, the good physical-mechanical and durable performance of the concrete GCV / ESC and GCV / OPC was demonstrated.

ISSN impreso: 1657 - 4583. ISSN en línea: 2145 - 8456, **CC BY-ND 4.0** 

Como citar: W. G. Valencia-Saavedra, R. Robayo-Salazar, R. Mejía de Gutiérrez, “Propiedades de ingeniería de concretos híbridos activados alcalinamente basados en altos contenidos de ceniza volante: un análisis a largas edades,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, no. 3, pp. 1-18, 2021, doi: [10.18273/revuin.v20n3-2021001](https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021001)

Keywords: alkaline activation materials; hybrids; fly ash; Ground-granulated Blast-furnace Slag; Ordinary Portland Cement; mechanical properties; durability.

1. Introducción

Los concretos de activación alcalina son una nueva clase de materiales que presentan un gran potencial en la industria de la construcción, constituyéndose en una alternativa de mayor sostenibilidad para el sector. Estos concretos se producen a partir de la interacción química entre un material aluminosilicato (precursor) y una disolución fuertemente alcalina. En función de la composición del precursor y/o el uso de adiciones ricas en calcio, la reacción puede generar como productos geles tipo aluminosilicatos sódicos hidratados (N-A-S-H) o silico-aluminatos cálcicos hidratados (C-A-S-H), o geles “híbridos”, es decir, aluminosilicatos sódico-cálcicos hidratados (N,C-A-S-H). En general, la producción de concretos de activación alcalina exhibe ventajas ambientales, tales como bajos consumos energéticos y menores emisiones de CO₂ en comparación con los concretos basados en cemento portland (OPC) [1], [2]. Así mismo, los concretos de activación alcalina presentan un elevado desempeño mecánico y una resistencia química frente a diversos ambientes agresivos, tales como ácidos, sulfatos, y CO₂; estas ventajas se suman a su buen comportamiento a elevadas temperaturas [3]-[6].

Entre los precursores comúnmente utilizados en los materiales de activación alcalina se encuentran las cenizas volantes (CV), este es un subproducto industrial cuyo manejo y disposición final representa un gran problema ambiental para las plantas que utilizan carbón como fuente principal de energía. Los grandes volúmenes de producción de CV en Colombia (600 kt/año) [7], su baja calidad en algunas plantas generadoras (elevado contenido de inquemados y poca reactividad) y la falta de alternativas de aprovechamiento sostenible llevan a su acumulación, generando un pasivo ambiental importante y la utilización de espacios improductivos que representan un alto costo de almacenamiento para estas industrias.

Son diversos los reportes que relacionan las propiedades de ingeniería de concretos de activación alcalina basados en ceniza volante (CV) [8]-[18]. Sin embargo, a pesar de las excelentes propiedades físicas y mecánicas reportadas hasta el momento, la información relacionada con mezclas híbridas y binarias (CV + OPC o escoria de alto horno (ESC)) y su utilización en la producción de concretos activados alcalinamente es relativamente escasa [2], [16]. Cabe anotar, que la adición de pequeñas cantidades (≤ 30 % en peso) de fuentes de calcio (tipo OPC y/o ESC) ha demostrado, a nivel de pastas y

morteros, una opción tecnológicamente viable para obtener mayores resistencias mecánicas a temperatura ambiente, gracias a la formación de geles tipo (N, C)-A-S-H; promoviendo así, su posible utilización en aplicaciones *in situ* como la producción de elementos de concreto premezclado [19]-[25].

Zhang *et al.* [2], en una revisión bibliográfica, reportan que los concretos de activación alcalina a base de cenizas volantes y adiciones de fuentes de calcio presentan un buen comportamiento cuando son expuestos a condiciones o ambiente agresivos tipo cloruros, sulfatos, ácidos, altas concentraciones de CO₂ y elevadas temperaturas; resaltan que estos materiales reportaron resistencias similares o incluso superiores a las presentadas por los concretos basados exclusivamente en OPC, bajo estos mismos ambientes. Sin embargo, cabe anotar que la mayoría de estos estudios reportan resultados a periodos de exposición relativamente cortos, y los materiales utilizados son generalmente de calidad probada, por ejemplo, para el caso específico de las cenizas volantes no contienen carbón inquemado.

Teniendo en consideración lo anteriormente descrito, este artículo plantea la producción y caracterización de concretos híbridos activados alcalinamente utilizando una CV colombiana con un alto contenido de inquemados (sin valor comercial) y adiciones del 20 % (en peso) de fuentes de calcio tipo ESC y OPC, como materiales alternativos al concreto OPC para su uso en el sector de la construcción. Se evaluaron propiedades mecánicas tales como las resistencias a la compresión y tracción indirecta; se resalta que el seguimiento de las propiedades mecánicas se llevó a cabo hasta edades de curado prolongadas (4 años). Complementariamente, se determinaron algunas propiedades físicas (absorción de agua, sorptividad, densidad y porosidad) que son de gran interés en términos de evaluar el desempeño final de estos materiales, así como una observación microestructural de las interfaces por medio de microscopia electrónica de barrido (MEB). Finalmente, se evaluó la durabilidad de ambos concretos bajo ambientes agresivos, tales como sulfatos, ácidos, CO₂, cloruros y elevadas temperaturas.

2. Materiales y metodología

Como precursor para los sistemas de activación alcalina se utilizó una ceniza volante colombiana (CV) procedente de una caldera de una planta papelera. Como adiciones fuente de calcio se utilizaron escoria siderúrgica de alto horno (ESC) y cemento portland

(OPC) de uso general (tipo UG). La composición química de estos materiales, presentada en la tabla 1, se determinó por fluorescencia de rayos X (XRF) empleando un espectrómetro MagiX-Pro PW-2440 Phillips, equipado con un tubo de rodio y con una potencia máxima de 4 KW. Se destaca en la CV la baja relación molar $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (2,50) y el alto contenido de inquemados (20,83 %), según lo cual el material no cumple las especificaciones de la norma ASTM C618 para uso como adición puzolánica en cementos portland convencionales; esta norma establece un valor máximo de inquemados del 6 %. El tamaño de partícula D [3, 4], obtenido por la técnica de granulometría láser en un equipo Mastersizer 2000 para CV, ESC y OPC fue de 22,1, 17,8 y 21,5 μm , respectivamente. Como activador alcalino se usó una solución mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) (98 %) y silicato sódico (waterglass) comercial ($\text{SiO}_2=32,1$ %, $\text{Na}_2\text{O}=11,9$ %, $\text{H}_2\text{O}=55,9$ %).

Tres tipos de cementantes activados alcalinamente fueron utilizados en la producción de los concretos. El primero, basado en 100 % CV (GCV); el segundo, basado en la mezcla 80 %CV-20 %ESC (GCV/ESC), y el tercero, basado en la mezcla 80 %CV-20 %OPC (GCV/OPC). Las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de cada mezcla fueron determinadas en estudios previos [26], [27], y corresponden a las siguientes:

- ✓ Mezcla GCV: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,85$; $\text{a}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0,32$
- ✓ Mezcla GCV/ESC: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=3,85$; $\text{a}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0,25$
- ✓ Mezcla GCV/OPC: $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=4,5$; $\text{a}_2\text{O}/\text{SiO}_2=0,40$

Para la preparación de las mezclas de concreto se utilizaron 400 kg de precursor por metro cúbico. Como agregados se incorporaron una grava triturada de tipo silícea con un tamaño máximo de 12,7 mm y una arena

de río con un módulo de finura de 3,16. La proporción de agregados grueso y fino fue de 42 % y 58 %, respectivamente. Los concretos se fabricaron con una relación líquido/sólido (L/S) de 0,48. Cabe aclarar que L representa el contenido de agua presente en la mezcla, teniendo en cuenta el aportado por el activante y el agua libre incorporada en el mezclado; y S representa la proporción del precursor y la proporción del activador alcalino anhidro. En la tabla 2 se muestran las dosificaciones de los concretos.

La trabajabilidad de los concretos en estado fresco se determinó mediante el ensayo de asentamiento (slump), de acuerdo con lo especificado por la norma ASTM C143. Para el análisis de las propiedades mecánicas y físicas se elaboraron probetas cilíndricas (76,2 mm de diámetro por 152,4 mm de altura) y cúbicas (50,8 mm de lado). Todos los especímenes fueron moldeados a temperatura ambiente (~ 24 °C) y cubiertos con espumas húmedas durante las primeras 24 horas (bajo condiciones de humedad relativa (HR) >90 %); posteriormente, los especímenes fueron removidos de los moldes y curados bajo condiciones controladas (HR ~ 90 %, temperatura ~ 24 °C).

El ensayo de resistencia a la compresión se llevó a cabo de acuerdo con la normativa ASTM C39, utilizando una máquina de ensayos ELE International con capacidad de 1500 KN, a una velocidad de 1 mm/min hasta la rotura. La evaluación de esta propiedad se realizó utilizando probetas cilíndricas (76,2 mm de diámetro por 152,4 mm alto) curados en la cámara a edades de curado de 7, 28, 90, 180, 360, 720 y 1440 días. La resistencia a la compresión fue igualmente evaluada en especímenes curados bajo agua a edades de 28, 90, 180, 360 y 720 días de curado), simulando las condiciones convencionales de curado de concretos basados en OPC.

Tabla 1. Composición química de las materias primas

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	Otros	PI
CV	28,53	19,18	8,80	6,68	2,24	7,94	2,71	1,62	1,63	20,67
ESC	31,99	14,54	1,12	46,86	1,05	0,23	0,82	0,54	1,03	1,82
OPC	19,13	4,42	4,32	57,70	1,60	-	2,32	-	0,73	9,78

PI: pérdida por ignición

Tabla 2. Proporciones (diseño de mezclas) por m³ de los concretos

Mezclas	CV (Kg)	ESC (Kg)	OPC (Kg)	NaOH (Kg)	SS (Kg)	Arena (Kg)	Grava (Kg)	Relación L/S	Asentamiento (mm)
GCV	400	-	-	47,4	184,9	972,7	704,4	0,48	220
GCV/ESC	320	80	-	28,5	158,4	972,7	704,4	0,48	180
GCV/OPC	320	-	80	48,4	219,7	972,7	704,4	0,48	280

La resistencia a la tracción indirecta fue evaluada de acuerdo con el procedimiento estándar ASTM C496 a edades de curado de 28, 360 y 1440 días.

Las propiedades físicas de porosidad total y absorción del concreto endurecido fueron evaluadas en especímenes cilíndricos a edades de curado de 28, 180 y 360 días, siguiendo el procedimiento estándar descrito en la normativa ASTM C642.

Adicionalmente, se realizó el ensayo de succión capilar de acuerdo con las normativas EMPA SIA 162/1 y ASTM C1585. Para estos últimos ensayos, las muestras de concreto, una vez retiradas de la cámara de curado, se secaron a una temperatura de 60 °C hasta lograr un peso constante; posteriormente, se aplicó un recubrimiento en la cara lateral de la probeta con una película polimérica (Acronal-imprimante acrílico), con la finalidad de impermeabilizar esta cara y direccionar el ingreso del agua. Por medio de este ensayo se determinó el coeficiente de absorción capilar (K), la resistencia a la penetración de agua (m) y la porosidad efectiva de los concretos.

Los valores que se reportan para las diferentes propiedades físico-mecánicas corresponden al promedio de tres probetas y/o mediciones. Complementariamente, se realizó una observación de la microestructura e *interface* de los concretos por medio de microscopía electrónica de barrido. Las probetas inspeccionadas corresponden a trozos de 1 cm³ de concreto, extraídas del interior del material, por medio de cortes de precisión. Los trozos fueron encapsulados en resina epóxica y fueron sometidos a un proceso de pulido, similar al seguido en inspecciones metalográficas. La observación se llevó a cabo utilizando un microscopio JEOL JSM-6490LV con un voltaje de aceleración de 20 kV en modo de bajo vacío.

La resistencia química al ataque por sulfatos se realizó con base en la norma ASTM C1012-13, exponiendo las muestras a soluciones de sulfato de sodio (Na₂SO₄) y sulfato de magnesio (MgSO₄) al 5 % a una temperatura de 25 °C hasta por un periodo de 365 días; el pH de las soluciones a lo largo del estudio se mantuvo entre 6 y 8. Se utilizaron especímenes prismáticos (50,8x50,8x285mm) 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).

Para evaluar el frente de la carbonatación se prepararon cilindros de concreto de 76,2 mm de diámetro por 152,4 mm de altura y cubos para evaluar el efecto en la resistencia a la compresión luego de la exposición a CO₂.

Con el fin de mantener la dirección radial en el ingreso del CO₂, la parte superior e inferior de cada uno de los cilindros fue recubierta con una resina acrílica (Acronal).

Se sabe que el proceso de carbonatación es en realidad una reacción a largo plazo, por lo tanto, para acelerar el proceso se utilizó una cámara de carbonatación con condiciones controladas (HR= 65 %, T= 25 °C y CO₂ = 1 %).

Para evaluar la resistencia química al ataque por ácido, se prepararon especímenes cúbicos de 50,8 mm de lado, los cuales, luego de un periodo de curado de 28 días, permanecieron inmersos hasta 365 días en cada una de las soluciones de ácido acético (CH₃COOH) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1 M. A lo largo del estudio se llevó a cabo un control de pH para evitar la neutralización del medio y la disminución de concentración del ácido. Para determinar la variación de peso en cada uno de los especímenes, cada espécimen extraído del medio fue lavado previamente y sometido a un proceso de secado a 60 °C por 24 horas. La resistencia a compresión se evaluó después de los 365 días de inmersión (ASTM C109).

El ensayo de exposición a cloruros se determinó mediante la prueba de permeabilidad rápida a cloruros con base en la normativa ASTM C1202; utilizando este mismo ensayo, se evaluó la resistividad inicial de los concretos, y se reportan los resultados promedio de tres especímenes a edades de curado de 365 días. Para la exposición a altas temperaturas, las muestras GCV/ESC y GCV/OPC, luego de un curado por 28 días a temperatura ambiente con una humedad relativa mayor al 90 %, se sometieron a un proceso de secado a 40 °C por 48 horas, para posteriormente ser expuestas durante dos horas a temperaturas de hasta 1100 °C, con una velocidad de calentamiento de 2 °C/min; finalmente, se determinó la resistencia a compresión residual.

3. Resultados y discusión

3.1. Propiedades en estado fresco de los concretos

Con el propósito de evaluar la capacidad de los concretos para deformarse en estado fresco, por acción de su propio peso, se determinó el flujo de asentamiento con el cono de Abrams (véase tabla 3). Los concretos de activación alcalina presentaron una consistencia fluida (slump ≥ 180 mm), la cual estuvo acompañada de una adecuada cohesión entre los componentes de la mezcla y la ausencia de fenómenos de segregación y sangrado. El mayor asentamiento presentado por el concreto GCV/OPC (véase tabla 2) se puede atribuir al mayor contenido de activante presente en la mezcla. Lo anterior coincide con lo obtenido por [28], [29], quienes reportan que el aumento de la cantidad de disolución alcalina da

lugar a un mayor distanciamiento entre las partículas y, como consecuencia, reduce la fricción entre estas [30], aumentando la trabajabilidad de las mezclas.

3.2. Propiedades en estado fresco de los concretos

3.2.1 Resistencia a compresión

La evolución de la resistencia a la compresión para los diferentes concretos producidos (véase figura 1) a edades hasta de 1440 días de curado (4 años) se puede observar en la figura 2.

En general, se observa un incremento en la resistencia a la compresión con la evolución del tiempo de curado, comportamiento que es característico de concretos

basados en OPC curados bajo agua. A pesar del incremento progresivo, se puede apreciar una diferencia entre la resistencia alcanzada por los diferentes concretos de activación alcalina. La menor resistencia a la compresión fue reportada en los concretos GCV; esta mezcla reporto una resistencia a la compresión de 7,1 MPa a los 7 días de curado, exhibiendo un incremento del 163 % a edades de curado de 28 días (18,7 MPa). A edades avanzadas de curado (360 días) se alcanza una resistencia de 33,1 MPa, esto se asocia a la baja calidad (o lenta reactividad) que presenta la CV, lo cual ocasiona que los mayores aumentos de resistencia se obtengan a edades prolongadas de curado.

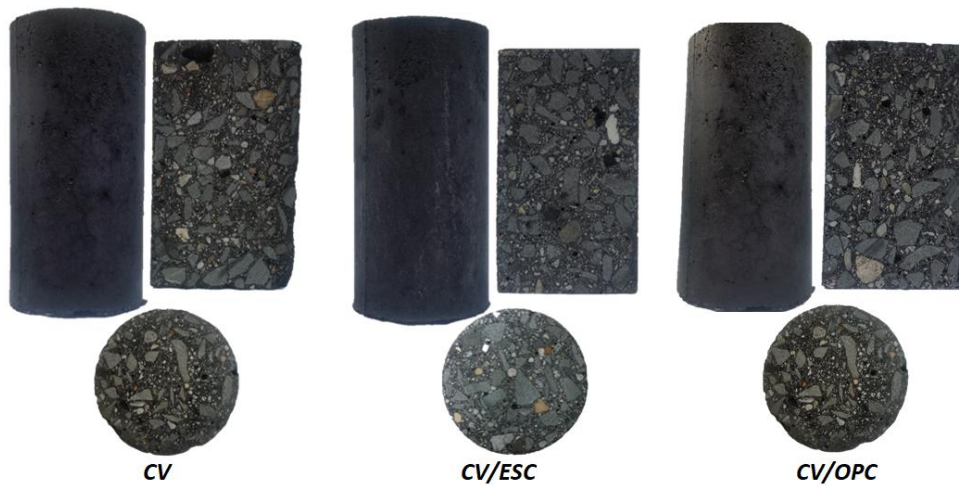


Figura 1. Corte longitudinal de los concretos de activación alcalina en estado endurecido: apariencia interna y distribución de los agregados.

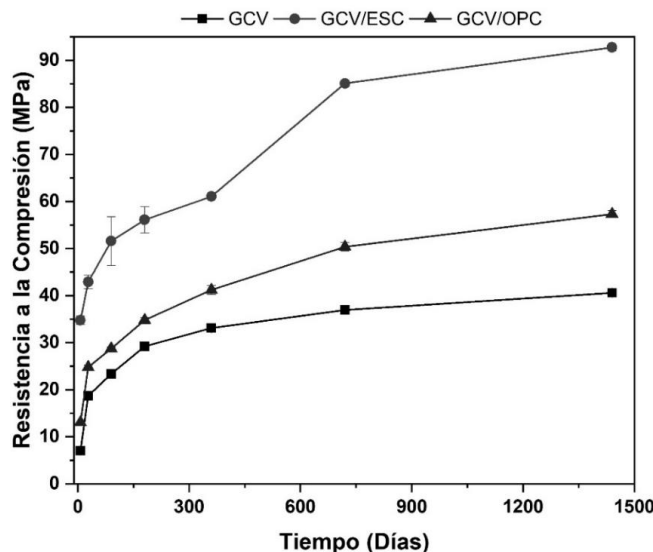


Figura 2. Resistencia a la compresión de los concretos en función de los tiempos de curado.

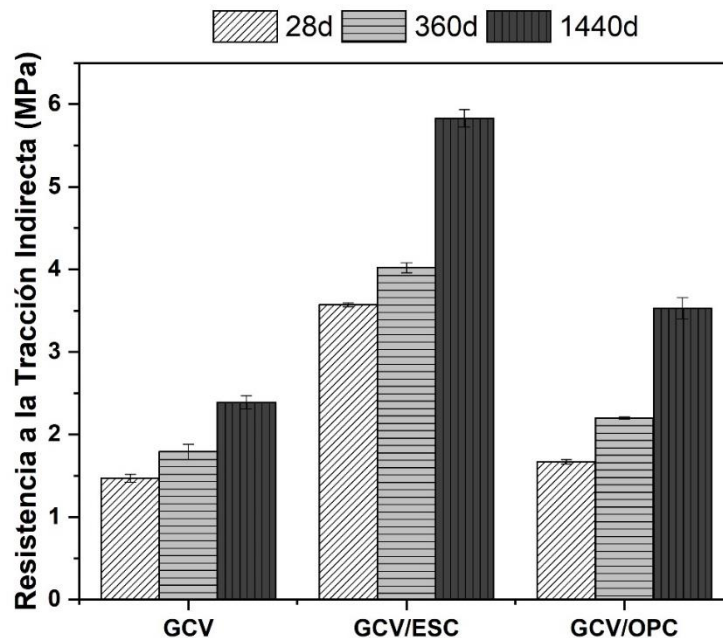


Figura 3. Resistencia a la tracción indirecta de los concretos a 28, 360 y 1440 días de curado.

Este comportamiento coincide con el reportado por [31]-[34], quienes informan que los sistemas de activación alcalina basados exclusivamente en CV, aunque puedan endurecer a temperatura ambiente, presentan un desarrollo de la resistencia a la compresión relativamente lento.

La adición de fuentes de calcio tipo ESC y OPC promueve el desarrollo de mayores resistencias a la compresión. El concreto binario GCV/ESC alcanzó un valor de resistencia aproximadamente 5 veces mayor que el concreto GCV a los 7 días de curado. En efecto, esta mezcla (GCV/ESC) reportó una resistencia a la compresión de 35 MPa a tan solo 7 días de curado, exhibiendo un incremento del 75 % a 360 días (61,07 MPa).

Por otra parte, el concreto híbrido GCV/OPC reportó una resistencia a la compresión de 13 MPa a los 7 días de curado, logrando superar satisfactoriamente al concreto GCV (7,09 MPa) en un 84 %; a su vez, a 360 días de curado, alcanzó 41 MPa. El mayor incremento en el desempeño mecánico de los concretos binarios (GCV/ESC) y/o híbridos (GCV/OPC) está relacionado con el mayor contenido de calcio presente en las mezclas que modifican la microestructura de los geles en relación con los sistemas basados exclusivamente en GCV [21], [23], [35]. La presencia de los geles híbridos (N, C-A-S-H), en general, ha sido demostrado, contribuye significativamente a la resistencia a la

compresión de los productos finales, y, a su vez, disminuye la porosidad al densificar al material [21], [36].

A edades de curado prolongadas, 720 y 1440 días, se destaca el mayor incremento de resistencia del concreto GCV/ESC, equivalente a un 52 % entre los 360 (61,07 MPa) y 1440 días de curado (92,75 MPa); mientras la mezcla GCV/OPC logró un incremento del 40 % en este mismo periodo. Los concretos GCV/OPC alcanzaron una resistencia máxima de 57 MPa a 1440 días de curado. Por su parte, el concreto GCV no reportó una variación significativa en la resistencia a la compresión (33,11-40,59 MPa) en este periodo (360 a 1440 días). Con base en estos resultados, se puede concluir que la adición (20 %) de una fuente de calcio tipo OPC o ESC a concretos de activación alcalina basados en GCV es efectiva y contribuye significativamente al incremento de la resistencia mecánica de las mezclas. Este comportamiento también fue observado por autores como [36]-[45].

Sin embargo, es de anotar que los estudios desarrollados por estos autores se realizaron a nivel de pastas y edades de curado, por lo general, inferiores a los 90 días. Al respecto, el seguimiento de la evolución de la resistencia a la compresión a edades de hasta los 1440 días (4 años) se considera uno de los aportes más importantes del presente estudio, al igual que el hecho de que este haya evaluado directamente el nivel de concretos.

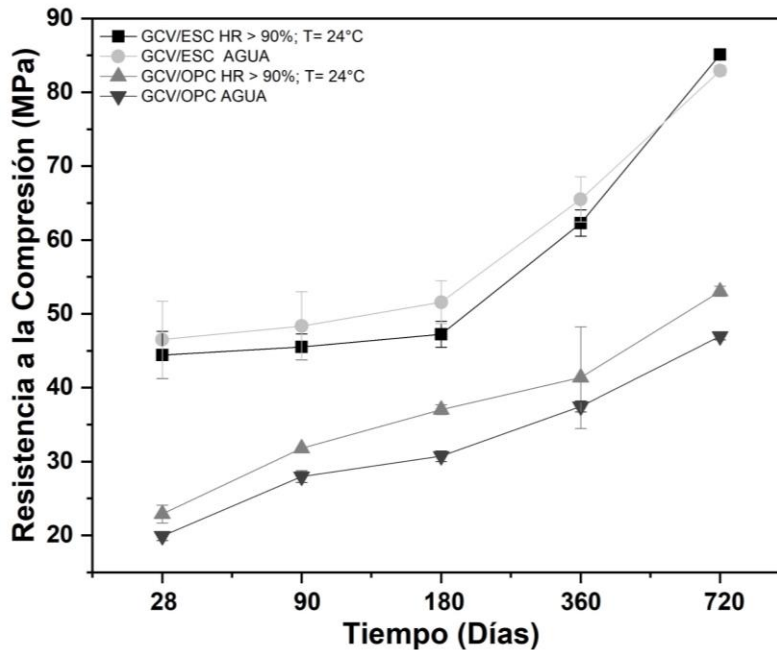


Figura 4. Resistencia a la compresión de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC en diferentes medios de curado (curado en cámara húmeda vs. curado bajo agua (inmersión)).

3.2.2 Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción del concreto es una propiedad mecánica importante utilizada para relacionar los fenómenos de iniciación y propagación de grietas, cizallamiento y anclaje del acero de refuerzo en el concreto [21], [46], [47]. La resistencia a la tracción indirecta de los concretos de activación alcalina curados a temperatura ambiente se presenta en la figura 3.

Los resultados muestran que la resistencia a la tracción aumenta con la adición de las fuentes de calcio (OPC o ESC), en comparación con el concreto basado exclusivamente en CV, lo cual coincide con lo reportado por [21]. Esta tendencia es similar al comportamiento mostrado por estos mismos concretos en donde la resistencia a compresión aumenta con la adición de las fuentes de calcio (OPC o ESC), en comparación con el concreto basado exclusivamente en CV, lo cual coincide con lo reportado por [21]. Esta tendencia es similar al comportamiento mostrado por estos mismos concretos en la resistencia a compresión.

A los 28 días de curado, se resalta el comportamiento de la mezcla GCV/ESC, la cual alcanza una resistencia a la tracción indirecta de 3,57 MPa, superando en un 143 % al concreto GCV. Por su parte, el concreto GCV/OPC reportó una resistencia a la tracción (1,67 MPa) superior al concreto GCV en un 13 %. A los 360 días de curado, la mezcla GCV/ESC logró superar en un 155 %

(4,57 MPa) a la mezcla GCV; este comportamiento coincide con lo reportado por [46] en ensayos que se llevaron a cabo hasta edades de curado de 180 días. A edades finales de ensayo (1440 días), el concreto GCV/ESC presenta un aumento del 144 % (5,83 MPa) y GCV/OPC del 47 % (3,53 MPa), en relación con la resistencia a la tracción indirecta reportada por la mezcla GCV (2,93 MPa).

3.2.3 Efecto del sistema de curado en la resistencia

En la figura 4 se compara la resistencia a la compresión de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC curados en cámara bajo condiciones controladas (HR ~90 %, temperatura ~24 °C) y bajo agua. Se puede observar que para el caso del concreto GCV/ESC se obtienen mayores resistencias cuando son curados bajo agua, en contraste con los concretos GCV/OPC que desarrollan una mayor resistencia cuando su curado se lleva a cabo en la cámara (HR ~90 %). Bajo condiciones de inmersión (curado bajo agua), la mezcla GCV/ESC presenta un incremento del 5 % de su resistencia a los 28 días (46,52 MPa) en comparación con la alcanzada bajo condiciones húmedas (44,43 MPa), mientras que para el concreto GCV/OPC se determinó una pérdida del 15 % de su resistencia en condiciones equivalentes.

A edades de curado de 180 días, esta diferencia se hace más evidente; para el concreto GCV/ESC, se logra un incremento del 10 % (51,48 MPa), mientras que el

concreto GCV/OPC sufre una pérdida de resistencia del 21 % (30,72 MPa). Este mismo comportamiento fue observado a los 720 días de curado. Contrario a lo aquí expuesto, en [48] se estudió el comportamiento mecánico de sistemas de activación alcalina basados en la mezcla CV+ESC, reportando en su estudio una caída de la resistencia cuando las mezclas fueron sometidas a un curado bajo agua (inmersión). La caída de resistencia del concreto GCV/OPC curado bajo agua se puede asociar a una lixiviación significativa de la solución activante.

Es de resaltar el comportamiento mecánico superior del concreto GCV/ESC, independientemente del ambiente de curado, en comparación con el concreto GCV/OPC, lo cual puede estar relacionado con la mayor reactividad de la ESC en el medio altamente alcalino, y podría promover una mayor producción de los geles de reacción, estructuras más densas y de mayor resistencia a la compresión.

3.3. Propiedades físicas: densidad, absorción, porosidad y sorptividad (succión capilar)

La densidad, el porcentaje de absorción y el volumen de poros permeables de los concretos en estudio se presentan en la figura 5. En general, los valores de la densidad aparente obtenidos para estos materiales son cercanos a aquellos reportados en la literatura para concretos convencionales basados en OPC (con agregados de tipo silíceo), los cuales reportan valores entre 2300 y 2600 kg/m³ [49]. Así mismo, no se aprecian diferencias significativas en la densidad del material a 28 días de curado respecto de aquella reportada a edades avanzadas de curado (180 y 360 días); contrasta este resultado con el obtenido en estudios anteriores [50] para concretos basados en ESC (100 %), donde se observó un incremento significativo en la densidad de los materiales con la edad de curado.

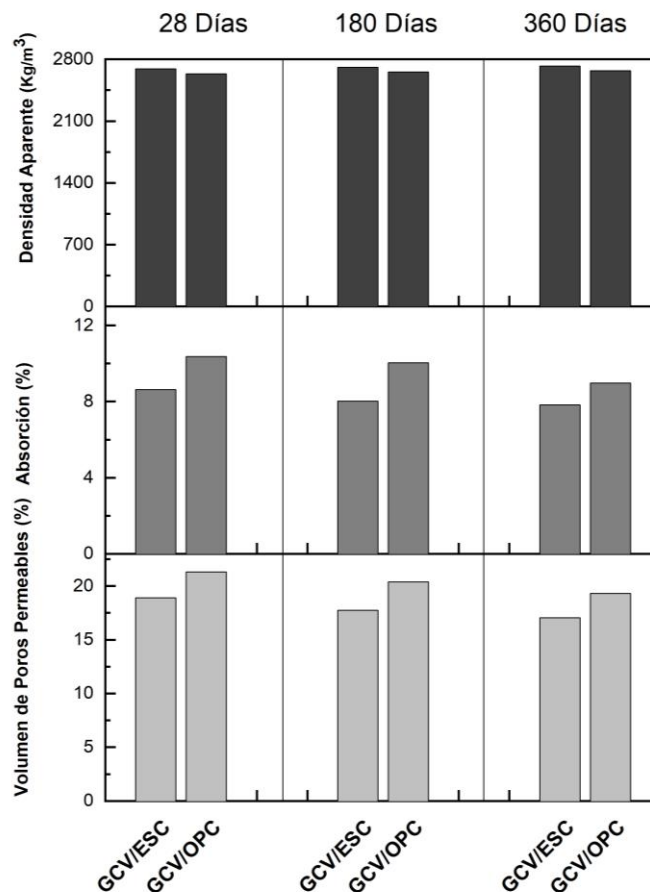


Figura 5. Densidad, absorción y porosidad de los morteros fabricados con la matriz de activación alcalina y cemento convencional a 28 180 y 360 días de curado.

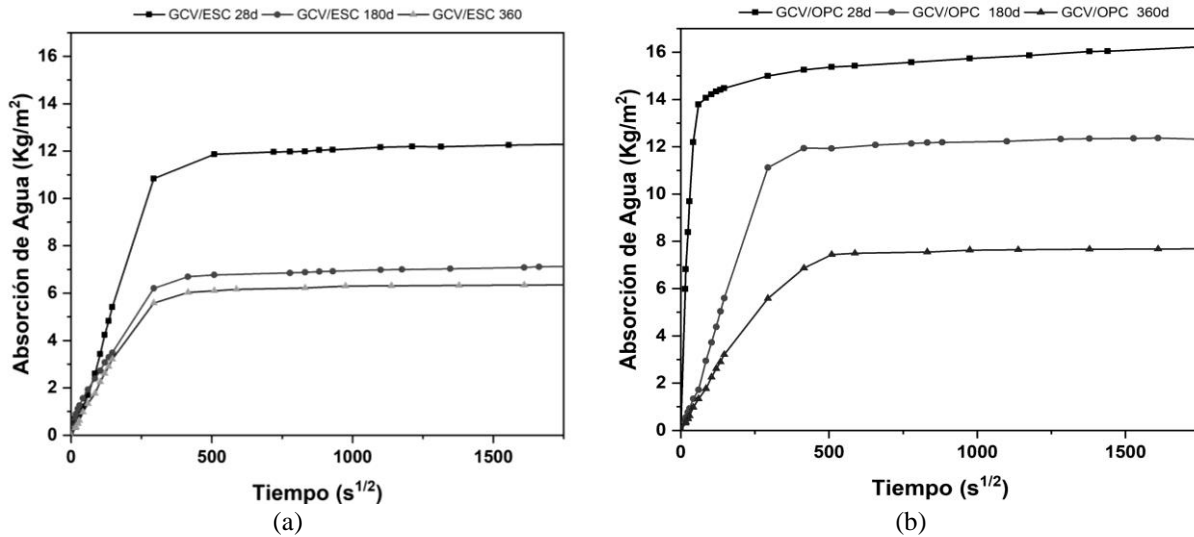


Figura 6. Curvas de succión capilar de los concretos (a) GCV/ESC y (b) GCV/OPC a diferentes edades de curado.

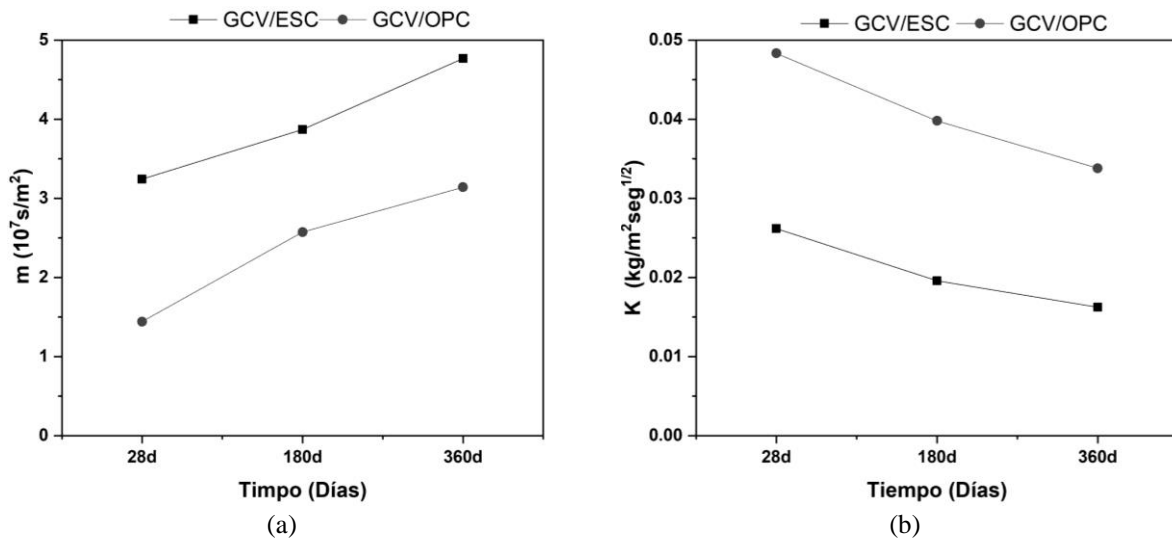


Figura 7. Coeficiente de absorción capilar “K” (a) y resistencia a la penetración de agua “m” (b) de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC a los 28, 180 y 360 días de curado.

En concordancia con los resultados de las pruebas mecánicas, se observó la disminución de la absorción y porosidad de los concretos, lo cual indica un incremento del grado de reacción de cada uno de los concretos con la evolución del tiempo de curado. El concreto GCV/ESC presentó los menores porcentajes de absorción, con valores del 8,6, 8,0 y 7,8 % menores a los reportados por el concreto GCV/OPC a los 28, 180 y 360 días de curado, respectivamente; esta misma tendencia fue observada en el volumen de poros permeables (véase figura 5).

A pesar de que la absorción de agua por inmersión total permite obtener una estimación del volumen total de poros en los concretos, esto no necesariamente reproduce

con exactitud la permeabilidad del concreto; parámetro importante en la evaluación de la durabilidad del material [51], [52]. Por ello, se evaluó la sorptividad (o succión capilar) de los concretos. Las curvas de succión capilar obtenidas para diferentes edades de curado se muestran en la figura 6. Se puede observar que, a mayores edades de curado, las muestras presentan una absorción de agua significativamente menor, que es coherente con una menor porosidad y una estructura de poro más refinada.

En general, la menor sorptividad a mayores edades de curado es coherente con los resultados obtenidos en resistencias mecánicas y los observados en absorción y porosidad total, lo cual concuerda con lo reportado por

otros autores [53], [54]. El concreto GCV/OPC presenta la mayor absorción capilar a los 28 y 180 días, sin embargo, a edades de 360 días esta se reduce en órdenes similares a la reportada por GCV/ESC; fenómeno atribuible al mayor refinamiento de poros y al incremento resistente a edades largas. En la figura 7 se presentan el coeficiente de absorción capilar (K) y la resistencia a la penetración de agua (m) de las diferentes mezclas, los cuales fueron calculados con base en los datos de la figura 6.

Se observa que a edades de curado avanzadas hay una reducción en el “K” de hasta un 38 % respecto de lo reportado a los 28 días de curado, donde los menores valores corresponden al concreto GCV/ESC; comportamiento que coincide con el reportado por [54]. Por su parte, “m” tiende a aumentar a mayores edades de curado. Coincidiendo con los resultados anteriores, las muestras GCV/ESC a edades de hasta 360 días de curado presentan valores que duplican los reportados por la mezcla GCV/OPC; esto coincide con la mayor resistencia mecánica a compresión, mayor densidad y menor absorción de agua de esta mezcla.

La figura 8 presenta la porosidad efectiva de los concretos a las diferentes edades de curado. En general, se aprecia la disminución de esta propiedad con el incremento del tiempo de curado como consecuencia del avance de las reacciones. A los 28 días de curado, el concreto con menor porosidad (16,3 %) es el GCV/ESC, mientras GCV/OPC reporta una porosidad efectiva del 20,1 %. Estos resultados se encuentran en el rango

reportado por [22], quienes informan que por lo general los sistemas de activación alcalina presentan porosidades entre 8 % y 20 %.

Por su parte, a 360 días, las porosidades efectivas se reducen a 9,2 % y 17,7 % para GCV/ESC y GCV/OPC, respectivamente. Al respecto, estudios previos [54], [55] han mostrado que el volumen de poros permeables de los concretos de activación alcalina tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo de curado, lo cual está relacionado con la mayor formación de productos de reacción que densifican al material y contribuyen al taponamiento de los poros, ocasionando una tortuosidad mayor de los poros capilares [56].

3.4. Propiedades físicas: densidad, absorción, porosidad y sorptividad (succión capilar)

Mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS), se llevó a cabo el análisis de la microestructura de los diferentes concretos producidos (GCV, GCV/ESC y GCV/OPC). La figura 9 muestra las microfotografías correspondientes a los 28 días de curado. Para el caso del concreto GCV se observa una matriz porosa (véase figura 9a), mientras en el concreto GCV/ESC (véase figura 9b) se observa una matriz más densa y una zona de transición interfacial que corresponde a una buena unión entre el agregado y la pasta.

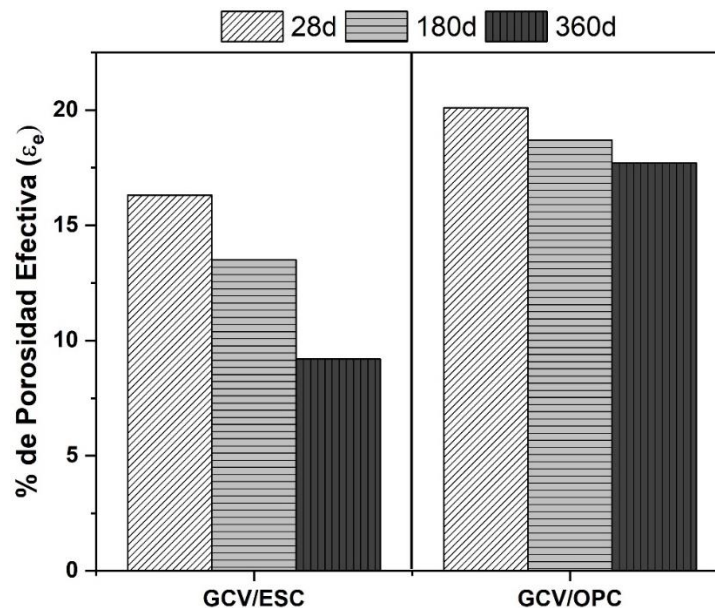


Figura 8. Porosidad efectiva de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC a los 28, 180 y 360 días de curado.

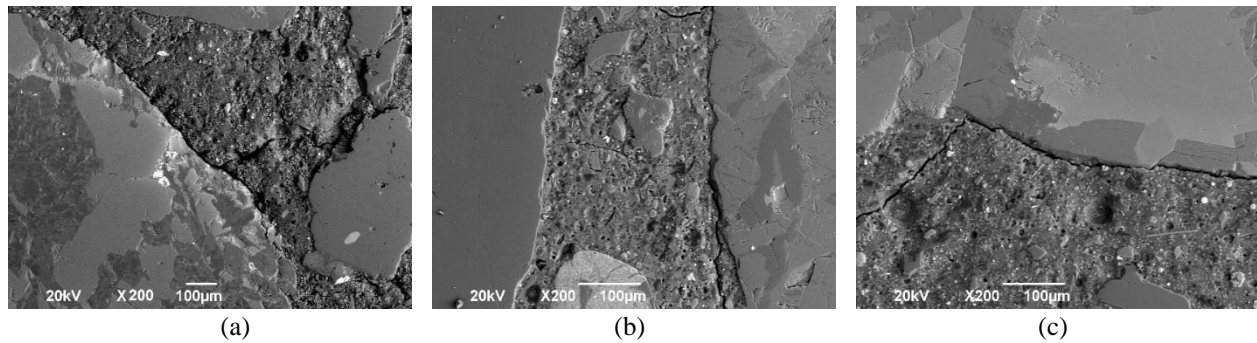


Figura 9. Observación microscópica (MEB) de las zonas de transición interfacial de los concretos GCV (a), GCV/ESC (b) y GCV/OPC (c).

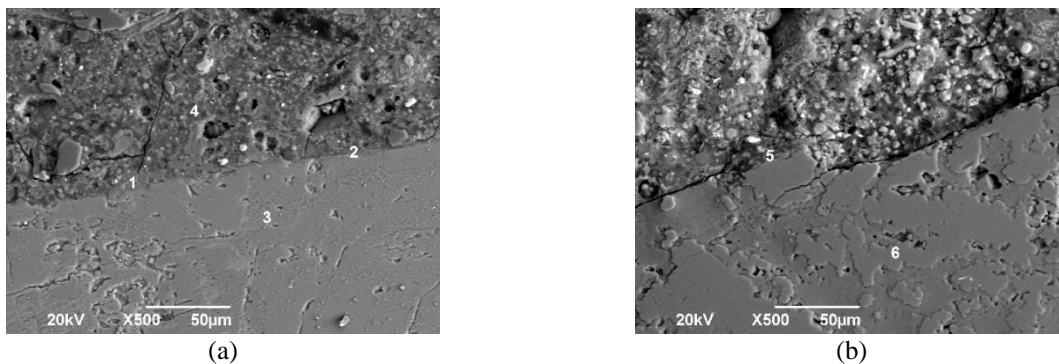


Figura 10. Análisis del límite entre el agregado y la matriz de los concretos GCV/ESC (a) y GCV/OPC (b).

En el concreto GCV/OPC (véase figura 9c) se observa, igualmente, una matriz densa, con microfisuras en la zona de transición interfacial entre el agregado y la matriz, lo cual puede corroborar el menor desempeño mecánico reportado por esta mezcla. La presencia de estas microfisuras puede estar relacionada a fenómenos de contracción o retracción por secado.

A diferencia de la zona de transición interfacial, que generalmente es porosa en los concretos basados exclusivamente en OPC, los concretos de activación alcalina presentan una zona de transición interfacial densa y uniforme [57], lo cual se pudo corroborar, especialmente para la mezcla GCV/ESC.

Una observación a mayores aumentos de esta zona (véase figura 10) permitió observar que la matriz GCV/ESC presenta una unión físico-química con el agregado, lo cual se confirma mediante el análisis EDS (véase tabla 3), donde se observa que en la zona interfacial la composición química de los productos de reacción corresponde a geles tipo (C, N)-A-S-H; esto explica el mejor comportamiento mecánico de los concretos GCV/ESC, debido al mayor anclaje químico y mecánico entre los agregados y la matriz.

3.5. Propiedades de durabilidad

La tabla 4 presenta los resultados obtenidos por los concretos CV/ESC y CV/OPC expuestos a diferentes ambientes agresivos: sulfatos (Na_2SO_4 y MgSO_4), CO_2 , permeabilidad a cloruros (Cl^-), ácidos (H_2SO_4 y $\text{CH}_3\text{-COOH}$) y elevadas temperaturas ($\approx 1100^\circ\text{C}$). El comportamiento de los concretos frente a estos medios se clasificó como “muy bueno” (++), “bueno” (+) o “malo” (-), de acuerdo con los resultados obtenidos en cada prueba y su comparación entre sí.

En general, se observó un mejor comportamiento del concreto GCV/ESC en comparación con el concreto GCV/OPC. Para las muestras expuestas en sulfatos, se determinó que el mayor nivel de deterioro se presentó en las mezclas expuestas a sulfato de magnesio, siendo mayor para los concretos CV/OPC, los cuales presentaron expansiones de 0,08 % y resistencias residuales de 54,88 %, a diferencias de los concretos CV/ESC, los cuales presentaron expansiones de 0,061 % y resistencias residuales del 66,72 % a los 365 días de exposición.

Tabla 3. Composición elemental (EDS) de la zona de transición interfacial de los concretos GCV/ESC y GCV/OPC

Puntos	Elementos									
	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Total
1	6,53	44,57	4,30	0,44	10,36	26,26	0,47	5,64	1,42	100,00
2	5,04	48,22	2,10	2,22	11,28	24,08	---	7,07	---	100,00
3	10,06	47,94	---	---	---	41,69	---	0,31	---	100,00
4	6,32	46,88	4,75	2,52	10,39	22,95	---	4,90	1,29	100,00
5	8,09	48,96	3,41	---	11,38	21,40	0,44	6,32	---	100,00
6	10,02	55,62	---	---	--	34,36	---	---	---	100,00
7	10,78	41,85	369	---	8,05	21,70	---	9,63	4,30	100,00

Tabla 4. Desempeño de concretos expuestos a ambientes agresivos

Prueba de desempeño			
Concreto		GCV/ESC	GCV/OPC
Exposición a sulfatos	Expansión Na ₂ SO ₄ -365d (%)	0,002 (++)	0,09 (+)
	Resistencia a la compresión residual Na ₂ SO ₄ 365d (%)	120,1 (++)	99,94 (+)
	Expansión MgSO ₄ -365d (%)	0,061 (+)	0,08 (+)
	Resistencia a la compresión residual MgSO ₄ 365d (%)	66,72 (+)	54,88 (+)
Exposición a CO ₂	Frente de carbonatación (mm)-150 d	29,08 (+)	33,24 (-)
	Resistencia a la compresión residual - 365d (%)	83,92 (+)	93,01 (++)
Exposición a ácidos	Pérdida de masa H ₂ SO ₄ -365d (%)	-3,81 (++)	-3,8 (++)
	Resistencia a la compresión residual H ₂ SO ₄ 365d (%)	34,45 (+)	25,82 (+)
	Expansión CH ₃ -COOH -365d (%)	-6,44 (+)	-9,67 (+)
	Resistencia a la compresión residual CH ₃ -COOH 365d (%)	33,73(+)	18,34 (+)
Exposición a cloruros	Permeabilidad a cloruros -365d (Coulombs)	1236 (++)	1509 (+)
	Resistividad-365 d (Ω.m)	333,89 (++)	198,22 (+)
Exposición altas temperaturas	Resistencia a la compresión residual (%) a 1100 °C	31,1 (+)	25,29 (+)

(++) Muy buen comportamiento, (+) Buen comportamiento y (-) Mal comportamiento.

Cuando las muestras fueron expuestas a sulfato de sodio, se observó que las muestras CV/ESC presentaban mejor desempeño con ganancias en la resistencia a la compresión después de los 365 días de curado, reportando resistencias residuales de 120 %; igualmente, se destaca que las muestras CV/OPC no presentaron pérdida de resistencia.

Cabe destacar que la concentración de Na₂SO₄ y MgSO₄ utilizada para esta evaluación fue de 50 g/l, equivalente a 32.900 y 39.877 ppm de sulfato (SO₄²⁻), que corresponden a valores que superan el límite (10.000 ppm) a partir del cual el ACI 318 clasifica una exposición a sulfatos como muy severa.

En general, tomando en consideración los límites de expansión (12 meses) establecidos para concretos basados en OPC (ASTM C1012-13), se puede afirmar que los concretos de activación alcalina GCV/ESC y GCV/OPC clasifican como materiales de alta resistencia a sulfatos (ACI 201), debido a que presentaron una expansión inferior a 0,10 %, tanto para sulfato de sodio (Na₂SO₄) como de magnesio (MgSO₄).

Este buen comportamiento coincide con lo reportado por otros investigadores, donde se resalta el buen comportamiento de los sistemas de activación alcalina cuando se exponen a sulfatos [58]-[61]. Para las muestras expuestas a CO₂ se determinó el frente de carbonatación de los concretos CV/ESC y CV/OPC. En general, ambos

concretos presentaron carbonatación; sin embargo, las muestras de GCV/OPC se carbonataron completamente a los 150 días, en comparación con el concreto GCV/ESC, que mostró una profundidad de carbonatación de 29,08 mm a la misma edad de exposición. En cuanto a la resistencia a la compresión residual de los concretos expuestos a CO₂, se resalta que los concretos activados alcalinamente (CV/ESC y CV/OPC) reportaron, a los 365 días, valores de resistencia mayores al 80 %, en comparación con las resistencias iniciales. Estos resultados coinciden con lo reportado por [62], quienes determinaron en morteros activados alcalinamente que, luego de 4 meses de exposición al CO₂, las resistencias a la compresión se estabilizan en valores relativamente aceptables.

En cuanto a la exposición a ácidos, se determinó que, pese a que los concretos presentaron pérdidas de la resistencia a la compresión, lo cual podría estar relacionado con el deterioro de los geles de activación alcalina [63]-[66], se mantiene una resistencia residual aceptable después de los 365 días de exposición. Los concretos que presentaron la mayor pérdida de resistencia a la compresión fueron las mezclas GCV/OPC, así, en presencia del ácido acético 1M, a los 365 días de inmersión, se observa una resistencia residual cercana al 18 %; valor inferior al reportado por los concretos CV/ESC, el cual fue del 34 %. De la misma manera, los concretos de activación alcalina CV/ESC y CV/OPC mostraron un mejor desempeño al ácido sulfúrico (H₂SO₄) 1 M, con resistencias residuales del 34,45 % y 25,82 % a los 365 días de exposición, respectivamente.

Por su parte, la pérdida de peso reportada por ambos concretos expuestos a ácido acético y sulfúrico mostró que, en general, los sistemas de activación alcalina presentan una buena estabilidad frente a estos medios. La mayor pérdida de masa se presentó en los sistemas GCV/OPC, en los dos medios ácidos, lo cual coincide con lo reportado en el ensayo de resistencia a la compresión. En efecto, se destaca la mejor estabilidad de las muestras GCV/ESC, presentando pérdidas de peso de hasta el 6,5 % a los 365 días del ataque ácido.

El buen comportamiento que presentaron los concretos de activación alcalina coincide con lo reportado por [65], [63], quienes informan que a pesar de que se produce un ataque químico por el ácido acético y sulfúrico, que conduce a la potencial descalcificación de la estructura, estos materiales presentan una buena estabilidad.

Por su parte, la permeabilidad al ion cloruro (Cl⁻) reportada por el concreto GCV/ESC fue un 22,08 % menor a la presentada por el concreto GCV/OPC. Los

niveles de permeabilidad al ion cloruro reportada por los concretos GCV/ESC (1236 C) y GCV/OPC (1509 C) se clasifican como bajos (1000-2000 C) según la norma ASTM C1202.

Por último, los concretos GCV/OPC expuestos a elevadas temperaturas (1100°C) demostraron ser más susceptibles a las altas temperaturas, reportando una resistencia residual de aproximadamente el 25 % con relación a la resistencia inicial (antes de ser expuestos a temperaturas de 1100°C), en comparación al concreto GCV/ESC, que reportó una resistencia residual del 31 %. Cabe resaltar que, según lo reportado en la literatura, los materiales álcali-activados presentan una mayor estabilidad a elevadas temperaturas y al fuego en relación con los concretos fabricados con cemento portland [67]-[69].

4. Conclusiones

Los resultados presentados en este artículo demuestran la posibilidad de producir concretos de activación alcalina, basados en altos contenidos de cenizas volantes (GCV) (80 %), con niveles de inquemados altos (20,67 %), incorporando la adición de bajos contenidos (20 %) de fuentes de calcio tipo escorias de alto horno (ESC) y/o cemento portland (OPC).

En estado fresco, el concreto GCV/OPC reportó el mayor asentamiento, seguido del concreto GCV y el concreto GCV/ESC, lo cual estuvo relacionado con el mayor contenido de solución activadora.

El seguimiento de la resistencia a compresión de los concretos de activación alcalina a edades de curado prolongadas (hasta de 4 años) mostró la viabilidad de obtener materiales con resistencias a la compresión a 28 días de hasta 46 MPa, que incrementan hasta 92,75 MPa al cabo de 4 años, independiente del tipo de curado (húmedo (HR 90 %) o inmersión en agua). Dentro de los concretos estudiados, la mezcla GCV/ESC (80/20) presentó el mejor desempeño mecánico, superando en un 229 % al concreto basado 100 % en CV (GCV) (18,70 MPa) y en un 173 % al concreto híbrido GCV/OPC, a los 28 días de curado.

La resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de curado fue de 3,57 MPa para la mezcla GCV/ESC, valor que supera en un 113 % y 143 % a la reportada por los concretos GCV/OPC y GCV, respectivamente. Esta tendencia coincide con la observada en los valores de absorción y porosidad de los concretos evaluados.

Estos resultados demuestran la viabilidad del aprovechamiento de este subproducto de la industria en la obtención de concretos alternativos con desempeños mecánicos y propiedades de ingeniería que permiten su uso en el sector de la construcción.

Los resultados obtenidos en el desempeño a la durabilidad confirman que los concretos de activación alcalina evaluados (CV/ESC y CV/OPC) presentan un buen comportamiento bajo los diferentes medios agresivos de exposición (sulfatos, cloruros, CO₂, ácidos y altas temperaturas). De los concretos evaluados se destaca el mejor desempeño observado en las mezclas GCV/ESC, expuestas a los diferentes ambientes, lo que coincide con el buen comportamiento obtenido en las propiedades físico-mecánicas.

Referencias

- [1] M. Olivia, H. Nikraz, "Optimization of fly ash geopolymer concrete mixtures in a seawater environment", *Proceedings of the 24th Biennial Conference of the Concrete Institute of Australia, Sydney*, 2009, pp. 188-189.
- [2] P. Zhang, K. Wang, Q. Li, J. Wang, Y. Ling, "Fabrication and Engineering Properties of Concretes Based on Geopolymers/Alkali-activated Binders-A Review", *J. Clean. Prod.*, vol. 258, pp. 120896, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120896
- [3] D. E. Angulo-Ramírez, R. M. de Gutiérrez, W. G. Valencia-Saavedra, M. H. F. de Medeiros, J. Hoppe-Filho, "Carbonation of hybrid concrete with high blast furnace slag content and its impact on structural steel corrosion", *Mater. Constr.*, vol. 69, no. 333, pp. 182, 2019, doi: 10.3989/mc.2019.05418
- [4] W. Valencia-Saavedra, D. E. Angulo, R. M. de Gutiérrez, "Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 12, pp. 04016148, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001618
- [5] W. G. Valencia-Saavedra, R. M. de Gutiérrez, "Performance of geopolymer concrete composed of fly ash after exposure to elevated temperatures", *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 229-235, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.208
- [6] W. G. Valencia-Saavedra, R. M. de Gutiérrez, F. Puertas, "Performance of FA-based geopolymer concretes exposed to acetic and sulfuric acids", *Constr. Build. Mater.*, vol. 257, pp. 119503, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119503
- [7] J. M. Mejía, E. D. Rodríguez, R. M. de Gutiérrez, "Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros", *Ing. Univ.*, vol. 18, no. 2, pp. 309-327, 2014, doi: 10.11144/Javeriana.IYU18-2.upcv
- [8] E. I. Díaz, E. N. Allouche, "Recycling of Fly Ash into Geopolymer Concrete: Creation of a Database", en *2010 IEEE Green Technologies Conference*, 2010, pp. 1-7, doi: 10.1109/GREEN.2010.5453790
- [9] A. M. Fernández-Jiménez, A. Palomo, C. Lopez-Hombrados, "Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete", *ACI Mater. J.*, vol. 103, no. 2, pp. 106-112, 2006.
- [10] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, B. V. Rangan, "Introducing fly ash-based geopolymer concrete: manufacture and engineering properties", en *30th Conference on our World in Concrete and Structures*, 2005, pp. 271-278.
- [11] A. F. Jiménez, A. P. Sánchez, "Factores que afectan al desarrollo inicial de resistencias a compresión en hormigones de ceniza volante activados alcalinamente (sin OPC)", *Mater. Constr.*, vol. 57, no. 287, pp. 7-22, 2007.
- [12] W. Prachasaree, S. Limkatanyu, A. Hawa, A. Samakrattakit, "Development of Equivalent Stress Block Parameters for Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete", *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 12, pp. 8549-8558, 2014, doi: 10.1007/s13369-014-1447-2
- [13] G. S. Ryu, Y. B. Lee, K. T. Koh, Y. S. Chung, "The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators", *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 409-418, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.069
- [14] M. Šejnoha, M. Brouček, E. Novotná, Z. Keršner, D. Lehký, P. Frantík, "Fracture properties of cement and alkali activated fly ash based concrete with application to segmental tunnel lining", *Adv. Eng. Softw.*, vol. 62-63, pp. 61-71, 2013, doi: 10.1016/j.advengsoft.2013.04.009
- [15] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta, S. K. Bhattacharyya, "Geopolymer concrete: A review of some recent developments", *Constr. Build. Mater.*, vol. 85, pp. 78-90, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036
- [16] D. K. Sinha, A. Kumar, S. Kumar, "Development of Geopolymer Concrete from Fly Ash and Bottom Ash Mixture", *Trans. Indian Ceram. Soc.*, vol. 73, no. 2, pp. 143-148, 2014, doi: 10.1080/0371750X.2014.922427

- [17] M. Talha J, O. Kayali, A. Khennane, J. Black, "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes", *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 301-310, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.048
- [18] S. E. Wallah, "Drying Shrinkage of Heat-Cured Fly Ash-Based Geopolymer Concrete", *Mod. Appl. Sci.*, vol. 3, no. 12, pp. 14, 2009, doi: 10.5539/mas.v3n12p14
- [19] W. Al-Kutti, M. Nasir, M. A. M. Johari, A. S. Islam, A. A. Manda, N. I. Blaisi, "An overview and experimental study on hybrid binders containing date palm ash, fly ash, OPC and activator composites", *Constr. Build. Mater.*, vol. 159, pp. 567-577, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.017
- [20] M. Dong, M. Elchalakani, A. Karrech, "Curing conditions of alkali-activated fly ash and slag mortar", *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 6, pp. 04020122, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003233
- [21] G. Fang, W. K. Ho, W. Tu, M. Zhang, "Workability and mechanical properties of alkali-activated fly ash-slag concrete cured at ambient temperature", *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 476-487, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.008
- [22] G. F. Huseien, A. R. M. Sam, K. W. Shah, A. M. A. Budiea, J. Mirza, "Utilizing spend garnets as sand replacement in alkali-activated mortars containing fly ash and GBFS", *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 132-145, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.149
- [23] N. K. Lee, H.-K. Lee, "Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature", *Constr. Build. Mater.*, vol. 47, pp. 1201-1209, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.107
- [24] P. Nath, P. K. Sarker, "Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 55, pp. 205-214, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.08.008
- [25] X. Ouyang, Y. Ma, Z. Liu, J. Liang, G. Ye, "Effect of the Sodium Silicate Modulus and Slag Content on Fresh and Hardened Properties of Alkali-Activated Fly Ash/Slag", *Minerals*, vol. 10, no. 1, pp. 15, 2020, doi: 10.3390/min10010015
- [26] W. Valencia, "Durabilidad corrosión de geoconcretos estructurales basados en ceniza volante", tesis de doctorado, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2019.
- [27] W. Valencia-Saavedra, R. Mejía de Gutiérrez, M. Gordillo, "Geopolymeric concretes based on fly ash with high unburned content", *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, pp. 697-706, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.071
- [28] M. N. Qureshi, S. Ghosh, "Effect of Silicate Content on the Properties of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Paste", *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 39, no. 8, pp. 5905-5916, 2014, doi: 10.1007/s13369-014-1172-x
- [29] S. H. Sanni, R. B. Khadiranaikar, "Performance of alkaline solutions on grades of geopolymer concrete", *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 366-371, 2013.
- [30] A. Sathonsaowaphak, P. Chindaprasirt, K. Pimraksa, "Workability and strength of lignite bottom ash geopolymer mortar", *J. Hazard. Mater.*, vol. 168, no. 1, pp. 44-50, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.01.120
- [31] A. Palomo, M. W. Grutzeck, M. T. Blanco, "Alkali-activated fly ashes: A cement for the future", *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323-1329, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00243-9
- [32] K. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Kajitvichyanukul, P. Chindaprasirt, "NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature", *Fuel*, vol. 90, no. 6, pp. 2118-2124, 2011, doi: 10.1016/j.fuel.2011.01.018
- [33] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. van Deventer, G. C. Lukey, "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers", *Chem. Eng. J.*, vol. 89, no. 1-3, pp. 63-73, 2002, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00025-6
- [34] X. Y. Zhuang *et al.*, "Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications", *J. Clean. Prod.*, vol. 125, pp. 253-267, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.03.019
- [35] M. Schmücker, K. J. D. MacKenzie, "Microstructure of sodium polysialate siloxo geopolymer", *Ceram. Int.*, vol. 31, no. 3, pp. 433-437, 2005, doi: 10.1016/j.ceramint.2004.06.006
- [36] J. Temuujin, A. van Riessen, "Effect of fly ash preliminary calcination on the properties of geopolymer", *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, no. 2-3, pp. 634-639, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.08.065

- [37] K. Komnitsas, D. Zaharaki, V. Perdikatsis, "Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags", *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 3073-3082, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0529-2
- [38] S. Kumar, R. Kumar, S. P. Mehrotra, "Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer", *J. Mater. Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 607-615, 2010, doi: 10.1007/s10853-009-3934-5
- [39] R. Firdous, T. Hirsch, D. Klimm, B. Lothenbach, D. Stephan, "Reaction of calcium carbonate minerals in sodium silicate solution and its role in alkali-activated systems", *Minerals Engineering*, vol. 165, 2021, doi: 10.1016/j.mineng.2021.106849
- [40] S. Pangdaeng, T. Phoo-ngernkham, V. Sata, P. Chindaprasirt, "Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive", *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 269-274, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2013.07.018
- [41] T. Phoo N, P. Chindaprasirt, V. Sata, T. Sinsiri, "High calcium fly ash geopolymer containing diatomite as additive", *IJEMS*, vol. 20, no. 4, pp. 310-318, 2013.
- [42] J. Temuujin, A. van Riessen, R. Williams, "Influence of calcium compounds on the mechanical properties of fly ash geopolymer pastes", *J. Hazard. Mater.*, vol. 167, no. 1-3, pp. 82-88, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.12.121
- [43] H. Xu, G. C. Lukey, J. S. J. van Deventer, "The Activation of Class C-, Class F-Fly Ash and Blast Furnace Slag Using Geopolymerisation", *Spec. Publ.*, vol. 221, pp. 797-820, 2004, doi: 10.14359/13292
- [44] C. K. Yip, G. C. Lukey, J. L. Provis, J. S. J. van Deventer, "Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation", *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 4, pp. 554-564, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.11.001
- [45] C. K. B. Yip, "The role of calcium in geopolymerisation", tesis doctoral, University of Melbourne, 2004.
- [46] P. S. Deb, P. Nath, P. K. Sarker, "The effects of ground granulated blast-furnace slag blending with fly ash and activator content on the workability and strength properties of geopolymer concrete cured at ambient temperature", *Mater. Des. 1980-2015*, vol. 62, pp. 32-39, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.05.001
- [47] A. Wardhono, D. Law, T. Molyneaux, "The mechanical properties of fly ash geopolymer in long term performance", en *CIC 2014*, 2014, pp. 1-10.
- [48] H. M. Giasuddin, J. G. Sanjayan, P. G. Ranjith, "Strength of geopolymer cured in saline water in ambient conditions", *Fuel*, vol. 107, pp. 34-39, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2013.01.035
- [49] R. M. Edmeades, P. C. Hewlett, P. C. Hewlett, *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. London: Arnold, 1998.
- [50] S. Bernal, M. Rodriguez, "Durabilidad y propiedades mecánicas de concretos de escoria siderurgica activada alcalinamente", tesis de grado, Universidad del Valle, 2004.
- [51] S. Izquierdo, "Durabilidad de cementos adicionados con un residuo del proceso de craqueo catalitico frente a diversos ambientes agresivos", tesis de grado, Universidad del Valle, 2015.
- [52] R. Mejía R, C. Rodríguez, E. Rodríguez, J. Torres, y S. Delvasto, "Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros", *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, vol. 48, pp. 55-64, 2009.
- [53] S. A. Bernal, R. M. de Gutiérrez, F. Ruiz, H. Quiñones, J. L. Provis, "High-temperature performance of mortars and concretes based on alkali-activated slag/metakaolin blends", *Mater. Constr.*, vol. 62, no. 308, pp. 471-488, 2012, doi: 10.3989/mc.2012.01712
- [54] S. A. Bernal, R. Mejía de Gutiérrez, J. L. Provis, "Engineering and durability properties of concretes based on alkali-activated granulated blast furnace slag/metakaolin blends", *Constr. Build. Mater.*, vol. 33, pp. 99-108, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.017
- [55] S. Al-Otaibi, "Durability of concrete incorporating GGBS activated by water-glass", *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 10, pp. 2059-2067, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.023
- [56] J. L. Provis, R. J. Myers, C. E. White, V. Rose, J. S. J. van Deventer, "X-ray microtomography shows pore structure and tortuosity in alkali-activated binders", *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 6, pp. 855-864, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.03.004

- [57] F. Pacheco T, J. Castro-Gomes, S. Jalali, "Investigations about the effect of aggregates on strength and microstructure of geopolymeric mine waste mud binders", *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 6, pp. 933-941, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.02.006
- [58] T. Bakharev, "Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1233-1246, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.09.002
- [59] Z. Baščarević, M. Komljenović, Z. Miladinović, V. Nikolić, N. Marjanović, R. Petrović, "Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers", *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 3, pp. 683-697, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0325-4
- [60] I. Ismail, S. A. Bernal, J. L. Provis, S. Hamdan, J. S. J. van Deventer, "Microstructural changes in alkali activated fly ash/slag geopolymers with sulfate exposure", *Mater. Struct.*, vol. 46, no. 3, pp. 361-373, 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9906-2
- [61] M. Komljenović, Z. Baščarević, N. Marjanović, V. Nikolić, "External sulfate attack on alkali-activated slag", *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 31-39, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.08.013
- [62] F. Puertas, M. Palacios, T. Vázquez, "Carbonation process of alkali-activated slag mortars", *J. Mater. Sci.*, vol. 41, no. 10, pp. 3071-3082, 2006, doi: 10.1007/s10853-005-1821-2
- [63] T. Bakharev, "Resistance of geopolymer materials to acid attack", *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 4, pp. 658-670, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.005
- [64] T. Bakharev, J. G. Sanjayan, Y.-B. Cheng, "Resistance of alkali-activated slag concrete to acid attack", *Cem. Concr. Res.*, vol. 33, no. 10, pp. 1607-1611, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00125-X
- [65] S. A. Bernal, E. D. Rodríguez, R. M. de Gutiérrez, J. L. Provis, "Performance of alkali-activated slag mortars exposed to acids", *J. Sustain. Cem.-Based Mater.*, vol. 1, no. 3, pp. 138-151, 2012, doi: 10.1080/21650373.2012.747235
- [66] V. Sata, A. Sathonsaowaphak, P. Chindaprasirt, "Resistance of lignite bottom ash geopolymer mortar to sulfate and sulfuric acid attack", *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 5, pp. 700-708, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.01.010
- [67] A. M. Rashad, "Potential use of phosphogypsum in alkali-activated fly ash under the effects of elevated temperatures and thermal shock cycles", *J. Clean. Prod.*, vol. 87, pp. 717-725, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.09.080
- [68] A. M. Rashad, "An investigation of high-volume fly ash concrete blended with slag subjected to elevated temperatures", *J. Clean. Prod.*, vol. 93, pp. 47-55, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.01.031
- [69] A. M. Rashad, D. M. Sadek, H. A. Hassan, "An investigation on blast-furnace slag as fine aggregate in alkali-activated slag mortars subjected to elevated temperatures", *J. Clean. Prod.*, vol. 112, no. 1, pp. 1086-1096, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.07.127