

Concreto autocompactante con altos contenidos de subproductos de la combustión de carbón

Self-compacting concrete with high content of coal combustion sub-products

Yimmy Fernando Silva Urrego^{1*}
William Gustavo Valencia Saavedra²
Silvio Delvasto Arjona³

¹ Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de los Materiales. M.Sc. en ingeniería. Universidad del Valle. Grupo Materiales Compuestos GMC. Cali, Colombia.

*Autor de correspondencia: E-mail: yimmy.silva@correounivalle.edu.co.

² Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de los Materiales. Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle. Grupo Materiales Compuestos GMC. Cali, Colombia.

³ Colombiano, Ph.D. Profesor Titular, Universidad del Valle. Grupo Materiales Compuestos GMC. Cali, Colombia.

Recibido: 07-06-2018 Aceptado: 24-08-2018

Resumen

El concreto autocompactante (CAC) se ha considerado como un gran logro en la tecnología del concreto debido a sus grandes ventajas como la auto-compactabilidad. Para tener esta propiedad el concreto fresco debe demostrar una alta fluidez, resistencia a la segregación y una buena cohesión. Con el propósito de evaluar estas propiedades, además de utilizar un subproducto de la combustión del carbón como la ceniza volante (CV) y la escoria de parrilla (E) se prepararon varias mezclas de concreto autocompactante reemplazando el cemento en un 35 % y 50 % de cada una de estas adiciones. A los cuales se les evaluaron sus propiedades, tanto en estado fresco como en endurecido, las propiedades en estado fresco fueron evaluadas mediante el flujo de asentamiento, el embudo en V y la caja en L, en estado endurecido se evaluaron propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión) y de permeabilidad (succión capilar, absorción y porosidad y resistencia a cloruros). Todos los CAC mostraron buenas propiedades en estado fresco y desarrollaron a los 28 días de curado resistencias a la compresión en un rango de 34 y 48 MPa. Los resultados muestran que el empleo de subproductos de la combustión del carbón pueden ser incorporados en la elaboración de CAC.

Palabras clave: Concreto autocompactante; ceniza volante; escoria; auto-compactabilidad; propiedades en estado fresco.

Abstract

The self-compacting concrete (SCC) has been considered a great achievement in concrete technology due to its great advantages like self-compactability. In order to have self-compactability fresh concrete should demonstrate high fluidity, segregation resistance and good cohesion. With the purpose of evaluating these properties, besides using a byproduct of coal combustion fly ash (CV) and grilled slag (E), also several self-compacting concrete mixes were prepared by replacing the cement in 35 % and 50 % in each one of these additions. Their properties were evaluated in fresh and hardened state. The fresh properties were evaluated using the slump flow, V-funnel and box in L. While in hardened state mechanical properties

Cómo citar: Silva Urrego, Y.F., Valencia Saavedra, W.G., y Delvasto Arjona, S. (2018). Concreto autocompactante con altos contenidos de subproductos de la combustión de carbón. *Informador Técnico*, 82(2), 147-159. doi: <https://doi.org/10.23850/22565035.1485>

were evaluated (compressive strength, indirect tensile and flexural) and permeability (capillary suction, absorption, porosity and chlorides resistance). All SCC showed good properties in fresh state and developed after 28 days curing, compressive resistance in the range of 34 and 48 MPa. The results show that the use of coal combustion sub-products can be incorporated in the production of SCC.

Keywords: Self-compacting concrete; fly ash; slag; self-compactability; fresh properties.

Introducción

El concreto autocompactante (CAC) es considerado un concreto que puede ser colocado y compactado por la acción de su propio peso con poco o ningún esfuerzo de vibración, y que al mismo tiempo presenta cohesividad suficiente para ser manipulado sin mostrar segregación. Este material compuesto se utiliza para facilitar y asegurar un llenado adecuado y un buen rendimiento en estructuras que presenten zonas altamente reforzadas y restringidas (Ryan y O'Connor, 2016; Karakurt, Çelik, Yilmazer, Kiriçi, y Özyasar, 2018). El CAC fue desarrollado en Japón a finales de 1980, para ser utilizado principalmente en estructuras reforzadas altamente congestionadas en regiones sísmicas (Bouzoubaâ y Lachemi, 2001; Okamura y Ouchi, 2003; Siddique, Aggarwal, y Aggarwal, 2012; Vakhshouri y Nejadi, 2018). Recientemente este concreto ha ganado un amplio uso en muchos países para diferentes aplicaciones y configuraciones estructurales, además que proporciona una manera amigable con el medio ambiente y seguro de producir concreto sin comprometer su calidad, debido al alto empleo de subproductos industriales o agroindustriales en su fabricación, además de eliminar el empleo de equipos vibradores para su colocación (Ganjian *et al.*, 2009; Topçu y Bilir, 2009; El-Gammal, Abdel-Gawad, El-Sherbini, y Shalaby, 2010; Uygunoglu y Topçu, 2010; Rahman, Usman, y Al-Ghalib, 2012; Nguyen, Chang, Shih, y Djayaprabha, 2018).

El CAC es un tipo especial de concreto donde se requiere un alto asentamiento que puede lograrse fácilmente mediante la adición de superplastificante a la mezcla de concreto. Los CAC a menudo contienen una alta cantidad de material fino que se requiere para mantener un bajo esfuerzo de fluencia para proporcionar una fluidez adecuada o una viscosidad lo suficientemente alta para evitar segregación en la mezcla (Siddique *et al.*, 2012). El uso de una gran cantidad de cemento aumenta el costo y resulta en un aumento de la temperatura, la incorporación de aditivos minerales, tales como polvo de piedra caliza, ceniza volante, ceniza de fondo, escoria de alto horno, etc. podrían aumentar el asentamiento sin incrementar los costos (Sonebi, 2004; Mohamed, 2011).

Diversas investigaciones se han realizado sobre el comportamiento de CAC con varios tipos de materiales puzolanicos como reemplazo parcial de cemento en órdenes que pueden ir desde el 5 % a 40 % dependiendo del tipo de material cementicio suplementario (Khatib, 2008; Uysal y Sumer, 2011; Uysal, y Yilmaz, 2011; Valcuende *et al.*, 2012; Omrane, Kenai, Kadri, y Ait-Mokhtar, 2017). La adición de la ceniza volante y la escoria de la combustión del carbón, tienen en el cemento Portland varios efectos en las propiedades de concreto, tanto en estado fresco como endurecido. Mejora la manejabilidad de la mezcla en estado fresco por su gran aporte de partículas finas, además de la estabilidad (Bouzoubaâ y Lachemi, 2001; Khatib, 2008; Liu, 2010), así como un incremento de la densidad en la pasta de la matriz y la zona de transición interfacial en el concreto endurecido, aunque a edades tempranas muestra valores de resistencia a la compresión bajas debido a las reacciones puzolanicas lentas entre el cemento y la ceniza volante (Felekoğlu, Tosun, Baradan, Altun, y Uyulgan, 2006). Por otra parte, la adición de ceniza volante o escoria contribuye a un beneficio económico ya que son subproductos de las industrias que actualmente no tienen ninguna comercialización, además de un beneficio ecológico debido a la reducción del consumo de cemento en la elaboración de concretos.

El objetivo de este estudio está dirigido a investigar el efecto de la ceniza volante y escoria como adiciones minerales en las propiedades en estado fresco y endurecido del CAC.

Metodología experimental

Material

Para el presente estudio se utilizó Cemento Portland tipo I de acuerdo con la norma ASTM C150. Como adición se implementó ceniza volante y escoria subproducto de la combustión de carbón en diferentes proporciones (35 % y 50 %) como remplazo en peso del Cemento Portland. Las características químicas y físicas del cemento, la ceniza volante y la escoria se realizaron mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y granulometría laser, los resultados se presentan en la Tabla 1. Como superplastificante se utilizó una mezcla líquida a base de policarboxilatos, de marca comercial ViscoCrete -20HE. El agregado grueso triturado tenía un tamaño máximo de 19 mm con el fin de evitar el bloque en la caja en L, y como agregado fino se empleó arena natural de río, los agregados tenían un peso específico de 2760 kg/m³ y 2680 kg/m³ respectivamente.

Tabla 1. Características del Cemento Portland, ceniza volante y escoria

Composición química	Cemento	Ceniza volante	Escoria
Sílice (SiO ₂)	21,57	33,85	51,31
Alúmina (Al ₂ O ₃)	4,19	24,72	29,3
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	4,22	6,34	7,5
Óxido de Calcio (CaO)	58,29	6,92	6,54
Óxido de Magnesio (MgO)	1,67	2,25	1,18
perdida al fuego (PF) (% _{peso})	9,01	21,42	4,85
Gravedad específica	3,05	1,53	1,72
Tamaño de partícula promedio (mμ)	20,67	23,93	19,57

Fuente: Los autores

Proporciones de mezclas

En el presente estudio, cinco mezclas fueron diseñadas, una de control y cuatro mezclas con adición mineral (dos con ceniza volante y dos con escoria) para examinar y cuantificar la influencia en las propiedades de CAC. La Tabla 2 presenta el diseño de las distintas mezclas de CAC. En las mezclas, el cemento fue remplazado por CV y E en el mismo contenido de 35 % y 50 % en masa. Después de algunos ensayos previos, el contenido total de finos se fijó en 550 kg/m³. Las proporciones de los agregados y la granulometría se mantuvieron constantes para todas las mezclas.

Tabla 2. Detalles de las mezclas de concretos autocompactantes.

Mezcla	Patrón	CAC E 35%	CAC E 50%	CAC FA 35%	CAC FA 50%
Material	(kg/m ³)				
Cemento	550	357,5	275	357,5	275
Grava	800	800	800	800	800
Arena	871	871	871	871	871
Agua	198	198	198	209	209
Aditivo	6,6	5,8	5,5	6,0	5,8
a/c	0,36	0,36	0,36	0,38	0,39
Ceniza volante	-	-	-	192,5	275
Escoria	-	192,5	275	-	-

Fuente: Los autores

Prueba del concreto fresco

La secuencia de mezcla consistió en homogeneizar la arena y la grava en primera instancia, posterior a ello, se adicionó el subproducto de la combustión del carbón (ceniza volante o escoria) con el cemento, y parte del agua de mezcla. Por último se incorporó el agua restante con el superplastificante. Esto se realizó en una mezcladora tipo trompo para concreto. El tiempo de mezcla inicial es más crítica para los aditivos basados en policarboxilato, debido a su mecanismo de dispersión. El tiempo de mezcla fue el mismo para todos los CAC.

Parte de la mezcla se utilizó para las pruebas del concreto fresco. La otra parte para realizar las probetas sin ningún tipo de vibración, para determinar las propiedades mecánicas. El desmolde se realizó entre 22 y 24 h después de la colada. No hubo problemas para ninguno de los CAC. Las muestras fueron curadas en agua hasta el día de la prueba.

Para determinar las propiedades de auto-compactabilidad se realizaron pruebas en estado fresco como el flujo de asentamiento, caja en L y embudo V. Todas las mediciones de los ensayos se realizaron por duplicado y se dio el promedio de las mediciones. Las pruebas se cumplieron siguiendo las recomendaciones de la EFNARC (*European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*) (EFNARC, 2002).

Pruebas del concreto endurecido

La resistencia a la compresión fue obtenida de cilindros de 7,62 cm de diámetro y 15,2 cm de altura. Este ensayo se realizó bajo la norma ASTM C39. Las muestras fueron curadas a aproximadamente a 23°C hasta que se llevaron a cabo las pruebas a edades de 3, 7, 14, 28, 90 y 180 días. Tres muestras por cada edad fueron probadas y se informó el valor promedio. La resistencia a la tracción indirecta se determinó a 7, 28, 90 y 180 días de curado en cilindros de 7,62 cm de diámetro y 15,2 cm de altura, siguiendo la norma ASTM C496. La resistencia a la flexión a tres puntos se realizó en probetas prismáticas (vigas) de 7,62 cm de ancho por 7,62 cm de alto por 30,5 cm de largo a 7, 28 y 90 días de curado siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C293.

Pruebas de resistencia a la penetración

Los ensayos de permeabilidad al agua, como la absorción y la succión capilar se realizaron conforme a la ASTM C 642 y SIA 162/1 respectivamente. El ensayo de succión capilar permite calcular parámetros tales como la resistencia a la penetración de agua m (s/m^2), el coeficiente de absorción capilar K ($kg/m^2 \cdot s^{1/2}$) y porosidad efectiva (ϵ_0). También se realizó el ensayo de resistencia a la penetración de ion cloruro en el equipo *Rapid Chloride permeability test*, de German Instruments, bajo la ASTM C1202, cada ensayo se hizo por duplicado para todas las mezclas.

Resultados y discusiones

En este estudio se investigaron algunas características de las adiciones (CV y E), las propiedades en estado fresco y endurecido de los CACs utilizando estos subproductos de la combustión del carbón. La capacidad de los CAC para la auto-compactación es en general el tema principal de este estudio, de acuerdo con los criterios especificados por la EFNARC. En el presente estudio tales propiedades se evaluaron sobre la base de pruebas en estado fresco del concreto.

Caracterización de las adiciones

La caracterización mineralógica de la ceniza volante y la escoria se llevó a cabo por medio de Difracción de Rayos-X. Fue realizado en un difractómetro PANalytical, modelo X'PertPRO filtro de Nickel, usando la señal $K\alpha_1$ del Co. Se usó un paso de 2° /min dentro de un rango de 5° - 104° . En la Figura 1 se aprecia el difractograma para la ceniza volante y la escoria, respectivamente. Se puede observar que la ceniza volante no es totalmente amorfa (vítreo), presenta fases cristalinas en menor cantidad como Cuarzo, Mullita y Calcita. El difractograma evidencia un pico de mayor intensidad identificado con

un ángulo característico $2\theta=31,02^\circ$ que indica que la ceniza volante tiene una gran cantidad de Cuarzo (SiO_2). Además, se observan varios picos característicos de la Mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) con baja intensidad, lo que indica que esta fase se encuentra en una menor proporción.

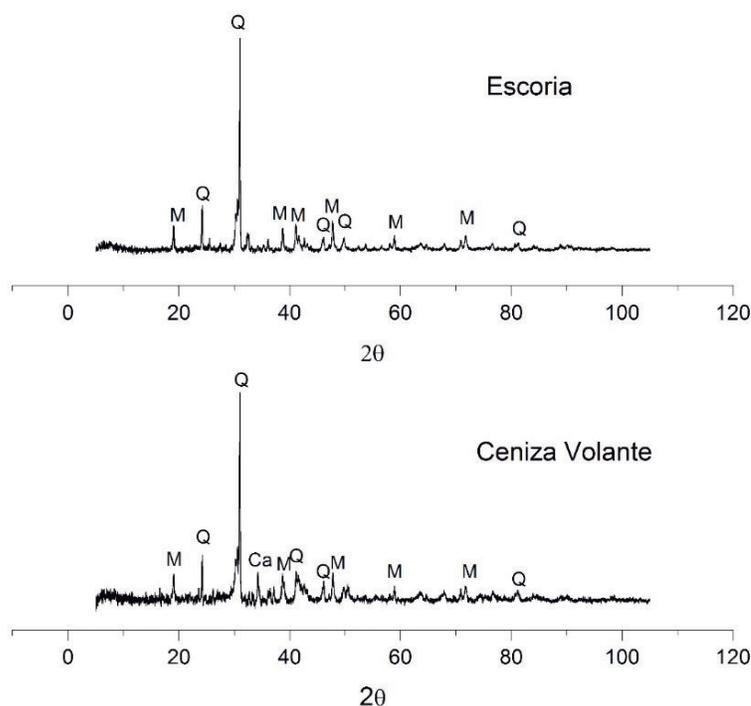


Figura 1. Patrón de difracción de rayos X de la ceniza volante y la escoria
Fuente: Los autores

La Escoria también presenta fases cristalinas como Cuarzo (SiO_2), Mullita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) y Magnetita (Fe_3O_4), lo cual afecta su reacción. Al igual que la Ceniza Volante se evidencia un pico de mayor intensidad correspondiente a un ángulo $2\theta=31,03^\circ$ característico del Cuarzo.

La caracterización morfológica de la ceniza volante y la escoria se realizó mediante la técnica de SEM como se muestran en las Figuras 2 y 3, respectivamente. Las micrografías revelan que la ceniza volante consiste de partículas esféricas de diferente tamaño identificadas como cenoesferas, además de contener partículas irregulares y negras porosas que son atribuidas al carbón no quemado (Kutchko y Kim, 2006; Medina *et al.*, 2010).. En la escoria se observan partículas irregulares con diferentes tamaños, esto se le atribuye al carbón del cual procede. Además también se aprecia que estas partículas son más compactas que las partículas de la ceniza volante y no se observa aglomeración de partículas.

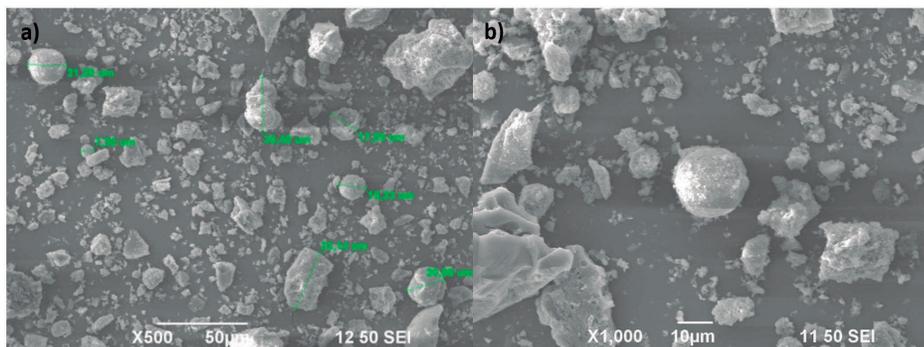


Figura 2. Morfología de la ceniza volante tomada a diferentes aumentos. a) x500 y b) x1000
Fuente: Los autores

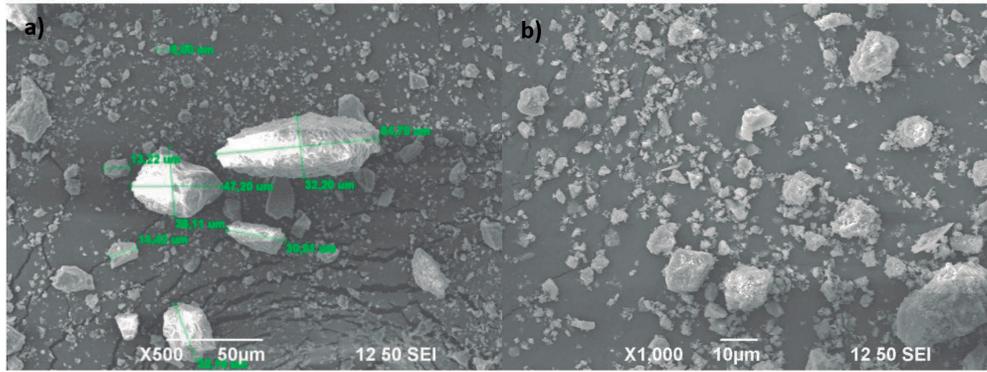


Figura 3. Morfología de la escoria tomada a diferentes aumentos. a) x500 y b) x1000
Fuente: Los autores

El índice de actividad de resistencia IAR se calculó empleando la norma ASTM C311; este se realizó mediante la relación de la resistencia a la compresión de morteros con relación 1:2,75 de cemento: arena. Se reemplazó de 20 % de cemento en masa del cemento por la adición y la resistencia a la compresión de un mortero de control (100 % cemento Portland como material cementante). De acuerdo con la Tabla 3 las adiciones tienen actividades favorables, ya que el IAR supera lo establecido por la norma (75 %).

Tabla 3. Resultados índice de actividad de resistencia (IAR) a los 28 días de curado.

Muestra	% Adición	Resistencia a la Compresión (MPa)	IAR (%)
Mortero patrón	0	25,5	-
Mortero adicionado con ceniza volante	20	32,9	129
Mortero adicionado con escoria	20	33,6	131

Fuente: Los autores

Resultados de los CAC en estado fresco

Los valores de las pruebas en estado fresco de las mezclas de los CACs se presentan en la Tabla 4. El ensayo de flujo de asentamiento se realizó mediante el cono de Abrams, el cual permite cuantificar la capacidad que tiene el concreto para deformarse bajo la acción de su propio peso contra la fricción de la superficie sin una restricción presente (Felekoğlu, Türkel, y Baradan, 2007). Todas las mezclas mostraron una buena trabajabilidad con valores de flujo de asentamiento entre 670 mm y 690 mm. La prueba de caja en L caracteriza la capacidad de paso y relleno de los CACs. En general, cuando la relación de bloqueo de la caja en L es inferior a 0,8 existe un riesgo de que haya bloqueo (H2/H1), esta debe de estar entre 0,8 y 1,0. Todas las mezclas de CAC están dentro de este rango. El embudo en V evalúa la capacidad de relleno y la viscosidad de los CAC; los tiempos en esta prueba fueron aceptables para algunas mezclas de CAC como son las adicionadas con ceniza volante y 50 % de escoria ya que su valor fue inferior a 12 s, como lo especificado por la EFNARC, sin embargo todas las mezclas de concreto autocompactante llenaron los moldes completamente por la acción de su propio peso sin necesidad de vibrado. Con estas pruebas se validaron las características en estado fresco de los CAC.

Tabla 4. Ensayos en estado fresco de los CAC

	Cono de Abrams Spread (mm)	Caja en L H2/H1	Embudo en V Tiempo (seg)
Patrón	670	0,82	18
CAC 35% E	690	0,85	13,5
CAC 50% E	685	0,83	11,2
CAC 35% CV	687	0,88	11,1
CAC 50% CV	689	0,96	10,8

Fuente: Los autores

Resultados de los CAC endurecido

Las propiedades en estado endurecido fueron obtenidas mediante ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, flexión, absorción y porosidad, succión capilar y resistencia al ion cloruro.

Resistencia a la compresión

En la Figura 4 se presenta la resistencia a la compresión a diferentes edades de curado. Cuando se compara la mezcla de CAC de referencia (Patrón) con el CAC con escoria se observa un mejor comportamiento a todas las edades. Los CACs con escoria a los 28 días de curado superan en más del 40 % la resistencia a la compresión planteada en el diseño (35 MPa), mientras que el CAC 50 % CV se aproxima a ella, esto se atribuye a que es el CAC que tiene una mayor relación agua/finos, y que las reacciones puzolánicas para la adición de CV se dan a edades prolongadas (Wongkeo, Thongsanitgarn, y Chaipanich, 2012; Lorca, Calabuig, Benlloch, Soriano, y Payá, 2014; Yu, Ni, Tang y Shen, 2018). El buen comportamiento presentado por los CAC con escoria se puede atribuir a que las partículas de escoria eran más finas que las del cemento lo cual conlleva a tener una mayor facilidad de ocupar o llenar espacios disponibles mejorando la distribución de partículas del cemento y, consecuentemente, mejoran la compactación de la pasta logrando una mejor resistencia del concreto a partir de una mejor ocupación de espacios, además que el reemplazo del cemento por los subproductos de la combustión del carbón se realizó en peso, los cuales tienen una densidad menor, lo que supone un mayor volumen de pasta. A edades largas, como los 180 días de curado, se sigue conservando la misma tendencia logrando resistencia a la compresión de las mezclas en un rango de 50 MPa a 65,8 MPa.

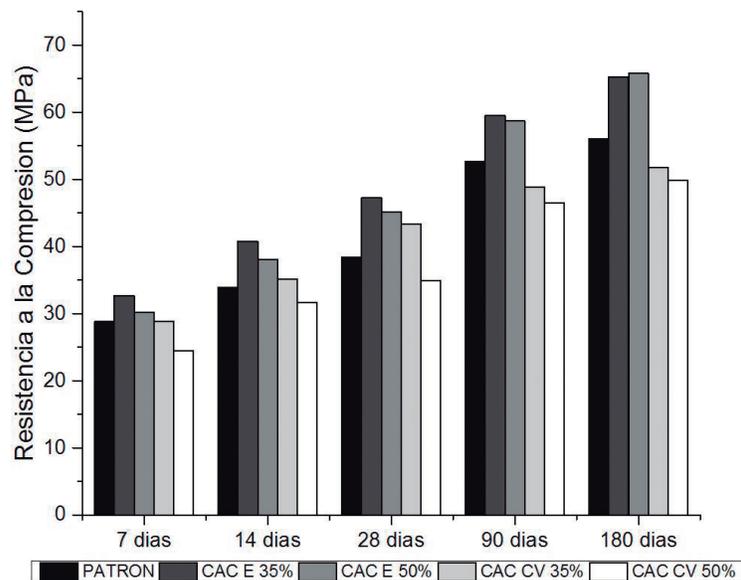


Figura 4. Resistencia a la compresión de los CACs.
Fuente: Los autores

Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta se define en el punto donde la falla es debida a la carga de compresión, induciendo un esfuerzo de tracción puro a lo largo del diámetro de la probeta (Chhorn, Hong, y Lee, 2018). Esta resistencia depende de múltiples factores como por ejemplo, el tipo de agregado, la distribución de tamaño de partícula, los días de curado del concreto y el contenido de aire (Neville y Brooks, 1988). Para hacer claro este aspecto, la Tabla 5 muestra la resistencia a la tracción indirecta a los 7, 28, 90 y 180 días de curado. En general los resultados muestran que las resistencias más altas las presentan los CACs con escoria. Los CAC con ceniza volante presentaron una disminución de la resistencia a la tracción indirecta comparado con el concreto patrón a las diferentes edades de curado. La resistencia de los CACs adicionados con ceniza volante oscila entre el 64 % y 83 % de la resistencia de la mezcla patrón a los 7 días de curado.

Tabla 5. Resistencia a la tracción indirecta a diferentes días de curado

Días de Curado	Resistencia a la Tracción Indirecta (MPa)			
	7	28	90	180
Patrón	3,07	3,27	3,30	4,13
CAC 35% E	3,20	3,57	4,03	4,70
CAC 50% E	2,74	3,00	3,98	5,40
CAC 35% CV	2,56	3,70	3,89	4,05
CAC 50% CV	1,98	3,14	3,24	3,90

Fuente: Los autores

Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión se midió aplicando una carga a flexión en la mitad de la longitud de una viga de concreto estándar, soportada por dos apoyos. Como se observa en la Tabla 6, a los 7 y 28 días de curado el CAC E 35 % presentó la mayor resistencia a la flexión. A los 90 días de curado el CAC con 35 % de escoria tiene una resistencia 10 % superior a la del concreto Patrón, además se puede observar que a esta edad incluso el CAC con 50 % de escoria alcanzó valores de resistencia a la flexión superiores a la mezcla Patrón en un 20 %. Cabe destacar que este comportamiento no se presenta en las mezclas que contienen ceniza volante (35 % y 50 %), donde se obtienen valores de resistencia del 88 % y 87 % en relación con la mezcla patrón. Este mismo comportamiento se observó en la resistencia a la compresión cuando se incorpora esta cantidad de adición.

Tabla 6. Resistencia a la flexión a diferentes días de curado

Mezcla	Carga Máxima promedio (N)	Módulo de ruptura promedio (MPa)	Carga Máxima promedio (N)	Módulo de ruptura promedio (MPa)	Carga Máxima promedio (N)	Módulo de ruptura promedio (MPa)
	7 Días de curado		28 Días de curado		90 Días de curado	
Patrón	6200,5	5,45	7866,5	6,91	8587	7,55
CAC E 35%	7047,5	6,19	7885	6,93	9506	8,35
CAC E 50%	5744	5,05	6938,5	6,10	10340	9,09
CAC CV 35%	5056,5	4,44	7675	6,74	7588,5	6,67
CAC CV 50%	4890,5	4,30	6458,5	5,68	7530	6,62

Fuente: Los autores

Porosidad y succión capilar

En la Tabla 7 se presentan los resultados del ensayo de porosidad y absorción realizados de acuerdo con la ASTM C 642, los cuales indican un aumento en la cantidad total de poros en los CACs adicionados con ceniza volante (CV), esto se atribuye a que estos CACs tenían una mayor relación agua/finos. Pequeños cambios en este parámetro pueden significar apreciables diferencias en la porosidad, además del efecto dilución del cemento (Wongkeo, Thongsanitgarn, Ngamjarurojana, y Chaipanich, 2014). El CAC con 35 % de remplazo de escoria presentó una mayor porosidad que el CAC con 50 % de escoria, esto puede ser atribuido a que la sustitución del cemento se realizó en peso y la escoria al tener una densidad mucho menor, se adicionó un mayor volumen de este material. A diferencia los CACs que contienen ceniza volante, donde el de mayor reemplazo tiene una mayor porosidad debido principalmente a su mayor relación agua /finos.

Tabla 7. Resultados de ensayos de permeabilidad

	CAC	PATRON	E 35%	E 50%	CV 35%	CV 50%
	K (kg/m ² seg ^{1/2})	0,0039	0,0053	0,0052	0,0042	0,0061
Succión capilar	m (10 ⁷ s/m ²)	2,90	6,5	6,67	9,09	7,75
	Porosidad efectiva ϵ_0 (%)	0,036	0,039	0,042	0,039	0,053
Porosidad y absorción	Porosidad total (%)	10,9	10,25	10,1	10,8	13,35

Fuente: Los autores

El ensayo de succión capilar se llevó a cabo utilizando la norma SIA 162/1. La porosidad efectiva (ϵ_0) es menor para el CAC patrón y los CAC con escoria. Los CAC con ceniza volante presentan los valores más altos de coeficiente de resistencia a la penetración de agua (m) y menor coeficiente de absorción capilar (K). Este comportamiento es atribuido a los productos de reacción puzolánica que fueron capaces de obstruir las conexiones entre los poros capilares, aumentando la resistencia a la penetración del agua.

Resistencia a la penetración del ion cloruro

La Tabla 8 presenta los resultados de la permeabilidad a cloruros y resistividad de los CAC. En general se destaca el desempeño de los CAC adicionados, con una reducción de hasta un 79 % en la permeabilidad a cloruros, comparado con lo mostrado por el CAC patrón. Los resultados del ensayo ASTM C1202 permiten clasificar los CAC adicionados con ceniza volante (CV) como materiales de muy baja permeabilidad, los CAC con adición de la escoria (E) alcanzan a tener una permeabilidad baja y los CAC sin adición como de alta permeabilidad. De igual manera, la medida de la resistividad de los CAC adicionados, es significativamente mayor que la del CAC sin adición. Este comportamiento de los CAC adicionados se atribuye a las propiedades puzolánicas que presentaban los materiales (CV y E), las cuales han sido reveladas con los ensayos mostrados previamente. El mejor comportamiento de los concretos adicionados con ceniza volante se puede atribuir a la disminución en el tamaño de los poros y la reducción de las microfisuras en la zona de transición, lo cual se debe al hecho de que las partículas esféricas de la ceniza volante mejoran la densidad en la matriz y en la zona de interfaz entre los agregados y la pasta (Nehdi, Pardhan, y Koshowski, 2004; Patel, Hossain, Shehata, y Bouzoubaa, 2004; Siddique, 2011). Para la CAC con adición de escoria la reducción de la permeabilidad a cloruros se debe a la mejora en la estructura de los poros (reducción de tamaño de poro), por reacciones puzolánicas (Kasemchaisiri y Tangtermsirikul, 2008). Adicionalmente puede atribuirse este buen comportamiento a la capacidad de enlaces de la CV y E con el ion cloruro para formar la sal de Friedel.

Tabla 8. Resultados de permeabilidad a cloruros y resistividad

Ensayo	CAC				
	Patrón	E 35%	E 50%	CV 35%	CV 50%
Permeabilidad a cloruros Carga (Culombios)	3425	1395	906	989	715
Resistividad (Ω .m)	59,81	146,87	231,03	182,10	233,83

Fuente: Los autores

Conclusiones

La presente investigación ha demostrado que es posible diseñar un CAC incorporando varios porcentajes de ceniza volante (CV) y escoria (E). Las propiedades en estado fresco de los concretos autocompatantes que contienen ceniza volante y escoria estaban en los rangos recomendados por la EFNARC, reflejándose en una adecuada fluidez, excelente capacidad de paso, buena capacidad de relleno y apropiada resistencia a la segregación.

Los concretos autocompactantes con ceniza volante necesitaron una mayor relación agua/cementante debido a que esta adición presentó un alto contenido de inquemados, el cual es un material poroso que demanda una mayor cantidad de agua para tener una adecuada fluidez.

Las mezclas con escoria mostraron un buen comportamiento en los ensayos mecánicos a las diferentes edades de curado (7, 14, 28, 90 y 180 días). En la resistencia a la compresión, los CAC con 35 % y 50 % de escoria logran aumentar las resistencias en un 17 % y 35 % respectivamente a los 28 días de curado, lo cual se debe a sus propiedades puzolánicas. Para CAC con ceniza volante el comportamiento mecánico no es tan satisfactorio a edades tempranas, en comparación con los CAC con escoria. Esto se atribuye a que es el CAC que tiene la mayor relación agua/finos, lo cual posee influencia en su desempeño en estado endurecido.

Los CAC con las adiciones mostraron una mayor resistencia al paso de cloruros, en comparación con el CAC patrón, resaltando el mejor desempeño los CACs adicionados con ceniza volante, este comportamiento se atribuye a las características físicas y químicas del material, mediante una mayor densificación en la matriz y en la zona de interfaz. Este comportamiento se corrobora con lo obtenido en succión capilar donde se resalta el buen comportamiento de los CACs adicionados, destacando el CAC adicionado con ceniza volante.

Agradecimientos

Los autores hacen reconocimiento del apoyo brindado por Colciencias para hacer posible esta investigación, por medio del programa de Jóvenes Investigadores. Igualmente, al Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM) por el apoyo logístico, al Grupo de Investigación Materiales Compuestos (GMC) y a la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle.

Referencias

- ASTM International. (2012). *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C39 / C39M). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2015). *Standard Specification for Portland Cement* (ASTM C150/150M), West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2010). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)* (ASTM C293/C293M) West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2011). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. (ASTM C311). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2011). *Standard test method for split tensile strength of cylindrical concrete specimens* (ASTM C496/C496M). West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2013) *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete* (ASTM C642). West Conshohocken, PA.
- ASTM International.(2012) *Test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration* (ASTM C1202). West Conshohocken, PA.
- Bouzoubaâ, N., y Lachemi, M. (2001). Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: Preliminary results. *Cement and Concrete Research*. 31(3) 413-420. doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00504-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00504-4)

- Chhorn, C., Hong, S.J., y Lee, S.H. (2018). Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. *Journal of traffic and transportation engineering*, 5(3), 215-223. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.09.002>
- EFNARC (2002). EFNARC, *Specifications and guidelines for self-compacting concrete*. In: European federation for specialist construction chemicals & concrete systems, 2002. Recuperado de: <http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCC.PDF>
- El-Gammal, A., Abdel-Gawad, A.K., El-Sherbini, Y., y Shalaby, A. (2010). Compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* (1), 1, 96-99.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., Baradan, B., Altun, A., y Uyulgan, B. (2006). The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self-compacting repair mortars. *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1719-1726. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.04.002>
- Felekoğlu, B., Türkel, S., y Baradan, B. (2007). Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. *Building and Environment*, 42(4), 1795-1802. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.01.012>
- Ganjian, E., Khorami, M., y Maghsoudi, A.A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5): 1828-1836. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>
- Karakurt, C., Çelik, A. O., Yilmazer, C., Kiriççi, V., y Özyasar, E. (2018). CFD simulations of self-compacting concrete with discrete phase modeling. *Construction and Building Materials*, 186, 20-30. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.106>
- Kasemchaisiri, R., y Tangtermsirikul, S. (2008). Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate. *Science Asia* 34, 087-095. doi: <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2008.34.087>
- Khatib, J.M. (2008). Performance of self-compacting concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials*, 22(9), 1963-1971. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.011>
- Kutchko, B.G., y Kim, A.G. (2006). Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*, 85(17-18), 2537-2544. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.05.016>
- Liu, M. (2010). Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1245-1252. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.012>
- Lorca, P., Calabuig, R., Benlloch, J., Soriano, L., y Payá, J. (2014). Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. *Materials & Design*, 64, 535-541. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.022>
- Medina, A., Gamero, P., Querol, X., Moreno, N., De León, B., Almanza, M., Vargas, G., Izquierdo, M., Font, O. (2010). Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization. *Journal of Hazardous Materials*, 181 (1-3): 82-90. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.096>
- Mohamed, H.A. (2011). Effect of fly ash and silica fume on compressive strength of self-compacting concrete under different curing conditions. *Ain Shams Engineering Journal*, 2(2), 79-86. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2011.06.001>

- Nehdi, M., Pardhan, M., y Koshowski, S. (2004). Durability of self-consolidating concrete incorporating high-volume replacement composite cements. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 2103-2112. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.018>
- Neville, A.M., y Brooks, J.J. (1988). *Concrete Technology*. Harlow, Essex: Pearson Educaiton.
- Nguyen, H-A., Chang, P-A., Shih, J-Y., y Djayaprabha, H.S. (2018). Enhancement of low-cement self-compacting concrete with dolomite powder. *Construction and Building Materials*, 161, 539-546. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.148>
- Okamura, H., y Ouchi, M., (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 1(1), 5-15. doi: <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E-H., y Ait-Mokhtar, A. (2017). Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*. 165, 415-430. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139>
- Patel, R., Hossain, K. M. A., Shehata, M., y Bouzoubaa, N. (2004). Development of Statistical Models for Mixture Design of High-Volume Fly Ash Self-Consolidating Concrete. *Materials Journal*, 101(4): 294-302. doi: <https://doi.org/10.14359/13363>
- Rahman, M.M., Usman, M., y Al-Ghalib, A.A. (2012). Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC). *Construction and Building Materials*, 36, 630-637. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.116>
- Ryan, P.C., y O'Connor, A. (2016). Comparing the durability of self-compacting concretes and conventionally vibrated concretes in chloride rich environments. *Construction and Building materials*, 120, 504-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.089>
- Siddique, R. (2011). Properties of self-compacting concrete containing class F fly ash. *Materials & Design*. 32(3), 1501-1507. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.043>
- Siddique, R., Aggarwal, P., Aggarwal, Y. (2012). Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*. 29, 73-81. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035>
- Sonebi, M. (2004). Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1199-1208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.12.022>
- Swiss Society of engineers and architects (SIA). (1989). *Norma de ensayo Swiss Standard - SIA 162/1 - Succión Capilar*. SIA.
- Topçu, İ.B., y Bilir, T. (2009). Experimental investigation of some fresh and hardened properties of rubberized self-compacting concrete. *Materials y Design*, 30(8), 3056-3065. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.011>
- Uygunoglu, T., y Topçu, I.B.(2010). The role of scrap rubber particles on the drying shrinkage and mechanical properties of self-consolidating mortars. *Construction and Building. Materials*, 24 (7),1141-1150. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.027>
- Uysal, M., y Sumer, M. (2011). Performance of self-compacting concrete containing different mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 25(11), 4112-4120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032>

- Uysal, M., y Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), 771-776. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.005>
- Vakhshouri, B., y Nejadi, S. (2018). Prediction of compressive strength of self-compacting concrete by ANFIS models. *Neurocomputing*, 280, 13-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.09.099>
- Valcuende, M., Parra, C., Marco, E., Garrido, A., Martínez, E., y Cánoves, J., (2012). Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 122-128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.029>
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., y Chaipanich, A. (2012). Compressive strength and drying shrinkage of fly ash-bottom ash-silica fume multi-blended cement mortars. *Materials y Design (1980-2015)*, 36, 655-662. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.11.043>
- Wongkeo, W., Thongsanitgarn, P., Ngamjarurojana, A., y Chaipanich, A. (2014). Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume. *Materials & Design*, 64, 261 - 269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.042>
- Yu, Z., Ni, C., Tang M., y Shen, X., (2018). Relationship between water permeability and pore structure of Portland cement paste blended with fly ash. *Construction and building materials*. 175, 458-466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.147>