

Obtención de un concreto autocompactante empleando adiciones de escoria de carbón finamente molida

Obtaining a self-compacting concrete with finely ground coal slag

Rafael A. Robayo*
 Pedro E. Matthey**
 Yimmy F. Silva***
 Silvio Delvasto****

Universidad del Valle (Colombia)

* Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC). Cali, Colombia. rafael.robayo@correounivalle.edu.co

** Ingeniero Metalúrgico, MSc., Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC). Cali, Colombia. pedromatthey@gmail.com

*** Ingeniero de Materiales. Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC). Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co

**** Ingeniero Químico, MSc., Ph.D., Profesor Titular de la Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, grupo de investigación Materiales Compuestos (GMC). Cali, Colombia. silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

Correspondencia: Silvio Delvasto, Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería de Materiales, Calle 13 # 100-00, Edificio 349-2° piso, teléfono (2) 321 2270/ 321 2436, Cali, Colombia. e-mail: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

Origen de subvenciones: Esta investigación forma parte del proyecto de investigación VRI C.I. 747 "Reciclar Escombros en Concreto" financiado por la Universidad del Valle en la convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones y del plan de investigación p-2012-0807 del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda" de Colciencias, convocatoria 566 de 2012.

Resumen

Este artículo presenta las características en estado fresco y endurecido de mezclas de concreto modificadas con la adición del 10%, 20%, 30% y 50% de escoria de parrilla de carbón finamente molida como sustitución parcial del cemento. Con el propósito de verificar la autocompactabilidad de estas mezclas se les evaluó el cumplimiento de los valores considerados óptimos de la capacidad de paso, la capacidad de relleno y del asentamiento. En su estado fresco, los concretos adicionados con escoria de carbón presentaron un buen nivel de manejabilidad y alta cohesividad entre sus componentes, con cualidades óptimas para encofrar sin vibrar y sin que se presentase segregación, por lo que las mezclas con adición fueron consideradas como concretos autocompactantes. En estado endurecido, la sinergia de las características físicas y químicas de la adición de escoria produjo incrementos de la resistencia a la compresión de las mezclas adicionadas con el 10%, 20% y 30% de escoria en órdenes del 20%, 21% y 18%, respectivamente.

Palabras clave: asentamiento, capacidad de paso, capacidad de relleno, concreto autocompactante, escoria de carbón.

Abstract

This article presents the characteristics of fresh and hardened state of concrete mixtures modified with the addition of 10, 20, 30 and 50 % of finely ground coal slag as a partial replacement of cement. In order to verify their self-compactability, it was evaluated the performance of the optimal values for properties such as: the passing ability, filling ability and slump. In its fresh state, the concrete added with coal slag presented a very good workability and high level of cohesiveness among its components, with optimum qualities for formwork without vibration and without segregation. This achieved behaviour of the mixtures is characteristic of self-compacting concretes. On the other hand, the synergy of the addition of fine slag coal caused increases in the compressive strength of the concretes added with 10, 20 and 30 % w/w coal slag in orders of 18, 20, and 21%, respectively.

Keywords: Slump, passing ability, filling ability, self-compacting concrete, coal slag.

Fecha de recepción: 07 de mayo de de 2014
Fecha de aceptación: 24 de noviembre de 2015

INTRODUCCIÓN

A diario se generan cantidades considerables de cenizas volantes, de ceniza de fondo y de escoria de parrilla debido al alto consumo de carbón a nivel mundial y al contenido de materia mineral del mismo causando problemas ambientales y riesgos de contaminación. La combustión de 1 tonelada de carbón genera un promedio de 80 a 250 kg de residuos dependiendo del tipo de carbón utilizado. Estos residuos están compuestos por un 70% de material silico-aluminoso, que dependiendo de su microestructura, hace posible que sean utilizados como materia prima para la producción de materiales de construcción, tales como; mezclas de concreto y mortero, cementos, áridos ligeros, bloques y ladrillos, entre otras aplicaciones [1]-[3].

Una de las alternativas que surge para el aprovechamiento de la escoria de parrilla es su uso en la producción de concretos autocompactantes, debido a que este tipo de concretos poseen una cantidad de material cementante (finos) mayor al que se utiliza en las mezclas convencionales con el fin de cumplir las exigencias reológicas para las cuales es diseñado [4].

La aparición del Concreto Autocompactante (CAC) ha impactado positivamente al sector de la construcción por la innovación que conlleva. En un principio se diseñó para compensar una creciente escasez de personal especializado pero ha demostrado ser ventajoso al reducir el tiempo de construcción, la mano de obra, y los niveles de ruido y vibraciones, entre otras. El CAC es capaz de fluir y consolidarse bajo su propio peso y, al mismo tiempo, es suficientemente cohesivo para llenar todos los espacios, de casi cualquier tamaño y forma, sin segregación y sangrado (exudación); esto hace que el CAC sea particularmente útil donde el vaciado es difícil, tal como ocurre en estructuras de concreto altamente reforzadas o con cimbras complicadas [5]-[7].

Las cenizas volantes y las de fondo se producen conjuntamente en una caldera donde el carbón ha sido pulverizado, por lo cual su composición química en la mayoría de los casos es bastante similar. Las cenizas de fondo se diferencian de las escorias de parrilla en que estas provienen de los restos de la combustión del carbón grueso quemado en calderas, donde el mismo no está pulverizado. La proporción en la que se obtienen, así como su recolección depende de cada proceso (Figura 1). La mayor diferencia

entre ambos subproductos se encuentra en su morfología y tamaño de partícula; no obstante, las cenizas volantes son ampliamente utilizadas como adición puzolánica a diferencia de las cenizas de fondo o de las de parrilla que normalmente son usadas en la producción de agregados o material de relleno. Algunos investigadores consideran que las cenizas de fondo pueden ser consideradas como relleno que pueden intervenir en el proceso de hidratación del cemento y que además, si son molidas finamente sus partículas intervienen como catalizadores del proceso de hidratación, actuando como centros de nucleación [8]-[10]. Así mismo, Bahri, et ál. [11], Topcu, et ál. [12], y Medina, et ál. [13] afirman que el uso de este tipo de finos en una mezcla de CAC reduce el volumen de espacios vacíos, la fricción entre sus componentes y por ende su resistencia al flujo en estado fresco.



Figura 1. Escoria de carbón a la salida de una parrilla de la caldera (izquierda) y morfología de las partículas de escoria (derecha).

En este sentido, es de interés investigar los efectos de la adición de escoria de parrilla finamente molida en la obtención de un concreto autocompactante usando materiales de la región, basándose en la evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido de las mezclas elaboradas. De esta manera, la obtención de un concreto con características autocompactantes usando la escoria de carbón como reemplazo del cemento, brindará a la industria de la construcción local un material alternativo, económicamente viable y de alto desempeño en estado fresco y endurecido, útil para ser usado en el conformado de estructuras complejas y densamente armadas.

METODOLOGÍA

Para el desarrollo y ejecución de esta investigación se siguió el procedimiento metodológico mostrado en el esquema de la Figura 2.

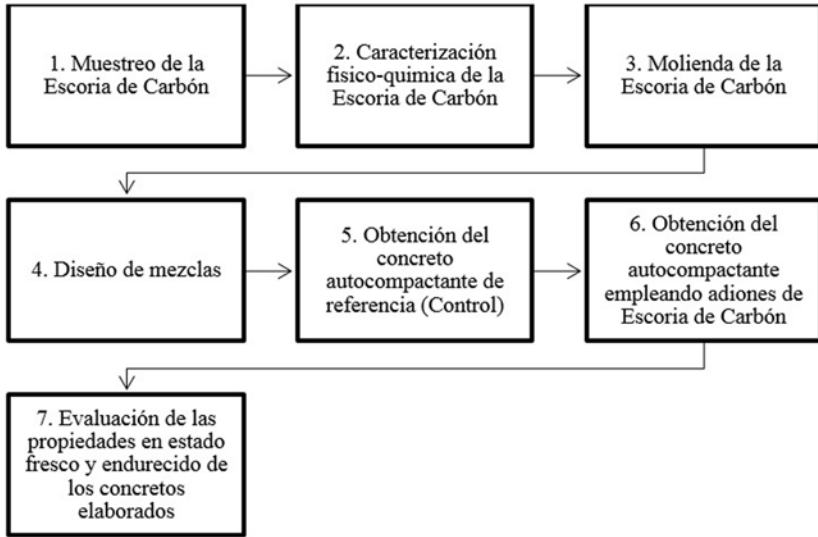


Figura 2. Metodología desarrollada durante la investigación.

Materiales

Cemento

Se utilizó un cemento Portland tipo I de uso general que cumple las especificaciones de las normas NTC 121 y 321, el cual está compuesto principalmente por los elementos que se observan en la tabla 1. Es de anotar que el tipo de cemento utilizado presenta una adición de material calcáreo (CaCO_3).

Tabla 1. Composición química del cemento.

Componente	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	PI
% en peso	20,20	4,52	4,45	61,54	1,58	0,16	0,27	2,48	4,8

Escoria de carbón

Se utilizó escoria de parrilla obtenida como sub-producto de la combustión de carbón en una caldera pirotubular de la región (Valle del Cauca- Colombia). La escoria de carbón fue molturada hasta obtener un tamaño de partícula similar a la del cemento. El tamaño de partícula obtenido fue de $19,1 \mu\text{m}$ y la distribución granulométrica alcanzada se puede observar en la Figura 3, estos resultados muestran que se logró un tamaño de partícula similar a la del cemento la cual fue de $22,7 \mu\text{m}$.

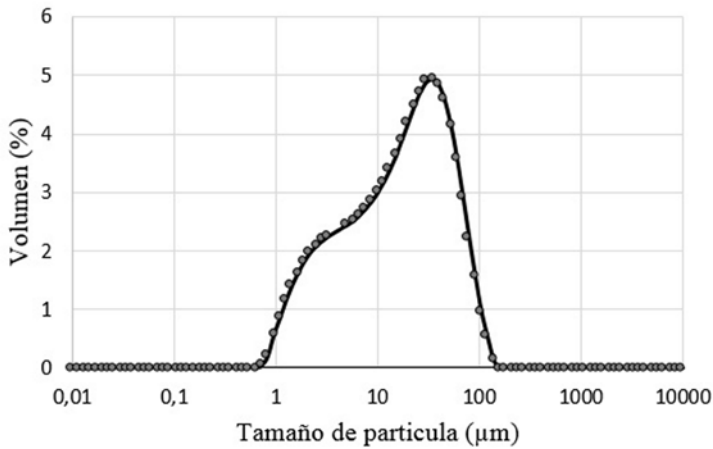


Figura 3. Distribución granulométrica de la escoria de carbón molida

El porcentaje de humedad y de pérdida al fuego de la escoria se determinó con base en la norma ASTM C-114 y mostró menos del 1% de humedad y un promedio de inquemados del 4,71%. El Índice de Actividad Puzolánica (IAP) de esta escoria se analizó con base en las normas ASTM C-311 y C618, reportando un IAP superior al mínimo establecido por la misma norma, que es del 75%, por lo cual se podría clasificar el material como una puzolana y, por lo tanto, apto para actuar como una adición activa en las mezclas (Tabla 2).

Tabla 2. Caracterización de la escoria de carbón.

Característica	Resultado	Característica	Resultado
Tamaño de partícula inicial	25,4 mm	% de inquemados	4,17%
Tamaño de partícula (molida)	19,13 μm	% de humedad	0,18%
Densidad (kg/m ³)	2280	IAP (28 días)	92,58%

La composición química de la escoria de carbón fue obtenida por la técnica de espectrofotometría de fluorescencia de rayos X y se muestra en la Tabla 3. Se puede observar que esta escoria está compuesta esencialmente de un 78% de material silico-aluminoso, que en efecto la hace potencialmente útil como puzolana en sustitución parcial del cemento Portland en mezclas de concreto.

Tabla 3. Composición química de la escoria de carbón.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	S	P ₂ O ₅	Ba
% en peso	50,99	27,45	6,53	4,92	1,53	1,30	1,11	0,74	0,21	0,17	0,10

La caracterización mineralógica de la escoria de carbón se llevó a cabo por medio de Difracción de Rayos X (DRX). El difractograma de rayos X obtenido se muestra en la Figura 4, donde se puede observar que la escoria de carbón no es totalmente amorfa y presenta fases cristalinas como cuarzo, mullita, hematita y andesina. El difractograma evidencia un pico de mayor intensidad identificado con un ángulo característico 2Theta de 31,01° el cual indica que la escoria tiene una gran cantidad de cuarzo (SiO₂). Además, se observan varios picos característicos de la mullita (silicato de aluminio) con un ángulo característico 2Theta de 30,59° y hematita (2Theta: 38,71°) con baja intensidad, lo cual indica que estas fases se encuentran en una menor proporción.

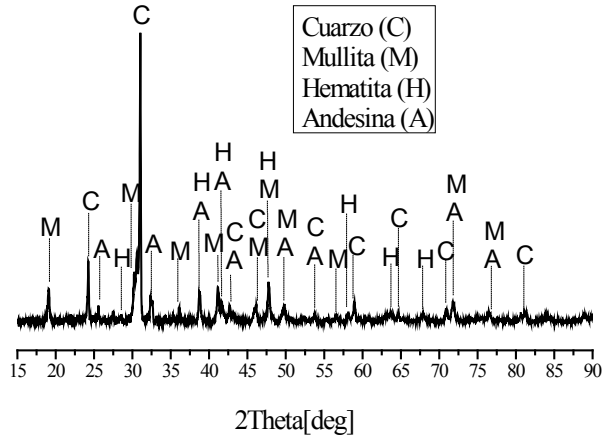


Figura 4. Difractograma de rayos-X de la escoria de carbón.

En la Figura 5 se muestran dos imágenes de la escoria, que fueron obtenidas por medio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se puede apreciar la textura lisa y de baja porosidad que presentan las partículas obtenidas después de la molienda; además, se observan partículas angulosas de baja relación de aspecto.

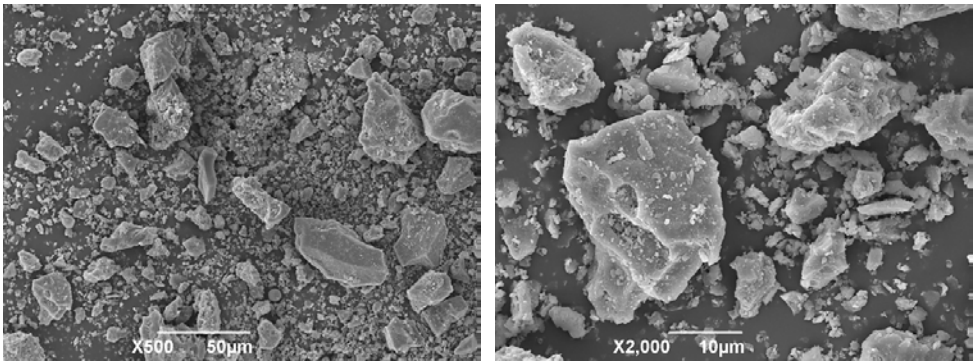
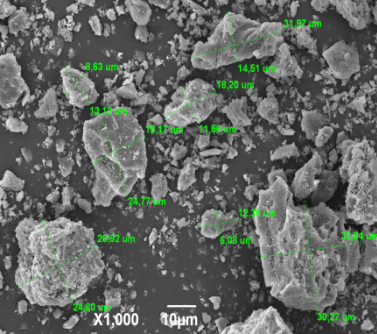


Figura 5. MEB de la morfología de las partículas de escoria molida (izquierda, x500) (derecha, x2000).

La técnica de Espectroscopia de Energía Dispersiva de Rayos X (EDS) permitió conocer la composición de algunas áreas puntuales de la escoria evaluada.

Como se puede apreciar en la tabla 4, la mayoría de las partículas están compuestas por C, O, Al, Si y en menores concentraciones por Na, K y Ca.

Tabla 4. Espectroscopia dispersiva.

MEB	EDS					
	EDS 1		EDS 2		EDS 3	
	Elemento	% peso	Elemento	% peso	Elemento	% peso
	C	21,78	C	13,87	C	3,77
	O	45,71	O	51,35	O	53,69
	Al	14,19	Na	0,47	Na	7,36
	Si	17,11	Al	14,78	Al	4,48
	K	0,66	Si	18,99	Si	7,7
	Ca	0,55	K	0,54	Ca	21,58
					Fe	1,42

La estabilidad térmica de la escoria de carbón fue determinada por medio de termogravimetría asociada con un Análisis Térmico Diferencial (TGA, por sus siglas en inglés). Los resultados mostrados en la Figura 6 indican varios cambios; el primero fue una pérdida de peso a una temperatura de alrededor de 100°C, que está relacionada con la pérdida de humedad de la muestra, también se puede observar que entre 100°C y 450°C hay una pérdida de peso que se atribuye a la deshidratación del material, y por último se aprecia una caída de peso entre 450°C y 700°C que corresponde a la descomposición del CaCO_3 y al carbón residual presente en la escoria. Sin embargo, esta pérdida es muy poca, lo cual corrobora el contenido relativamente bajo de inquemados (4,17%). Este porcentaje de inquemados es admisible en un material de adición al concreto.

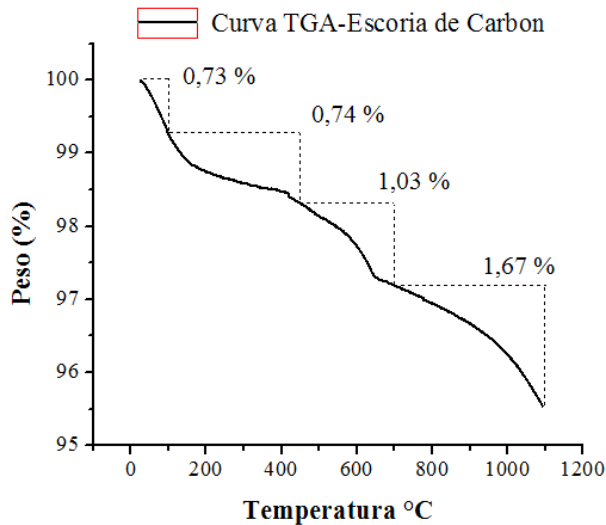


Figura 6. Curva termogravimétrica la escoria de carbón.

Agregados

Se utilizaron agregados de la región que cumplen con las especificaciones de las Normas Técnicas Colombianas (NTC) para la producción de mezclas de concreto. La grava presentó un tamaño máximo de 12,5 mm (1/2 pulg) y un predominio de partículas angulares. La arena usada es silícea, extraída de un río de la región, y presentó un módulo de finura de 2,55 con predominio de partículas redondeadas, estas características físicas la hacen apropiada para producir concretos de características fluidas. Para la determinación de la proporción de los agregados se empleó como referencia la gradación ideal propuesta por Fuller y Thompson y se encontró que la combinación que exhibía un mayor ajuste granulométrico era la conformada por 40% de grava y 60% de arena (Figura 7).

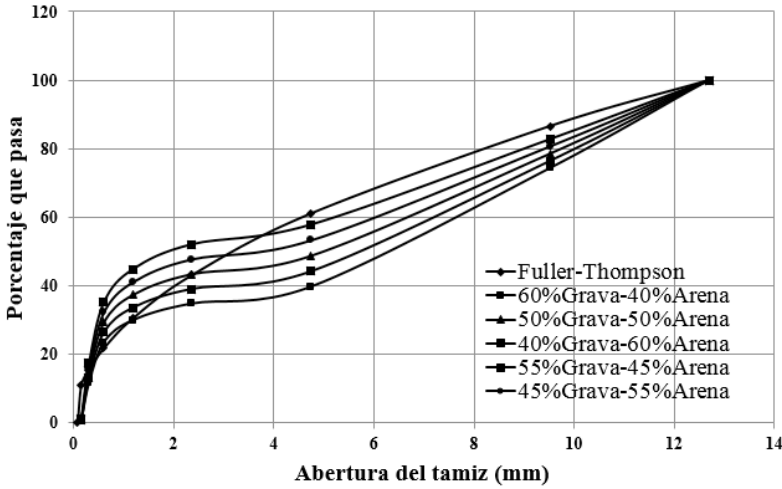


Figura 7. Distribución granulométrica de los agregados.

Aditivo superplastificante

Se usó un superplastificante (Sp) disponible comercialmente, el cual corresponde a un aditivo líquido, reductor de agua de ultra alto poder, para prolongar el tiempo de trabajabilidad y que está compuesto por resinas sintéticas y polímeros de última generación. Este aditivo cumple con los requisitos de la norma ASTM C494 y se clasifica según los parámetros establecidos en esta norma como tipos A y F, su densidad es de 1.130 kg/m^3 .

Diseño de mezclas

Para el diseño de las mezclas de concreto autocompactante se partió de una cantidad de material cementante (finos) de 480 kg/m^3 y una relación agua/cemento de 0,45 con el objetivo de lograr una resistencia mínima a la compresión de 35 MPa a los 28 días de curado. Para asegurar el cumplimiento de las propiedades en estado fresco, se utilizó el aditivo superplastificante mencionado anteriormente con una dosificación de entre 0,5% y 0,6%. La dosificación de las mezclas se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Dosificación de las mezclas de concreto elaboradas.

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	Escoria (kg/m ³)	Agua (l/m ³)	Sp (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)
Control	480	0	216	2,64	643	965
M-10%	432	48	216	2,64	643	965
M-20%	384	96	216	2,64	643	965
M-30%	336	144	216	2,64	643	965
M-50%	240	240	216	2,64	643	965

Ensayos realizados

Con el fin de verificar el flujo libre, la capacidad de paso y la capacidad de relleno de las mezclas elaboradas en su estado fresco se llevaron a cabo ensayos de rigor característicos en este tipo de concretos de alta fluidez tales como: el cono de Abrams, la caja en L y el embudo en V (Figura 8), cuyos criterios y parámetros según la EFNARC se relacionan en la Tabla 6.



Figura 8. Ensayos en estado fresco realizados, cono de Abrams (izquierda), caja en L (centro) y embudo en V (derecha).

Tabla 6. Criterios de conformidad para las propiedades en estado fresco de los CAC según la EFNARC.

Propiedad	Criterio	Aplicación en estructuras
Clase de asentamiento SF1	$\geq 520 \text{ mm}, \leq 700 \text{ mm}$	Ligeramente reforzadas
Clase de asentamiento SF2	$\geq 640 \text{ mm}, \leq 800 \text{ mm}$	Medianamente reforzadas
Clase de asentamiento SF3	$\geq 740 \text{ mm}, \leq 900 \text{ mm}$	Altamente reforzadas
Clase del ensayo del embudo en V VF1	$\leq 10 \text{ s}$	Altamente reforzadas
Clase del ensayo del embudo en V VF2	$\geq 7 \text{ s}, \leq 27 \text{ s}$	Medianamente reforzadas
Clase de capacidad de paso PA1	$\geq 0,75$	
Clase de capacidad de paso PA2	$\geq 0,75$	

En estado endurecido se evaluó la resistencia a la compresión de tres especímenes por edad para cada una de las mezclas de concreto autocompactante. Las probetas conformadas fueron cilindros de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura los cuales fueron ensayados de acuerdo al procedimiento descrito en la norma ASTM C39.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades en estado fresco

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de cono de Abrams, caja en L, y embudo en V se presentan en la tabla 7, los cuales están acordes con los resultados obtenidos por Guneyisi et ál. [14], Wang et ál. [15] y Boukendakdji et ál, [16], se pudo observar que la adición de escoria de carbón en la mezcla de CAC no produjo incrementos en la demanda de agua y en la cantidad de aditivo superplastificante requerido para lograr las propiedades de diseño en estado fresco y cumplir con los criterios de conformidad según la EFNARC [17].

Se observó que el efecto de la adición de escoria fina sobre el asentamiento de las mezclas fue positivo, generando aumentos de hasta del 13% en el asentamiento en relación con la mezcla control, tal como fue el caso de la mezcla M-10%. Este mismo efecto pudo verse reflejado en el ensayo del embudo en V, en donde esta misma mezcla fue 60% más fluida que la mezcla control, lo cual indica que la adición de escoria produjo un incremento en la capacidad de fluir de las mezclas a través de espacios reducidos, con tiempos en un rango entre 8 y 13 segundos. Adicionalmente, se pudo observar en la prueba de caja en L que la adición de este mineral no generó aumentos en la relación de bloqueo (H_2/H_1), indicando que aunque no se redujo el riesgo de bloqueo de los áridos entre las barras de refuerzo, todas las mezclas cumplieron con la capacidad de paso mínima para ser considerados como CAC. Algunos autores como Boukendakdji et ál. [18], Valcuende et ál. [19] y Guneyisi et ál. [20] afirman que la morfología de las partículas de la adición cuando presentan baja relación de aspecto, distribución granulométrica similar a la del cemento, baja porosidad y textura superficial lisa son factores que logran mejorar el desempeño en estado fresco de las mezclas de CAC, debido a la reducción de volumen de espacios vacíos, la fricción entre sus componentes y su resistencia al flujo.

Tabla 7. Comportamiento en estado fresco de los concretos elaborados.

Característica	Control	M-10%	M-20%	M-30%	M-50%
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
% Sp	0,55%	0,55%	0,55%	0,55%	0,55%
Asentamiento (mm)	635	720	690	625	530
Embudo en V (s)	19,93	8,20	9,34	8,74	12,85
Caja en L (relación H2/H1)	0,98	0,79	0,78	0,77	0,76

En términos reológicos, si se consideran los parámetros de flujo de asentamiento y tiempo de flujo como medidas indirectas de la tensión de umbral y de la viscosidad de la mezcla, se puede observar que las mezclas adicionadas alcanzaron combinaciones adecuadas de buena fluidez (baja tensión de umbral) y moderada viscosidad, que evitaron la segregación de sus componentes (Figura 9), por lo que todas las mezclas puedan ser consideradas como concretos autocompactantes, y, por lo tanto, que sus características sean promisorias para que estos CAC puedan ser usados en el conformado de estructuras mediana y/o altamente reforzadas, tal como lo establecen los criterios de conformidad de la EFNARC [21]-[22].



Figura 9. Consistencia y cohesividad de las mezclas elaboradas. De izquierda a derecha; control, M-10%, M-20%, M-30% y M-50%, respectivamente.

Resistencia a la compresión

El efecto de la adición de escoria de carbón sobre la resistencia a la compresión de los CAC se puede observar en la Figura 10. Con base en estos resultados se puede afirmar que la adición del 10%, 20% y 30% de este material como sustitución parcial del cemento generó un incremento en la resistencia a la compresión de las mezclas a partir de los 28 días de curado, en órdenes del

20,1%; 21,1% y 18,2%, respectivamente. Este comportamiento podría ser atribuido a dos factores típicos en este tipo de materiales silico-aluminosos; el primero de carácter químico y el segundo de carácter físico.

La influencia de la reactividad química o puzolánica de la escoria sobre el comportamiento mecánico de las mezclas elaboradas fue mayor a edades de curado prolongadas, tal como se puede observar en la Figura 10. Esto es debido, según Argiz et ál., [23], Vejmelkova et ál., [24] y Hannesson et ál. [25], a que las reacciones puzolánicas son lentas y se dan en la medida en que estas consumen el hidróxido de calcio producido por las reacciones de hidratación del cemento. Por lo tanto, las reacciones puzolánicas solo pueden tener lugar después de que comienza la reacción hidráulica del cemento. Acorde con Kunder et ál., [26], Sani et ál., [27] y Siddique et ál., [28], esta tardanza en la reactividad puzolánica también puede ser debida a la baja amorficidad presente en esta puzolana y su naturaleza semicristalina. Por otro lado, se pudo observar que cuando el reemplazo de cemento por escoria fue del 50%, la generación de resistencias a tempranas edades se vio afectada, este comportamiento es atribuido a la disminución del hidróxido de calcio disponible generado durante la hidratación del cemento y el cual es un componente esencial para la generación de las reacciones puzolánicas [29].

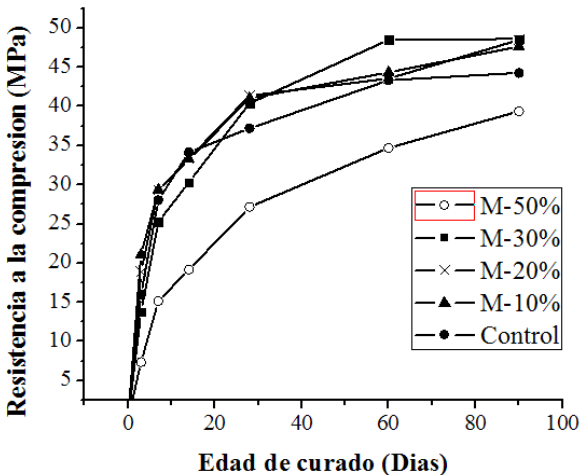


Figura 10. Resistencia a la compresión de los concretos elaborados.

Como se mencionó anteriormente, otro factor que pudo haber influido en el comportamiento mecánico de las mezclas son las características físicas y morfológicas de la escoria, ya que al tener un tamaño de partícula adecuado para ser usada como adición, tiene mayor facilidad de ocupar o llenar los espacios vacíos en la mezcla, mejorando el empaquetamiento y la distribución de las partículas del cementante, y de este modo generando una zona de transición más densa y homogénea entre la pasta y los agregados, lo cual contribuye a la mejora del desempeño mecánico de los CAC adicionados con este material. Por otro lado, la superficie de la escoria molida pudo haber tenido afinidad con las fases hidratadas del cemento, facilitando de esta forma la nucleación de los productos de hidratación. Este fenómeno es descrito por Silva et ál., [30], Mohammed et ál., [31] y Bustnes et ál., [32] como el efecto "Filler".

En general, la sinergia entre estos dos factores físico-químicos permitió, en estado endurecido, la obtención de valores de resistencia por encima a la de diseño (35 MPa a 28 días de curado), inclusive con la sustitución del 30% de cemento Portland por escoria de carbón finamente molida. Confirmando así la posibilidad de obtener un concreto de características autocompactantes con materiales de la región y sin la necesidad de incrementar la cantidad de finos o de cemento necesarios para lograr propiedades adecuadas tanto en su estado fresco como endurecido.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos durante la ejecución de esta investigación se demostró la viabilidad de producir concretos autocompactantes con la incorporación de escoria de carbón como sustitución parcial del cemento. Estos concretos presentaron las características necesarias para ser considerados como autocompactantes; dichas características se reflejan en una adecuada fluidez, buena capacidad de paso y de relleno, así como también una elevada cohesividad y un tiempo de manejabilidad apropiado para lograr una adecuada colocación y vaciado dentro de los moldes sin necesidad de emplear métodos de compactación o vibrado. Estas propiedades pueden representar numerosas ventajas para la industria de la construcción local, siendo éstas promisorias para que este material pueda ser usado en la elaboración de estructuras altamente reforzadas y de difícil conformado.

Las características físico-químicas de esta escoria de carbón, acompañadas de un proceso previsible adicional de activación mecánica por medio de molienda, hacen que este subproducto industrial sea potencialmente útil para ser valorado como adición puzolánica en mezclas de concreto auto-compactante con el fin de reducir el elevado consumo de cemento portland en este tipo de mezclas.

La incorporación de escoria de carbón como una adición activa en la mezcla permitió la reducción de la cantidad de cemento hasta en 30%. Se resalta que la influencia de esta sobre el desarrollo de resistencias a la compresión fue muy aceptable a cortas edades y excelente a edades de curado más prolongadas o superiores a los 28 días, logrando incrementos resistentes cercanos al 20%, 21% y 18% cuando fue incorporada como sustituto parcial del cemento en porcentajes del 10%, 20% y 30%, respectivamente.

Agradecimientos

Los autores presentan sus agradecimientos al grupo de investigación "Materiales Compuestos" de la Universidad del Valle; proyecto VRI C.I. 747 "Reciclar Escombros en Concreto" financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones; Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e innovación (COLCIENCIAS) y su programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda", convocatoria 566 de 2012, por su apoyo a esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] R. Robayo, P. Matthey y S. Delvasto, "Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz", *Revista de la Construcción*, vol. 12, N° 2, pp. 139-151, 2013. DOI: 10.4067/S0718-915X2013000200011
- [2] R. Kasemchaisiri and S. Tangtermsirikul, "Properties of self-compacting concrete in incorporating bottom ash as a partial replacement of fine aggregate", *Science Asia*, vol. 34, pp. 87-95, 2008. DOI: 10.2306/scienceasia1513-1874.2008.34.087
- [3] P. Ramanathan, I. Baskar, P. Muthupriya y R. Venkatasubramani, "Performance of self-compacting concrete containing different minerals admixtures", *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 12, N° 2, pp. 465-472, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.032

- [4] K. Murthy, N. Rao, R. Vand y V. Reddy, "Mix design procedure for self-compacting concrete", *IOSR Journal of Engineering*, vol. 2, N° 9, pp. 33-41, 2012.
- [5] H. Okamura y M. Ouchi, "Self-compacting concrete", *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 1, N° 1, pp. 5-15, 2003.
- [6] C.I. Goodier, "Development of self-compacting concrete", *Structures & Building*, vol. 56, pp. 405-414, 2003.
- [7] P. L. Domone, "Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies", *Cement & Concrete Composites*, vol. 28, pp. 197-208, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003
- [8] Y. Aggarwal y P. Aggarwal, "Prediction of compressive strength of SCC containing bottom ash using artificial neural networks", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 53, pp. 1-6, 2011. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.05.016
- [9] P. Dinakar, K.P. Sethy y U.C. Sahoo, "Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag", *Materials and Design*, vol. 43, pp. 161-169, 2013. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.06.049
- [10] M. Purushothaman and R.M. Senthamarai, "Strength properties of high performance concrete using bottom ash as fine aggregate", *International Journal of Civil*, vol. 2, no. 3, pp. 35-40, 2013.
- [11] I. J. Bahri, A. Lecomte, M. Ouezdou y T. Achour, "Use of limestone sands and filler in concrete without superplasticizer", *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 771-780, 2012. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2012.02.010
- [12] I.B. Topcu and A. Ugurlu, "Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 33, pp. 1071-1075, 2003. DOI:10.1016/S0008-8846(03)00015-2
- [13] A. Medina, P. Gamero, X. Querol, N. Moreno, B. De León, M. Almanza, G. Vargas, M. Izquierdo y O. Font, "Fly ash from a Mexican mineral coal I: Mineralogical and chemical characterization", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 181, pp. 82-90, 2010. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.04.096
- [14] E. Guneyisi, M. Gesoglu and E. Ozbay, "Effects of marble powder and slag on the properties of self-compacting mortars", *Materials and Structures*, vol. 42, pp. 813-826, 2009. DOI: 10.1617/s11527-008-9426-2
- [15] H.Y. Wang and C.C. Lin, "A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC)", *Construction and Building Materials*, vol. 42, pp. 132-136, 2013. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.020
- [16] O. Boukendakdji, E.H. Kadri y S. Kenai, "Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete", *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 583-590, 2012. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2011.08.013

- [17] EFNARC (2005, May), "The European guidelines for self-compacting concrete. Specification, production and use", SCC 028, pp. 51, available: <http://www.efnarc.org>.
- [18] O. Boukendakdji, S. Kenai, E.H. Kadri y F. Rouis, "Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 2593-2598, 2009. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.029
- [19] M. Valcuende, C. Parra, E. Marco, A. Garrido, E. Martinez y J. Cánoves, "Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the porous structure of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 122-128, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.029
- [20] E. Guneyisi y M. Gesoglu, "Properties of self-compacting Portland pozzolana and limestone blended cement concretes containing different replacement levels of slag", *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 1399-1410, 2011. DOI: 10.1617/s11527-011-9706-0
- [21] Y. Silva, R. Robayo, P. Matthey, S. Delvasto, "Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición", *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, vol. 35 (1), pp. 86-94, 2015.
- [22] R. Robayo, P. Matthey, Y. Silva, S. Delvasto, "Comportamiento en estado fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado", *Revista Informador Técnico (Colombia)*, Vol. 78 (2), pp. 128-139, 2014.
- [23] C. Argiz, E. Menéndez, y M. Sanjuan, "Effect of mixes made of coal bottom ash and fly ash on the mechanical strength and porosity of Portland cement", *Revista Materiales de Construccion*, vol. 63, no, pp. 49-64, 2013.
- [24] E. Vejmelkova, M. Keppert, S. Grzeszczyk, B. Skalinski y R. Cerny, "Properties of self-compacting concrete mixtures containing metakaolin and blast furnace slag", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1325-1331, 2011. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.012
- [25] G. Hannesson, K. Kunder, R. Shorgen y D. Lehman, "The influence of high volume of fly ash and slag on the compressive strength of self-consolidating concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 30, pp. 161-168, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.046
- [26] K. Kunder, D. Lehman, J. Berman, G. Hannesson y R. Shogren, "Mechanical properties of self-consolidating concrete blend with high volumes of fly ash and slag", *Construction and Building Materials*, vol. 34, pp. 285-295, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.034
- [27] M. Sani, F. Muftah y Z. Muda, "The properties of special concrete using washed bottom ash (WBA) as partial sand replacement", *International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology*, vol. 1, N° 2, 2010.

- [28] R. Siddique, P. Aggarwal y Y. Aggarwal, "Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash", *Construction and Building Materials*, vol. 29, pp. 73-81, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.035
- [29] Y.Y Chen, B.L. Tuan y C.L. Hwang, "Effect of paste amount on the properties of self-consolidating concrete containing fly ash and slag", *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 340-346, 2013. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.05.050
- [30] Y. Silva, D. Burgos, W. Valencia, S. Delvasto y J. Álvarez, "Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera", *Revista de la Construcción*, vol. 12, N° 2, pp. 166-176, 2013. DOI: 10.4067/S0718-915X2013000200013
- [31] M.K. Mohammed, A.R. Dawson y N.H. Thom, "Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler", *Construction and Building Materials*, vol. 49, pp. 84-92, 2013. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2013.07.107
- [32] H.M. Bustnes, B. Lagerblad y E. Forssberg, "The function of filler in concrete", *Materials and Structures*, vol. 37, pp. 74-81, 2004. DOI: 10.1007/BF02486602