

CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN

Yimmy Silva^{1}, Silvio Delvasto²*

1: Ingeniero de Materiales, Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, Cali, Colombia

2: Profesor Titular, MSc., Ph.D., Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Materiales, Cali, Colombia

*Contacto: yimmy.silva@correounivalle.edu.co

RESUMEN

En este estudio, se elaboraron diferentes concretos autocompactantes (CAC) de cemento Portland con diferentes niveles de sustitución por ceniza volante (CV) y escoria (E) en mezclas ajustadas para dar permanencia a las propiedades en estado fresco del concreto autocompactante. Las propiedades evaluadas incluyen la trabajabilidad, resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y porosidad. La trabajabilidad del concreto fresco se determinó usando la prueba de flujo de asentamiento, la caja en L y el embudo en V. Para poder mantener la capacidad de llenado adecuada, el concreto con ceniza volante requirió un incremento en la relación agua/fino. Los resultados indican que sustituyendo el 35% de cemento por escoria se obtiene una resistencia de 59,5 MPa a los 90 días de curado bajo agua. La resistencia a la tracción indirecta reportó 4 MPa a la misma edad y porcentaje de sustitución. Al sustituir 50% del cemento por escoria se obtiene un resultado comparable en ambas propiedades mecánicas. Con adición de ceniza volante hasta de un 50% también se obtuvieron resistencias a la compresión importantes aunque un poco inferiores. Valores altos de absorción se obtuvieron al aumentar la relación agua/finos. Todos los concretos autocompactantes exhibieron valores en un rango de 10,06-13,35% de volumen de poros permeables. Se concluye que es factible obtener concretos autocompactantes de elevadas prestaciones usando elevadas proporciones de escoria y ceniza volante de la combustión de carbón en reemplazo de cemento Portland.

Palabras Clave: *Ceniza volante, Escoria, Concreto autocompactante, Propiedades en estado fresco*

ABSTRACT

In this study were developed different self-compacting concretes (SCC) of Portland cement, with different levels of fly ash replacement (CV) and slag (E) in mixtures adjusted to give permanence to fresh properties of self-compacting concrete. Evaluated properties include workability, compressive strength, indirect tensile, absorption and porosity. The fresh concrete workability was determined using slump flow test, L-box and V-funnel. In order to maintain adequate filling capacity, concrete with fly ash required an increase in its water/fine proportion. Results showed that replacing 35% of cement by slag can be obtained a resistance of 59.5 MPa after 90 days of curing in water. Indirect tensile strength reported 4 MPa at the same age and replacement rate. By replacing 50% of cement by slag shows comparable results in both mechanical properties. By adding fly ash up to 50% was also obtained important compressive strengths although slightly lower. High absorption values were obtained by increasing water/fine proportions. All self-

compacting concretes showed values in a range of 10.06 % to 13.35% of permeable volume pore. As a conclusion can be said that is possible to obtain self-compacting concrete high performance using high proportions of slag and fly ash from coal combustion replacing Portland cement.

Keywords: *Fly ash, Slag, Self-compacting concrete, Fresh properties*

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad en la industria de la construcción, el diseño y la utilización del concreto en estructuras, cambian y evolucionan con los avances tecnológicos. Uno de los tipos relativamente recientes es el concreto autocompactante (CAC) que favorece la construcción de elementos delgados y formas complejas [1,2]. Por esta razón ha habido un incremento significativo en el uso de este material compuesto [3-8]. El uso de este tipo de concreto conlleva a reducir los tiempos de construcción y los costos, mejora las condiciones de trabajo mediante la eliminación de las vibraciones, hace más fácil lograr un mejor acabado y durabilidad, permite el uso de moldes complejos y piezas con congestionado refuerzo [9-11].

Para la producción de concretos autocompactantes se exige una gran cantidad de polvos en comparación con el concreto convencional vibrado. Jagadish et al. [12] indican que el CAC a menudo contiene polvos muy finos en el orden de 450-600 kg/m³ de concreto, un superplastificante y aditivos modificadores de viscosidad (en algunos casos). El contenido alto de polvos frecuentemente se complementa con aditivos minerales, tales como cenizas volantes, escorias, caliza molida entre otras. El uso de aditivos minerales tales como cenizas volantes, donde esté disponible, podría aumentar el asentamiento de la mezcla sin incrementar el costo. El uso de esta adición también reduce la demanda de cemento, materiales finos y arena que se requieren en los CAC [13]. Por otra parte, la incorporación de cenizas también elimina la necesidad de aditivos químicos que aumentan la viscosidad.

La adición de la ceniza volante y de la escoria de la combustión del carbón generan varios efectos en las propiedades de concreto tanto en estado fresco como endurecido, se mejora la manejabilidad de la mezcla en estado fresco por su gran aporte de partículas finas además de la estabilidad [14-16], así como un incremento de la densidad en la pasta de la matriz y la zona de transición interfacial en el concreto endurecido. Por otra parte la adición de ceniza volante o escoria contribuye a un beneficio económico ya que son subproductos de las industrias, además el uso de estos materiales conlleva un beneficio ecológico.

El objetivo de este trabajo es medir las propiedades en estado fresco y propiedades mecánicas tales como resistencia a la compresión y a la tracción indirecta a diferentes edades de curado para diversas mezclas de concreto, además las propiedades de permeabilidad como la absorción y porosidad, incorporando ceniza volante o escoria en porcentajes variables de 35% y 50%, manteniendo constante la dosificación de los agregados para los diferentes CAC.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para el presente estudio se utilizó Cemento Portland ordinario (similar al ASTM Tipo I), Un tipo de Ceniza Volante-finos de la combustión de carbón en estado de terrón en una caldera pirotubular y una escoria - residuo que queda sobre la parrilla de ese mismo carbón. Estos desechos se añadieron en diferentes proporciones (35% y 50%) como remplazo en peso del Cemento Portland utilizado en la fabricación de un concreto. Las características del cemento, de la ceniza volante y de la escoria se presentan en la Tabla 1. Grava triturada con un tamaño máximo nominal de 19 mm y una buena calidad de arena de río bien gradada fueron utilizadas como agregado grueso y fino. Éstas tenían un peso específico de 2,76 y 2,68 respectivamente, la curva granulométrica de estos agregados se observa en la figura 1. En ella se presentan las granulometrías de los agregados de las mezclas (Grava/Arena= 0,89) que se acerca más a la distribución de Fuller-Thompson, que también se muestra en la figura 1. El aditivo superplastificante utilizado en este estudio fue un policarboxilato modificado tipo F conforme con la norma ASTM C494.

2.2 Preparación de las muestras

Se prepararon cinco diferentes composiciones de concretos autocompactantes que incluyen un CAC de referencia, el cual no tenía ningún remplazo de cemento, dos CAC con dosis variables de ceniza volante y dos CAC con adición variable de escoria. Los detalles de los concretos con los diferentes porcentajes de sustitución se muestran en la tabla 2.

Para el mezclado de los concretos se usó una mezcladora convencional tipo trompo, el tiempo de mezcla fue el mismo para todos los CAC. En general, el desmoldeo se realizó entre 22 h y 24 h después del mezclado.

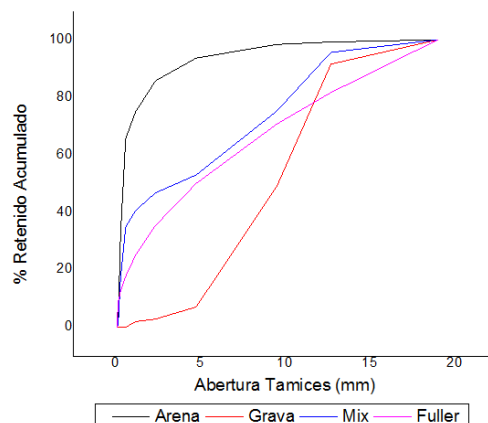


Figura 1. Granulometría de los agregados y de las mezclas.

Tabla 1. Características del cemento, 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
Pérdida al Fuego (PF)	-	21,42	4,85
Gravedad Específica	3,05	1,53	1,72

Tabla 2. Mezclas de concretos autocompactantes.

MATERIAL	PATRON	CAC E 35%	CAC E 50%	CAC CV 35%	CAC CV 50%
	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)	(kg/m ³)
Cemento	550	357,5	275	357,5	275
Grava	770	770	770	770	770
Arena	860	859	859	859	859
Agua	198	198	198	209	214,5
Aditivo	6,6	5,8	5,5	6,0	5,8
Ceniza volante	-	-	-	192,5	275
Escoria	-	192,5	275	-	-

3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Caracterización de las adiciones

La ceniza volante y la escoria se consideran puzolanas puesto que al determinar el índice de actividad puzolánica siguiendo el procedimiento establecido en la norma ASTM C311-04 los valores obtenidos superan los establecidos por la norma, el índice de la ceniza volante fue de 129 % y de la escoria 131%. Es importante resaltar que estos desechos de la combustión fueron sometidos a molienda hasta obtener la ceniza volante un tamaño medio de partícula (granulómetro laser) de 23,9 y la escoria 19,5 μm (ver figura 2), que es similar al del cemento. La adición al concreto de estos suplementos finos permite mejorar sus propiedades reológicas y mecánicas. Además, el empleo de estas adiciones minerales muy finas disminuye la segregación y exudación del concreto, básicamente producto del efecto de un mayor empaquetamiento [16].

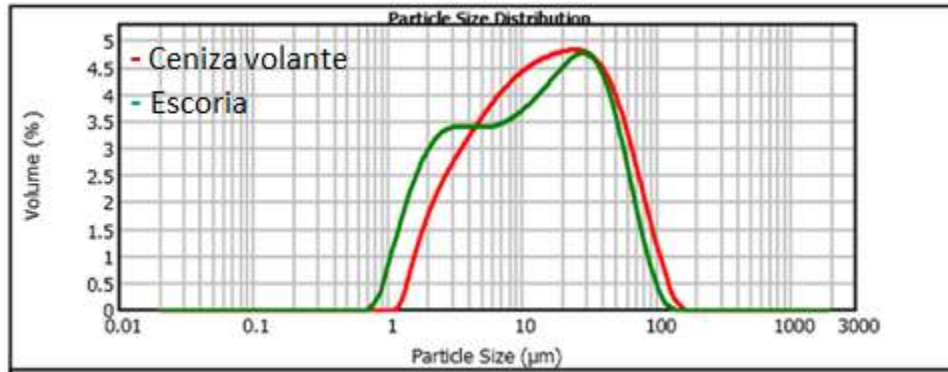


Figura 2. Distribución granulométrica de la ceniza volante y de la escoria.

La caracterización mineralógica de la ceniza volante y de la escoria se llevó a cabo por medio de Difracción de Rayos-X mediante un difractómetro PAnalytical, modelo X'PertPRO filtro de Nickel, usando la señal $K\alpha_1$ del Co. Se usó un paso de $2^\circ/\text{min}$ dentro de un rango de $10^\circ - 93^\circ$. En la figura 3 se aprecia el difractograma para la ceniza volante y la escoria. Se puede observar que la ceniza volante no es totalmente amorfa (vítrea), presenta fases cristalinas en menor cantidad como cuarzo (Q), mullita (M) y calcita (Ca). 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 (Silicato de aluminio) con baja intensidad, lo que indica que esta fase se encuentra en una menor proporción.

La escoria también presenta fases cristalinas como cuarzo (Q) y mullita (M), lo cual afecta su reacción. Al igual que la ceniza volante se evidencia un pico de mayor intensidad correspondiente a un ángulo $2\theta = 31,028^\circ$ característico del Cuarzo.

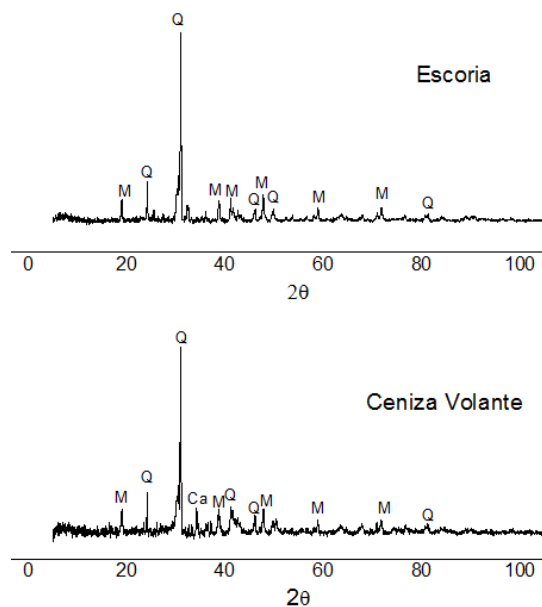


Figura 3. Patrón de difracción de rayos X de la ceniza volante y de la escoria.

3.2 Resultados de las pruebas en estado fresco de los CAC

Los resultados de las mezclas de los CAC en estado fresco se presentan en la tabla 3. Estas se caracterizaron mediante ensayos como: el cono de Abrams, la caja en L y el embudo en V, con el fin de verificar que no se presentara el fenómeno de segregación también conocido como estabilidad, que se tuviese una fluidez y capacidad de paso apropiadas. Todas las mezclas mostraron una buena trabajabilidad con valores que están en el rango especificado en la norma EFNARC [18]. Con estas pruebas se validó de gran manera las características reológicas de los CAC. Los resultados de estos ensayos en estado fresco se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Ensayos en estado fresco de los CAC.

	<i>Cono de Abrams</i>	<i>Caja en L</i>	<i>Embudo en V</i>
	<i>Spread (mm)</i>	<i>H2/H1</i>	<i>Tiempo (seg)</i>
PATRON	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

3.3 Ensayos Mecánicos

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, presentados en la tabla 4, muestran que los CAC adicionados con escoria presentan el mejor comportamiento a todas las edades. Los CAC a los 28 días de curado superan en más del 40% la resistencia de diseño a la compresión de 35 MPa, mientras que el CAC 50% CV se aproxima a ella.

En la tabla 4 se presentan los resultados de la resistencia a la tracción indirecta a diferentes edades. Esta propiedad se puede relacionar con resistencia a la compresión, aunque esto depende de múltiples factores tales como, el tipo de agregado y la distribución del tamaño de partícula, la edad del concreto, el contenido de aire y proceso de curado [19]. El CAC con 35% y 50% de escoria y el CAC con 35% de adición de Ceniza Volante reportaron valores superiores de resistencia a la tracción indirecta que los del patrón, que no tenían adición alguna.

Tabla 4. Resistencia a la compresión y tracción indirecta a diferentes edades de curado.

Días de curado	Resistencia a la Compresión (MPa)				Tracción Indirecta (MPa)		
	7	14	28	90	7	28	90
PATRON	28,8	33,9	38,4	52,7	3,07	3,27	3,3
CAC 35% E	32,7	40,8	47,3	59,5	3,2	3,57	4,03
CAC 50% E	30,2	38,1	45,2	58,7	2,74	3	3,98
CAC 35% CV	28,9	35,1	43,4	48,9	2,56	3,7	3,89
CAC 50% CV	24,5	31,6	34,9	46,5	1,98	3,14	3.24

3.4 Estudio de Durabilidad

En la tabla 5 se presentan los resultados del ensayo de porosidad y absorción hechos de acuerdo a la norma ASTM C 642, los cuales indican un aumento en la cantidad total de poros en los CAC adicionados con un 35% y con 50% de ceniza volante, esto se atribuye a que estos CAC tenían una mayor relación agua/polvo adicionado, ya que pequeños cambios de este parámetro pueden significar apreciables diferencias en la permeabilidad. 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. Por otra parte, los CAC que contienen ceniza volante, el de mayor reemplazo tiene una mayor porosidad debido principalmente a su mayor relación agua /fino.

El ensayo de succión capilar, se llevó a cabo utilizando la norma sueca estándar Europea 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 que los productos de la reacción puzolánica fueron capaces de obstruir las conexiones entre los poros capilares, reduciendo así la penetración de estos concretos.

Tabla 5. Resultados Ensayos de Permeabilidad.

	CAC	PATRON	E 35%	E 50%	CV 35%	CV50%
Resultados Succión Capilar	$K (Kg/m^2seg^{1/2})$	0,0039	0,0053	0,0052	0,0042	0,0061
	$m (10^7 s/m^2)$	7,6	6,5	6,67	9,09	7,75
	Porosidad efectiva ϵ_0	0,036	0,039	0,042	0,039	0,053
Resultados de porosidad y absorción	Porosidad total (%)	10,9	10,25	10,1	10,8	13,35

4 CONCLUSIONES

Con base en los resultados de esta investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones: La producción de concreto autocompactante utilizando materiales de la región y desechos de la combustión del carbón (ceniza volante y escoria) es factible técnicamente, este concreto presenta las características necesarias para ser considerado como autocompactante, dichas características se reflejan en una adecuada fluidez, una excelente capacidad de paso y de relleno, y una muy buena resistencia a la segregación, además en estado endurecido muestra un estético y sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y tracción indirecta mostraron un buen desempeño lo que le permite a este concreto autocompactante competir sin ningún problema con los concretos convencionales.

Todas las composiciones de mezclas de los concretos autocompactantes presentaron un flujo de asentamiento adecuado además una buena capacidad de relleno y de paso.

A pesar del alto contenido de inquemados de la ceniza volante, lo cual conlleva a una mayor demanda de agua es posible obtener CAC con propiedades mecánicas apropiadas para uso en estructuras.

Las mezclas de CAC desarrollaron resistencia a la compresión que van desde 34.9 a 47.3 MPa y de 40 a 60MPa a 28 y 90 días de curado respectivamente.

Los concretos autocompactantes adicionados con escoria presentan mejores propiedades mecánicas que los concretos autocompactantes adicionados con ceniza volante, esto se atribuye a que tiene un tamaño menor de partícula lo cual da una mayor área superficial lo cual conlleva a una reacción más acelerada además que el contenido de inquemados es mucho menor.

5 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.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barbhuiya, S. "Effects of fly ash and dolomite powder on the properties of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 3301–3305, 2011.
2. Lazniewska-Piekarczyk, B. "The influence of selected new generation admixtures on the workability, air-voids parameters and frost-resistance of self compacting concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 31, pp. 310–319, 2012.
3. Liu M. "Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash", *Construction and Building Materials*, Vol. 24, pp. 1245–1252, 2010.
4. Leemann, A., Loser, R., Münch, B. "Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.32, pp. 116–120, 2010.
5. Filho F.M., Barragán, B.E., Casas, J.R., El Debs, ALHC. "Hardened properties of selfcompacting concrete – a statistical approach". *Construction Building Materials*, Vol. 24, pp. 1608-1615, 2010.
6. Bingöl, A.F., Tohumcu, L. "Effects of different curing regimes on the compressive strength properties of self compacting concrete incorporating fly ash and silica fume". *Materials and Design*. *Materials and Design*, Vol. 51, pp. 12-18, 2013.

7. Boukendakdji, O., Kenai, S., Kadri, E.H., Rouis, F. " Effect of slag on the rheology of fresh self-compacted concrete". *Concrete Building Materials*, Vol.23, pp. 2593–2598, 2009.
8. Craeye, B, De Schutter, G., Desmet, B., Vantomme, J., Heirman, G., Vandewalle, L., Cizer, O., Aggoun, S., Kadri, E.H. "Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self compacting concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, pp. 908–913, 2010.
9. Skarendahl A, Petersson Ö. "State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, self-compacting concrete ". Cachan Cedex, Francia: RILEM Publications S.A.R.L.; 2000.
10. Bouzoubaâ N, Lachemib M. "Self compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: preliminary results". *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp. 413–420, 2001.
11. Sonebi M. "Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: modelling using factorial experimental plans". *Cem Concr Res* 2004; 34:1199–208.
12. Jagadish V, Sudharshan MS, Ranganath RV. "Experimental study for obtaining self-compacting concrete". *Indian Concrete Journal*. Vol. 77, pp.1261–1266, 2003.
13. Khurana R, Saccone R. "Fly ash in self-compacting concrete, fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete". In: Malhotra V. M. (editor), *ACI SP-199*, pp. 259– 274. 2001.
14. Khatib JM. "Performance of self-compacting concrete containing fly ash". *Construct Building Materials*, Vol. 22, pp. 1963-1971, 2008.
15. Bouzoubaa N, Lochemi M. "Self-compacting concrete incorporating high volumes of class F fly ash: preliminary result". *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 413-420, 2001.
16. Liu M. "Self-compacting concrete with different levels of pulverized fuel ash". *Construct Building Materials*, Vol. 24, pp. 1245–1252. 2010.
17. Martirena F. "Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clinker de cemento Portland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa". Universidad Central Marta Abreu de las Villas. 2004.
18. Barbara G. Kutchko y Ann G. Kim . "Fly ash characterization by SEM–EDS". Vol.85, pp, 2537–2544, 2006.
19. EFNARC. "Specification and guidelines for self-compacting concrete". EFNARC; 2006.
20. Neville, A.M. "Tecnología del concreto". México, 1ª Edición, Limusa; 1988.