

OBTENCIÓN DE CONCRETOS AUTOCOMPACTANTES EMPLEANDO RESIDUOS DE DEMOLICIÓN

Yimmy Silva^{1*}, Rafael Robayo¹, Pedro Mattey¹, Silvio Delvasto²

1: Ingeniero de Materiales, Universidad del Valle. Cali, Colombia.

2: Profesor Titular, MSc., Ph.D., Universidad del Valle. Cali, Colombia.

*e-mail: yimmy.silva@correounivalle.edu.co



RESUMEN

Uno de los principales problemas ambientales es la disposición o reciclaje de los materiales de desechos de construcción y/o demolición y el gran volumen de estos, que en una ciudad como Bogotá es del orden de 15 millones de metros cúbicos por año. Uno de los materiales más comunes en estos escombros son los residuos de ladrillos de arcilla unidos con mortero de cemento (residuo de mampostería-RM), que son una fracción importante del volumen total de desechos. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue la utilización de los residuos de mampostería molido en la producción de concretos autocompactantes (CAC) como reemplazo del cemento en porcentajes entre el 10% y el 50%. Las propiedades en estado fresco de los CAC se evaluaron mediante los ensayos de flujo de asentamiento con cono de Abrams, caja en L y embudo en V. Para poder mantener un flujo adecuado de los CAC se requirieron incrementos en el contenido de aditivo superplastificante cuando la sustitución del cemento era mayor. Igualmente, se evaluaron propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta. Se obtuvieron resultados satisfactorios en porcentajes de sustitución del 10% y 20%, aunque con porcentajes más elevados de sustitución como 30% y 50% se alcanzaron resistencias importantes, aunque fueron inferiores. Basando en los resultados experimentales, se puede afirmar que el uso de residuo de mampostería en escombros de construcción es posible en la obtención de concretos autocompactantes. Ello trae consecuencias en disminución de costos y ventajas en aspectos ambientales.

Palabras Claves: concretos autocompactantes, escombros de construcción, residuo de mampostería, ladrillo de arcilla.

OBTAINING SELF-COMPACTING CONCRETE USING DEMOLITION WASTE

ABSTRACT

One of the main environmental problems is the disposal or recycling of big volumes of waste materials from construction and / or demolition. One of the most common materials in these residues are waste clay bricks bonded with cement mortar (masonry waste-MW). Only a city as Bogotá, Colombia, produces approximately 15 million cubic meters each year of debris from construction. Therefore the aim of this investigation was the use of grinding masonry waste in the production of self-compacting concrete (SCC) as a replacement of cement at different percentages, ranging from 10% to 50% by weight. The Properties in fresh state of CAC were assessed using the slump flow cone Abrams, L-box and V- funnel. In order to maintain an adequate flow in the CAC was required increasing dosis of superplasticizer when the replacement of portland cement was greater. There was also an evaluation of mechanical properties such as compression strength and indirect tensile. The best results were obtained with substitution of cement in percentages of 10% and 20%; with higher rates of substitution as 30% and 50% there were achieved significant resistances, although they were slightly minors. Based on these experimental evidences, it can be said that the use of masonry waste is promising in the manufacture of self-compacting concrete, especially in the diminishing of costs of production and in the impact on environmental aspects.

Keywords: Self-compacting concrete, Construction debris, masonry wastes, clay bricks.

1. INTRODUCCIÓN

La gestión ambiental y el impulso al desarrollo sostenible son cada vez más rutinarios en los últimos años, la conciencia colectiva ha ido en aumento con respecto a los problemas potenciales que genera el crecimiento de la industria de la construcción en el deterioro del medio ambiente. En términos generales, la construcción no es una actividad amigable con el medio ambiente, ya que genera efectos sobre la tierra, agotamiento de recursos naturales, generación de residuos y diversas formas de contaminación como son las emisiones antropogénicas de CO₂ [1-4]. Cerca del 85% de estas emisiones provienen de la fabricación del cemento [5]. Debido a la importancia del cemento en la industria de la construcción, muchos estudios se han ocupado de sus perspectivas futuras [6-8]: Mejoras en el horno del cemento, el uso de combustibles alternativos y adiciones minerales, entre otros, que permitirán a la industria del cemento reducir las emisiones de CO₂. Por otro lado, existen desechos que no tienen todavía aplicación como adición mineral a los cementos y que originan un problema muy serio de disposición, sobre todo para las grandes ciudades, tal es el caso de Bogotá, ciudad donde se generan cerca de 15 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición al año, y ocupa el primer lugar a nivel nacional con un indicador de aproximadamente de 2000 kg de residuos de construcción por habitante/año. [9]. La utilización de los residuos de construcción en el ciclo productivo del cemento y de sus derivados es una alternativa atractiva para reducir el CO₂ emitido a la atmosfera, ya que aumenta la fracción en volumen de materiales cementicios suplementarios (MCS) disponibles y se suma a aquellos, como las cenizas volantes, escoria, puzolanas volcánicas y fillers que producen concretos más sostenibles ambientalmente, y también producen mezclas con alta capacidad de trabajo [10].

La utilización de estos materiales en la obtención de concretos autocompactantes (CAC) sería un paso positivo hacia un desarrollo sostenible. En las últimas décadas la utilización de ceniza volante en la obtención de CAC ha sido exitosa [11-13], al igual que CAC con escoria de alto horno [14-16] y fillers calizos [17,18]. Los residuos de demolición de mampostería constituyen una fracción importante de los escombros de construcción. La mampostería,

que es cualquier elemento constructivo, ya sea bloque, ladrillo de arcilla cocida, de mortero o de concreto, que aglomerados o ensamblados entre si sirven para conformar monolitos como son muros de paredes. Por la alta demanda de estos elementos constructivos es que en los residuos de construcción aparecen los de mampostería. Sin embargo, por ser considerados ‘contaminados’, ya que tienen materiales tan disímiles como arcilla cocida, morteros, concretos, estucos, pinturas, etc., prácticamente hasta el momento se les ha considerado inutilizables. Por ello, su valorización en aplicaciones de elevado consumo de adiciones, como los concretos autocompactantes, daría un valor añadido importante a la mitigación del problema de afectación al medio ambiente que generan estos residuos de construcción.

El concreto autocompactante es un tipo especial de concreto, desarrollado en Japón a finales de la década de los ochenta, para ser utilizado principalmente en estructuras reforzadas altamente congestionadas en regiones sísmicas, ya que un concreto convencional no podría fluir a través de estas zonas y se necesitaría un vibrado [19-21]. En las últimas dos décadas, el CAC se ha identificado como uno de los logros más importantes en la industria del concreto debido a su gran trabajabilidad, ya que el CAC se compacta bajo su propio peso sin ningún tipo de vibración [22].

Desde la introducción del CAC en la industria de la construcción, a principios de 1990, ha habido una profunda investigación en la evaluación de sus propiedades en estado fresco y endurecido [23,24]. Con el fin de conferir una alta fluidez a este tipo de concreto (CAC) y evitar problemas de segregación y exudación durante su transporte y colocación, se hace necesario el uso de una gran cantidad de material fino y en algunos casos la utilización de un aditivo modificador de viscosidad. Normalmente, un rango típico de la cantidad de estos finos en un CAC se encuentra en 380-600 kg/m³ [25], este contenido generalmente permite lograr la autocompactabilidad del concreto.

Además de ser costoso, el uso de elevadas cantidades de cemento, es indeseable cuando se toma en consideración el medio ambiente. Esta situación conlleva a los diseñadores a utilizar material fino en remplazo, como las cenizas volantes, humo de sílice, escoria de alto horno, puzolanas naturales y finos calizos; la utilización de

estos materiales, no solo reduce los costos, sino que proporciona un rendimiento adicional al CAC.

Por ello, el presente estudio, tuvo como objetivo evaluar el efecto de los residuos de demolición de edificaciones, que contuviesen ladrillos de arcilla y mortero de cemento como ligante (residuos de mampostería finamente molido) en la producción de concreto autocompactante. Pruebas en estado fresco, como el flujo de asentamiento con el cono de Abrams, el embudo en V y la caja en L, y pruebas en concreto endurecido, tales como resistencias a la compresión y la tracción indirecta, se llevaron a cabo en esta investigación.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

Se utilizó cemento Portland ordinario de uso general (CPO) en la preparación de todas las mezclas. El análisis químico de este material se realizó mediante fluorescencia de rayos X (FRX), el cual se observa en la Tabla 1. Se aprecia un contenido elevado de pérdida por ignición, cerca del 10%, que indica que el cemento presentaba una significativa adición calcárea.

2.1.2 Ladrillo de arcilla y mortero de cemento (Residuo de Mampostería-RM)

Como adición y/o materia prima que aporte los finos necesarios en la elaboración del concreto autocompactante se empleó un residuo de demolición de mampostería, que correspondía a un muro de ladrillo cocido proveniente de una obra pública, como se observa en la Figura. 1. Este residuo sólido es un material que no tiene uso comercial.



Figura 1. Ladrillo de arcilla y mortero de cemento (RM).

El residuo de mampostería (RM) fue triturado en una trituradora de mandíbula y molido posteriormente en un molino de bolas hasta obtener un tamaño similar al del cemento Portland. En la Figura 2, se observan las distribuciones de tamaños de partícula obtenida mediante un granulómetro laser mastersizer 2000 marca Malvern utilizando como medio dispersante agua. En los RM se identificó que el 10% de la muestra presentó un tamaño de partícula inferior a 1,74 μm , el 50% inferior a 16,45 μm , el 90% inferior a 66,11 μm y el tamaño medio de partícula alcanzado fue de 26,6 μm . El cemento tipo I, exhibe en un 10% partículas con tamaños inferiores a 1,96 μm , el 50% inferior a 15,82 μm , el 90% inferior a 46,82 y el tamaño promedio fue de 20,67. La composición química del residuo de mampostería fue obtenida por medio de la técnica de Fluorescencia de rayos X y se muestra en la Tabla 1. Se puede observar que este material está constituido principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO y algunas trazas de otros compuestos como Na_2O , K_2O . Las propiedades químicas se reportan en la Tabla 1.

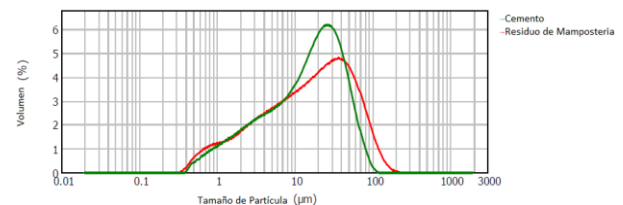


Figura 2. Distribución granulométrica del cemento y residuo de mampostería.

La caracterización mineralógica del residuo de mampostería se llevó a cabo por medio de Difracción de Rayos-X mediante un difractómetro PAnalytical, modelo X'PertPRO filtro de Nickel, usando la señal $\text{K}\alpha_1$ del Cu. Se usó un paso de $2^\circ/\text{min}$ dentro de un rango de $8^\circ - 70^\circ$. En la Figura 3 se aprecia el difractograma del residuo de mampostería donde se puede observar la presencia de fases cristalinas como el cuarzo (Q), la Albita (A) y la Cordierita (C), esta fase se forma mediante una reacción exotérmica a elevadas temperatura. El difractograma evidencia un pico de mayor intensidad identificado con un ángulo característico $2\theta = 26,64^\circ$ que indica que el polvo de ladrillo y mortero de cemento tiene una gran cantidad de Cuarzo (SiO_2 ; PDF#98-005-4677). La Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$; PDF#98-005-6885) es un silicoaluminato de sodio, perteneciente a los

feldespatos, y es el segundo mineral en esta muestra de residuo de mampostería. Además se observan varios picos característicos de Cordierita ($Mg_2(Al_4Si_5O_{18})$; PDF# 90-010-9834) con baja intensidad, lo que indica que esta fase se encuentra en una menor proporción.

Tabla 1. Propiedades químicas y físicas del cemento Portland ordinario (CPO) y del Residuo de Mampostería (RM).

Características	CPO	RM
<i>Composición Química, %</i>		
SiO ₂	19,13	54,09
Al ₂ O ₃	4,42	15,50
Fe ₂ O ₃	4,32	9,84
CaO	57,70	8,73
MgO	1,60	3,50
Na ₂ O	N.D	1,92
K ₂ O	0,28	1,29
TiO ₂	0,26	0,88
P ₂ O ₅	0,17	0,20
MnO	0,03	0,18
SO ₃	2,32	0,14
Pérdida por Ignición	9,78	3,40
<i>Propiedades Físicas:</i>		
Densidad (g/cm ³)	3,05	2,56
Tamaño de Partícula (µm)	20,67	26,6

La caracterización morfológica del residuo de mampostería se realizó mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB), la imagen se aprecia en la Figura 4. La micrografía muestra partículas irregulares de baja relación de aspecto de diferentes tamaños y una superficie semi-lisa.

2.1.3 Agregados

Se emplearon agregados disponibles de la región que cumplen con las especificaciones descritas en las normas técnicas colombiana (NTC) para la producción de mezclas de concreto. El agregado grueso (grava) que se ha empleado presentaba un tamaño máximo de 12,7 mm (1/2 pulgada) y un

predominio de partículas angulares. La arena usada es silicea y de origen natural con un módulo de finura de 2,55, con predominio de partículas redondeadas adecuada para concretos que requieren una alta manejabilidad y fluidez. La densidad relativa de la grava y la arena fueron de 2,54 g/cm³ y 2,58 g/cm³ y sus tasas de absorción fueron de 2,01% y 1,89% respectivamente. La curva granulométrica de estos agregados se observa en la Figura 5. En ella se presentan las granulometrías de los agregados de las mezclas encontrando que la combinación que exhibe un mayor ajuste granulométrico a la gradación ideal propuesta por Fuller y Thompson fue la combinación de 40% grava y 60% arena.

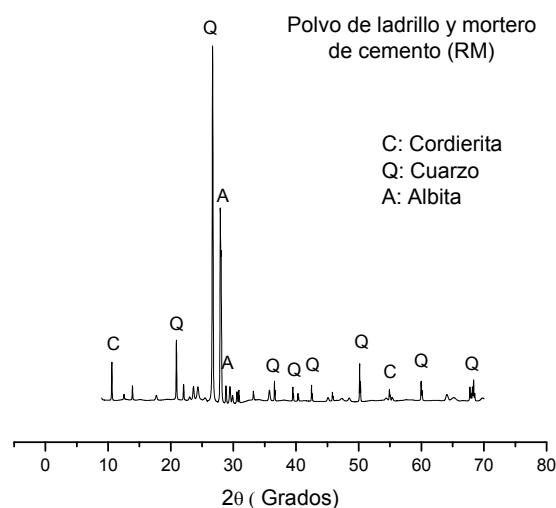


Figura 3. Patrón de difracción de rayos X de RM.

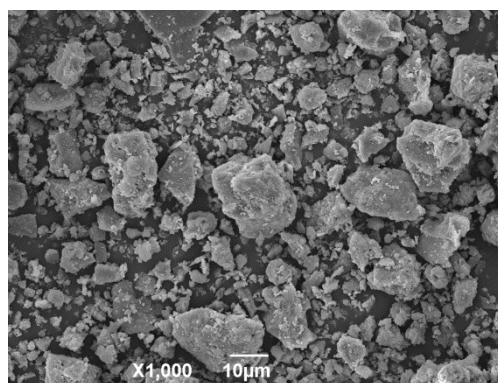


Figura 4. Micrografía de la muestra de RM.

2.1.4 Aditivo

El aditivo superplastificante (SP) usado en la

preparación de las mezclas fue el Sika Plast 326, este es un aditivo líquido, reductor de agua de alto rango, para largos tiempos de trabajabilidad y compuesto de resinas sintéticas y polímeros de última generación. Sika Plast 326 cumple con los requisitos de la norma ASTM C494 [26] y se clasifica según los parámetros establecidos en esta norma como un aditivo Tipo F.

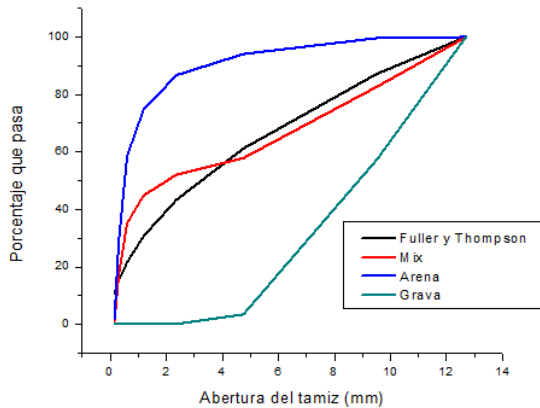


Figura 5. Granulometría de los agregados.

2.2 Proporciones de Mezclas

En el presente estudio, se realizaron cinco mezclas de CAC, una de control con un contenido de cemento de 480 kg/m³ y cuatro mezclas con diferentes porcentajes de RM en remplazo del

conglomerante. La relación agua / cemento se mantuvo constante en 0,45 y la dosificación del aditivo súperplastificante estuvo en un rango de 0,5% - 0,615% para así asegurar el cumplimiento de las propiedades en estado fresco de este tipo de concreto. La Tabla 2 presenta la dosificación y designación de las mezclas de CAC.

2.3 Mezclado y Vaciado de las mezclas

Cada una de las proporciones de las mezclas fue hecha en peso. El cemento y el RM se mezclaron en seco por separado, así como los agregados gruesos y finos. Después se adicionó ¾ del agua de amasado a la mezcla de todos los ingredientes sólidos, y por último el superplastificante con el resto del agua. Después de adicionar todos los componentes a la mezcladora y obtener una homogenización adecuada, se procedió a realizar las pruebas en estado fresco. Posterior a esto se llenaron los moldes. Las muestras se retiraron de los moldes cilíndricos después de 24 h y se curaron en agua hasta el momento de la prueba. Se utilizaron especímenes cilíndricos de 76,2 x 152,4 mm para determinar la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta, y cilindros de 76,2 x 76,2 mm para estimar las propiedades de permeabilidad como absorción y porosidad. Cada uno de los datos corresponde a un promedio de tres lecturas de prueba.

Tabla 2. Dosificación de las mezclas de concretos autocompactantes.

Mezcla	Cemento (kg/m ³)	RM (kg/m ³)	Agua (l/m ³)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
Control	480	0	216	965	643	2,64
CAC-10%	432	48	216	965	643	2,64
CAC-20%	384	96	216	965	643	2,88
CAC-30%	336	144	216	965	643	2,92
CAC-50%	240	240	216	965	643	2,95

2.4 Ensayos a las muestras

2.4.1 Propiedades del concreto en estado fresco y endurecido

Las propiedades de auto-compactabilidad se determinaron mediante los ensayos de flujo de asentamiento con cono de Abrams, tiempo T₅₀, Tiempo de flujo en el embudo en V y relación de bloqueo de la Caja en L. Con el fin de reducir el

efecto de pérdida de trabajabilidad en la variabilidad de los resultados de prueba, las propiedades en estado fresco de las mezclas se determinaron dentro de un período no mayor a 12 min después del vaciado de la mezcla. El orden de las pruebas fue:

1. Ensayo de flujo de asentamiento con cono Abrams y medición del T₅₀.
2. Caja en L.

3. Embudo en V y Embudo V a T_{5 minutos}

Las propiedades en estado endurecido de los CAC como resistencia a la compresión se realizó de acuerdo a la norma ASTM 39 [27] a 3, 7, 28 y 60 días de curado y a tracción indirecta siguiendo el método de la norma ASTM C 496 [28] a 7 y 28 días de curado; finalmente las propiedades de permeabilidad se evaluaron a 28 días de curado.

3. RESULTADOS Y DISCUSSION

3.1 Pruebas en estado Fresco

El ensayo de flujo de asentamiento por medio del cono de Abrams tiene como propósito evaluar la capacidad del concreto en deformarse bajo la acción de su propio peso sin restricción alguna, además que permite comprobar visualmente la posibilidad de segregación del concreto. Un rango de valores para un flujo de asentamiento adecuado es de 550 mm - 850 mm [25]. Si el valor es inferior a 550 mm el concreto podría tener un flujo insuficiente para pasar a través de refuerzos en estructuras altamente congestionadas y si los valores son superiores a 800 mm se deben extremar las precauciones en lo concerniente a la separación de las partículas gruesas de las otras. Todas las mezclas en estudio se

ajustaron al rango propuesto por la EFNARC, ya que el flujo de asentamiento de las mezclas de CAC estuvo en el intervalo de 585 a 740 mm. El tiempo de flujo de asentamiento para llegar a un diámetro de 500mm (T₅₀) para todas las mezclas fue menor de 4 s.

La prueba de caja en L tiene como finalidad calcular la capacidad de paso del concreto autocompactante de fluir a través de la apertura estrecha entre barras (3 en este caso), sin segregación o taponamiento. Todas las mezclas superan la relación de bloqueo excepto la mezcla de control y la que tiene una sustitución del 30% (CAC-30%), ya que la relación H2/H1 es inferior a 0.75. También se realizó la prueba de embudo en V para evaluar la fluidez y estabilidad de los CAC. Los tiempos en el embudo deben ser inferiores a 25 s de acuerdo a lo estipulado por The *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC) en 2005 [25]. Los tiempos de flujo en el embudo estaban en el rango de 4 – 15 s. Los resultados de los ensayos de los CAC se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Comportamiento en estado fresco de los concretos autocompactantes.

Característica	Control	M-10%	M-20%	M-30%	M-50%
Flujo de asentamiento (mm)	585	623	740	644	740
T ₅₀ (s)	3,78	3,01	1,85	2,52	1,99
Embudo en V (s)	4,64	14,1	4,28	13,32	10,11
Caja en L (relación H2/H1)	0,73	0,82	0,84	0,68	0,76

3.2 Resistencia en estado endurecido

La resistencia a la compresión de diversas mezclas con porcentajes diferentes de sustitución de cemento Portland en peso por RM, que van desde 0% a 50% a diferentes edades de curado (3, 7, 28 y 60 días), se observan en las Figura 6. Los resultados muestran que la resistencia a la compresión de las diferentes mezclas depende del contenido de RM en la mezcla, aunque a edades tempranas no hay una diferencia significativa en los CAC adicionadas con el 10% y 20% de RM respecto al concreto de Control. Por otra parte las mezclas con mayor porcentaje de remplazo, 30% y 50% para los concretos autocompatantes, mostraron una reducción

considerable respecto al concreto de control.

La resistencia a la tracción indirecta es una de las propiedades fundamentales del concreto que se puede relacionar con la 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 el proceso de curado [29]. Los CAC con mayores porcentajes de sustitución presentaron la menor resistencia a la tracción indirecta. La más alta resistencia a la tracción indirecta a los 28 días se obtuvo con la mezcla de referencia seguida de la CAC-20%, como se puede observar en la Figura 7.

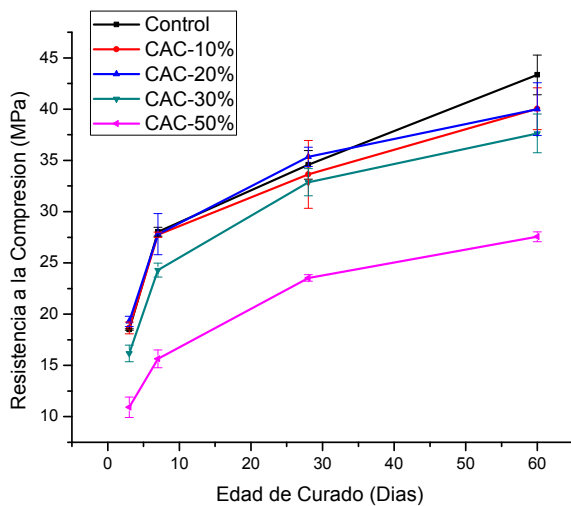


Figura 6. Resistencia a la compresión de los concretos elaborados.

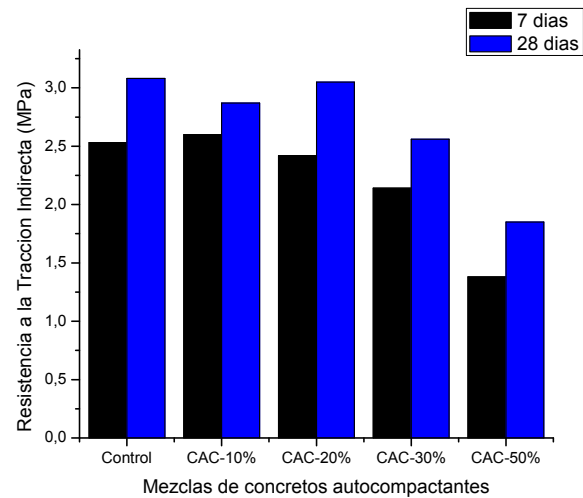


Figura 7. Resistencia a la tracción indirecta.

Tabla 4. Resultado de absorción y porosidad.

Mezcla	% de Absorción después de inmersión	Densidad Aparente (g/cm ³)	Volumen de Poros permeables (%)
Control	5,16	2,71	13,07
CAC-10%	6,21	2,65	14,18
CAC-20%	6,14	2,63	14,14
CAC-30%	7,23	2,6	15,96
CAC-50%	7,87	2,57	17,14

Los ensayos de permeabilidad: Porosidad y absorción realizados de acuerdo a la norma ASTM C 642 [30], indicaron una tendencia al aumento del volumen total de poros en los CAC al aumentar la cantidad de RM en las mezclas, esto puede ser atribuido a la mayor porosidad que tiene el RM debido a sus componentes de origen, explicando el comportamiento presentado en los ensayos de resistencia a la compresión, lo cual puede ser debido a su vez al aumento de la cantidad de superplastificante para mantener constante la relación agua / cementante conllevando a un incremento del contenido de aire en el concreto debido a que se reduce la tensión superficial del agua [31]. En la Tabla 4 se observan los resultados obtenidos por medio de este ensayo.

4. CONCLUSIONES

Con base en los resultados de esta investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La utilización de los residuos de demolición de elementos constructivos de mampostería en la producción de concretos autocompactantes como sustitución parcial del cemento es técnicamente viable. Los concretos donde se utilizaron finos de estos residuos presentaron las características necesarias para ser considerados como autocompactantes; dichas características se reflejan en flujo adecuado con buena resistencia a la segregación, exudación y una excelente capacidad de paso y de relleno, además en estado endurecido muestra un buen aspecto estético y sus propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y tracción indirecta lo que le permite a este concreto autocompactante competir sin ningún problema con el concreto convencional.

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

de control y la CAC-30% estuvo por debajo de la relación de bloqueo, presentó adecuadas propiedades en estado fresco.

La influencia de la incorporación de los finos de mampostería como sustitución parcial del cemento Portland afectó levemente el comportamiento mecánico de los concretos elaborados cuando se utilizaron porcentajes de 10% y 20%. Sin embargo, se resalta, que el desarrollo de la resistencia a la compresión a edades cortas fue aceptable, logrando incluso valores muy similares a los de la mezcla de control hasta con un 30% de reemplazo del cemento por RM.

La incorporación de los finos de mampostería como una adición que reemplaza parcialmente al cemento en la mezcla, permitió la reducción de la cantidad de cemento en cantidades que van desde el 10% al 50% en peso. Así, la utilización de este residuo es una alternativa viable que contribuiría al mejoramiento del medio ambiente, además que permitiría la reducción en el costo de producción del CAC, ya que uno de los constituyentes de los concretos como el cemento tiene un alto costo y este está siendo sustituido parcialmente. Se advierte, sin embargo, que para cualquier aplicación del CAC que se produzca con la adición de estos residuos finos, siempre son necesarios estudios de durabilidad particulares a los lotes de residuos de mampostería, debido a la variabilidad de la calidad de estos.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos al: grupo de investigación “Materiales Compuestos” de la Universidad del Valle y al proyecto VRI C.I. 747 “Reciclar Escombros en Concretos”, financiado por la Universidad del Valle, Convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigación.

6. REFERENCIAS

- [1]. Hill RC, Bowen P. “Sustainable construction: principles and a framework for attainment”. *Construction Management Economics*. 1997; (15): 223–239.
- [2]. Buildings Department; 2006. Available from: <http://www.info.gov.hk/bd/english/index.html>.
- [3]. Habert G, Arribe D, Dehove T, Espinasse L, Le Roy R. “Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges”. *Journal of Cleaner Production*. 2012; 35: 250-262.
- [4]. Wadel G. La sostenibilidad en la construcción industrializada La construcción modular ligera aplicada a la vivienda. Tesis Doctoral. Barcelona (España): Universidad Politécnica de Cataluña. www.tdx.cat/TDX-0122110-180946 (visitada 01/01/14).
- [5]. Worrell E, Martin N, Price L. “Potentials for energy efficiency improvement in the U.S”. *cement industry. Energy*. 2000; (25): 1189–1214.
- [6]. Szabó L, Hidalgo I, Cisar JC, Soria A. “CO2 emission trading within the European union and annex b countries: the cement industry case”. *Energy Policy*. 2006; (34): 72–87.
- [7]. Taylor M, Tam C, Gielen D. “Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry”. En: International Energy Agency (Ed.), *Energy Efficiency and CO2 Emission Reduction Potentials and Policies in the Cement Industry*, Paris. 2006.
- [8]. Pardo N, Moya JA, Mercier A. “Prospective on the energy efficiency and CO2 emissions in the EU cement industry”. *Energy*. 2011; (36): 3244-3254.
- [9]. Castaño J, Rodríguez R, Lasso L, Gomez A, y Ocampo S. “Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes”. *Revista Tecnura*. 2013; (17): 121-129.
- [10]. Mehta PK, Monteiro PJM. “Concrete microstructure, properties, and materials”. University of California at Berkeley: McGraw-Hill. 2006.
- [11]. Ponikiewski T, Gołaszewski J. “The effect of high-calcium fly ash on selected properties of self-compacting concrete”. *Archives of civil and mechanical engineering*, 2013.
- [12]. Ashtiani M, Scott A, Dhakal R. “Mechanical and fresh properties of high-strength self-compacting concrete containing class C fly ash”. *Construction and Building Materials*. 2013; (47): 1217–1224.
- [13]. Pathak N, Siddique R. “Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures”. *Construction and Building Materials*. 2012; (30): 274–280.
- [14]. Wang H, Lin C. “A study of fresh and engineering properties of self-compacting high slag concrete (SCHSC)”. *Construction and Building Materials*. 2013; (42): 132–136.
- [15]. Dinakar P, Sethy K, Sahoo U. “Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag”. *Materials and Design*. 2013; (43): 161–169.
- [16]. Boukendakdji O, Kenai S, Kadri E, Rouis F. “Effect of slag on the rheology of fresh self-

- compacted concrete". *Construction and Building Materials*. 2009;(23): 2593–2598.
- [17]. Mohammed M, Dawson A, Thom N. "Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler". *Construction and Building Materials*. 2013; (49): 84–92.
- [18]. Gesoglu M, Güneysisia E, Kocabag M, Bayram V, Mermerdas K. "Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash". *Construction and Building Materials*. 2012; (37): 160–170.
- [19]. Okamura H, Ouchi M. "Self- Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*". 2003; (1): 5-15.
- [20]. Filho FM, Barragán BE, Casas JR, El Debs ALHC. "Hardened properties of selfcompacting concrete – a statistical approach". *Construction Building Materials*. 2010; (24): 1608-1615.
- [21]. Siddique R, Aggarwal P, Aggarwal Y. "Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash". *Construction and Building Materials*. 2012; (29): 73–81.
- [22]. Khaloo A, Raisi E, Hosseini P, Tahsiri H. "Mechanical performance of self-compacting concrete reinforced with steel fibers". *Construction and Building Materials*. 2014; (51): 179–186.
- [23]. Felekoglu F, Turkel S, Baradan B. "Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete". *Building and Environment*. 2007; (42): 1795–1802.
- [24]. Gesoglu M, Özbay E. "Effects of mineral admixtures on fresh and hardened properties of self-compacting concretes: binary, ternary and quaternary systems". *Materials and Structures*. 2007; (40): 913–926.
- [25]. EFNARC. 2005. Specifications and guidelines for self-compacting concrete, English ed. In: *European federation for specialist construction chemicals & concrete systems*.
- [26]. Norma ASTM C494-13, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. *Book of ASTM Standards*. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2014.
- [27]. Norma ASTM C39/39M-12a, Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Book of ASTM Standards*. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2012.
- [28]. Norma ASTM C496/C496M-11, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. *Book of ASTM Standards*. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2011.
- [29]. Rafat Siddique, Paratibha Aggarwal, Yogesh Aggarwal. "Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash". *Construction and Building Materials*. 2012; (29): 73–81.
- [30]. Norma ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Book of ASTM Standards*. Vol. 04.02 (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2013.
- [31]. Piekarczyk-Łazniewska B. "The methodology for assessing the impact of new generation superplasticizers on air content in self-compacting concrete". *Construction and Building Materials*. 2014; (53): 488–502.