

Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes

Use of construction and demolition waste as supplementary cementitious material and recycled coarse aggregate in self-compacting concrete

Yimmy Silva-Urrego¹
Silvio Delvasto-Arjona²

¹ Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: yimmy.silva@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3888-457X>

² Universidad del Valle (Colombia). Correo electrónico: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9443-8238>

Recibido: 08-11-2019 Aceptado: 28-10-2020

Cómo citar: Silva-Urrego, Yimmy; Delvasto-Arjona, Silvio (2020). Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes. *Informador Técnico*, 85(1), 20-33.
<https://doi.org/10.23850/22565035.2502>

Resumen

En los últimos años, el uso del concreto autocompactante (CAC) ha ido aumentando desde su inicio, debido a la capacidad que tiene para llenar encofrados con alta densidad de aceros, por lo que el empleo de este tipo de concreto en la elaboración de muros delgados armados sería una solución al llenado incompleto de este tipo de elementos prefabricados. Por otra parte, el empleo de residuo de mampostería (RM) y agregado grueso reciclado de concreto (AGR) proveniente de residuos de construcción y demolición (RCD) como reemplazo del cemento (20 % en volumen) y del agregado grueso, respectivamente, daría un enfoque sostenible al concreto autocompactante. El objetivo de este estudio fue evaluar la influencia de los RCD en las propiedades en estado fresco (flujo de asentamiento, embudo en V y caja en L) y estado endurecido (resistencia a la compresión, tracción indirecta y compresión diagonal de muretes) de concretos autocompactantes. Las mezclas de CAC propuestas muestran que cuando se sustituye el cemento Portland y el agregado natural por RM y AGR, respectivamente, los concretos pueden satisfacer los requerimientos de las directrices europeas de *European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete* (EFNARC por sus siglas en inglés). En estado endurecido, los CAC con RCD lograron un desempeño aceptable en comparación con la mezcla de referencia (CAC-referencia). Todas las mezclas lograron una resistencia a la compresión superior a los 21 MPa (28 días), adecuada para muros divisorios de casas, de acuerdo al Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR 10).

Palabras clave: concreto autocompactante; residuo de mampostería; agregado grueso reciclado, resistencia a la compresión; muretes.

Abstract

In the last year, the use of self-compacting concrete (SCC) has been increasing since its start due to the capacity it has to fill formwork with a high density of steels, so the use of this type of concrete in the elaboration of reinforced thin walls would be a solution to incomplete filling of this type of prefabricated elements. On the other hand, the use of masonry residue (RM) and recycled coarse concrete aggregate (AGR) from construction and demolition waste (CDW) as a replacement for cement and coarse aggregate respectively would give a sustainable approach to self-compacting concrete. This study aimed to evaluate the influence of CDW on the properties in the fresh state (slump flow, V-funnel, and L-box) and hardened state in cylindrical specimens (compressive strength and splitting tensile strength) and in walls (diagonal tension strength). The mixtures of CAC show that when Portland cement and natural aggregate are replaced by RM and AGR respectively, the concrete can meet the requirements of the European guidelines of the European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC). In the hardened state, CACs with CDW achieved acceptable performance compared to the reference mixture (CAC-reference). All mixtures achieved compressive strength greater than 21 MPa suitable for house walls according to (NSR 10).

Keywords: self-compacting concrete; masonry residue; recycled coarse aggregates; compressive strength; walls.

1. Introducción

Actualmente, en la construcción de edificios e infraestructura civil se ha vuelto muy común el uso de elementos prefabricados de concreto y uso del concreto autocompactante (CAC), debido a las diferentes ventajas que su uso promueve, como lo son la reducción del tiempo en obra y un mayor control de calidad (Wang; Kim; Cheng; Sohn, 2016; Han; Song; Liu; Huang 2019; Duan; Singh; Xiao; Hou 2020). Sin embargo, el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) en los elementos prefabricados o en la elaboración de estructuras de concreto se ha vuelto esencial (Nibhanupudi; Rahul, 2020), ya que el uso de RCD permite reducir el impacto de estos residuos al ambiente y a la salud, así como mejorar la eficiencia de los recursos naturales disponibles (González; Gyarre; Pérez; Ros; López, 2017). Se estima que se producen más de 25 mil millones de toneladas de concreto en el mundo, lo que equivale en promedio a 1 m³ por persona (Amer; Ezziane; Bougara; Adjoudj, 2016), y al mismo tiempo se producen 10 mil millones de toneladas de RCD en todo el planeta, de las cuales Estados Unidos aporta aproximadamente 700 millones de toneladas, China aporta alrededor de 2.300 millones de toneladas y la Unión Europea más de 800 millones de toneladas (Wu; Zuo; Zillante; Wang; Yuan, 2019).

Una alternativa de solución a la problemática generada por los residuos de construcción y demolición y la alta demanda de recursos naturales es el empleo de estos residuos como agregados en la producción de concreto (Andal; Shehata; Zacarias, 2016; Ahmed; Tiznobaik; Huda; Islam; Alam, 2020; de Brito-Prado Vieira; de Figueiredo; John, 2020). El concreto endurecido se tritura y se procesa para producir agregado reciclado de concreto (ARC). En la actualidad, los ARC se emplean como material para base y subbase, relleno granular y para la elaboración de concreto y asfalto (Butler; West; Tighe, 2012; Tam; Soomro; Evangelista, 2018; Maduabuchukwu; Yap; Onn; Yuen; Ibrahim, 2020). El empleo de ARC ayuda a mitigar la deposición de los RCD, lo que contribuye a la preservación del ambiente, además de reducir los costos en la construcción, ya que cuando se utilizan estos directamente en la obra, ayuda a disminuir al mínimo los gastos de transporte, ahorro de su disposición final en vertederos, recuperación de tierras, reducción de la deforestación y extracción de agregados naturales de lechos de ríos, lagos y otras fuentes que generan problemas ambientales (Boudali; Kerdal; Ayed; Abdulsalam; Soliman, 2016; Asutkar; Shinde; Patel, 2017; Ahmed *et al.*, 2020). El uso de agregado reciclado ha venido aumentando, debido a la importancia de un desarrollo sostenible del sector de la construcción. Numerosas investigaciones se han llevado a cabo sobre el uso potencial de los agregados reciclados en la elaboración de concreto, encontrando resultados satisfactorios (Poon; Chan, 2007; Kou; Poon; Wan, 2012; Xiao; Ma; Ding, 2016; Silva; Robayo; Matthey; Delvasto, 2016; Wang *et al.*, 2017).

Los residuos de construcción y demolición presentan una composición variada de componentes, que en su gran mayoría está constituido por concreto (alrededor del 40 %) y cerámicos (alrededor del 30 %) (Oikonomou, 2005; Ozal; Yilmaz; Kara; Kaya; Şahin, 2016). Entre los materiales cerámicos se encuentran los residuos de ladrillo de arcilla cocida que generalmente están mezclados con mortero de pega basado en cemento Portland (residuo de mampostería-RM); este tipo de residuo se genera en grandes cantidades y su reutilización es posible como un *filler* o como material cementicio suplementario si presenta actividad puzolánica. El uso del RM o polvo híbrido proveniente de los RCD se ha estudiado muy poco. Sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios (Silva; Robayo; Matthey; Delvasto, 2015; Zhu; Mao; Qu; Li; John, 2016; Li; Lin; Chen; Kwan, 2020). El empleo de este material como suplementario del cemento Portland es una gran alternativa y más cuando se utiliza en la elaboración de concretos autocompactantes (CAC), ya que este tipo de material compuesto permite el empleo de grandes cantidades de *filler* o adiciones.

El CAC se desarrolló en Japón a finales de 1980, debido a los problemas que se presentaban en estructuras altamente reforzadas, además de los problemas en el vaciado de los concretos cuando se vibraban por operarios sin experiencia y generaban inconvenientes en la mezcla. Los CAC tienen ventajas, como menores tiempos en obra, mayor libertad de diseño, fácil llenado en elementos o estructuras densamente reforzadas sin vibración, mejora el ambiente de trabajo y presenta excelente acabado superficial (Khayat; Hu; Monty, 1999; Sun; Chen; Xiao; Liu, 2020; Surya; Venkateswara, 2020).

Este trabajo de investigación pretende facilitar el uso integral del residuo de mampostería y agregado reciclado proveniente de los RCD. La trabajabilidad del concreto autocompactante es de gran importancia, por lo que se evaluó la fluidez, capacidad de llenado y capacidad de paso mediante las pruebas de flujo de asentamiento con cono de Abrams, el ensayo del embudo en V y caja en L, respectivamente. En estado endurecido se evaluó propiedades mecánicas, como resistencia a la compresión, tracción indirecta en cilindros y compresión diagonal en muretes para determinar su desempeño mecánico y posibles aplicaciones en viviendas de los CAC desarrollados.

2. Programa experimental

2.2. Materiales

Cemento Portland Argos® de uso general, arena de río, grava triturada natural, residuo de mampostería (RM) proveniente de la demolición de muros y agregado grueso reciclado de concreto (AGR) proveniente de remodelaciones de la Universidad del Valle (Figura 1) fueron empleados para la elaboración de los CAC. El agregado grueso natural (AGN) y reciclado (AGR) se adecuaron con un tamaño máximo de 12,7 mm para su empleo. El residuo de mampostería se sometió a un proceso de molturación en dos etapas. En primera instancia, el RM se realizó una reducción de tamaño mediante una trituradora de mandíbula y luego en un molino de bolas, donde se obtuvo un tamaño medio de partícula de 26,6 μm . También, se evaluó el índice de actividad de resistencia (IAR) de acuerdo con la ASTM C618, donde el RM presentó un valor de 82,6 %, siendo adecuado mecánicamente como material puzolánico, ya que superó el límite establecido (75 %). Para el AGR se realizó una trituración manual mediante el empleo de una porra y posterior a ello se pasó por una trituradora de mandíbula con una abertura adecuada para obtener un tamaño máximo de 12,7 mm y así cumplir con uno de los requerimientos expuestos en la EFNARC para la producción de CAC (EFNARC, 2002). Se empleó un superplastificante (SP) SikaPlast MO de última generación para lograr una adecuada trabajabilidad. La composición química del cemento Portland y el RM se muestran en la Tabla 1.



Figura 1. (a) Residuo de mampostería y (b) Residuo de concreto
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.

Análisis de FRX del cemento Portland (OPC) y residuo de mampostería (RM)

Oxido/elemento	OPC (% en masa)	RM (% en masa)
SiO ₂	19,13	54,09
TiO ₂	0,26	0,88
Al ₂ O ₃	4,42	15,51
Fe ₂ O ₃	4,32	9,84
Mn ₃ O ₄	0,03	-
MgO	1,6	3,50
CaO	57,7	8,73
Na ₂ O	N.D	1,93
K ₂ O	0,28	1,30
P ₂ O ₅	0,17	0,20
SO ₃	2,32	-
LOI	9,78	3,47

N.D: No determinado. LOI: Pérdida al fuego

Fuente: elaboración propia.

La distribución del tamaño de partícula de los agregados se evidencia en la Figura 2. La arena presenta un módulo de finura de 2,55 mientras que los agregados gruesos (AGN y AGR), un tamaño máximo de 12,7 mm. En la Figura 2, también se puede observar que el AGR presenta una mayor finura que el AGN, lo que significaría una mayor demanda de agua, debido a una mayor área superficial. Por otra parte, en la Tabla 2 se muestra que el AGR presenta una absorción de 7,28 % debido al mortero adherido que le confiere una mayor porosidad, la cual es mayor que la presentada por el AGN. La pérdida de trabajabilidad por la mayor demanda de agua en los CAC con AGR se corrigió mediante el uso de una mayor dosis de superplastificante (SP), con la finalidad de mantener la relación agua/cementante constante. El Coeficiente de Los Ángeles presentado por los agregados gruesos fue de 16,39 % y 33,65 % para el AGN y AGR, respectivamente, lo que indica que son aceptables para la elaboración de concretos, ya que el Coeficiente de Los Ángeles no excedió el 50 % (ASTM C33).

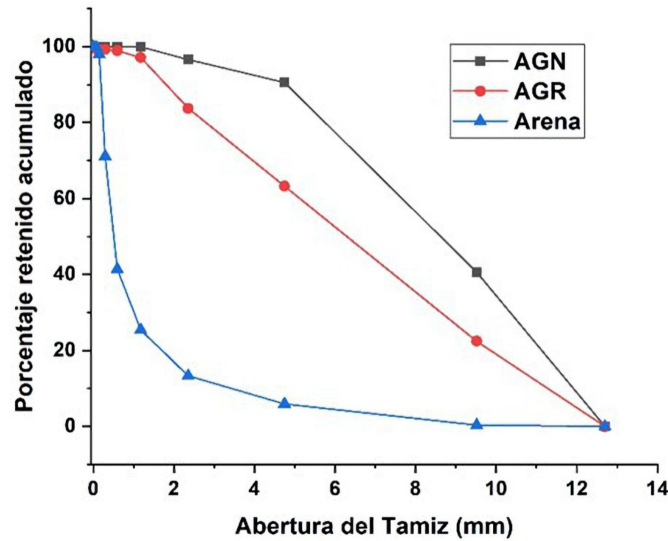


Figura 2. Distribución de tamaño de partícula de agregados para las mezclas de CAC
Fuente: elaboración propia.

Tabla 2.

Características de los agregados usados para las mezclas de CAC

Ensayo	Norma	Arena	AGN	AGR
Densidad Aparente (Bulk)	NTC 237	2,57 g/cm ³	2,54 g/cm ³	2,26 g/cm ³
Absorción	NTC 237/176	1,97 %	2,01 %	7,28 %
Masa Unitaria Suelta	NTC 92	1,59 g/cm ³	1,47 g/cm ³	1,26 g/cm ³
Masa Unitaria Compacta	NTC 92	1,69 g/cm ³	1,49 g/cm ³	1,46 g/cm ³
Módulo de finura	NTC 77	2,55	6,38	5,65
Impurezas orgánicas	NTC 127	Color No. 3	-	-
Tamaño máximo	NTC 77	-	12,7 mm	12,7 mm
Coefficiente de Los Ángeles	ASTM C131	-	16,39 %	33,65 %

Fuente: elaboración propia.

2.3. Proporciones de mezcla

El diseño de mezclas de todos los CAC de este estudio se presenta en la Tabla 3. El contenido de agua se mantuvo constante en 225 kg/m³ al igual que el volumen de cementante (finos) en 16,1 %, y a todas las mezclas antes del proceso de mezclado se efectuó la corrección de humedad de los agregados. Una mezcla de control con 100 % OPC (CAC-referencia) y agregados naturales, y tres mezclas de CAC con material proveniente de RCD como reemplazo parcial del OPC y/o del AGN, fueron producidas. EL CAC con un reemplazo de 20 % de OPC por RM se denominó CAC-20 % RM, y la mezcla que presentaban reemplazó en volumen del 10 % y 59 % de AGR por AGN (la selección de este último porcentaje de AGR se realizó de acuerdo con una investigación previa de Silva; de Brito; Dhir (2015) y (Silva *et al.*, 2016), se denominaron CAC-20 % RM-10 % AGR y CAC-20 % RM-59 % AGR, respectivamente. Con el fin de satisfacer los requerimientos de trabajabilidad de *European Project Group* (EPG, 2005) para la producción de los CAC, la cantidad de SP se ajustó en un rango de 4,99-5,79 kg/m³.

Tabla 3.

Proporciones de las mezclas de CAC

	CAC	CAC-20 %	CAC-20 % RM-10 %	CAC-20 % RM-59 %
	Referencia	RM	AGR	AGR
MATERIAL	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)	Proporciones (kg/m ³)
Cemento (OPC)	500	400	400	400
RM	-	83,5	83,5	83,5
AGN	623,52	623,52	561,18	252,54
AGR	-	-	55,48	323,46
Arena	946,34	946,34	946,34	946,34
Agua	225	225	225	225
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45
Aditivo SP	4,99	5,37	5,39	5,79

Fuente: elaboración propia.

2.4. Trabajabilidad

Las pruebas en estado fresco se realizaron de acuerdo con las especificaciones y directrices europeas para concretos autocompactantes (EFNARC 2002). Los resultados de las pruebas se compararon con la EPG (2005). Las pruebas que se llevaron a cabo para medir la trabajabilidad de los concretos fueron: el ensayo de flujo de asentamiento con cono de Abrams, la resistencia a la segregación por medio del ensayo de embudo en V y la capacidad de paso mediante la caja en L. Todas las pruebas se realizaron 8 minutos después de iniciar la mezcla para evitar cualquier pérdida de trabajabilidad.

2.5. Ensayos en estado endurecido

La resistencia a la compresión se realizó en probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro y 152,4 mm de alto a diferentes edades de curado (28, 60 y 90 días) siguiendo la norma ASTM C39, y utilizando una prensa hidráulica ELE internacional de 1000 KN de capacidad.

La resistencia a la tracción indirecta se midió en cilindros de 76,2 mm de diámetro y 152,4 mm de alto, después de 28, 60 y 90 días de curado, de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM C496.

El ensayo de compresión diagonal se realizó en muretes de 400 mm x 400 mm x 90 mm, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM E519. Los elementos se curaron bajo agua durante un periodo de 28 días, tiempo en el cual se evaluó la resistencia. Antes de la prueba, los muretes se giraron 45 grados para que descansaran sobre la esquina inferior y se pudiera aplicar la carga vertical en la esquina superior (opuesta).

3. Resultados y discusiones

3.1. Trabajabilidad

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de las diferentes mezclas en estado fresco. El flujo de asentamiento (SF) de todos los CAC supera el límite inferior (550 mm) establecido por la EPG (EPG, 2005). Cuando mayor es el flujo de asentamiento, mayor es la deformabilidad del material, indicando la capacidad que tiene la mezcla

para alcanzar un área distante desde el punto de introducción del concreto (Manzi; Mazzotti; Bignozzi, 2017). Las mezclas con AGR mostraron valores de SF mayores que el CAC de referencia, esto se atribuye a la ligera cantidad mayor de superplastificante (SP) utilizada en estas dos mezclas. El CAC de referencia con 10 % y 59 % de AGR de acuerdo con esta prueba (flujo de asentamiento), se clasifica como SF1, apropiado para estructuras no reforzadas o ligeramente reforzadas y fundiciones mediante bombas y secciones pequeñas donde el flujo horizontal no es prolongado. Por otro lado, el CAC con 20 % de RM se clasifica como SF2, apropiado para diversas aplicaciones como paredes y columnas (EPG, 2005).

La prueba de embudo en V permite evaluar la viscosidad y la capacidad de llenado, encontrando que la presencia de RM y una mayor dosis de SP en el CAC generó un menor tiempo de flujo, sin embargo, cuando al CAC con RM presentó en su dosificación AGR, el tiempo de flujo en el embudo en V aumentó, esto atribuido a la mayor rugosidad y angularidad (Santos; da Silva; de Brito, 2019). Las mezclas se clasifican de acuerdo a esta prueba como VF1, indicando que todos los CAC presentan una buena capacidad de llenado (EPG, 2005). La prueba de caja en L evalúa la habilidad que tiene el concreto para pasar a través de armaduras y refuerzos. Se encontró que el índice de capacidad de paso (H2/H1), el cual es la relación de alturas de la sección horizontal (H2) y vertical (H1), disminuye a medida que aumenta el contenido de AGR. Sin embargo, se obtuvieron valores dentro del rango de aceptabilidad ($\geq 0,80$), de acuerdo con la EPG y se clasifican como PA2 (EPG, 2005). Las mezclas mostraron un buen desempeño en estado fresco.

Tabla 4.
Resultados de los ensayos de trabajabilidad de las mezclas de CAC

Prueba	CAC Referencia	CAC-20 % RM	SCC-20 % RM-10 % AGR	SCC-20 %-59 % AGR
Flujo de asentamiento (mm)	600	660	640	630
Caja en L (H2/H1)	0,80	0,85	0,83	0,82
Embudo en V (s)	3,84	3,31	3,63	3,52

Fuente: elaboración propia.

3.2. Resistencia a la compresión

Los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas de CAC se presentan en la Figura 3. En general, las mezclas en las diferentes edades de curado que contenían RCD en su composición presentaron una disminución de la resistencia a la compresión. Una disminución del orden del 12,3 % en la resistencia a la compresión a los 28 días de curado se observó cuando se reemplazó el 20 % de OPC por RM en ese mismo periodo, siendo congruente con el IAR presentado por el RM a los 28 días, donde la resistencia a la compresión del mortero con RM disminuye en comparación al mortero de referencia. A los 90 días de curado, la disminución fue de 10,2 % para la mezcla con RM en comparación con el CAC de referencia, esta reducción se atribuye al moderado efecto puzolánico que presenta el residuo de mampostería, siendo similar al comportamiento reportado por otros autores (Malhotra; Mehta, 1996; Schackow; Stringari; Senff; Correia; Segadães, 2015). Es probable que el CAC 20 % RM llegue a desarrollar una resistencia similar al CAC referencia a edades más prolongadas de curado, esto atribuido a la fijación de la portlandita (hidróxido de calcio) y la fase activa del RM. Por lo tanto, la caída de la resistencia a tempranas edades puede ser compensada por la actividad puzolánica del RM que se verá mejorada a edades largas de curado (Naceri; Hamina, 2009).

Por otra parte, los CAC-20 % RM con reemplazos de 10 % y 59 % de AGR por AGN presentaron una reducción de la resistencia a la compresión del 14,3 % y 34,9 %, respectivamente, esto se atribuye al mortero adherido al agregado reciclado que presenta una estructura porosa débil que afecta el modo de falla del concreto,

además de la pobre adherencia entre el mortero adherido y el agregado reciclado (Behera; Bhattacharyya; Minocha; Deoliya; Maiti, 2014). Por otra parte, la influencia del AGR respecto a la acción mecánica también depende del nivel de reemplazo (Ajdukiewicz; Kliszczewicz, 2002; McNeil; Kang, 2013), como se puede observar el menor desempeño lo presentó el CAC con 59 % de AGR, con relación al CAC que tenía en su composición un 10 % de AGR. Otro factor que influencia en la resistencia a la compresión es la zona de transición interfacial (ZTI), ya que la vieja ZTI gobierna la resistencia del concreto cuando la mezcla presenta baja relación agua/cementante. Además, la ZTI es una de las zonas más débiles del concreto y cuando se emplea AGR, el nuevo concreto presentará una zona de interfaz vieja y una nueva zona de interfaz (Figura 4).

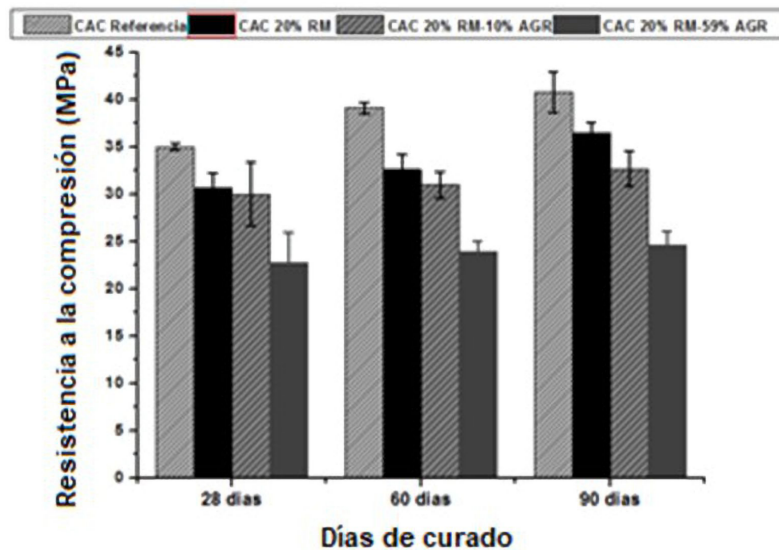


Figura 3. Resistencia a la compresión de las mezclas de CAC
Figura: elaboración propia.



Figura 4. Vista de sección de la vieja y nueva ZTI del CAC 20 % RM con AGR
Figura: elaboración propia.

3.3. Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la compresión y tracción son propiedades del concreto que se deben de conocer para el diseño de estructuras. En algunas aplicaciones prácticas, como estructuras de concreto no reforzado, estructuras bajo carga sísmica, pavimentos y losas, el valor de la resistencia a la tracción es aún más importante que la resistencia a la compresión (Zain; Mahmud; Ilham; Faizal, 2002). De acuerdo con la información disponible, la resistencia a la tracción indirecta es otra propiedad que se ve afectada por la presencia de agregado reciclado (Khoshkenari; Shafigh; Moghimi; Mahmud, 2015; Silva *et al.*, 2015). La Figura 5 muestra la resistencia a la tracción indirecta de los CAC a 28, 60 y 90 días de curado. Todas las mezclas con RCD presentaron una menor resistencia a la tracción indirecta en comparación con el CAC de referencia, la cual, es más notable en la mezcla con mayor cantidad de AGR (CAC 20 % RM-59 % AGR), donde hay una reducción del 25,2 % de esta propiedad a los 28 días de curado. Este comportamiento se atribuye a la presencia de una mayor porosidad y menor resistencia de los AGR. Además, McNeil; Kang (2003) mencionan en su investigación de revisión que el mortero adherido en el agregado reciclado es responsable de la disminución de la resistencia a la tracción indirecta (McNeil; Kang, 2013).

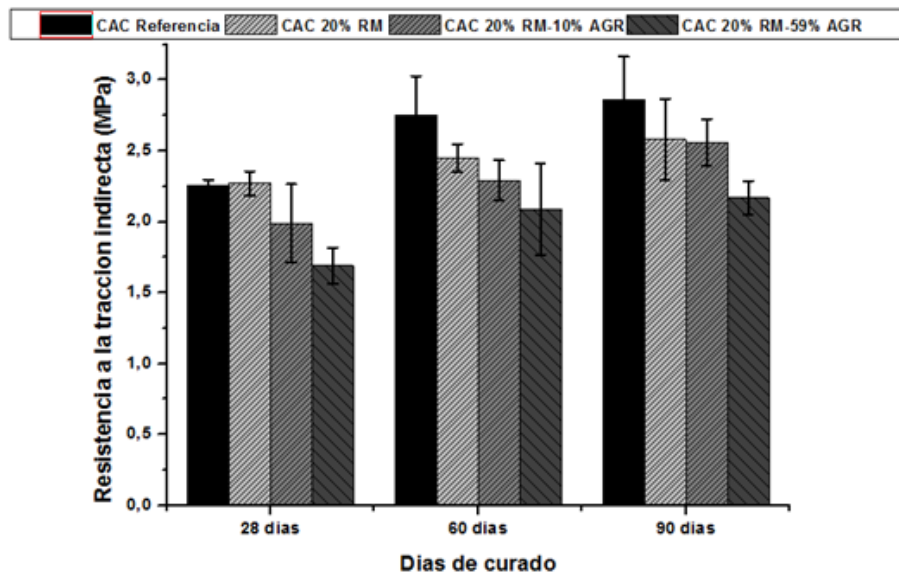


Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas de CAC
Fuente: elaboración propia.

3.4. Resistencia a compresión diagonal de muretes

La determinación de la resistencia a compresión diagonal de los muretes se realizó a los 28 días de curado, en el cual se emplearon tres muestras por cada tipo de mezcla. En la Figura 6 se muestra el montaje realizado para la ejecución del ensayo. En la Figura 7 se presentan los valores de carga máxima aplicada de cada una de las mezclas de CAC. Respecto al desempeño de los muretes, la falla típica asociada es causada por la pérdida de estabilidad geométrica del murete debido a presión ejercida, generando deformaciones excesivas en el estado último (Golondrino; Bonilla; Gaviria; Giraldo, 2008). Al igual que la resistencia a la compresión y tracción indirecta, esta resistencia se ve afectada por la presencia de RCD, ya sea como reemplazo de OPC o del agregado natural, presentando una disminución en el desempeño. El CAC 20 % RM presentó una pérdida de resistencia de 4,53 % y los CAC con 10 % y 59 de AGR mostraron un desempeño menor de 6,05 % y 15,41 %, respectivamente, en comparación con el murete de referencia.

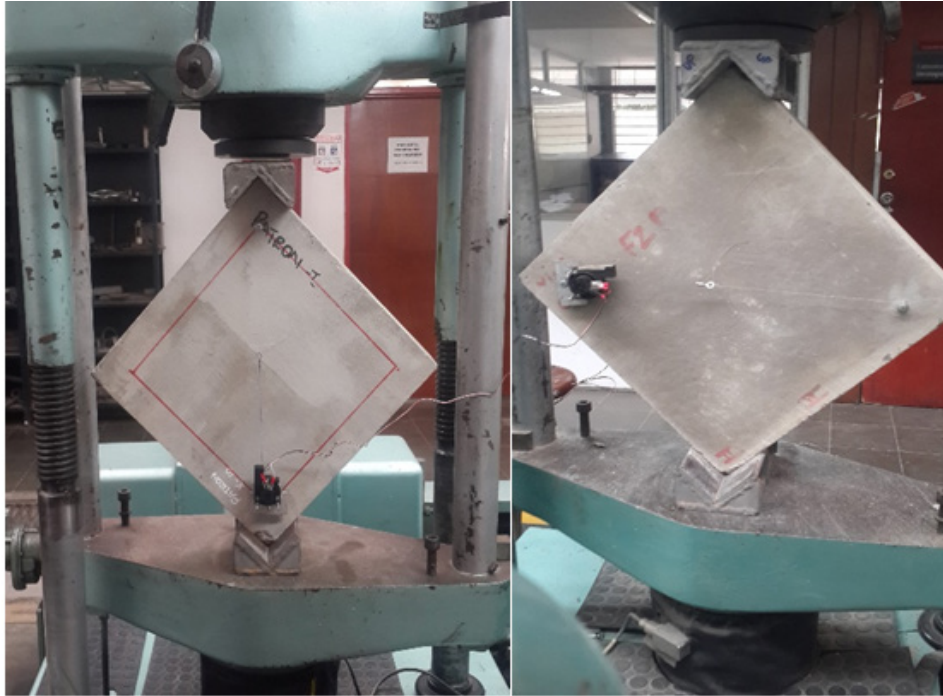


Figura 6. Ensayo realizado a muretes de CAC
Fuente: elaboración propia.

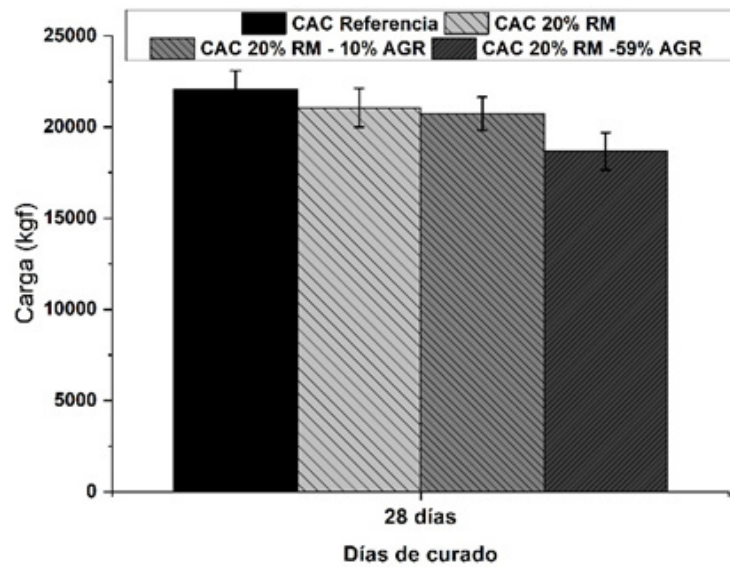


Figura 7. Carga máxima aplicada a muretes de CAC
Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Basado en los resultados de las propiedades en estado fresco y endurecido de los CAC con RM como material cementicio suplementario y AGR como AGN, se consideran las siguientes conclusiones:

La utilización del residuo de mampostería en la producción de concretos autocompactantes como sustituto parcial del cemento es técnicamente viable, debido a que los CAC donde había presencia de RM cumplieron con los requerimientos de trabajabilidad, como son una fluidez adecuada, buena capacidad de llenado y de paso. Además, en estado endurecido, los CAC con RM mostraron aceptables propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, la cual superó la resistencia mínima (21 MPa), según la NSR-10 Título C para estructuras de concreto con capacidad DMO y DES.

A edades de curado prolongadas (90 días), el CAC con RM generó una mayor ganancia de resistencia en comparación al CAC de referencia.

El empleo de agregado grueso reciclado afecta la trabajabilidad del concreto autocompactante, debido a su morfología y mayor capacidad de absorción, por lo cual se debe hacer un mayor uso de aditivo superplastificante para contrarrestar este efecto sobre las propiedades en estado fresco.

La resistencia a la compresión, tracción indirecta y a la compresión diagonal de muretes se ve afectada por el empleo de residuos de construcción y demolición cuando se utiliza como adición (RM) y/o como agregado natural el agregado grueso reciclado (AGR), presentándose una mayor pérdida de esta propiedad cuando la cantidad de AGR es mayor.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Valle, especialmente a la Escuela de Ingeniería de los Materiales y al Grupo Materiales Compuestos (GMC). A Colciencias-Minciencias y al proyecto 21060 "Aerogeles silíceas obtenidas de la cascarilla de arroz mediante un proceso químico sostenible para aplicaciones en súper aislamiento térmico de edificaciones".

Referencias

- Ajdukiewicz, Andrzej; Kliszczewicz, Alina (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24 (2), 269–279.
[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
- Ahmed, Humera; Tiznobaik, Mohammed; Huda, Sumaiya; Islam, Shahidul; Alam, Shahria (2020). Recycled aggregate concrete from large-scale production to sustainable field application. *Construction and Building Materials*, 262, 119979.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119979>
- Amer, Adem; Ezziane, Karim; Bougara, Abdelkader; Adjoudj, M'Hamed (2016). Rheological and mechanical behavior of concrete made with pre-saturated and dried recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 123, 300–308.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.107>

- Andal, Jonathan; Shehata, Medhat; Zacarias, Philip (2016). Properties of concrete containing recycled concrete aggregate of preserved quality. *Construction and Building Materials*, 125, 842–855.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.110>
- Asutkar, Priyanka; Shinde, S.; Patel, Rakesh (2017). Study on the behavior of rubber aggregates concrete beams using analytical approach. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 20 (1), 151-159.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.07.007>
- Behera, Monalisa; Bhattacharyya, S.; Minocha, A.; Deoliya, R.; Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68, 501-516.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Boudali, S.; Kerdal, D.; Ayed, K.; Abdulsalam, B.; Soliman, A. (2016). Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack. *Construction and Building Materials*, 124, 705–713.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.058>
- Butler, Liam; West, Jeffrey; Tighe, Susan (2012). Effect of recycled concrete aggregate properties on mixture proportions of structural concrete. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2290 (1), 105–114.
<https://doi.org/10.3141/2290-14>
- de Brito-Prado, Luiz; de Figueiredo, Antonio; John, Vanderley (2020). Evaluation of the use of crushed returned concrete as recycled aggregate in ready-mix concrete plant. *Journal of Building Engineering*, 31, 101408.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101408>
- Duan, Zhenhua; Singh, Amardeep; Xiao, Jianzhuang; Hou, Shaodan (2020). Combined use of recycled powder and recycled coarse aggregate derived from construction and demolition waste in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119323.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119323>
- EFNARC (2002). *Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable – HAC*. Recuperado de:
<http://www.efnarc.org/pdf/SandGforSCCSpanish.pdf>
- EPG (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use*. Recuperado de: https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf
- Golondrino, José; Bonilla, Diego; Gaviria, John; Giraldo, John (2008). Ensayos a compresión y tensión diagonal sobre muretes hechos a base de papel periódico reciclado y engrudo de almidón de yuca. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(3), 145-154.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732008000300002>
- González, Jesús; Gayarre, Fernando; Pérez, Carlos; Ros, Pedro; López, Miguel (2017). Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*, 149, 507-514.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.147>
- Han, Fanghui; Song, Shaomin; Liu, Juanhong; Huang, Shun (2019). Properties of steam-cured precast concrete containing iron tailing powder. *Powder Technology*, 345, 292–299.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.01.007>

- Khayat, K.; Hu, C.; Monty, H. (1999). Stability of Self consolidating concrete, advantages, and Potential applications. In: A. Skarendahl, Ö Petersson (Eds.). *RILEM international conference on self-compacting concrete* (pp. 143–52). Stockholm, Sweden.
- Khoshkenari, Adel; Shafigh, Payam; Moghimi, Mahmoud; Mahmud, Hilmi (2014). The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Desing*, 64, 345-354.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.07.048>
- Kou, Shi-Cong; Poon, Chi-Sun; Wan, Hui-Wen (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 36, 881-889.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.060>
- Surya, Gabbiti; Venkateswara, A. (2020). A detailed report on various behavioral aspects of self-compacting concrete. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.273>
- Li, L.; Lin, Z.; Chen, G.; Kwan, A. (2020). Reutilizing clay brick dust as paste substitution to produce environment-friendly durable mortar. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122787.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122787>
- Maduabuchukwu, Chidozie; Yap, Soon; Onn, Chiu; Yuen, Choon; Ibrahim, Hussein (2020). Utilisation of recycled concrete aggregates for sustainable highway pavement applications; a review. *Construction and Building Materials*, 235, 117444.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117444>
- Malhotra, V.; Mehta, P. (1996). *Pozzolanic and Cementitious Materials*. Amsterdam, The Netherlands: Gordon and Breach.
- Manzi, Stefania; Mazzotti, Claudio; Bignozzi, Maria (2017). Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: Study of the long-term properties. *Construction and Building Materials*, 157, 582–590.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.129>
- McNeil, Katrina; Kang, Thomas (2013). Recycled concrete aggregates: a review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7 (1), 61–69.
<https://doi.org/10.1007/s40069-013-0032-5>
- Naceri, Abdelghani; Hamina, Makhloufi (2009). Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar. *Waste Management*, 29 (8), 2378–2384.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.03.026>
- Nibhanupudi, Pratyusha; Rahul, Gnana (2020). Comparative study on use of precast framed structure and precast load bearing wall structure. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.219>
- Oikonomou, Nik (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315-318.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
- Ozal, Fatih; Yilmaz, Halit; Kara, Mustafa; Kaya, Omer; Sahin, Aylin (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving Stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17-23.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Poon, Chi-Sun; Chan, Dixon (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50 (3), 293-305.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>

- Santos, S.; da Silva, P.; de Brito, J. (2019). Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. *Journal of Building Engineering*, 22, 349–371.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.001>
- Schackow, A.; Stringari, D.; Senff, L.; Correia, S.; Segadães A. (2015). Influence of fired clay brick waste additions on the durability of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 62, 82–89.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.019>
- Silva, R.; de Brito, J.; Dhir, R. (2015). Tensile Strength Behaviour of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 83, 108-118.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>
- Silva, Yimmy; Robayo, Rafael; Matthey, Pedro; Delvasto, Silvio (2015). Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 35 (1), 86-94.
- Silva, Yimmy; Robayo, Rafael; Matthey, Pedro; Delvasto, Silvio (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639-644.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>
- Sun, Chang; Chen, Qiuyi; Xiao, Jianzhuang; Liu, Weidong (2020). Utilization of waste concrete recycling materials in self-compacting concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104930.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104930>
- Tam, Vivian; Soomro, Mahfooz; Evangelista, Ana (2018). A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Construction and Building Materials*, 172, 272–292,
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.240>
- Wang, Jianyun; Vandecyvery, Brecht; Vanhessche, Sam; Schoon, Joris; Boon, Nico; De Belie, Nele (2017). Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 156, 355-366.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.051>
- Wang, Qian; Kim, Min-Koo; Cheng, Jack; Sonh Hoon (2016). Automated quality assessment of precast concrete elements with geometry irregularities using terrestrial laser scanning. *Automation in Construction*, 68, 170-182.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.03.014>
- Wu, Huanyu; Zuo, Jian; Zillante, George; Wang, Jiayuan; Yuan, Hongping (2019). Status quo and future directions of construction and demolition waste research: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118163.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118163>
- Xiao, Jianzhuang; Ma, Zhiming; Ding, Tao (2016). Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. *Waste Management*, 48, 334-343.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.018>
- Zain, M.; Mahmud, H.; Iham, Ade; Faizal, M. (2002). Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(8), 1251-1258.
[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00768-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00768-8)
- Zhu, Peng; Mao, Xinqi; Qu, Wenjun; Li, Zongyang; John, Zhongguo (2016). Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 113, 246-254.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.040>