

# Evaluación de un mortero preparado con agregados reciclados de un concreto mejorado por carbonatación: Una mirada a la construcción sustentable

## Assessment of a mortar with recycled aggregate from a concrete improved by carbonation: A look to a sustainable construction

A. Muñoz \*, N. Torres \*, A. Guzmán <sup>1\*</sup>

\* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 15/03/2018

Fecha de Aceptación: 01/08/2018

PAG 25-32

### Abstract

*In this research, some of the physical, mechanical, and durability properties of mortars were evaluated. These mortars were prepared with partial replacements of the natural fine aggregate (NFA) by recycled fine aggregate (RFA) and carbonated recycled fine aggregate (CRFA) in amounts of 0%, 25%, and 50%. For this purpose, 3 groups of mortar mixtures were elaborated with a w/c ratio of 0.65. The results showed that an increase in the percentage of replacement of the CRFA led to an improvement in the mortar compressive strength, as well as a lower superficial absorption rate.*

*Keywords: Recycled concrete, carbonation, mortar, mechanical properties, durability*

### Resumen

En este artículo, se evaluaron algunas de las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de morteros preparados con reemplazos parciales de 0%, 25% y 50% del agregado fino natural (AFN) por agregado fino reciclado carbonatado (AFRC) y sin carbonatar (AFR). Para ello, se elaboraron 3 grupos de mezclas de mortero, con una relación a/c de 0,65. Los resultados obtenidos demostraron un aumento en la resistencia a la compresión del mortero y una menor tasa de absorción superficial, conforme se incrementó el porcentaje de reemplazo del AFRC.

**Palabras clave:** Concreto reciclado, carbonatación, mortero, propiedades mecánicas, durabilidad

## 1. Introducción

En la elaboración del mortero, el uso de agregados finos reciclados, provenientes de los desechos de concreto, es el paso que la industria de la construcción debería dar a fin de proteger el medio ambiente y el uso efectivo de los recursos naturales. Los efectos adversos producidos al medio ambiente por la elaboración del concreto es un asunto de gran preocupación debido, principalmente, a su uso extensivo a nivel mundial (Fernández-Jiménez y Palomo, 2009) donde el consumo de concreto se elevó a unos 20 mil millones de metros cúbicos anuales. En consecuencia, la huella de carbono del proceso de producción se duplicó en sólo 15 años (1990-2005) (Mehta y Meryman, 2009); donde gran parte de los gases invernadero provienen de la producción del clínker (Mehta y Meryman, 2009). Por tanto, es evidente que la industria de la construcción emplea gran parte de los recursos renovables y no renovables. Lo anterior queda demostrado por el hecho de que es responsable del

50% de la explotación de la materia prima, así como del consumo del 40% de la energía producida mundialmente. Como resultado de ello, la industria de la construcción genera el 50% de los residuos depositados en los rellenos sanitarios. Estos desechos pueden venir de la demolición de estructuras que ya alcanzaron su vida útil o que no cumplen con los requisitos de resistencia sísmica y de seguridad, así como estructuras que se han visto dañadas de manera irreparable durante los desastres naturales (Oikonomou, 2005).

Sobre esa base, se han desarrollado diversas metodologías con la finalidad de reparar el daño medio ambiental y la disposición de los desechos de la construcción y demolición. Como resultado de esto, se emplearon desechos de concreto para la elaboración de un nuevo mortero y mezclas de concreto, como un reemplazo total o parcial de los agregados naturales. En términos comparativos, los agregados reciclados presentan mayor absorción, menor densidad nominal y aparente, menor factor de forma y menor resistencia a la abrasión en la máquina de Los Ángeles, así como en el aparato Micro-Deval (Bojaca, 2013). El reemplazo parcial o total de agregados naturales por desechos de concreto procesado en plantas recicladoras es

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, COLOMBIA.  
E-mail: alvaro.guzman@escuelaing.edu.co



un alivio para los recursos naturales. De igual forma, si la molienda de los agregados se realiza en el sitio del proyecto, los ahorros son mayores.

Existen dos tipos de agregados reciclados: agregado grueso reciclado (AGR) y agregado fino reciclado (AFR). La pasta de cemento rodea las partículas, creando una capa porosa y frágil que aumenta la porosidad de la nueva mezcla; en consecuencia, disminuye su calidad y facilita la formación de micro-grietas dentro del nuevo mortero o concreto (Geng y Sun, 2013).

Diversos autores han ensayado las muestras de concreto usando un reemplazo parcial de agregados reciclados, ya sea agregados gruesos (Sim y Park, 2011) (Bojaca, 2013; Evangelista y de Brito, 2010), finos (Ledesma et al., 2014) o desechos de ladrillos de arcilla (Chaparro, 2012). En ciertos casos, se encontró que dependiendo de la calidad del concreto, las propiedades mecánicas de estas mezclas son comparables con las de los agregados naturales, a pesar de que algunas propiedades de durabilidad se ven afectadas.

Debido a la mayor atención puesta en los morteros y concretos elaborados con agregados reciclados, se han estudiado y desarrollado algunas metodologías con el objetivo de mejorar sus propiedades. Una de ellas es el proceso de someter los agregados reciclados a una carbonatación acelerada con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este método ha demostrado ser eficiente y medio ambientalmente amigable, mejora algunas propiedades de la pasta de cemento adherida a los agregados gruesos (Shi et al., 2015) y finos (Molano et al., 2015) reciclados.

Los ensayos realizados a los agregados reciclados muestran que el tratamiento de carbonatación incrementa la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de las probetas (Ramezani pour, Ghahari y Esmaeili, 2014). Lo anterior se atribuye principalmente a la producción de carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) durante la reacción entre el hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) contenido en la pasta de cemento y el dióxido de carbono inyectado (CO<sub>2</sub>). Estos resultados incentivan la adopción de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono (CAC), que pueden reducir sustancialmente la degradación medio ambiental almacenando de manera segura el CO<sub>2</sub> (Sanna, Dri, Hall, y Maroto-Valer, 2012).

Durante las últimas décadas, se ha vuelto común el uso de agregados reciclados carbonatados (ARC) en las nuevas mezclas de concreto, especialmente cuando se consideran las mejoras de sus propiedades por la vía de la

carbonatación acelerada. Sin embargo, gran parte de la información referida se enfoca en el concreto, dejando atrás la investigación sobre los agregados finos carbonatados y su uso en las mezclas de mortero.

En este grupo de materiales, se evaluó el comportamiento de las mezclas de mortero con agregados finos reciclados carbonatados y no carbonatados mediante ensayos mecánicos y de durabilidad. Este estudio es una contribución al respecto, puesto que también intenta difundir la información y reducir las interrogantes sobre este tema.

## 2. Materiales y métodos

En esta investigación, se usó un cemento especial para la preparación de las mezclas de concreto. El cemento tenía una densidad de 3,07 g/cm<sup>3</sup> y finura Blaine de 4213 cm<sup>2</sup>/g. La composición química se determinó con un ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF, por su sigla en inglés) y se encontró un contenido de CaO (61%) y de SiO<sub>2</sub> (21%). Por otra parte, se determinaron las propiedades físicas del AFN, AFR y AFRC (granulometría, densidad y absorción) según las normas de ensayo ASTM C136-14 y ASTM C128-05. El AFN era arena de río y el AFR se obtuvo de la molienda de cilindros de concreto de laboratorio. El AFR se sometió a carbonatación acelerada por un periodo de 15 días. La cámara de carbonatación se fijó una temperatura de 23 °C, HR de 65% y concentración de CO<sub>2</sub> del 10%. El tiempo de permanencia se definió como el necesario para una carbonatación óptima. Lo anterior, se definió como el punto en el que no había signos de una variación significativa en la densidad y en el porcentaje de absorción del AFRC. El tiempo óptimo fue de 15 días con las variables mencionadas para la cámara de carbonatación.

Las variables consideradas en la elaboración de las muestras de mortero se muestran en la Tabla 1. En total, se prepararon 5 mezclas con reemplazo parcial de AFN/AFR/AFRC. El contenido de humedad y la absorción de la arena, en un diseño por volumen, permitió corregir la cantidad de agua. La Tabla 1, además, indica la cantidad de agregado usado en cada mezcla.

El mortero fue diseñado para una resistencia a la compresión de 17,5 MPa, que se clasifica como mortero tipo M, según la ASTM C270. Un 0% de reemplazo representa a la mezcla estándar, mientras que los valores de 25% y 50%, representan el reemplazo de AFN por AFR y AFRC.

**Tabla 1.** Tipo y cantidad de agregados y razón de la mezcla

Mezcla	Agregado fino (kg/m <sup>3</sup> )		Razón agua/cemento
	Natural	Reciclado	
AF0	1480	0	0,65
AFR25	1083	361	
AFRC25	1083	361	
AFR50	703	703	
AFRC50	703	703	

Con el fin de identificar el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  antes del tratamiento de carbonatación y la síntesis de  $\text{CaCO}_3$  después del tratamiento mencionado, el AFR y el AFRC fueron caracterizados mediante un análisis termo-gravimétrico (TG) y derivada termogravimétrica (DTG). Este se practicó a una tasa de calentamiento de 10 °/min a partir de la temperatura ambiente hasta los 1000 °C.

El proceso de mezclado se realizó de acuerdo a la norma ASTM C305-14. Las probetas medían 45 mm de diámetro por 90 mm de alto. La resistencia a la compresión de las probetas se evaluó a las edades de curado de 3, 28, 90 y 180 días, como lo especifica la norma ASTM C39.

Las propiedades físicas de las muestras de mortero (densidad y absorción) se evaluaron en probetas con un espesor de 50 mm y un diámetro de 100 mm, de acuerdo a

los requisitos de la norma ASTM-C642, a las edades de curado de 28, 90 y 180 días. Además, se determinó el ensayo de absorción superficial inicial (EASI) en cilindros de 100 x 200 mm, según los procedimientos especificados en la norma británica BS 1881: Parte 208: 1996, a las edades de curado de 28, 90 y 180 días, en tres probetas para cada fecha de ensayo.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Propiedades físicas de los agregados

La granulometría de los agregados naturales y reciclados se muestra en la Figura 1.

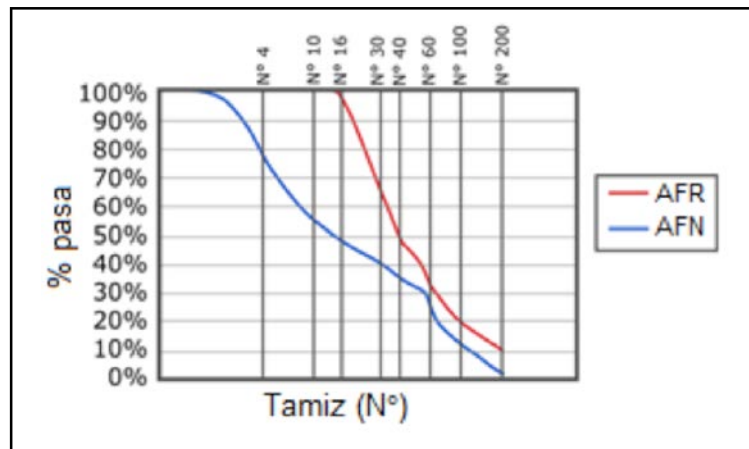


Figura 1. Distribución del tamaño de partícula del AFN y AFR

La distribución del tamaño de partículas en el AFR muestra un predominio de los finos, con un módulo de finura de 1,77. Esto se debe principalmente a la trituración del concreto. El AFN muestra una curva bien graduada y un módulo de finura de 3,36.

En cuanto a la absorción y a la densidad nominal y aparente, los resultados para cada tipo de agregado se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas de los agregados naturales y de los agregados reciclados carbonatados y no carbonatados

Propiedad	Agregado fino		
	AFN	AFR	AFRC
Absorción (%)	2,10	8,82	7,25
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,20	2,40
Densidad nominal (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	2,46	2,67

Se encontró una diferencia del 16,7% entre las densidades aparentes de los AFN y AFR, siendo el AFR el de menor valor. Este resultado se atribuye a la menor densidad de la pasta de cemento adherida al agregado reciclado. Por lo tanto, este mortero tiene mayor porosidad que el con agregado natural, como menciona Bojaca (2013). Además, la densidad aparente del AFRC es el más próximo al valor del AFN (9,1% menor), como informan autores como Molano et al. (2015). Este incremento en la densidad aparente está asociado a la presencia de  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de calcio), que es el producto de la reacción entre el  $\text{Ca(OH)}_2$  y el  $\text{CO}_2$ . Lo anterior, porque el  $\text{CaCO}_3$  tiene una masa molar de 218,89 g/mol, que es casi tres veces la del  $\text{Ca(OH)}_2$  (74,09 g/mol). El tratamiento de carbonatación disminuyó la absorción del agregado reciclado de 8,82% a 7,25% , que es similar al resultado informado por autores como Zhang et al. (2015). Este comportamiento se atribuyó a la precipitación del carbonato de calcio en la estructura de los poros de la pasta de cemento adherida a los agregados, que provoca la saturación la estructura impidiendo el flujo del agua (Bertolini et al., 2014).

### 3.2 Análisis térmico

Las Figuras 2 y 3 presentan el análisis térmico del AFR y del AFRC. En la primera, se observan tres picos relacionados con una pérdida de masa (Figura 2). Estos picos se asocian a la pérdida de humedad (50–120 °C), descomposición del dióxido de calcio (400-450 °C) y al bajo consumo de los carbonatos de los agregados ( $\approx 600$  °C). Todo lo anterior concuerda con las evaluaciones realizadas por BroomField (2006),(Izquierdo et al., 2013).

De manera similar, en las curvas de los AFRC, se aprecian tres picos de pérdida de masa (Figura 3), los que se atribuyeron a la evaporación de la humedad (45-107 °C), deshidratación de los hidratos de aluminato de calcio (CAH) y de los hidratos de aluminosilicatos de calcio (CASH) (200-220 °C). El último proceso no se apreció en los AFR, debido posiblemente a la baja cantidad de estos compuestos en la pasta de cemento de los agregados estudiados. Finalmente, se aprecia una mayor cantidad de carbonato de calcio descompuesto (650-750 °C), que supone una conversión significativa del hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) en  $\text{CaCO}_3$  debido al proceso de carbonatación.

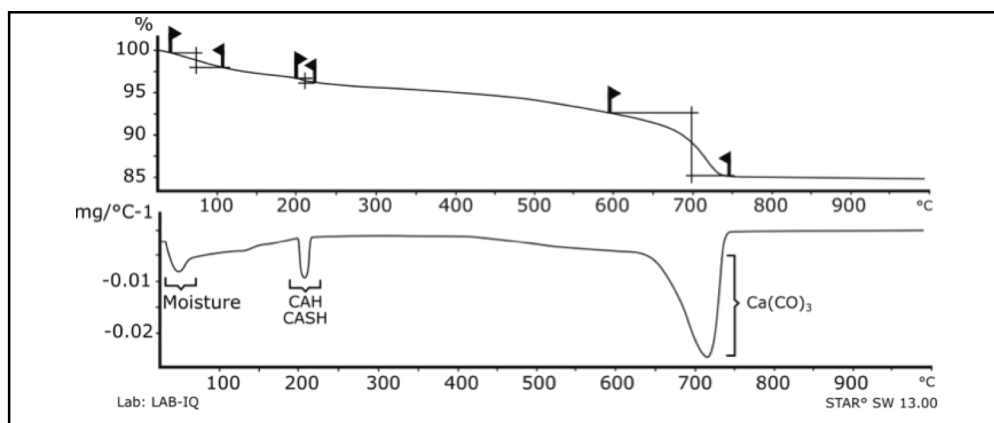


Figura 2. Curvas TG y DTG de los AFR

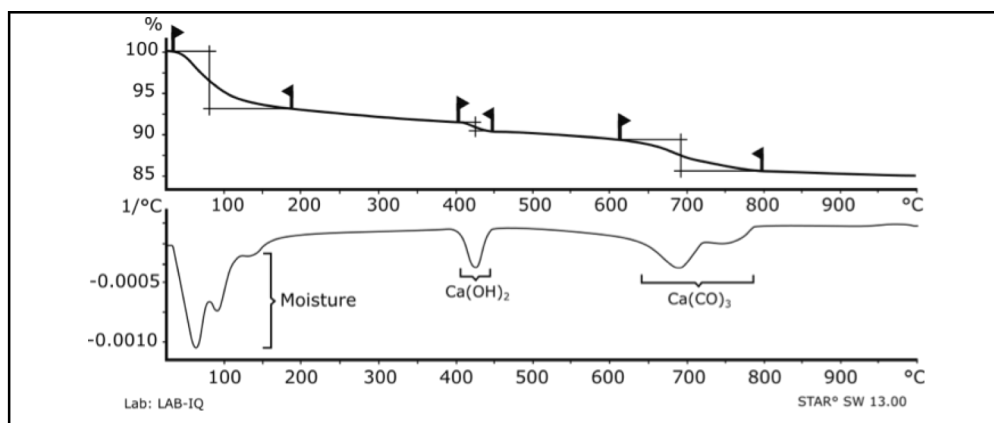


Figura 3. Curvas TG y DTG de los AFRC

### 3.3 Absorción del mortero endurecido

Los resultados de los ensayos de absorción de los morteros se muestran en la Figura 4.

Todas las mezclas excedieron los resultados del AF 0 a los 30 y 90 días. Esto se asocia con la mayor absorción del AFR en comparación con el agregado natural. También es evidente por el hecho de que la absorción aumentó junto con la cantidad de reemplazo de AFR y de AFRC. Este comportamiento cambió a los 180 días, cuando las mezclas AFR 25, AFRC 25 y AFRC 50 presentaron resultados iguales o menores que los de la mezcla estándar. En cuanto al reemplazo de AFN por AFR y AFRC, se encontró sólo una diferencia significativa (+2%) entre las mezclas con 25% de

AFR y 25% de AFRC. Se podría inferir que los efectos de los AFRC en la absorción del mortero dependen más de su granulometría y porcentaje de reemplazo que de su estado de carbonatación.

### 3.4 Densidad del mortero endurecido

Los resultados de la densidad de los morteros endurecidos se presentan en la Figura 5. Los resultados de la densidad, para todas las edades, son similares en los morteros elaborados con AFN, AFR y AFRC, lo que difiere de lo esperado, es decir, que la mayor densidad del AFRC en comparación con el AFR se vería reflejada en la densidad de los morteros.

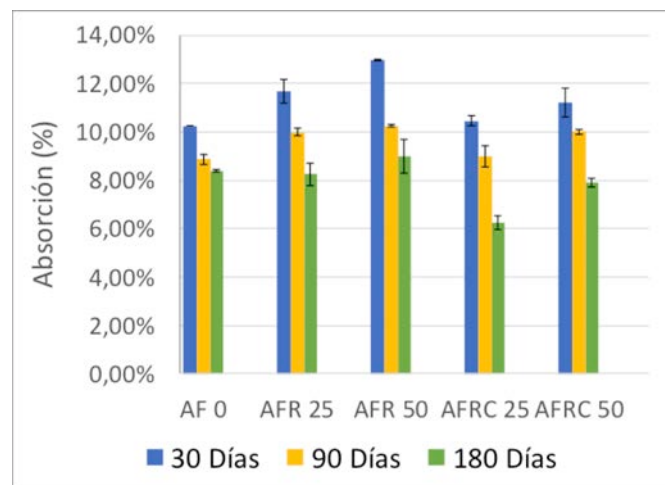


Figura 4. Absorción de los morteros

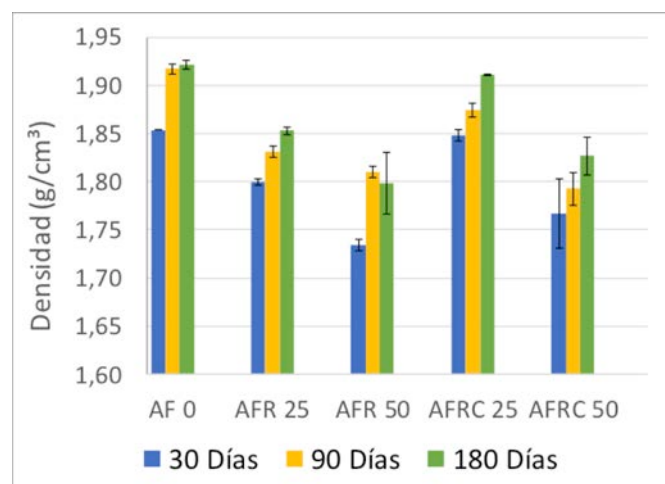


Figura 5. Densidad de los morteros



### 3.5 Resistencia a la compresión de los morteros

En general, las mezclas con AFR mostraron un pronunciado detrimento de la resistencia a la compresión del mortero (Figura 6). Por otra parte, las mezclas que tenían AFRC incorporado, mostraron un comportamiento similar o levemente inferior al de la mezcla estándar. Esto se aprecia claramente a los 180 días, puesto que los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros AFR 25, AFR 50, AFRC 25 y AFRC 50 fueron un 27%, 24%, 1% y 5% respectivamente menores a la resistencia de la mezcla estándar. Por lo tanto, las mezclas con adición de AFRC lograron valores de resistencia a la compresión cercanos a los de la mezcla estándar. Este comportamiento podría estar relacionado con la mayor resistencia del  $\text{CaCO}_3$  en

comparación con el  $\text{Ca(OH)}_2$ . Esto ha sido identificado y explicado por autores como Ramezani pour et al. (2014), que obtuvieron un 22% de incremento en la resistencia, al comparar el AFRC con el AFN.

De estos resultados, se puede inferir que la porosidad del mortero con adición de AFR no se ve totalmente compensada por su efecto de relleno. Además, la menor densidad y mayor absorción del AFR tiene un impacto negativo sobre su resistencia, lo que refuta los resultados encontrados por Ledesma et al. (2014), quienes atribuyen la ganancia de resistencia al efecto de relleno de la fracción fina del agregado, que fue reemplazada hasta en un 10% por agregado reciclado.

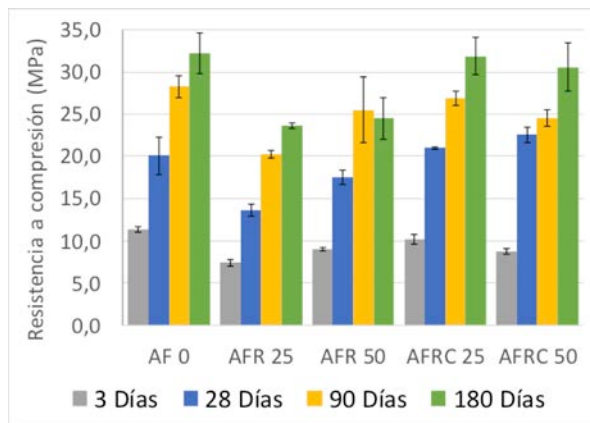


Figura 6. Resistencia a la compresión de los morteros

### 3.6 Ensayo de absorción superficial inicial (EASI)

Los resultados de los EASI realizados a las mezclas de mortero después de los primeros 10 minutos del ensayo se presentan en la Figura 7. Para todas las mezclas, en cada edad, la tasa de absorción aumenta con la cantidad de reemplazo con AFR y AFRC respecto de la mezcla estándar. Este comportamiento se atribuye a la mayor porosidad y absorción de estas mezclas. Por lo tanto, el reemplazo de

AFN con AFR y AFRC resulta contraproducente respecto de su tasa de absorción inicial.

Con los resultados obtenidos, no es posible sostener que la carbonatación del AFR mejora significativamente la permeabilidad. Es decir, que la estructura de los poros del mortero no se ve afectada de manera apreciable por la carbonatación del AFR.

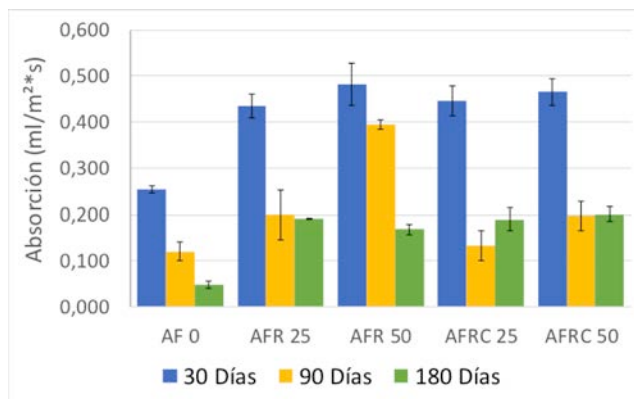


Figura 7. EASI de los morteros después de los primeros 10 minutos del ensayo



SPANISH VERSION.....

### 3.7 Permeabilidad (k) y resistencia a la penetración (m) (sortividad)

Las Figuras 8 y 9 muestran los resultados de la sortividad de los morteros, en términos de su permeabilidad y resistencia a la penetración, en las diferentes edades de curado. En general, la adición de AFR y de AFRC a los morteros logra valores mayores en la permeabilidad y valores menores en la resistencia a la penetración, con respecto a la mezcla estándar. Esto se asocia con los mayores valores de absorción del AFR y AFRC comparados con los del AFN.

Cabe señalar que los morteros con adición de AFRC mostraron un menor efecto negativo en la permeabilidad y resistencia a la penetración que los morteros con AFR. Esto porque la precipitación del carbonato de calcio en la estructura de los poros de la pasta de cemento, durante el

proceso de carbonatación, provoca una saturación de la estructura impidiendo el flujo del agua (Bertolini et al., 2014).

Además, se esperaba que a medida que aumentara la edad de curado, todas las mezclas perdieran permeabilidad y ganaran resistencia a la penetración de sustancias externas (agua). Esto se relaciona con el refinamiento de la estructura de los poros provocado por los productos de hidratación (gel de CSH), que producen una pérdida de su conectividad interna. Es decir, que el flujo a través de los capilares más grandes disminuye, forzando al agua a fluir lentamente a través de los poros más pequeños del gel de CSH (Garboczi y Bentz, 1999). En consecuencia, existe una reducción de los efectos del AFR y del AFRC en la permeabilidad y resistencia a la penetración del mortero.

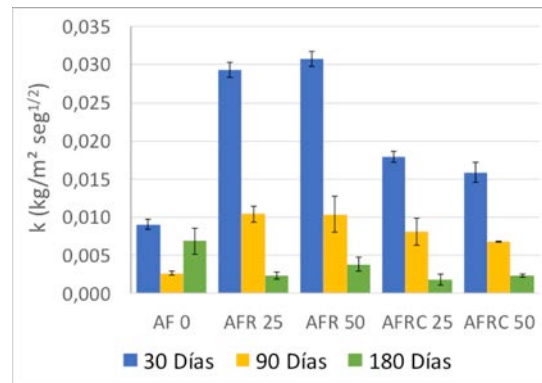


Figura 8. Valores de la permeabilidad (k) de los morteros

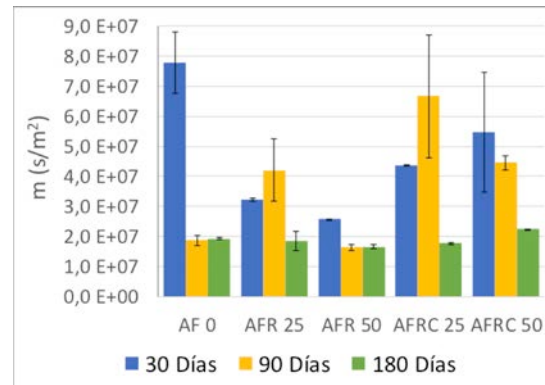


Figura 9. Resistencia a la penetración del agua (m) de los morteros

## 4. Conclusión

El tratamiento de carbonatación acelerada a la que se sometieron los AFR probó ser un método efectivo para fortalecer las propiedades físicas de los AFR, bajo las condiciones mencionadas (10% CO<sub>2</sub>, 25 °C, y 65% HR, por 15 días), puesto que disminuye su absorción y aumenta su densidad (17,8% y 9,1%, respectivamente).

Se encontró que el efecto de relleno del AFR en la estructura de los poros del mortero no compensa la pérdida en la resistencia a la compresión debido a su menor densidad y mayor absorción. Sin embargo, el tratamiento de carbonatación mostró un incremento en la resistencia a la

compresión de la mezcla. Por lo tanto, la resistencia a la compresión de los morteros con AFRC es similar a la de los morteros con AFN.

La mejora de las propiedades físicas de los AFR por medio del tratamiento de carbonatación, permite su adición como reemplazo parcial del AFN en las mezclas de mortero, en hasta un 25% y 50%. Esto provoca un leve detrimento en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los morteros. En consecuencia, desde el punto de vista medio ambiental, el uso de agregados finos reciclados carbonatados como reemplazo de los agregados finos naturales puede ser una buena alternativa para la industria de la construcción.



## 5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia) por el apoyo prestado para el financiamiento y desarrollo de esta investigación, especialmente, con las investigaciones “Evaluación de los

agregados de concretos reciclados mediante la técnica de carbonatación acelerada” (convocatoria interna de 2015) y “Durabilidad del concreto elaborado con agregado fino reciclado carbonatado comercial” (convocatoria interna de 2016).

## 6. Referencias

- ASTM C128 – 05 (2005)**, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2005.
- ASTM C270-14a (2014)**, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM C305-14 (2014)**, Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM C39 / C39M-17b (2017)**, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM C642-13, (2013)**, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM C128-15 (2015)**, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials, ASTM, West Conshohocken, PA, 2015.
- ASTM C136-14 (2014)**, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM, West Conshohocken, PA, 2014.
- Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R. P. (2014)**, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair (Second). WILEY-VCH.
- Bojaca N. R. (2013)**, Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- BroomField J. (2006)**, Corrosion of steel in concrete - Understanding, Investigation and Repair (Second). Taylor & Francis.
- Chaparro I. A. J. F. (2012)**, Hacia un desarrollo sostenible en la producción de concreto a partir de desechos de construcción de mampostería de arcilla, 1(1), 114.
- Evangelista L., De Brito J. (2010)**, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 32(1), 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>
- Fernández-Jiménez A., Palomo, Á. (2009)**, Properties and uses of alkali cements. Revista Ingeniería de Construcción, 24(3), 213–232. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732009000300001>
- Garboczi E. J., Bentz, D. P. (1999)**, Computational Simulation and Percolation Theory Applied To Concrete. Annual Reviews of Computational Physics VII.
- Geng J., Sun, J. (2013)**, Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. Construction and Building Materials, 49, 814–820. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.090>
- Izquierdo S., Díaz J., Mejía R., Torres J. (2013)**, Cemento adicionado con un residuo del proceso de craqueo catalítico (FCC): Hidratación y microestructura. Revista Ingeniería de Construcción, 28(2), 141–154. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732013000200003>
- Ledesma E. F., Jiménez J. R., Fernández J. M., Galvín A. P., Agrela F., Barbudo A. (2014)**, Properties of masonry mortars manufactured with fine recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials, 71, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.080>
- Mehta P. K., Meryman H. (2009)**, Tools for reducing carbon emissions due to cement consumption. STRUCTURE Magazine, (January), 11–15. Retrieved from [https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/08/C-BB-SustainableConcrete\\_MehtaMeryman-Jan091.pdf](https://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2014/08/C-BB-SustainableConcrete_MehtaMeryman-Jan091.pdf)
- Molano M., Torres N., Molano C. (2015)**, Evaluación de los beneficios de la captura de CO<sub>2</sub> para el tratamiento de agregados finos reciclados de concreto, como una estrategia para combatir el cambio climático. Revista de La Escuela Colombiana de Ingeniería, (N° 99), 45–58.
- Oikonomou N. D. (2005)**, Recycled concrete aggregates. Cement and Concrete Composites, 27(2), 315–318. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020>
- Ramezani-pour A. A., Ghahari S. A., Esmaili M. (2014)**, Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. Construction and Building Materials, 58, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.102>
- Sanna A., Dri M., Hall M. R., Maroto-Valer M. (2012)**, Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) - A UK perspective. Applied Energy, 99, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.049>
- Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. (2015)**, Performance enhancement of recycled concrete aggregate - a review. Journal of Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- Sim J., Park C. (2011)**, Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. Waste Management, 31(11), 2352–2360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.06.014>
- Zhang J., Shi C., Li Y., Pan X., Poon C. S., Xie Z. (2015)**, Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar. Construction and Building Materials, 98, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087>

