

# 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\*

Benefit assessment of CO<sub>2</sub> capture for treating fine recycled concrete aggregates, as a strategy to fight climate change

MARFA MOLANO CAMARGO<sup>1</sup> - NANCY TORRES CASTELLANOS<sup>2</sup> - CINDY MOLANO CAMARGO<sup>3</sup>

1. Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural. Escuela Colombiana de Ingeniería. Estudiante de doctorado en Infraestructura y Medio Ambiente, Universidad de Edimburgo, Escocia.
2. Doctorado en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Profesor, Escuela Colombiana de Ingeniería.
3. Pregrado en Ingeniería civil. Escuela Colombiana de Ingeniería.

marfa.molano@mail.escuelaing.edu.co - nancytorres@escuelaing.edu.co - cindy.molano@mail.escuelaing.edu.co

Recibido: 15/03/2015 Aceptado: 15/06/2015  
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

\* Artículo ganador del Premio Eficiencia - Davivienda 2014.

## Resumen

Considerar los desechos de la industria de la construcción como fuente de recursos para producir materiales de construcción con baja huella de carbono, a partir de escombros derivados de las actividades de demolición del concreto y a través de la innovadora tecnología de captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CAD), por medio de carbonatación acelerada, es un novedoso enfoque para contribuir al cerramiento del ciclo del carbono en los materiales de construcción, aportando al desarrollo sostenible y resiliente de la región.

En este artículo se presentan los resultados experimentales de la evaluación a corto plazo de algunas propiedades físicas y de durabilidad de muestras de mortero elaboradas con agregados finos reciclados de concreto (AR), expuestos a carbonatación acelerada. Se realizaron mezclas de mortero, con diferentes porcentajes de remplazo de arena natural por ARSC (agregado fino reciclado sin carbonatar) y ARC (agregado fino reciclado carbonatado) en porcentajes del 0, 25, 50 y 100 %. Aunque las mezclas de mortero elaboradas con ARC registraron unos valores de propiedades mecánicas y de durabilidad inferiores a la mues-

tra control (100 % arena natural), las mezclas de mortero elaboradas con ARC presentaron mejor desempeño en todas las propiedades, en comparación con las mezclas de mortero elaboradas con ARSC. Esto demostró la factibilidad de aplicar la tecnología CAD como un proceso para mejorar las propiedades de los agregados reciclados, a la vez que se combate el cambio climático. La mezcla de mortero elaborada con agregados finos reciclados, que obtuvo los mejores resultados, correspondió a 25 % ARC.

**Palabras claves:** carbonatación, captura de CO<sub>2</sub>, escombros, reciclado, agregados.

## Abstract

Considering the construction industry's waste as a source to manufacture construction materials with a low carbon footprint, using debris derived from concrete demolition activities and through the innovative technology of carbon capture and storage (CCS), through accelerated carbonation, is a breakthrough approach to help to close the carbon

cycle in construction materials, supporting a sustainable and resilient development in the region.

This paper presents the experimental results of a short-term assessment of some of the physical and durability properties of mortar tests done with fine recycled concrete aggregates (RCA) exposed to accelerated carbonation. Mortar mixtures were prepared with different percentages of natural sand replacement by un-carbonated RCA and carbonated RCA in percentages of 0, 25, 50, and 100.

Even though the mortar mixtures prepared with carbonated RCA registered lower values in their mechanical and physical properties than the control sample (100% natural sand), the mixtures prepared with carbonated RCA showed a better performance in all properties than mortar mixtures prepared with un-carbonated RCA. This showed the feasibility of applying CCS technology as a process to improve the properties of recycled aggregates, as well as fighting climate change. The mortar mixture prepared with fine recycled aggregates that showed the best results was 25% carbonated RCA.

**Keywords:** carbonation; CO<sub>2</sub> capture; debris; recycled; aggregates.

### Fórmulas, siglas y símbolos

ARC	agregados reciclados de concreto
CaCO <sub>3</sub>	calcita o carbonato de calcio
CaO	óxido de calcio
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
C-S-H	silicato de calcio hidratado
DIA	desechos industriales alcalinos
MgO	óxido de magnesio
Mt	millones de toneladas
RC&D	residuos de construcción y demolición
TCA	tecnología de carbonatación acelerada

### INTRODUCCIÓN

Se ha estimado que el sector de la construcción es una de las grandes fuentes de generación de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuyendo de manera significativa al calentamiento global (Rehan & Nehdi, 2005; Yamasali, 2003).

Por ejemplo, la construcción y operación de las edificaciones en Europa representan entre el 36 y 40 % del total de la energía consumida y de las emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas en ese continente (Airaksinen & Matilainen, 2011; Urge, 2007), mientras que en Estados Unidos constituye el 54 % (Guggemos, 2005).

Por otra parte, teniendo en cuenta que en el concreto los agregados ocupan entre el 60 y 75 % de su volumen (Kosmatka et al., 2002), el sector de la cons-

trucción ha sido catalogado como uno de los grandes consumidores de recursos naturales. De acuerdo con algunas estimaciones (Bleischwitz, 2011), la demanda mundial de agregados es de casi 20.000 millones de toneladas al año, con un crecimiento proyectado de 4,7 % por año.

A escala mundial, cada año se producen millones de toneladas de residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición (RC&D), de los cuales se considera que el 50 % corresponde a residuos de concreto (Li, 2002). En el año 2009 se produjeron en Bogotá aproximadamente 12 millones de toneladas de RC&D, el equivalente a 70 torres Colpatria (Méndez, 2011), que ocasionaron impactos negativos en la salud, el espacio público y el medio ambiente (Méndez, 2011; Pinzón, 2013).

Con el propósito de que los centros urbanos alcancen un escenario sostenible y resiliente, la industria de la construcción debe implementar prácticas sostenibles, para minimizar los impactos ambientales en todas las fases del ciclo de vida de la estructura. Es así como el reciclaje de los residuos de demolición y construcción del concreto, para la manufacturación de agregados, se constituye en un valioso mecanismo que permite la preservación de los recursos naturales y el ahorro de energía incorporada en los materiales empleados en la obra, contribuyendo a la generación de estructuras amigables con el medio ambiente (Roussat, Dujet & Méhu, 2009).

La producción y uso de agregados reciclados de concreto (ARC) es una práctica común en países desarrollados. Naciones como Estados Unidos producen anualmente alrededor de 140 millones de toneladas de ARC (Report Construction Materials Recycling Association, 2013). En Europa, Alemania es el país con mayor producción de ARC, con una tasa anual cercana a 60 millones de toneladas (Mt), seguida por el Reino Unido con 49 Mt, los Países Bajos con 20 Mt, y en cuarto lugar Francia con 17 Mt (Report European Aggregates Association, 2011). Dosho (2007) reportó que en Japón se registra una tasa de aproximadamente 98 % de reciclaje de RC&D de concreto, para manufacturar ARC.

Aunque en Colombia se presentan bajos porcentajes de reciclaje de RC&D (más o menos entre 5 y 10 %), y las regulaciones para el aprovechamiento de escombros no se encuentran bien definidas (Villamizar, 2014), el

gobierno está implementando políticas que regulen y promuevan las actividades de reciclaje de RC&D. Por ejemplo, en Bogotá, la Resolución 2397 de 2011 indica que las obras de infraestructura deben incluir elementos reciclados provenientes de los centros de tratamiento o aprovechamiento de escombros legalmente constituidos, en un porcentaje no inferior al 10 % del total de los metros cuadrados que se van a construir en el caso de las entidades públicas y 5 % en el caso de las empresas privadas que desarrollen proyectos de construcción. Cada año dicho porcentaje se debe aumentar en cinco unidades porcentuales hasta alcanzar mínimo un 25 %.

Sin embargo, varios autores han reportado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ARC son inferiores a las exhibidas por los agregados naturales (Liu, Xiao & Sun, 2011; Poon & Chan 2007; Kou, Zhan & Poon 2012; Khatib 2005). Entre los principales factores que influyen en su bajo desempeño se encuentran la presencia de porciones de mortero adheridas (generalmente fisuradas) a la superficie del ARC, las cuales le confieren mayor porosidad y una mayor capacidad de absorción de agua (Tomosawa & Noguchi, 2000; Kawano, 2000; Ravindrarajah & Tam, 1985); el débil comportamiento en la zona de transición de la interfase entre el ARC y la nueva pasta de cemento (Li & Xiong, 2001), y contenidos de sulfatos, cloro e impurezas (Olorunsogo & Padayachee, 2002; Kawano, 2000).

Diversos tratamientos se han propuesto con el fin de mejorar el comportamiento de los ARC, tales como métodos de limpieza con ultrasonido (Katz, 2004); separación del mortero adherido al agregado, por medio del método de molienda con esferas (Montgomery, 1998); tratamientos térmicos que incluyen altas temperaturas (500 °C o mayores) (Tateyashiki et al., 2001; Zhonghe et al., 2008) y tratamientos químicos en los cuales los ARC se sumergen en diferentes soluciones (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) (Tam et al., 2007). Sin embargo, estas técnicas generan mayor cantidad de residuos, consumen altas cantidades de energía o utilizan sustancias tóxicas, limitando su uso actual debido a los impactos negativos generados en el medio ambiente (Deyu et al., 2010).

En los últimos años se han desarrollado varias investigaciones con el fin de implementar novedosas metodologías verdes que disminuyan las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el sector de la construcción. El

desarrollo e implementación de energías renovables y la fabricación de cementos ecológicos contribuyen a reducir las emisiones de dióxido de carbono, pero no son suficientes para mitigar totalmente los impactos climáticos generados por la actividad de la construcción (Fernández et al., 2004). Es así como se ha desarrollado una tecnología para captar y almacenar CO<sub>2</sub> en residuos industriales alcalinos (DIA), con el fin de utilizarlos posteriormente en la manufacturación de materiales de construcción mediante un proceso innovador denominado tecnología de carbonatación acelerada (TCA), que permite fijar el dióxido de carbono en la estructura interna de los DIA ricos en óxidos de calcio (CaO) y óxidos de magnesio (MgO), (Aimaro et al., 2012; Erin et al., 2012; Hasanbeigi et al., 2012), con la ventaja de que los procesos térmicos involucrados en el procesamiento de los DIA, como por ejemplo la calcinación del clínker del cemento, incrementan la reactividad de sus componentes (CaO, MgO, entre otros), facilitando la fijación del CO<sub>2</sub> (Huijgen, Ruijg, Comans & Witkamp, 2006).

En Inglaterra se construyó una planta piloto para la producción de agregados carbonatados elaborados con diferentes clases de desechos industriales ricos en CaO, en un sitio dispuesto para botadero de basuras domésticas y comerciales. El dióxido de carbono generado por dichas basuras se recolectó en reactores, con el fin de usar este CO<sub>2</sub> para el procesamiento de los agregados (Gunning, 2011).

De esta forma, los ARC representan una alternativa interesante para almacenar dióxido de carbono, debido a que el alto contenido de calcio presente en el mortero adherido al agregado le permite fijar CO<sub>2</sub> hasta un 16,5 % de su peso propio (tabla 1), siguiendo el mecanismo de reacción descrito en la parte izquierda de la figura siguiente (figura 1) (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004; García et al., 2008).

Bobiki (2012) estimó que los ARC pueden captar hasta 60 Mt de CO<sub>2</sub> cada año (cálculos realizados teniendo en cuenta la cantidad de RD&C de concreto generados en la Unión Europea, China y Estados Unidos)

Varias investigaciones (Engelsen, Mehus & Pade, 2005; Jonsson & Wallevik, 2005) han demostrado el mejoramiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad de los ARC, después de haber sido expuestos al proceso de carbonatación acelerada, presentando cambios en la estructura de poros, acompañados por

aumento en la densidad, disminución de la porosidad y absorción de agua (Baojian, Poon & Shi, 2013; Kou & Poon, 2012; Kou, Zhan & Poon, 2014). El cambio en el sistema de poros puede explicarse por el incremento en volumen de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), compuesto resultante de la reacción entre el  $\text{CO}_2$  y las fases que contienen calcio, de aproximadamente 11,7 % en relación con el volumen del hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) (Shu & Pen, 2012). Adicionalmente, la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) bloquea el sistema de poros debido a su baja solubilidad (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).

**Tabla 1**

Composición química de agregados reciclados de concreto y su teórica ( $\text{TCO}_{2\text{captura}}$ ) y experimental captura de dióxido de carbono ( $\text{ECO}_{2\text{captura}}$ ) (tomado de Aimaro et al., 2012).

Composición química (% de peso propio)	
Componente químico	Porcentaje de peso propio
CaO	15-24
MgO	2-3
$\text{Na}_2\text{O}$	0,1
$\text{K}_2\text{O}$	0,2
Fijación del dióxido de carbono	
Parámetro	Porcentaje de peso propio
$\text{TCO}_{2\text{captura}}$	6,0-22
$\text{ECO}_{2\text{captura}}$	7,5-16,5

(a) Suponiendo que el calcio fija el 75 % de  $\text{CO}_2$ .

Kou y coinvestigadores (2014) evaluaron el comportamiento en mezclas de concreto elaboradas con agregados gruesos reciclados carbonatados (AGRC) y no carbonatados (AGR), y observaron que las mezclas de concreto preparadas con AGRC presentaron mejores resistencias que las mezclas de concreto confeccionadas con AGR y registraron valores ligeramente inferiores a la muestra control (100 % agregados gruesos naturales).

Por otra parte, Baojian et al. (2013) estudiaron diferentes parámetros que inciden en el proceso de carbonatación de los ARC, y hallaron que las fracciones más finas absorben un mayor porcentaje de  $\text{CO}_2$ .

Aunque la carbonatación es un proceso que ha demostrado beneficios en pastas de cemento y ARC, se debe recordar que este proceso tiene efectos adversos en las estructuras de concreto reforzadas, debido a

que las reacciones de carbonatación disminuyen el alto valor de pH presente en la pasta de cemento hidratada, despasivando el acero de refuerzo (Roy & Poh, 1999).

Por otra parte, teniendo en cuenta que la industria cementera es responsable de generar aproximadamente un 5 % del total de las emisiones globales antropogénicas de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (Van & Padovani, 2003; Cement Technology Roadmap, 2009), investigadores han enfatizado en la habilidad que tienen los materiales basados en cemento de absorber casi la misma cantidad de  $\text{CO}_2$  liberada químicamente a la atmósfera durante el proceso de calcinación del cemento (figura 1).

Así, se sugiere que la cantidad captada de  $\text{CO}_2$  en el concreto debería tomarse en cuenta en las evaluaciones ambientales, de la misma forma como la absorción de  $\text{CO}_2$  (por proceso de fotosíntesis) es estimada en el análisis del ciclo de vida de las estructuras construidas con materiales de madera (Lagerblad, 2005; Collins, 2010).

En atención a la inminente necesidad de implementar estrategias que ayuden a combatir el cambio climático en Colombia y debido a la inexistente información en la región acerca del comportamiento de los ARC carbonatados, esta investigación se enfoca en la evaluación de las propiedades mecánicas y de durabilidad, a corto plazo, de pastas de mortero elaboradas con ARC finos, expuestas a carbonatación acelerada, como una posible ruta que contribuya a su valorización sostenible y al cerramiento del ciclo de carbono en las estructuras de concreto.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Materiales

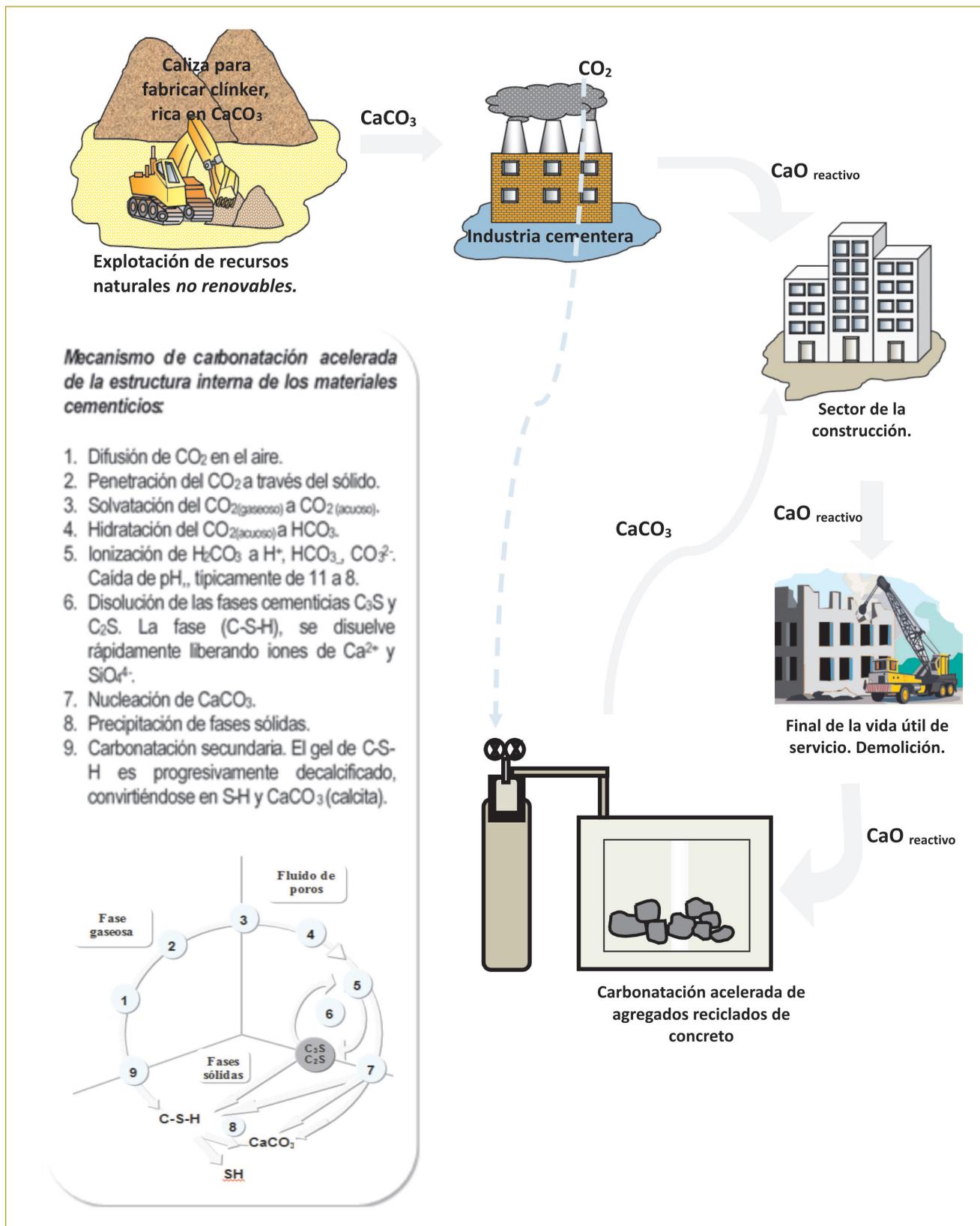
#### Cemento

Se utilizó cemento tipo Pórtland de uso general.

#### Agregados finos

Como agregado natural fino se empleó arena de río.

Los agregados reciclados finos (AR) se obtuvieron a partir de la trituración de especímenes de concreto seleccionados aleatoriamente, procedentes de residuos de ensayos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Escuela Colombiana de Ingeniería (figura 2).



**Figura 1.** Esquema del cerramiento del flujo del carbono propuesto en este estudio. En la parte inferior izquierda de la figura se describe el mecanismo de carbonatación acelerada de los materiales cementicios (elaboración propia basada en Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).



**Figura 2.** Máquina trituradora (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).

### Carbonatación acelerada del agregado fino reciclado de concreto

Los agregados reciclados finos de concreto (AR) se dividieron en dos grupos con el propósito de obtener una muestra control sin carbonatar (ARSC) y otra muestra carbonatada (ARC) (figuras 3 y 4). Los AR se secaron en un horno a una temperatura de 115 °C, durante 24 horas, hasta obtener un peso constante.

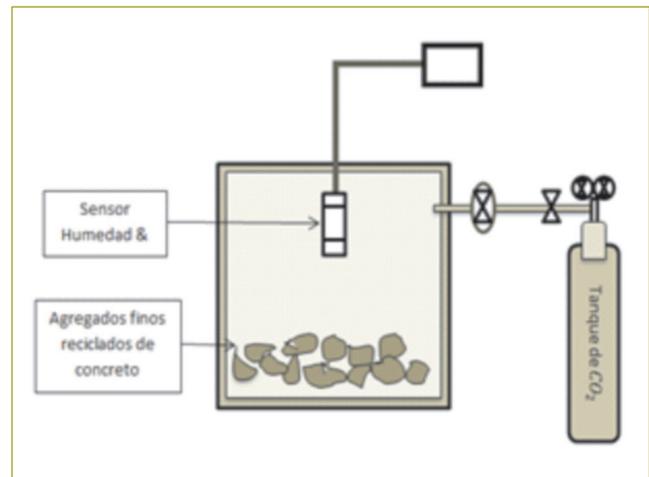
La muestra de ARC seca y fría se introdujo dentro de una cámara de carbonatación acelerada (figura 5), durante un periodo de 14 días, manteniendo una humedad relativa de 65 %, temperatura de 25 °C y una concentración de CO<sub>2</sub> de 6 %.



**Figura 3.** Muestra de agregados finos reciclados de concreto sin carbonatar (ARSC), sobre los cuales se aplicó una solución de fenolftaleína. El cambio de color rosado indica las zonas no carbonatadas. Se observa la presencia de granos carbonatados, producto de la carbonatación atmosférica de los cilindros viejos con los que se trituró este material (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).



**Figura 4.** Muestra de agregados finos reciclados de concreto carbonatados (ARC), sobre los cuales se aplicó una solución de fenolftaleína. El no cambio de color indica las zonas carbonatadas (tomado de Ensayos de Laboratorio ECI).



**Figura 5.** Montaje del ensayo de carbonatación acelerada en agregados finos reciclados de concreto. Tomado de Ensayos de Laboratorio ECI.

### Mezclas de mortero

Se elaboraron siete mezclas de mortero, con una relación agua/cemento (a/c) de 0,56, manteniendo constante una cantidad de cemento de 530 kg/m<sup>3</sup>. Las proporciones de la mezcla de mortero se diseñaron empleando el método de diseño por peso.

Se reemplazó la arena natural por agregados finos reciclados de concreto (AR), carbonatados (C) y sin carbonatar (SC), en porcentajes de sustitución de 25, 50 y 100 % (tabla 2). Además, se elaboró una mezcla control con 100 % de arena natural.

**Tabla 2**  
Cantidades de agregados finos naturales y reciclados (carbonatados y sin carbonatar) empleados en las mezclas de mortero.

ID mezcla	Denominación de la mezcla	Arena natural (kg/m <sup>3</sup> )	Arena reciclada (kg/m <sup>3</sup> )
0	Control	1325	0
1	25 % ARSC	994	331
2	50 % ARSC	663	663
3	100 % ARSC	0	1325
4	25 % ARC	994	331
5	50 % ARC	663	663
6	100 % ARC	0	1325

### Moldeo de especímenes y curado

Las mezclas se elaboraron en el laboratorio, manteniendo una temperatura de  $(23 \pm 4)$  °C. La humedad relativa del laboratorio fue de 55 %. Una vez moldeadas las probetas de mortero, éstas se almacenaron en un cuarto húmedo, conservando una temperatura de 23 °C  $\pm$  2,0 °C y a una humedad relativa mínima del 95 %, protegidas por un plástico para evitar la caída de gotas sobre su superficie.

Transcurridas 24 horas se desmoldaron las mezclas de mortero, para inmediatamente curarlas en un tanque de agua saturada con cal, a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C, hasta el día del ensayo (en este caso tres y siete días).

### Ensayos

#### Propiedades físicas del agregado fino reciclado de concreto

En el agregado fino reciclado de concreto carbonatado (ARC) y sin carbonatar (ARSC), se determinaron las propiedades de densidad aparente, nominal y en condición SSS, y el porcentaje de absorción, de acuerdo con la metodología descrita en la norma ASTM C128-84.

#### Propiedades físicas de las mezclas de mortero

La masa unitaria seca, el porcentaje de absorción después de inmersión y el volumen de vacíos (espacio de poros permeables) de las mezclas de mortero, se evaluaron a los tres y siete días de edad, con base en el procedimiento indicado en la norma ASTM C642-97.

Para esto se tomaron tres porciones individuales de cilindros de mortero de 100 mm de diámetro por 50 mm de longitud, por cada tipo de mezcla de mortero y edad de ensayo.

#### Ensayo de absorción inicial superficial (ISAT)

Para el ensayo de ISAT se utilizaron especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro por 200 mm de longitud. Se realizaron pruebas a los tres y siete días de edad, con base en la norma BS 1881: parte 208: 1996. El resultado registrado en el ensayo corresponde al promedio de tres probetas, elaboradas con la misma mezcla de mortero y ensayadas a la misma edad.

#### Sortividad

Esta propiedad se evaluó a los siete días de edad, en porciones de cilindros de mortero de 100 mm de diámetro por 50 mm de longitud, siguiendo las indicaciones señaladas en la norma ASTM C1585-2004. El resultado del ensayo corresponde al promedio de tres probetas.

#### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó a los tres y siete días de edad, sobre tres cilindros de mortero de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220-12.

### Resultados y discusión

#### Propiedades físicas del agregado fino reciclado de concreto.

Las propiedades físicas del AR, carbonatado (ARC) y sin carbonatar (ARSC), se indican a continuación (tabla 3).

**Tabla 3**  
Propiedades de densidad y absorción de agregados finos reciclados de concreto, carbonatados (ARC) y sin carbonatar (ARSC)

Propiedad	Valor ARC	Valor ARSC
Densidad aparente	2,047 g/cm <sup>3</sup>	1,928 g/cm <sup>3</sup>
Densidad condición SSS	2,261 g/cm <sup>3</sup>	2,188 g/cm <sup>3</sup>
Densidad nominal	2,606 g/cm <sup>3</sup>	2,607 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	10,5 %	13,5 %

**Tabla 4**  
Propiedades de densidad y absorción del agregado fino natural

Propiedad	Valor
Densidad aparente	2,523 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	3,4 %

Las menores densidades registradas por los agregados reciclados, así como su alto porcentaje de absorción, en comparación con los agregados finos naturales, son ocasionadas probablemente por la pobre calidad del mortero viejo adherido al agregado reciclado y la posible presencia de impurezas y fisuras (Tomosawa & Noguchi, 2000; Kawano, 2000; Ravindrarah & Tam, 1985; Li & Xiong, 2001; Olorunsogo & Padayachee, 2002; Kawano, 2000).

Los agregados finos reciclados de concreto, después de haber sido carbonatados (ARC), registraron una disminución del porcentaje de absorción de agua de 22,2 %, en comparación con los ARSC; de manera contraria, la densidad aparente de los ARC aumentó en un 5,8 % en relación con los ARSC, efectos que coinciden con los resultados reportados por (Kou, Zhan & Poon, 2014).

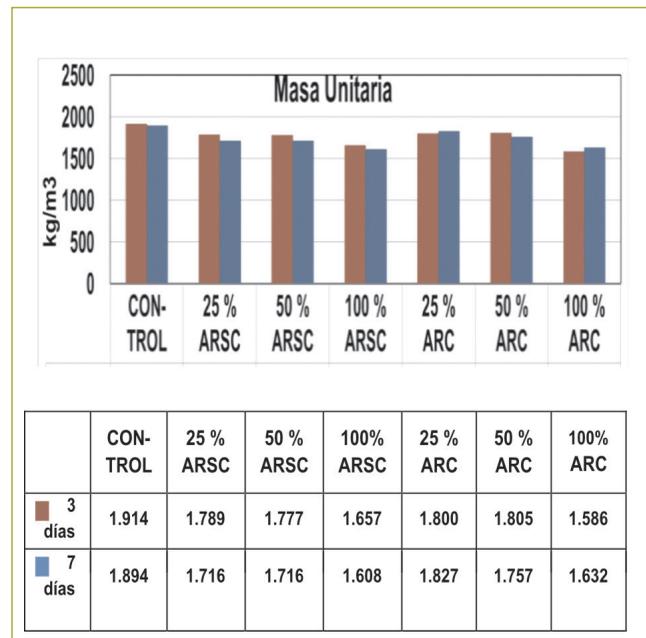
Como la densidad y la absorción están ligadas con las características de los poros en el agregado, el aumento en las propiedades de densidad y la disminución en la absorción de agua de los ARC pudieron ocurrir debido a la formación de productos de carbonatación, como la calcita (CaCO<sub>3</sub>), principalmente, depositada en los poros, lo que ocasiona cambios en su estructura debido al incremento de volumen que experimenta este producto de carbonatación (CaCO<sub>3</sub>), en comparación con los componentes del agregado reciclado no carbonatado (Ca(OH)<sub>2</sub>) (Shu & Pen, 2012).

Además, este factor podría estar acompañado por un posible efecto de bloqueo en los poros por parte de los productos de carbonatación, los cuales poseen menor solubilidad que los productos no carbonatados (Fernández, Simons, Hills & Carey, 2004).

### Propiedades físicas de las mezclas de mortero

En las figuras siguientes se presentan los resultados de masa unitaria, porcentaje de absorción después de inmersión y volumen de vacíos de las mezclas control, y las mezclas preparadas con ARC y ARSC, ensayadas a los tres y siete días (figuras 6, 7 y 8).

Se puede apreciar que todas las muestras elaboradas con agregados reciclados tuvieron menores masas unitarias en relación con la mezcla control, y las muestras elaboradas con ARC presentaron mayores valores de masa unitaria en comparación con las muestras elaboradas con ARSC. Las mezclas 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC registraron incrementos en la masa unitaria evaluada a los siete días, de 6,08, 2,33 y 1,49 %, en comparación con las mezclas no carbonatadas 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC, respectivamente (figura 6).



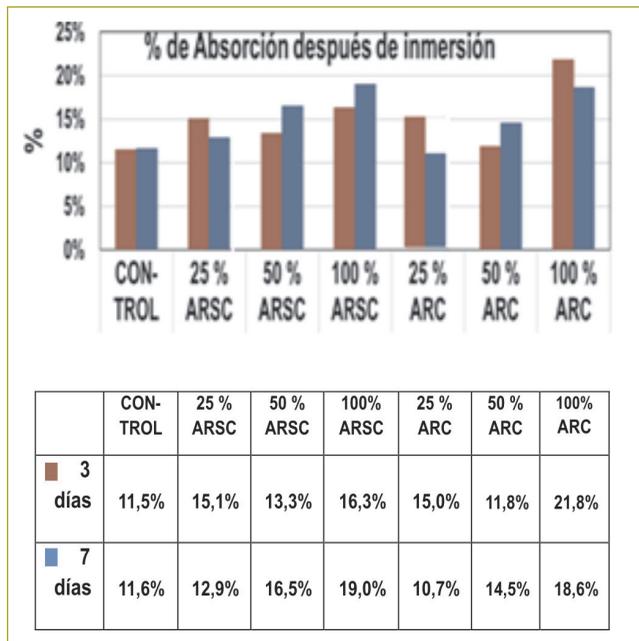
**Figura 6.** Gráfica del ensayo de masa unitaria en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

Se observa que de las mezclas preparadas con agregados reciclados, la mezcla 25 % ARC obtuvo los mayores valores de masa unitaria a los tres y siete días, aunque ligeramente inferiores a los valores de masa unitaria de la mezcla control, 6 y 3,5 %, respectivamente. Por otra parte, la mezcla que presentó los valores más bajos de masa unitaria a los tres y siete días, corresponde a 100 % ARSC, cuyos valores fueron 13,4 y 15,1 % inferiores a la mezcla control.

Como la propiedad de masa unitaria está relacionada con la porosidad de los agregados, se podría esperar que los agregados reciclados carbonatados presenten mayores valores de masa unitaria que los no carbonatados, debido a la formación de productos de carbonatación que modifican el sistema de poros.

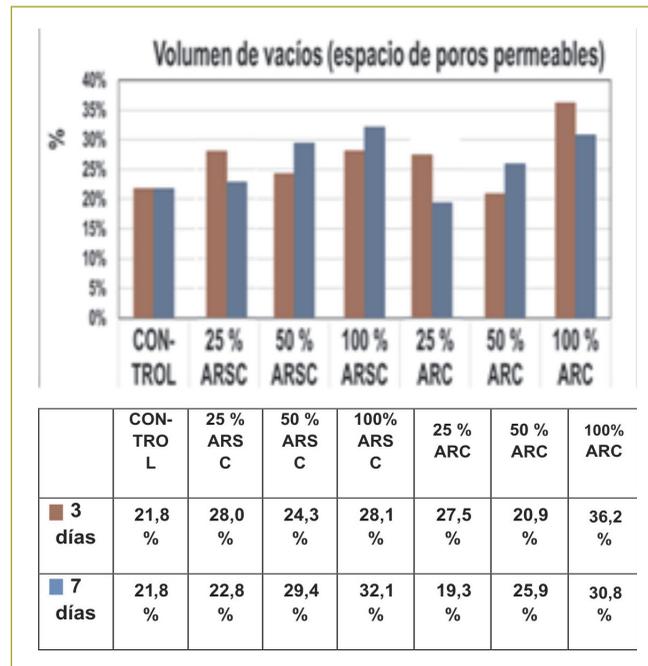
En las figuras siguientes se observa que las muestras elaboradas con ARC presentaron valores de porcentaje de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días, inferiores a los registrados en las muestras que se hicieron con ARSC. La mezcla preparada con agregados reciclados que tuvo los menores valores de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días es la mezcla 25 % ARC, con porcentajes de 20,6 y 18,6 %, inferiores a los presentados por las mezclas 25 % ARSC, respectivamente.

Con respecto a la mezcla control, los porcentajes de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos a los siete días de las mezclas 25 % ARC fueron inferiores en 7,8 y 11,5 %, respectivamente (figuras 7 y 8).



**Figura 7.** Gráfica del ensayo de porcentaje de absorción después de inmersión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

La disminución en los valores de absorción después de inmersión y de volumen de vacíos, presentada en las mezclas elaboradas con ARC, puede atribuirse a la formación de productos carbonatados en los agregados reciclados carbonatados, que posiblemente bloquean sus poros y disminuyen su interconectividad, influyendo positivamente en las mezclas de mortero preparadas con ARC. Estos resultados son concordantes con los incrementos en la densidad aparente y la disminución del porcentaje de absorción de los ARC, indicados anteriormente (tabla 3).



**Figura 8.** Gráfica del ensayo de porcentaje de absorción después de inmersión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

### Ensayo de absorción inicial superficial (ISAT)

En las figuras siguientes se señalan los valores de tasa de absorción superficial inicial registradas a los 10, 20 y 30 minutos, respectivamente, en las mezclas control y las mezclas preparadas con ARC y ARSC, ensayadas a los tres y siete días (figuras 9, 10 y 11).

Se observa en los resultados que a medida que transcurre el ensayo de tasa de absorción superficial inicial, la tasa disminuye, debido a la saturación de la superficie de concreto.

Se puede apreciar que las mezclas de mortero elaboradas con agregado reciclado con porcentajes de 25 y 50 % de sustitución, tanto carbonatadas (ARC) como sin carbonatar (ARSC), presentaron menores valores de tasa de absorción superficial inicial, evaluada a los 20 y 30 minutos, a la edad de siete días, en comparación con las mezclas de control.

Los valores de tasa de absorción superficial inicial medida a los 30 minutos, a la edad de siete días, en las mezclas de 25 % ARC, 50 % ARC y 25 % ARSC, reportaron porcentajes inferiores de 43,8, 25 y 12,5 % en relación con los valores presentados en las mezclas control.

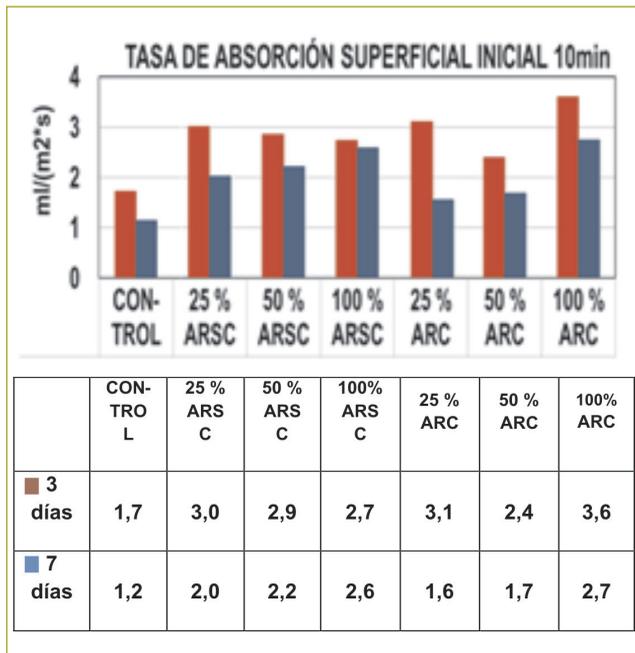


Figura 9. Gráfica del ensayo de ISAT a los 10 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

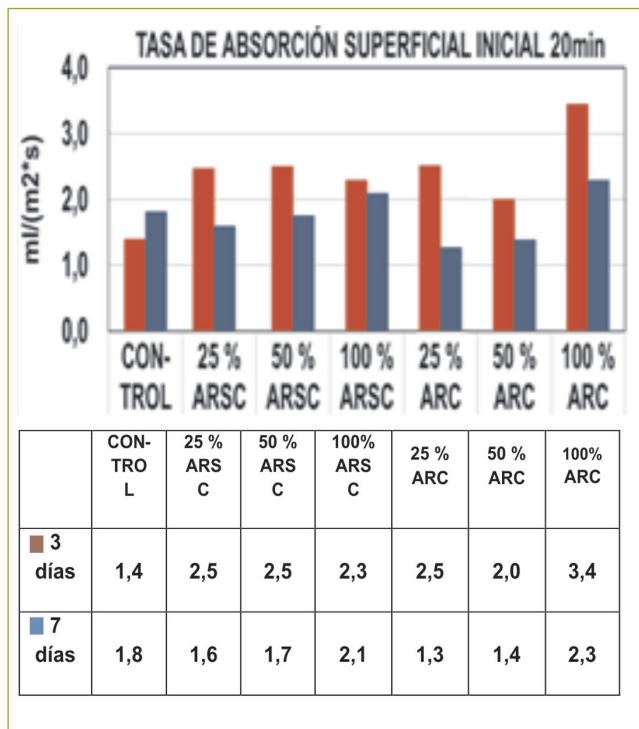


Figura 10. Gráfica del ensayo de ISAT a los 20 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

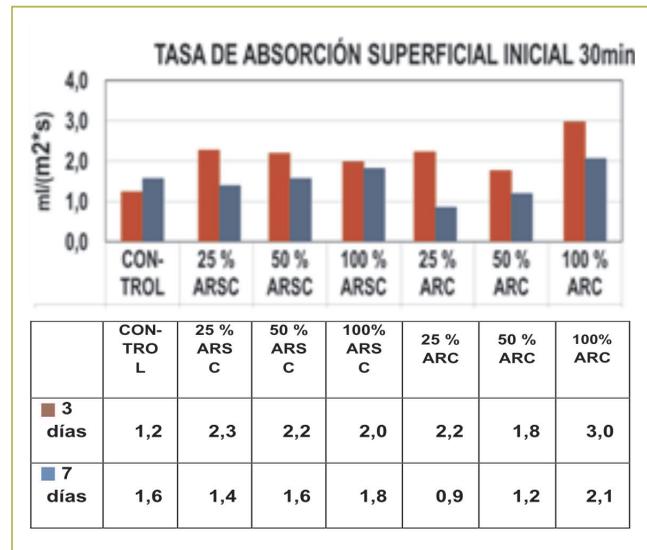


Figura 11. Gráfica del ensayo de ISAT a los 30 minutos, en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

Los menores resultados de tasa de absorción superficial registrados en las mezclas elaboradas con ARC pudieron haber sido causados por la formación de productos de carbonatación en los ARC, que ejercen un efecto de llenado en el sistema de poros, disminuyendo la absorción superficial inicial de la mezcla de mortero.

### Ensayo de sortividad

A renglón seguido se indican los valores de sortividad, de las diferentes mezclas, a los tres y siete días (figuras 12, 13 y 14).

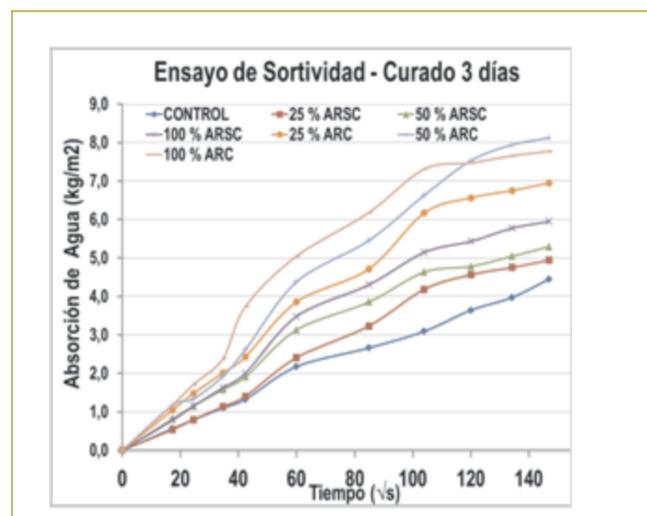
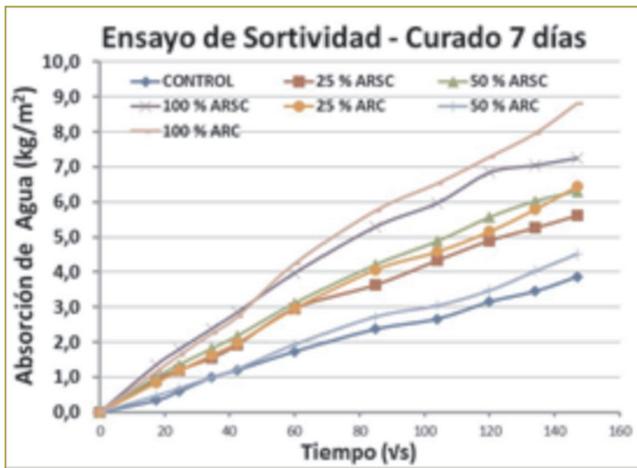


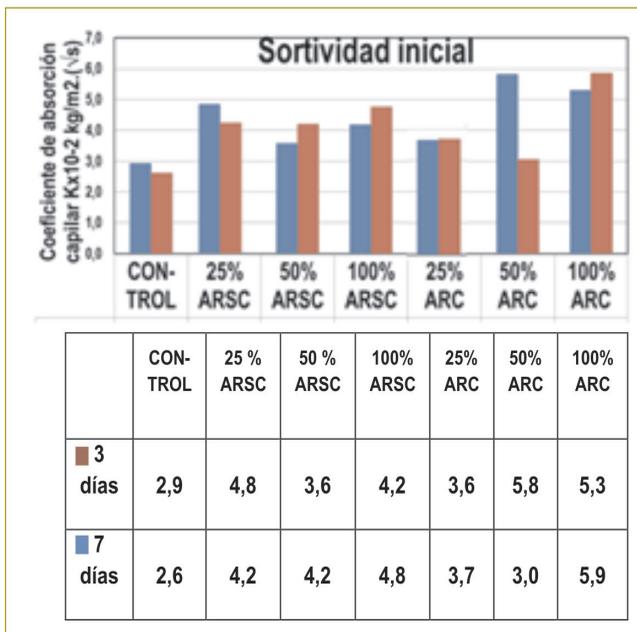
Figura 12. Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los tres días.



**Figura 13.** Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los siete días.

Se observa que todas las mezclas elaboradas con agregados reciclados presentan valores superiores a la tasa de sortividad registrada en la mezcla control, ensayada a los tres y siete días.

Aunque se observa un ligero mejoramiento en la tasa de sortividad de las mezclas de mortero preparadas con agregados reciclados carbonatados, con sustituciones de 25 y 50 %, los valores reportados son significativamente superiores a los de la mezcla control, evaluada a los siete días, con porcentajes mayores de 43,8 y 15,4 %, respectivamente.



**Figura 14.** Gráfica del ensayo de sortividad en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

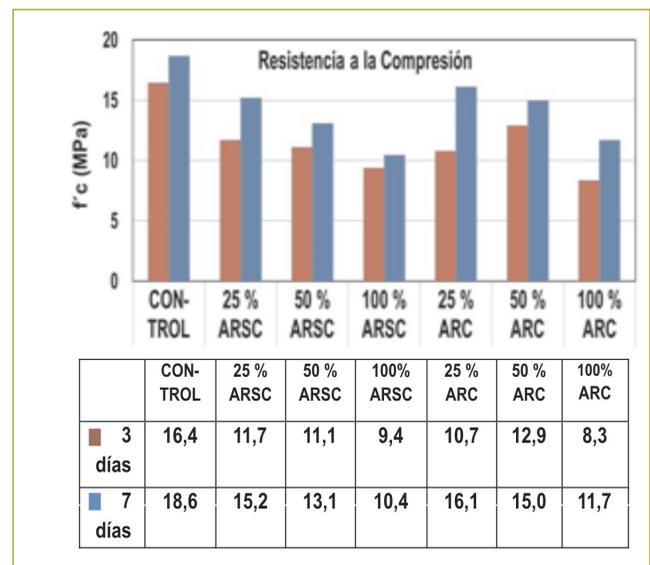
Los elevados valores de sortividad reportados en todas las mezclas preparadas con agregados reciclados, tanto carbonatados como no carbonatados, posiblemente son ocasionados por los altos porcentajes de absorción que presentan los agregados reciclados, en comparación con la arena natural (tablas 3 y 4).

Sin embargo, cabe señalar que el proceso de carbonatación acelerada mejoró los valores de sortividad de los agregados reciclados, en comparación con los no carbonatados. Se puede observar que los valores de sortividad de las mezclas 25 % ARC y 50 % ARC fueron 23,8 y 28,6 % menores que los registrados por las mezclas 25 % ARSC y 50 % ARSC (figuras 13 y 14).

### Ensayo de resistencia a la compresión

En la figura siguiente se indican los valores de resistencia a la compresión de las mezclas elaboradas con ARC y ARSC, a los tres y siete días (figura 15).

Se observa en todas las edades de ensayo que la resistencia a la compresión de las mezclas preparadas con ARC y ARSC fueron inferiores a la resistencia de la mezcla control. Aunque las resistencias a la compresión a los siete días, de las mezclas elaboradas con AR carbonatados, 25 % ARC, 50 % ARC y 100 % ARC, fueron 5,9, 12,7 y 10,8 % mayores que las resistencias de las mezclas de mortero preparadas con AR sin carbonatar, 25 % ARSC, 50 % ARSC y 100 % ARSC, respectivamente.



**Figura 15.** Gráfica del ensayo de resistencia a la compresión en las mezclas de mortero ensayadas a los tres y siete días.

La mezcla de mortero elaborada con agregados reciclados finos (AR), que obtuvo la mayor resistencia, corresponde a la muestra preparada con 25 % de AR carbonatados, registrando una resistencia a la compresión, a los siete días, de 16,1 MPa; sin embargo, este valor es 13,6 % inferior a la resistencia de la mezcla control.

También se observa que remplazar del todo el agregado natural por agregado reciclado disminuye dramáticamente el desempeño mecánico de las mezclas de mortero. Las mezclas 100 % ARC y 100 % ARSC reportaron resistencias, a los siete días, 37,1 y 44,1 % menores que la mezcla control.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas de mortero elaboradas con ARC, en relación con las mezclas confeccionadas con ARSC, se puede atribuir a que la reacción de carbonatación y los productos generados por ésta ocasionan cambios complejos en el sistema poroso del mortero viejo adherido al agregado reciclado, acompañados con una mayor densificación, disminución de la absorción, porosidad y permeabilidad (Shu & Pen-Chi, 2012; Kou, Zhan & Poon, 2014).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los valores de propiedades mecánicas y de durabilidad de las muestras de mortero elaboradas con ARC fueron superiores a los de los morteros con ARSC y ligeramente menores que las obtenidas con la mezcla control. El mejor desempeño mecánico y estructural de las mezclas de mortero elaboradas con agregados finos reciclados se logró al remplazar la arena natural por 25 % de ARC.

Los resultados experimentales inducen a pensar que la carbonatación acelerada de los agregados finos reciclados densifica el mortero adherido al agregado, presentando una significativa reducción en el porcentaje de absorción de agua y aumentando la densidad.

Así, el enfoque propuesto en esta investigación se convierte en una alternativa sinérgica y novedosa, que contribuye al cerramiento del ciclo de carbono de la industria de concreto, al captar y fijar CO<sub>2</sub> en la estructura interna de los materiales reciclados, contrarrestando los impactos del cambio climático. Además, las reacciones generadas en el material debido al proceso de carbonatación mejoran su desempeño durable y mecánico,

convirtiendo esta técnica en una atractiva herramienta de valorización de los productos de desecho de la construcción, estimulando su aplicación práctica.

Adicionalmente, en virtud de que por medio del reciclaje se preservan los recursos naturales no renovables, al utilizar materiales con menor energía incorporada se emiten menos emisiones de CO<sub>2</sub> al medio ambiente, contribuyendo aún más a la mitigación del cambio climático.

Como el proceso de carbonatación acelerada de los ARC demostró beneficios mecánicos y de durabilidad, en comparación con los ARSC, se recomienda hacer estudios a mayores edades que verifiquen la influencia que tienen los productos de carbonatación en el comportamiento mecánico y de durabilidad, no sólo en los agregados reciclados finos, sino también en los agregados reciclados gruesos, mediante la elaboración de mezclas de concreto.

Además, se recomienda optimizar las condiciones del ensayo para permitir una mayor carbonatación en los agregados reciclados, teniendo en cuenta algunas de las siguientes variables:

- Condiciones del proceso de carbonatación: tiempo de exposición, temperatura, presión, humedad relativa.
- Condiciones de los materiales: tamaño de partículas, relación agua/cemento, contenido de humedad, tipo de cementante, un rango más amplio de porcentajes de remplazo.

## REFERENCIAS

- Aimaro, S. et al. (2012). Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) - AUK perspective. *Applied Energy*, 99, 545-554.
- Airaksinen, M. & Matilainen, P. (2011). A carbon footprint of an office building. *Energies*, 4, 1197-1210.
- Baojian, Z., Poon, C. & Shi, Q. (2013). Experimental study on CO<sub>2</sub> curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 44, 1-5.
- Bleichwitz, R. & Bahn-Walkowiak, B. (2011). Aggregates and construction markets in Europe: towards a sectorial action plan on sustainable resource management. *Miner Eng*, 22, 159-176.
- Bobicki, E., Liu, Q., Xu, Z. & Zeng, H. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Prog Energy Combust*, 38, 302-320.
- Cement Technology Roadmap, Carbon emissions reductions up to 2050 (2009). International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development, p. 36. Date accessed sept. 13, 2011, [http://www.wbcsd.org/DocRoot/mka1EKor6mqL-Vb9w903o/WBCSD-IEA\\_CementRoadmap.pdf](http://www.wbcsd.org/DocRoot/mka1EKor6mqL-Vb9w903o/WBCSD-IEA_CementRoadmap.pdf).

- Collins, F. (2010). Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *Int. J. Life Cycle Assess*, 15, 549–556.
- Deyu, K., Ting, L., Jianjun, Z., Chengchang, M., Jun, J. & Jing, J. (2010). Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24, 701–708.
- Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing Method. *J Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27–42.
- Engelsen, C., Mehus, J. & Pade, C. (2005). Carbon Dioxide Uptake in Demolished and Crushed Concrete, Tech. Rep. Oslo: Norwegian Building Research Institute.
- Ensayos de laboratorio de la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI) (2014).
- Erin, R. et al. (2012). Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38, 302–320.
- Fernández, B., Simons, S., Hills, C., & Carey, P. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO<sub>2</sub>. *Journal of Hazardous Materials B112*, 193–205.
- García, C., et al. (2008). New insights on the use of supercritical carbon dioxide for the accelerated carbonation of cement pastes. *J. of Supercritical Fluids*, 43, 500–509.
- Guggemos, A. & Horvath, A. (2005). Comparison of environmental effects of steel and concrete-framed buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11 (008), 93–101.
- Hasanbeigi et al. (2012). Emerging energy-efficiency and CO<sub>2</sub> emission-reduction technologies for cement and concrete production: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6220–6238.
- Huijgen, W., Ruijg, G., Comans, R. & Witkamp, G. (2006). Energy consumption and net CO<sub>2</sub> sequestration of aqueous mineral carbonation. *Industry Engineering Chemistry*, 45, 9184–9194.
- Jonsson, G. & Wallevik, O. (2005). Information on the use of concrete in Denmark, Sweden, Norway and Iceland, Tech. Rep. Reykjavik: Icelandic Building Research Institute.
- Katz, A. (2004). Treatments for the improvement of recycled aggregate. *J Mater Civil Eng*, 16(6), 597–603.
- Kawano, H. (2000). Barriers for sustainable use of concrete materials, Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century. London/New York: E & FNSpon.
- Khatib, J. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement & Concrete* 2005, 35, 763–769.
- Kosmatka, S. et al. (2002). Design and control of concrete mixtures. Cement Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 7.
- Kou, S. & Poon, C. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69–76.
- Kou, S., Zhan, B. & Poon, C. (2014). Use of a CO<sub>2</sub> curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 45, 22–28.
- Kou, SC., Zhan, B.J. & Poon, C.S. (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction Build Mater*, 28, 549–556.
- Lagerblad, B. (2005). Carbon Dioxide Uptake During Concrete Life Cycle: State of the Art, Tech. Rep, Swedish Cement and Concrete Research Institute, de www.cbi.se.
- Li, G., Xie, H. & Xiong, G. (2001). Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders. *Cement and Concrete Composites*, 23, 381–387.
- Li, W. (2002). Composition Analysis of Construction and Demolition Waste and Enhancing Waste Reduction and Recycling in Construction Industry in Hong Kong, Department of Building and Real Estate. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University.
- Liu, Q., Xiao, J., & Sun, Z. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement Concrete*, 41, 1050–1057.
- Méndez, S. (2011). Aprovechamiento de escombros: una oportunidad para mejorar la infraestructura de las comunidades marginadas. II Conferencia Internacional “Gestión de Residuos en América Latina (GRAL)”.
- Montgomery, D.G. (1998). Workability and compressive strength properties of concrete containing recycled concrete aggregate. In R.K. Dhir, N.A. Henderson, M.C. Limbachiya (eds.). *Proceedings of international symposium: sustainable construction: use of recycled concrete aggregate*. London: Thomas Telford, 289–296.
- Olorunsogo, F.T. & Padayachee, N. (2002). Performance of recycled aggregate concrete monitoring by durability indexes. *Cement and Concrete Research*, 32, 179–185.
- Pinzón, A. (2013). Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá. Trabajo de tesis de grado. Especialización en planeación ambiental y gestión integral de los recursos naturales. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Poon, C. & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *ResourConservRecycl*, 50, 293–305.
- Ravindrarajah, R.S. & Tam, T.C. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37.
- Rehan, R. & Nehdi, N. (2005). Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*, 8(2), 105–114.
- Report: Construction Materials Recycling Association. Concrete Recycling.org. (2013).
- Report: European Aggregates Association (2012). *Annual review 2011–2012*. Brussels, Belgium.
- Resolución 2397 de 2011 (abril 25), Por la cual se regula técnicamente el tratamiento o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital, artículo 4.
- Roussat, N., Dujet, C. & Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste management*, 29(1), 12–20.
- Roy, S. & Poh, K. (1999). Northwood. Durability of concrete accelerated carbonation and weathering studies, *Build. Environ*, 34, 597–606.
- Shu, E. & Pen-Chi, C. (2012). CO<sub>2</sub> Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications. *Aerosol and Air Quality Research*, 12, 22.
- Tam, V. et al. (2007). Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. *Resources. Conservation. Recycling*, 50(1), 82–101.
- Tateyashiki, H. et al. (2001). Properties of concrete with high quality recycled aggregate by heat and rubbing method. *ProcCI*, 23(2), 61–66.
- Tomosawa, F. & Noguchi, T. (2000). *New technology for the recycling of concrete—Japanese experience*. Concrete Technology for a Sustainable Development in the 21st Century. London/New York: E & FNSpon, 274–287.
- Urge, D. (2007). Climate change mitigation in the building sector: the findings of the 4th Assessment report of the IPCC. Center for climate change and sustainable energy policy, 38.
- Van, O. & Padovani, A. (2003). Cement manufacture and the environment. Part II: Environmental challenges and opportunities. *J Ind Ecol*, 7(1): 93–126.

Villamizar, L. (marzo-mayo de 2014). *Revista Ingeniería y Tecnologías*. Construcción, otro sector en la onda verde, 12-13.

Yamasali, A. (2003). An overview of CO<sub>2</sub> mitigation options for global warming – emphasizing CO<sub>2</sub> sequestration options. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 36(4), 361-375.

Zhonghe, S. et al. (2008). Rehydration reactivity of recycled mortar from concrete waste experienced to thermal treatment. *Construction and Building Materials*, 22, 1723–1729.