

Desempeño mecánico y durable de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial

DIANA MARCELA BURGOS GALINDO¹

 ÁLVARO GUZMÁN APONTE¹

NANCY TORRES CASTELLANOS¹

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de un estudio de viabilidad técnica de uso de agregado reciclado fino comercial (ARF) proveniente de concretos de las actividades de construcción y demolición (RC&D), en la fabricación de concreto de mediana resistencia. Con el fin de evaluar el desempeño mecánico y durable de los concretos, se estudiaron diferentes propiedades como la densidad, absorción, sorptividad, resistencia mecánica, tracción indirecta y permeabilidad al ion cloruro, de concretos con incorporación de 20% y 40% de ARF (ARF20% y ARF40%, respectivamente) en reemplazo del agregado fino natural. Los resultados se compararon con un concreto de referencia incorporando agregado fino natural (ARF0%).

Se encontró que la incorporación de ARF hasta un 40% en los concretos, no causa un detrimento marcado en la consistencia del concreto en estado fresco. En términos generales, a pesar de que las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los concretos en estado endurecido disminuyen con el incremento en la incorporación de ARF en reemplazo del agregado fino natural; los valores de las propiedades alcanzadas por los concretos ARF20% y ARF40%, fueron comprobables a aquellas alcanzadas por el concreto de referencia ARF0%, y aptas para la construcción de concretos de mediana resistencia.

Palabras Clave: agregado reciclado fino, concreto, durabilidad, propiedades mecánicas, resistencia a cloruro, sorptividad.

¹ Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá, Colombia.



*Autor de correspondencia: Guzmán Aponte, A. (Álvaro):
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, AK.45
No. 205-59 (Autopista Norte). Teléfono: 6683600.
Correo electrónico: alvaro.guzman@escuelaing.edu.co*

Historia del artículo:

Artículo recibido: 26-X-2017/ Aprobado: 30-V-2019
Disponible online: 3 de julio de 2019
Discusión abierta hasta marzo de 2021

Mechanical and durable performance of concrete that incorporates commercial fine recycled aggregate

Abstract

This paper presents the results of a technical feasibility study about the use of fine commercial recycled aggregate (ARF) from the construction and demolition wastes (RC&D), in the manufacture of concrete of medium strength. In order to evaluate the mechanical and durable performance of the concretes, different properties such as density, absorption, sorptivity, mechanical strength, indirect traction and chloride ion permeability were studied in a series of concretes incorporating 20% and 40% of the ARF (ARF20% and ARF40%, respectively) replacing the natural fine aggregate (AFN). The results were compared with a standard concrete incorporating natural fine aggregate (ARF0%).

It was found that using up to 40% of ARF in the concrete there is no cause adverse effects on fresh concrete consistency. Although the physical, mechanical and durability properties of concretes in hardened state decrease with the increase in the incorporation of ARF in replacement of the natural fine aggregate; the values of the properties achieved by the concretes ARF20% and ARF40% were affordable to those achieved by the standard concrete ARF0%, and suitable for the manufacture of medium strength concretes.

Keywords: Concrete, chloride resistance, durability, fine recycled aggregates, mechanical properties, sorptivity.

Desempenho mecânico e durável de concreto que incorpora agregado reciclado fino comercial

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de um estudo de viabilidade técnica sobre o uso de agregados reciclados comerciais (ARF) de resíduos de construção e demolição (RC & D), na fabricação de concreto de média resistência. Com o objetivo de avaliar o desempenho mecânico e durável dos concretos, diferentes propriedades como densidade, absorção, sorvetaria, resistência mecânica, tração indireta e permeabilidade a íons cloreto foram estudadas em uma série de concretos incorporando 20% e 40% do ARF (ARF20 % e ARF40%, respectivamente) substituindo o agregado fino natural (AFN). Os resultados foram comparados com um concreto padrão incorporando agregado fino natural (ARF0%).

Descobriu-se que usando até 40% de ARF no concreto, não há nenhum efeito adverso na consistência do concreto fresco. Embora as propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade dos concretos em estado endurecido diminuam com o aumento da incorporação de ARF em substituição ao agregado natural fino; os valores das propriedades obtidas pelos concretos ARF20% e ARF40% foram acessíveis àqueles alcançados pelo concreto padrão ARF0%, e adequados para a fabricação de concretos de média resistência.

Palavras-chave: Concreto, resistência a cloretos, durabilidade, agregados reciclados finos, propriedades mecânicas, sorvitividade.

1. Introducción

Los materiales de construcción son los más consumidos de los materiales de ingeniería, y la producción de concreto supera la de todos los demás materiales de construcción juntos. Se estima que la producción media anual de concreto es de aproximadamente 1 ton por ser humano en el mundo (Marie & Quiasrawi, 2012). En el concreto los agregados (arena y grava) ocupan entre el 60 - 75% de su volumen, lo que constituye el grueso del concreto. Por esta razón, el aumento de la producción y utilización del concreto en el sector de la construcción, ha sido catalogado como uno de los grandes consumidores de recursos naturales, generando una enorme presión sobre los ecosistemas circundantes (Kosmatka, Kherkhoff & Panarese, 2002; Marinković, Radonjanin, Malešev & Ignjatović, 2010; De Brito & Saikia, 2013).

Por otra parte, la creciente acumulación de residuos y su gestión plantean un problema mundial. Por ejemplo, la generación de residuos de construcción y demolición (RC&D) ha llevado a la implementación de nuevas políticas ambientales sostenibles que fomentan el reciclaje y la reutilización de dichos residuos (Delay, Lager, Schulz & Frimmel, 2007). A nivel mundial, cada año se producen millones de toneladas de residuos provenientes de las actividades de construcción y demolición, de los cuales se considera que el 50% corresponden a residuos de concreto (Li, 2002). En Bogotá, en el año 2009 se produjeron aproximadamente 12 millones de toneladas de RC&D, el equivalente a 70 torres Colpatria (Méndez, 2011), ocasionando impactos negativos en la salud, el espacio público y el medio ambiente (Méndez, 2011; Pinzón, 2013).

La versatilidad de la industria del cemento y el concreto le confiere un enorme potencial para incorporar nuevos materiales de diferente origen como adiciones activas en cemento, así como agregados gruesos o finos en la fabricación de mortero, concreto y, bases y sub-bases de carreteras (Medina, Banfill, Sánchez de Rojas & Frías, 2013). De esta manera, con el propósito de que los centros urbanos alcancen un

escenario sustentable 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 construcción y demolición de 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 construcción 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. En Europa, Alemania representa 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 (European Aggregates Association (2012)). Doshó (2007) reportó que en Japón se registra una tasa de aproximadamente 98 % de reciclaje de RC&D de concreto, para manufacturar ARC.

El uso de ARC en la fabricación de concreto, es una práctica que se ha venido manejando desde hace varias décadas (González-Fonteboa, Martínez-Abella, Herrador & Seara-Paz, 2012; Braga, De Brito & Veiga, 2014)); y en lo que respecta al origen de los ARC empleados en las diferentes investigaciones, estos generalmente provienen de plantas de reciclado o de concretos producidos en laboratorio con ese fin (Evangelista & De Brito, 2010; Kou & Poon, 2012; Kou, Zhan & Poon, 2014; Zhan, Poon, Liu, Kou & Shi, 2014; Vázquez, Barra, Aponte, Jiménez y Valls, 2014; Hongru & Yuxi, 2015). Sin embargo, diversos autores han reportado que las propiedades mecánicas y de durabilidad de especímenes de concreto, elaborados con ARC son inferiores en comparación a especímenes elaborados con agregados naturales (Ravindrarajah & Tam, 1985; Khatib, 2005; Poon & Chan, 2007; Liu, Xiao & Sun, 2011). Específicamente, en el caso de los concretos que incorporan agregado reciclado fino (ARF), autores como Ravindrarajah,

Loo & Tam (1987) y Evangelista & De Brito (2004) encontraron que los cambios más marcados están relacionados con la mayor contracción por secado y la menor durabilidad. Evangelista & De Brito (2010) mencionaron que la permeabilidad al agua, la absorción capilar y la difusión del ion cloruro en el concreto, incrementan con el aumento en la relación de reemplazo de agregado natural por ARF.

El ensayo de succión capilar o sorptividad mide directamente la interconectividad de la estructura de poros, por lo que se reconoce como un buen criterio de evaluación del ingreso de sustancias agresivas hacia el interior del concreto (Howland & Martín, 2013). Uno de los aspectos más importantes son los ambientes con cloruros, ya que la difusión de este ion hacia la parte interna del concreto, puede provocar la corrosión de las barras de refuerzo (Ann, Ahn & Ryou, 2009). Por esta razón, algunos autores son pesimistas sobre el uso de concreto que incorpora agregado reciclado en ambientes con cloruros, principalmente porque consideran que la alta porosidad de ARC provocará una alta difusión de cloruros en el concreto. Sin embargo, Otsuki, Miyazato & Yodsudjai (2003) encontraron que la penetración de cloruros en concretos de alta resistencia que incorporan ARC

con absorción de agua del 4,5%; es ligeramente inferior a un concreto equivalente que incorpora agregado natural (AN).

Con base en lo anterior, se planteó la presente investigación, que se enfocó en evaluar las principales propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad (resistencia a la penetración del ion cloruro) de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial en diferentes proporciones (20% y 40% ARF) en reemplazo del agregado fino natural; respecto a las propiedades de un concreto que incorpora agregado fino natural (0% ARF). Se evaluaron diferentes propiedades físicas y de durabilidad de los concretos tales como la densidad, porosidad y sorptividad; además de la permeabilidad ion cloruro. En cuanto a las propiedades mecánicas de los concretos, fueron evaluadas la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales y Mezclas

El cemento empleado para las mezclas de concreto fue un cemento Portland de uso general (tipo I), cuya composición química se presenta en la **Tabla 1**.

TABLA 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND DE USO GENERAL (%)

FUENTE: AUTORES

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	SO ₃	SrO	Mn ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	ZnO	PF
20,73	5,63	4,54	52,59	0,15	2,24	0,24	0,14	0,41	3,14	0,16	0,06	0,03	0,01	9,85

TABLA 2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS AGREGADOS GRUESO Y FINOS (AFN Y ARF)

FUENTE: AUTORES

<i>Ensayo</i>	<i>Norma</i>	<i>AFN</i>	<i>ARF</i>	<i>AGN</i>
Densidad Aparente (Bulk) (g/cm ³)	NTC 237	2,64	2,59	2,76
Absorción (%)	NTC 237	2,1	7,3	1,5
Masa Unitaria suelta (g/cm ³)	NTC 92	1,58	1,40	1,27
Masa Unitaria compacta (g/cm ³)	NTC 92	1,70	1,74	1,47
Módulo de finura	NTC 77	3,4	3,8	-
Tamaño máximo nominal	NTC 77	-	-	3/4" (19,05 mm)
Tamaño máximo	NTC 77	-	-	1" (25,4 mm)
Impurezas Orgánicas	NTC 127	#2	#2	-

El agregado grueso natural (AGN) correspondió a una grava; mientras que el agregado fino natural (AFN) correspondió a un agregado fino proveniente del municipio de Tabio, Cundinamarca. Como agregado reciclado fino comercial (ARF) se empleó agregado fino comercializado en Bogotá por una empresa encargada de su recolección y adecuación. Las propiedades físicas de los agregados (AGN, AFN y ARF) se presentan en la **Tabla 2**; así como sus curvas de distribución granulométrica (ver **Figura 1**).

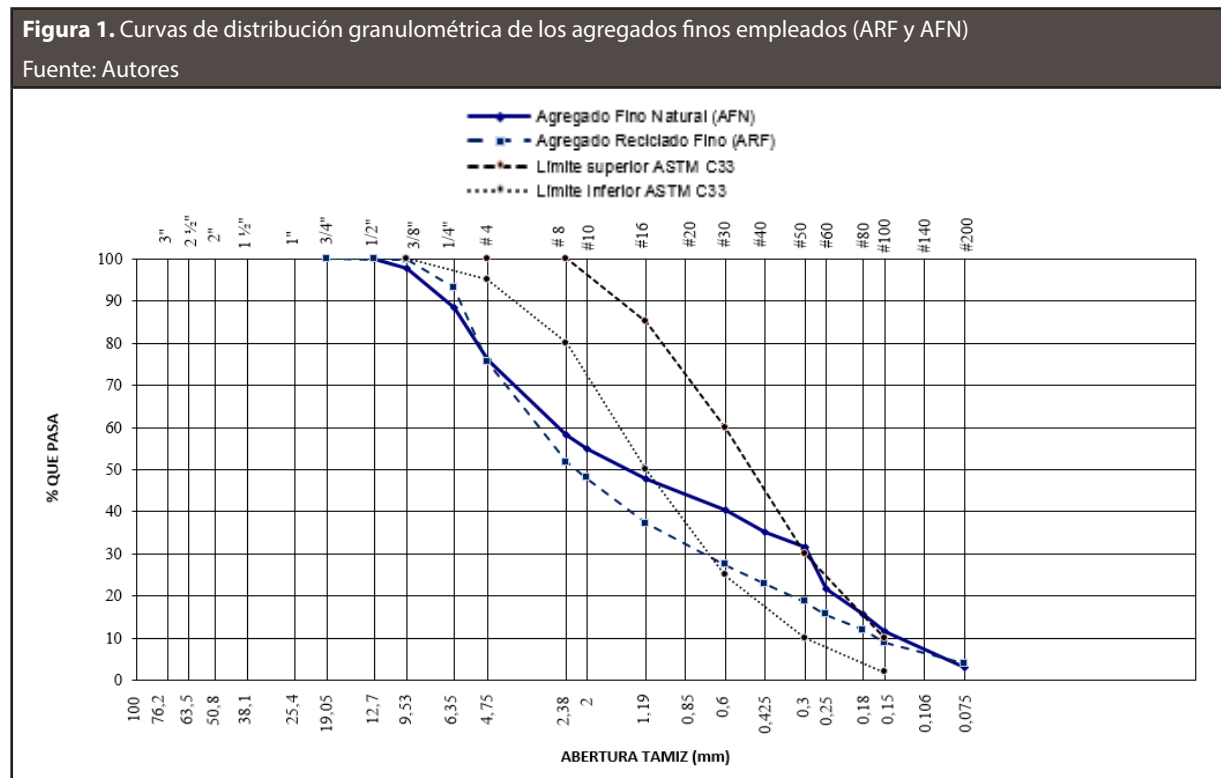
La **Figura 1** permite observar que la ARN y la ARF muestran curvas de distribución similares entre sí, incluso cercanas a aquella especificada por la norma ASTM C-33, lo que permite denotar que el ARN y el ARF presentan distribuciones granulométricas adecuadas para ser empleados en la fabricación de concretos.

Se realizaron tres mezclas de concreto en el laboratorio. Por tanto, un concreto hecho con 100% de AFN y relación a/c de 0,50 fue utilizado como concreto de referencia (CARF0); mientras los

concretos que incorporaron ARF fueron realizados reemplazando el AFN por 20% y 40% en masa de ARF (CARF20 y CARF 40, respectivamente). Las proporciones de mezcla de los diferentes concretos son presentadas en la **Tabla 3**. En aras a mantener el valor del asentamiento en el rango de 65 – 100 mm, se empleó 1,2% en peso de cemento de un superplastificante (SP) EUCON MR 250, en todas las mezclas.

TABLA 3. PROPORCIONES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO
FUENTE: AUTORES

Material (kg/m ³)	CARF0	CARF20	CARF40
Cemento	410	410	410
Agua	205	205	205
AGN	678	647	655
AFN	1017	777	589
ARF	0	194	393
SP	4,92	4,92	4,92



En lo que respecta al procedimiento de mezcla, los materiales fueron incorporados a la mezcladora en el siguiente orden: agregado grueso, agregado fino (natural y reciclado), cemento, y el agua con el SP fue añadida después de una mezcla breve de los materiales secos.

El asentamiento de los concretos en estado fresco fue medido haciendo uso del cono de Abrams. Los valores de consistencia de los concretos CARF20 y CARF40 fueron similares al del concreto de referencia CARF0 (asentamiento: 80 ± 25 mm).

2.2 Propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad de los concretos

La densidad y porosidad total de los concretos fueron evaluadas a edades de curado bajo agua de 28 y 90 días, con base en la norma ASTM C642. Se realizó el ensayo de succión capilar o sorptividad conforme al procedimiento descrito en la Normativa Suiza EMPA-SIA 162/1, en aras a caracterizar la estructura de poro y como un indicador de la durabilidad de los concretos. Los ensayos de densidad, absorción de agua y succión capilar, fueron realiza-

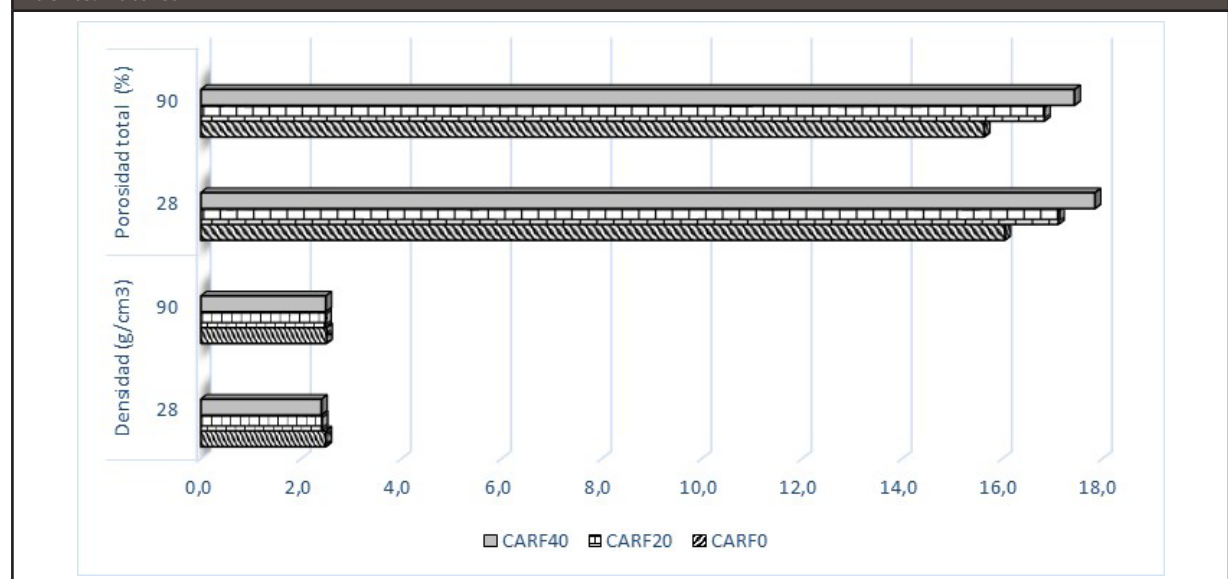
dos sobre especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro x 50 mm de longitud.

El comportamiento mecánico de los concretos fue evaluado a edades de curado de 28 y 90 días, a partir de propiedades como la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta, sobre especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro x 200 mm de longitud, con base en las normas ASTM C39 y ASTM C496, respectivamente. En cada caso, el valor indicado representa el promedio de tres especímenes de prueba.

La permeabilidad de los concretos al ion cloruro, fue realizada teniendo en cuenta la metodología descrita en la norma ASTM C1202, que consiste en forzar el ingreso de los cloruros dentro de un espécimen de concreto por medio de un potencial eléctrico. Para el ensayo, se emplearon especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro x 50 mm de longitud, provenientes de cilindros de concreto de 100 mm de diámetro x 200 mm de longitud. La resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro es representada por la carga pasada total en coulombs durante un periodo de prueba de 6 h. En este estudio, el ensayo de permeabilidad al ion cloruro se llevó a cabo a edades de curado de 28 y 90 días.

Figura 2. Evolución de la densidad y porosidad total respecto al tiempo de curado de los concretos.

Fuente: Autores



3. Resultados y discusiones

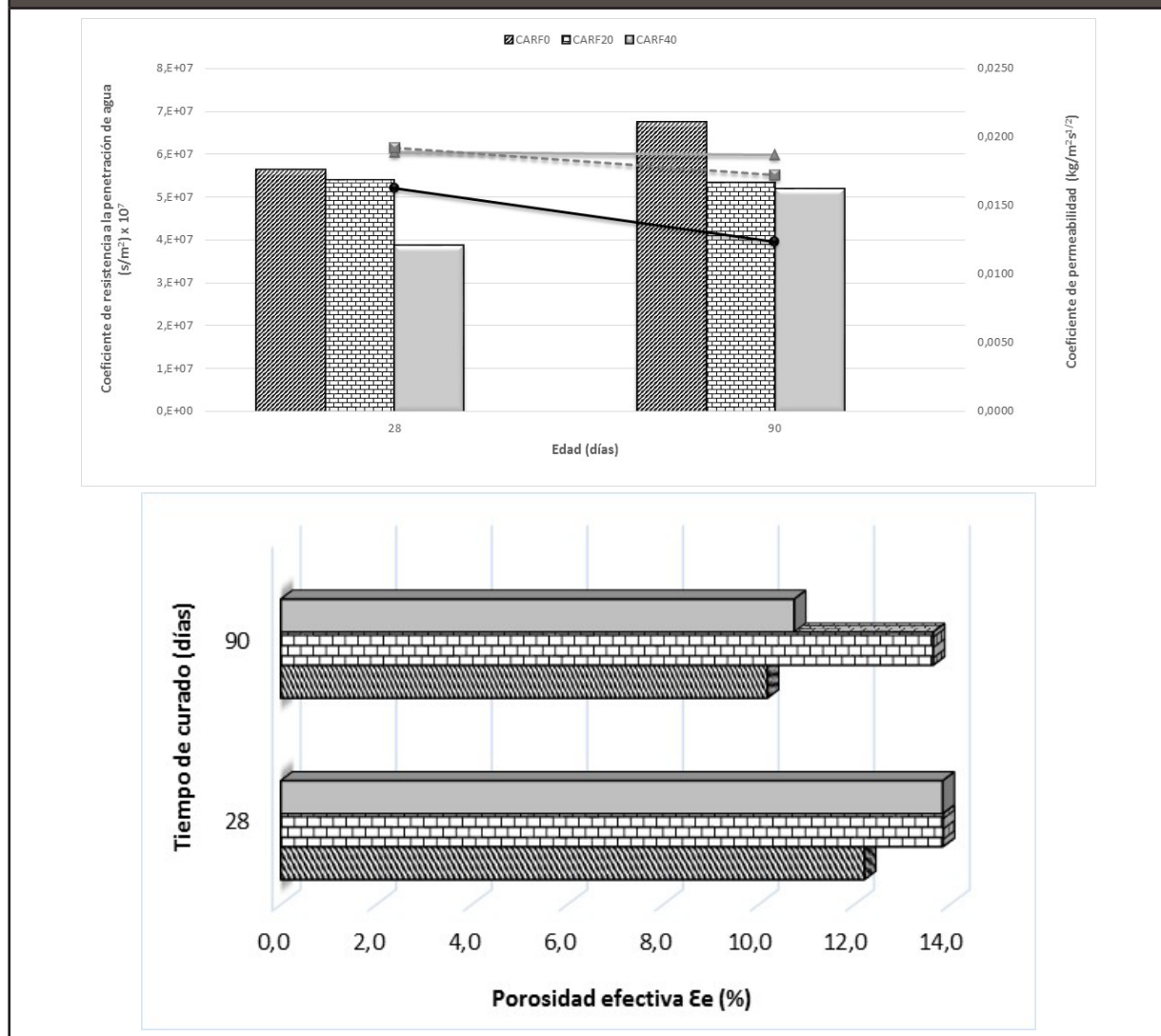
3.1. Densidad, Porosidad y Sorptividad

Se encontró a los 28 días de curado que los concretos con incorporación de ARF (CARF20 y CARF40, respectivamente) presentan valores de densidad $\approx 3 - 4\%$ menor ($2,42 \text{ g/cm}^3$ y $2,40 \text{ g/cm}^3$, respectivamente) comparados con el concreto de referencia ($2,49 \text{ g/cm}^3$) (ver **Figura 2**); mientras, a

edades de 90 días curado, se observa que los concretos con incorporación de ARF (CARF20 y CARF40, respectivamente) presentan valores de densidad $\approx 1\%$ menor ($2,48 \text{ g/cm}^3$ y $2,49 \text{ g/cm}^3$, respectivamente) comparados con el concreto de referencia ($2,51 \text{ g/cm}^3$). Este comportamiento es análogo al mencionado por autores como Akbarnezhad, Ong, Zhang, Tam & Foo (2011), Xuan, Zhan & Poon (2016). La porosidad como era de esperar, presentó un comportamiento inverso a la densidad.

Figura 3. Estudio de succión capilar de los concretos. a) Coeficientes de resistencia y de permeabilidad de agua (CARF0 (●), CARF20 (▲) y CARF40 (■)); b) Porosidad efectiva

Fuente: Autores



En la **Figura 3 a y b**, se presentan los resultados del ensayo de sorptividad, donde se puede observar el coeficiente de resistencia a la penetración de agua m (representado en el gráfico de columnas), el coeficiente de permeabilidad de agua k (representado en el gráfico de líneas) y la porosidad efectiva (representada en el gráfico de barras), respectivamente.

En términos generales, los resultados demuestran que los concretos que incorporan ARF (CARF20 y CARF40) evidenciaron mayor permeabilidad, ya que presentaron menor coeficiente de resistencia a la penetración y como consecuencia mayor coeficiente de permeabilidad en comparación a la mezcla de referencia (CARF0). Autores como Wirquin, Hahdjewa-Zahaarieva & Buyle-Bodin (2000), Levy & Helen (2004), Zega & Di Maio (2011) también han reportado que la sorptividad de concretos con incorporación de agregados reciclados, es mayor a la de los concretos con incorporación de agregado natural. Este comportamiento es atribuido a la mayor absorción del ARF respecto al AFN. Sin embargo, esta permeabilidad se ve reducida con el tiempo de curado (90 días), como consecuencia de las reacciones de hidratación del cemento. Cabe mencionar que

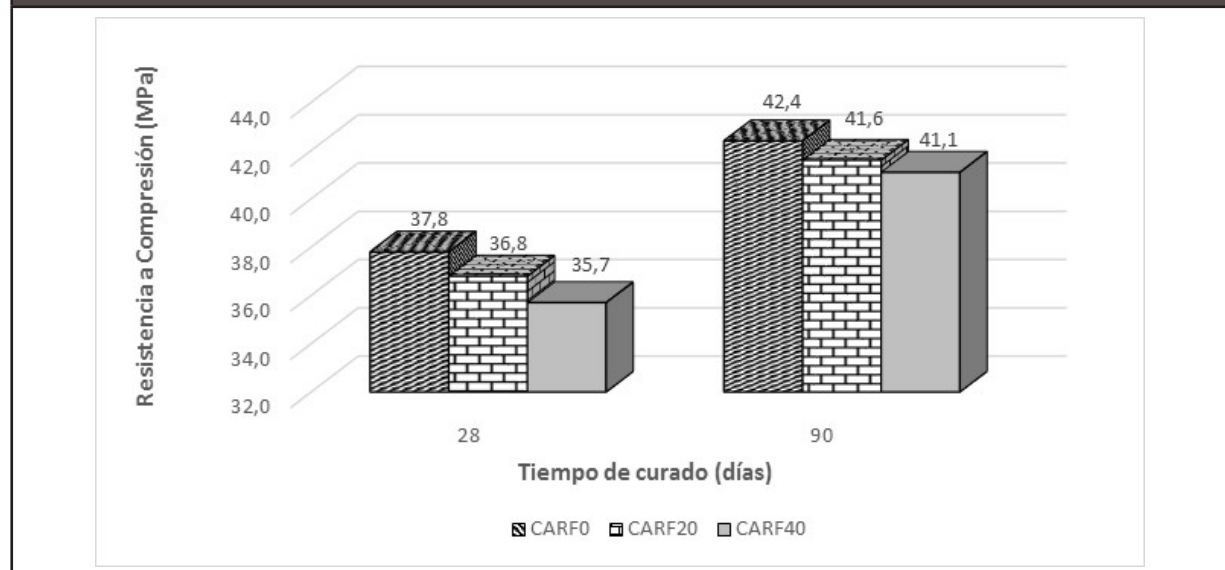
los valores de permeabilidad de CARF20 y CARF40, no se encuentran muy alejados de aquellos valores mostrados por el CARF0; comportamiento atribuido al efecto relleno (*filler effect*), el cual es definido como un arreglo apropiado de partículas pequeñas en la microestructura del concreto que llena los vacíos. Este efecto contribuye a mejorar el desempeño mecánico y de durabilidad al hacer la mezcla más compacta (Bravo, De Brito, Pontes & Evangelista, 2015). En esta investigación el efecto relleno es causado por la adecuada distribución granulométrica mostrada por el ARF (ver **Figura 1**); la cual como se mencionó en el apartado 2.1, es adecuada para su uso en la fabricación de concretos.

3.2. Propiedades Mecánicas

Las resistencias a compresión de los concretos que contienen ARF a las diferentes edades evaluadas (28 y 90 días), fueron similares a la del concreto referencia. A los 28 días de curado los CARF20 y CARF40 alcanzaron valores de resistencias del 97% y 94% la resistencia del CARF0, respectivamente (ver **Figura 4**); mientras que a los 90 días de curado alcanzaron valores del 98% y 97%, respectivamente.

Figura 4. Resistencia a la compresión de los concretos

Fuente: Autores



Esta reducción en la resistencia de los concretos con el incremento en el contenido de agregado reciclado, puede ser atribuida análogo a lo encontrado por Kou & Poon (2012), al hecho de que el mortero adherido en el agregado original causa un detrimento en las propiedades físicas y mecánicas del agregado reciclado, comparado con el agregado natural. Sin embargo, es importante resaltar que esta ligera reducción en la resistencia a la compresión, podría ser atribuida al efecto relleno (*filler effect*), el cual contribuyó a mejorar el desempeño mecánico al hacer la mezcla compacta. Autores como Bravo et al. (2015), mencionan que partículas pequeñas sólo mejoran el rendimiento del concreto en ciertas proporciones de incorporación del agregado reciclado (bajas), ya que posteriormente estas partículas ocupan espacio previamente ocupado por otros materiales disminuyendo la compacidad de las mezclas.

En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta a los 28 días de curado los CARF20 y CARF40 alcanzaron valores de resistencias del 97% y 79% la resistencia del CARF0, respectivamente (ver **Figura 5**); mientras que a los 90 días de curado alcanzaron valores del 93% y 83%, respectivamente.

3.3. Permeabilidad al ion cloruro

Como se puede observar en la **Figura 6**, la resistencia a la penetración del ion cloruro fue medida en términos de carga pasada a través de las probetas de concreto en función del tiempo de curado. Los resultados obtenidos fueron comparados con los límites de permeabilidad del ion cloruro propuestos en la norma ASTM C1202; evidenciando que a 28 días de curado los CARF20 y CARF40 presentaron carga pasada en el rango de los 2000 - 4000 culombios, ubicándose en la zona de moderada permeabilidad a cloruros; mientras que el concreto de referencia (CARF0) se ubicó en el rango de baja permeabilidad (1000 - 2000 culombios). Sin embargo, este comportamiento de los concretos (CARF20, CARF40 y CARF0), mejora con el tiempo de curado, y a los 90 días el desarrollo del proceso de hidratación y las reacciones puzolánicas formando regiones impermeables e incrementando la resistencia a la penetración del ion cloruro (Mindess, Young y Darwin, 2003), contribuyeron a la disminución de la carga pasada de todos los concretos, por lo que los CARF20 y CARF40 se ubicaron en la zona de baja y moderada permeabilidad, respectivamente; y el concreto de referencia en la zona de muy baja permeabilidad.

Figura 5. Resistencia a la tracción indirecta de los concretos

Fuente: Autores

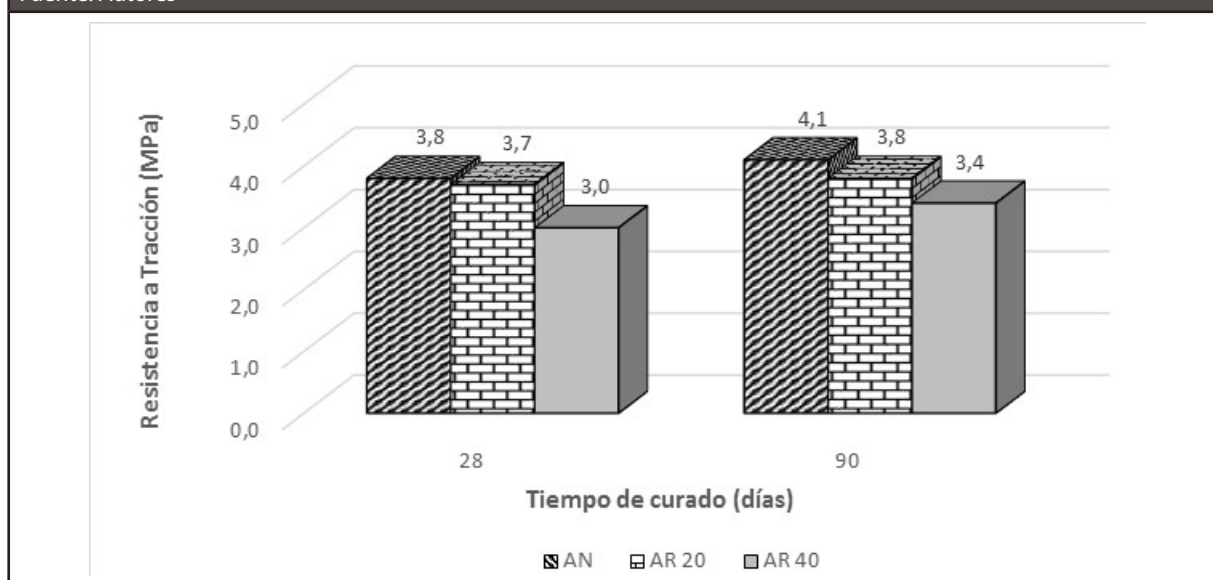
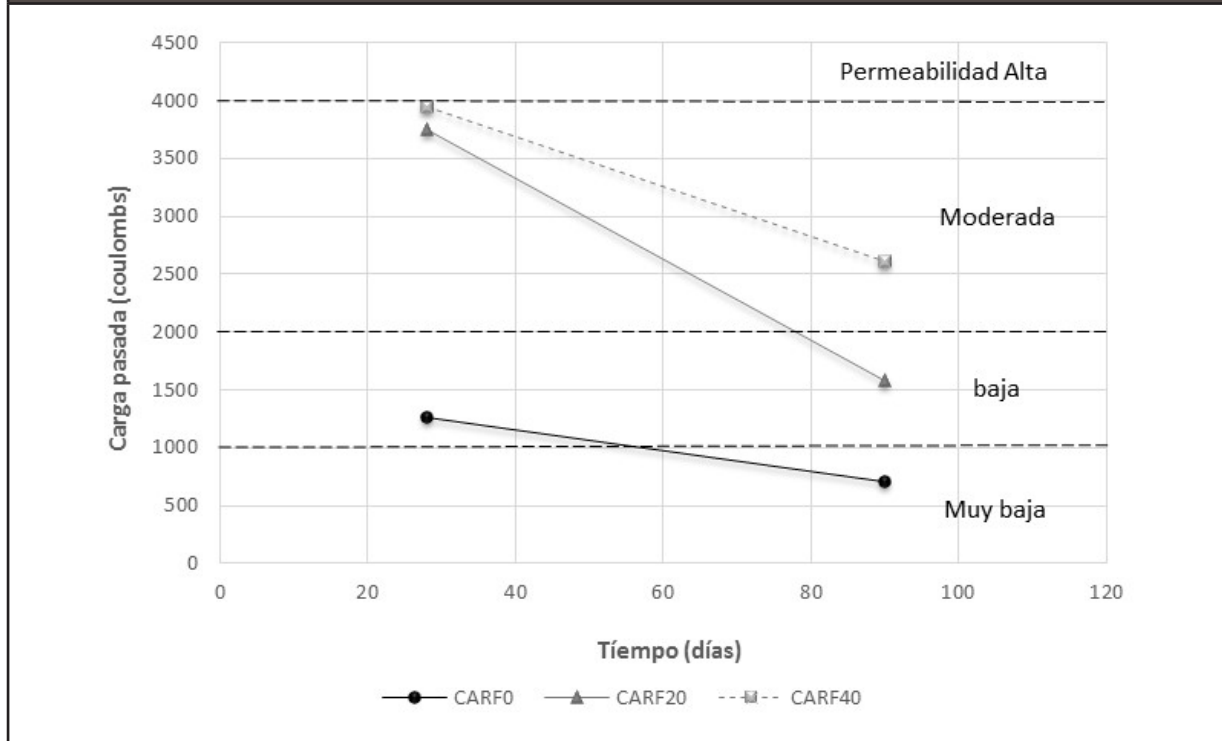


Figura 6. Evolución de permeabilidad a cloruros respecto al tiempo de curado de los concretos

Fuente: Autores



En términos generales, la resistencia a la penetración del ion cloruro disminuye con el incremento en el contenido de agregado reciclado fino en el concreto, acorde a lo encontrado por autores como Kou & Poon (2012), Abdurrahmaan & Al-Fayez (2015) y Bravo *et al.* (2015).

4. Conclusiones

Las siguientes conclusiones pueden ser realizadas con base en los resultados de este estudio:

- La consistencia de los concretos con incorporación de ARF (CARF20 y CARF40) no se ve afectada cuando el AFN se reemplaza hasta en un 40% de ARF.
- Las propiedades físicas (densidad) y mecánicas (resistencia a la compresión) de los concretos CARF20 y CARF40 en estado endurecido, disminuyen ligeramente con el incremento en la incorporación de ARF en reemplazo del

AFN, gracias a la adecuada distribución granulométrica mostrada por el ARF que contribuyó al efecto relleno (*filler effect*).

- El incremento del contenido de ARF en los concretos, ocasionó un incremento en la permeabilidad (menor m y mayor k); así como una reducción en la resistencia a la penetración del ion cloruro. Sin embargo, a edades de curado (90 días) en las cuales se da el desarrollo del proceso de hidratación y las reacciones puzolánicas formando regiones impermeables, se reduce la permeabilidad e incrementa la resistencia a la penetración del ion cloruro; permitiendo ubicar a los concretos CARF20 y CARF40 en la zona de baja y moderada permeabilidad.
- Resulta viable el uso de este tipo de agregado reciclado fino comercial en el diseño de concretos, generando un impacto ambiental positivo al proveer un agregado alternativo para la producción de concretos de mediana resistencia.

5. Financiamiento

Para el desarrollo de este proyecto se contó con el apoyo económico de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia), en particular, las investigaciones “Valoración de agregados reciclados de concreto a través de la técnica de carbonatación acelerada” Convocatoria Interna de 2015 y “Durabilidad de concreto fabricado con Agregado Reciclado de Concreto (ARC) fino comercial carbonatado” Convocatoria Interna de 2016.

Agradecimiento

Los autores quieren agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Colombia), por el apoyo brindado para la financiación y el desarrollo de este estudio, sin lo cual no habría podido desarrollarse este proyecto.

Referencias

- Abdurrahmaan, L., & Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 61, 36-43. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009.
- Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Zhang, M.H., Tam, C.T., & Foo, T.W.J. (2011). Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 25(8), 3469-3479. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.03.038.
- American Society for Testing and Materials, 2016. *ASTM C33-16 Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society for Testing and Materials, 2017. *ASTM C39-17 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society for Testing and Materials, 2011. *ASTM C496-11 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society for Testing and Materials, 2013. *ASTM C642-13 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- American Society for Testing and Materials, 2012. *ASTM C1202-12 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Ann, K.Y., Ahn, J.H., & Ryou, J.S. (2009) The importance of chloride content at the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 239-45. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.014.
- Braga, M., De Brito, J., & Veiga, R. (2014). Reduction of the cement content in mortar made with fine concrete aggregates. *Materials and Structures*, 47(1-2), 171-182.
- Bravo, M., De Brito, J., Pontes, J., & Evangelista, L. (2015). Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants. *Construction and Building Materials*, 77, 357-369. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.103.
- De Brito, J., & Saikia, N. (2013). Recycled aggregate in concrete: Use of industrial, construction and demolition waste. London, UK: Springer.
- Delay, M., Lager, T., Schulz, H.D., & Frimmel, F.H. (2007). Comparison of leaching tests to determine and quantify the release of inorganic contaminants in demolition waste. *Waste Management*, 27(2), 248-255. doi: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.01.013.
- Dosho, Y. (2007). Development of a sustainable concrete waste recycling system – application of recycled aggregate concrete produced by aggregate replacing Method. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), 27-42. doi: 10.3151/jact.5.27.
- EMPA-SIA 162/1, 1989. Test No. 5- Water conductivity, Suiza.
- European Aggregates Association. (2012). Annual review. Brussels, Belgium.
- Evangelista, L., & De Brito, J. (2004). Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production. Conference: Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, RILEM, At Barcelona, Spain.
- Evangelista, L., & De Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement & Concrete Composites*, 32(1), 9-14. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005.
- González-Fontebao, B., Martínez-Abella, F., Herrador, M.F., & Seara-Paz, S. (2012). Structural recycled concrete :

- Behaviour under low loading rate. *Construction and Building Materials*, 28(1): 111-116. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.010.
- Hongru, Z., & Yuxi, Z. (2015). Integrated interface parameters of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 861-877. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.084.
- Howland, J.J., & Martín, A.R. (2013). Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos. *Materiales de construcción*, 312, 515-527.
- Khatib, J.M. (2005). Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. *Cement & Concrete Research*, 35(4), 763-769. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.017.
- Kosmatka, S., Kherkhoff, B., & Panarese, W. (2002). Design and control of concrete mixtures. Chapter 5. Publisher: Portland Cement Association.
- Kou, S., & C, Poon. (2012). Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. *Construction and Building Materials*, 35, 69-76. doi: 0.1016/j.conbuildmat.2012.02.032.
- Kou, S.C., Zhan, B., & Poon, C. (2014). Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 45, 22-28. doi: 10.1016/j.cemcomp.2013.09.008.
- Levy, S., & Helene, P. (2004). Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. *Cement and Concrete Research*, 34(11), 1975-1980. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.02.009.
- 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. (M.Sc Thesis). The Hong Kong Polytechnic University: Hong Kong, China.
- Liu, Q., Xiao, J., & Sun, Z. (2011). Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cement & Concrete Research*, 41(10), 1050-1057. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.007.
- Marie, I., & Quiasrawi, H. (2012). Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 37, 243-248. doi: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.020.
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30, 2255-2264. doi:10.1016/j.wasman.2010.04.012.
- Medina, C., Banfill, P. F. G., Sanchez de Rojas, M., & Frías, M. (2013). Rheological behaviour of cements blended with containing ceramic wastes. In N. Roussel, & H. Bessaies-Bey (Eds.), *Rheology and processing of construction materials: 7th RILEM International Conference on Self-Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials* (1 ed., Vol. PRO90, pp. 65-74). Paris: RILEM. Recuperado de <https://pureapps2.hw.ac.uk/ws/portalfiles/portal/7700978>.
- Méndez, S. (2011). Aprovechamiento de escombros: una oportunidad para mejorar la infraestructura de las comunidades marginadas. In II Conferencia Internacional "Gestión de Residuos en América Latina GRAL".
- Mindess, S., Young, J.F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Otsuki, N.M., Miyazato, S., & Yodsudjai, W. (2003). Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 443-51. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(443).
- Pinzón, A. (2013). Formulación de lineamientos para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá. (Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada). Universidad Militar Nueva Granada: Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/10654/11004/1/TRABAJO%20DE%20GRADO%20ADRIANA%20ISABEL%20PINZON%20M..pdf>.
- Poon, C., & Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, 50(3), 293-305. doi: 10.1016/j.resconrec.2006.06.005.
- Ravindrarajah, R.S., & Tam, C.T. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*, 37(130), 29-38.
- Ravindrarajah, R.S., Loo, Y.H., & Tam, C.T. (1987). Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 39(141), 214-220.

- Roussat, N., Dujet, C., & Méhu, J. (2009). Choosing a sustainable demolition waste management strategy using multicriteria decision analysis. *Waste Management*, 29(1), 12-20. doi:10.1016/j.wasman.2008.04.010.
- Vázquez, E., Barra, M., Aponte, D., Jiménez, C., & Valls, S. (2014). Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*, 67, 61-67. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028.
- Wirquin, E., Hahdjewa-Zahaarieva, R., & Buyle-Bodin, F. (2000). Use of water absorption by concrete as a criterion of the durability of concrete – application to recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 33(6), 403-408.
- Xuan, D., Zhan, B., & Poon, C. (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67-74. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018.
- Zega, C.J., & Di Maio, A.A. (2011). Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. *Waste Management*, 31(11), 2336-2340. doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.011.
- Zhan, B., Poon, C., Liu, Q., Kou, S., & Shi, C. (2014). Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 67, 3-7. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.09.008.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Burgos Galindo, D.M.; Guzmán Aponte, Á.; Torres Castellanos, N. (2019). Desempeño mecánico y durable de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial. *Revista EIA*, 16(32), Julio-Diciembre, pp. 167-179. [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1210>