

Propiedades físico-mecánicas de concretos autocompactantes producidos con polvo de residuo de concreto

Physico-mechanical properties of self-compacting concrete produced with concrete waste powder

Jhonny Pastrana-Ayala¹
Yimmy Silva-Urrego²
Juan Adrada-Molano³
Silvio Delvasto-Arjona⁴

¹ Universidad del Valle; (Colombia); correo: jhonny.pastrana@correounivalle.edu.co

² Universidad del Valle; (Colombia); correo: yimmy.silva@correounivalle.edu.co

³ Universidad del Valle; (Colombia); correo: juan.adrada@correounivalle.edu.co

⁴ Universidad del Valle; (Colombia); correo: silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

Recibido: 06-05-2019 Aceptado: 23-07-2019

Cómo citar: Pastrana-Ayala, Jhonny; Silva-Urrego, Yimmy; Adrada-Molano, Juan; Delvasto-Arjona, Silvio (2019). Propiedades físico-mecánicas de concretos autocompactantes producidos con polvo de residuo de concreto. *Informador Técnico*, 83(2), 174-190. <https://doi.org/10.23850/22565035.2170>

Resumen

La gran demanda de Cemento Portland Ordinario (CPO) debido al incremento de nuevas obras civiles y la generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) causan un impacto ambiental negativo, por lo que una solución a esta problemática es el reciclaje de estos materiales para la producción de nuevos concretos. El reemplazo parcial de CPO por polvo de residuo de concreto (Concrete Waste Powder, CWP), proveniente del proceso de reciclaje de concreto, ha sido un enfoque sostenible. En esta investigación se realizó la caracterización química y pozzolánica del CWP mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), la prueba Frattini e índice de actividad de resistencia. Además, se evaluó la factibilidad de producir Concretos Autocompactantes (CAC) elaborados con CWP. El comportamiento de los CAC preparado con varias relaciones de reemplazo de CWP por CPO (en 0, 10, 20 y 30 %) proveniente de RCD, se evaluaron experimentalmente. Las propiedades de trabajabilidad se determinaron mediante las pruebas de flujo de asentamiento, embudo en V y caja en L. Las propiedades en estado endurecido de los CAC estudiadas incluyeron la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción indirecta, la resistencia a la flexión, la porosidad y la succión capilar. Los resultados experimentales de este trabajo mostraron que el CWP puede ser empleado con éxito como relleno en concretos autocompactantes, a pesar de disminuir la trabajabilidad y la resistencia mecánica.

Palabras clave: concreto autocompactante; residuos de demolición y construcción; polvo de residuo de concreto; cemento Portland; trabajabilidad; propiedades mecánicas.

Abstract

The high demand of Ordinary Portland Cement (CPO) due to the increase in new civil works, in addition to the generation of demolition and construction waste (RCD), cause a negative environmental impact, so a solution to this problem is the recycling of these materials to produce new concrete. The partial replacement of Portland cement by concrete waste powder (CWP) from the concrete recycling process has been highlighted as a sustainable approach. This paper present the chemical and pozzolanic characterization of CWP through X-ray fluorescence (FRX) and Frattini and resistance activity index test respectively. Also, it was evaluated the feasibility of producing self-prepared concretes (SCC) prepared with CWP. The

performance of SCC prepared with various replacement ratios of CWP to CPO (i.e., 0 %, 10 %, 20 %, and 30 %) from RCD, has been evaluated experimentally. The workability properties were performed regarding the slump flow test, V-funnel, and L-box. The hardened properties of SCCs including compressive strength, splitting tensile strength and flexural strength, porosity and Capillary suction were studied. The experimental results of this work are showed that the CWP can be used successfully as a filler in self-compacting concrete, although decreasing workability and mechanical resistance.

Keywords: Self-compacting concrete; construction and demolition waste; concrete waste powder; Portland cement; workability; mechanical properties.

Introducción

El Concreto Autocompactante (CAC) es un concreto especial que fluye por su propio peso, toma la forma del encofrado y llena todos los espacios vacíos, manteniendo su homogeneidad, incluso, en presencia de refuerzos (Señas; Priano; Marfil, 2016; Matos; Prudêncio-Jr.; Oliveira; Pelisser; Gleize, 2018), esto hace que el CAC sea particularmente útil donde el vaciado es difícil, tal como ocurre en estructuras de concreto altamente reforzadas o con cimbras complicadas (Silva; Robayo; Matthey; Delvasto, 2016). La aparición del concreto autocompactante ha impactado positivamente al sector de la construcción por la innovación que conlleva. En un principio se diseñó para compensar una creciente escasez de personal especializado en el vibrado del concreto, pero ha demostrado ser ventajoso al reducir el tiempo de construcción, la mano de obra, los niveles de ruido y vibraciones, mejorar la calidad en los acabados (superficie) y la durabilidad, tener menores costos y consumo energético, entre otras. (Silva *et al.*, 2016; Aydin; Nasl; Kotan, 2018). Otra de las razones del empleo del concreto autocompactante es el hecho de que es una tecnología orientada a generar un impacto ambiental positivo. Los CAC incorporan subproductos industriales, agroindustriales, *filler*, residuos de demolición y construcción (Mohammed; Dawson; Thom, 2013; Omrane; Kenai; Kadri; Ait-Mokhtar, 2017) que contribuyen al desarrollo sostenible de la tecnología del concreto, haciéndolo más ecológico (Cremades, 2011).

Respecto al concreto, este es un material compuesto que por sus características como versatilidad y bajo costo, es el comúnmente más empleado en la construcción a nivel mundial, por lo que a medida que crece la población en la tierra, su uso también aumenta (Aslani; Ma; Yim-Wan; Muselin, 2018). Por otra parte, su actual demanda y la terminación de la vida útil de construcciones antiguas, produce grandes cantidades de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Eguchi *et al.*, 2007; Xiao; Ling; Kou; Wang; Poon, 2011).

Los RCD, consisten en concreto, ladrillos de desechos, mortero, cerámica, metal, plástico, madera y otros. Los ladrillos, concretos, cerámica y mortero constituyen el 80 % de los residuos de construcción y demolición (Özalp; Yılmaz; Kara; Kaya; Şahin, 2016). El desperdicio de estos desechos genera un impacto negativo al medio ambiente, debido a que son depositados en vertederos sin control (Arenas *et al.*, 2017) y, en algunos casos, en lugares no adecuados que podría generar contaminación del agua, la atmósfera y el suelo (Xiao; Ma; Sui; Akbarnezhad; Duan, 2018). Cada año se generan alrededor de 1300 millones de toneladas de residuos en Europa, de los cuales el 40 % o 510 millones de toneladas, son RCD. Los Estados Unidos produce alrededor de 325 millones de toneladas de RCD y Japón alrededor de 77 millones de toneladas (World Business Council for Sustainable Development [WBCSD], 2009). En Colombia se producen más de 22 millones de toneladas de residuos de construcción (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017); y solo en la capital, Bogotá, se producen cerca de 12 millones de toneladas de escombros por año (Caicedo, 2016). En la ciudad de Cali se producen cerca de 2480 m³ de escombros diarios, de los cuales el 23,4 % lo aportan las remodelaciones domiciliarias, que son depositados en escombreras autorizadas que no dan abasto para la gran cantidad de RCD, por lo cual, una gran parte de estos residuos son dejados en parques, zonas verdes o lotes, causando contaminación del aire, el agua, el suelo y el paisaje (Ortiz; Silva, 2013).

El reciclaje y reutilización de los RCD se ha convertido en un tema de interés mundial y hay una necesidad elevada de tener alternativas de aplicaciones para los diferentes materiales que componen los RCD. La recuperación de los RCD no solo reduce los impactos generados por su disposición final, sino que también contribuye a reducir el impacto producido en la extracción de recursos naturales (Xiao *et al.*, 2018). Diversos estudios se han llevado a cabo con resultados aceptables sobre el uso de RCD en concretos, como agregado reciclado para aplicaciones en bases y sub-bases de carreteras (Leite; Motta; Vasconcelos; Bernucci, 2011; Rahman; Imteaz; Arulrajah; Piratheepan; Disfani, 2015; Xuan; Molenaar; Houben, 2015), como

agregado grueso para la producción de un concreto nuevo (Shi-cong; Bao-jian; Chi-sun, 2012; Xuan; Zhan; Chi-sun, 2016; Silva; Gordillo; Delvasto, 2017) y como agregado grueso para la fabricación de concreto autocompactante (Kou; Poon, 2009).

Además, el reciclaje de este residuo (concreto) genera un subproducto fino que se produce en la trituración o molienda, el cual puede ser empleado en las mezclas de concreto autocompactante como reemplazo parcial o adición del cemento Portland, generando un enfoque integral al reciclaje del concreto, ya que los dos materiales producidos en el reciclaje de este material compuesto pueden ser empleados (agregados y finos) de manera simultánea o individual, y de esta manera aliviar los desafíos de sostenibilidad que enfrenta la industria de la construcción. El empleo de este polvo de concreto en los CAC ha presentado una mejora sustancial en la fluidez, en la resistencia a la segregación y en algunos casos en la resistencia a la compresión (Pajares; Sánchez de Rojas; Frías; Bárbara, 2008). Muchos investigadores han estudiado diferentes *fillers* de RCD y residuos sólidos que pueden reemplazar el relleno mineral en la mezcla de concreto, (Chen; Lin; Wu, 2011; Elyamany; Elmoaty; Mohamed, 2014; Gómez-Mejide, 2015) descubriendo que dichos *filler* pueden no tener una influencia negativa en las mezclas de concreto, así como mejoras en algunas propiedades.

En este contexto, esta investigación pretende presentar una contribución al estudio del empleo del polvo generado en el proceso de molienda o reciclaje de concreto como reemplazo parcial del cemento Portland en concretos autocompactantes, mediante la evaluación de las propiedades en estado fresco, propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión) e indicadores de permeabilidad (absorción y succión capilar).

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó el procedimiento metodológico mostrado en el esquema de la Figura 1. En primera instancia se realizó un muestreo de los residuos de demolición y construcción en una estación de transferencia ubicada en la ciudad de Cali, Colombia. Los residuos de construcción y demolición muestreados fueron solo de concreto.

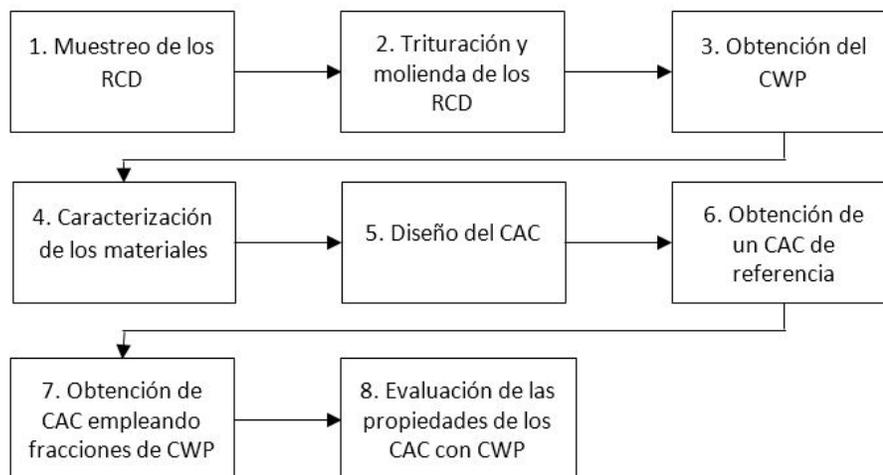


Figura 1. Metodología desarrollada durante la investigación.
Fuente: elaboración propia.

En el reciclaje de los RCD para obtener agregado grueso reciclado (ver Figura 2), mediante una trituradora de mandíbula, se genera un polvo. Posteriormente, este polvo se sometió a un proceso de conminución en un molino de bolas con el fin de llevarlo a las condiciones adecuadas para este estudio (impalpable), puesto que había quedado con partículas grandes (algunos milímetros). La distribución de tamaños de partículas del polvo de concreto o polvo de residuo de concreto (CWP) fue obtenida mediante granulometría láser (mastersizer 2000 marca Malvern, utilizando como medio dispersante agua) después de dos horas de molienda (ver Figura 3). El tamaño medio de partícula obtenido fue de 24,5 μm como se observa en la Tabla 1.



Figura 2. Concreto reciclado.
Fuente: elaboración propia.

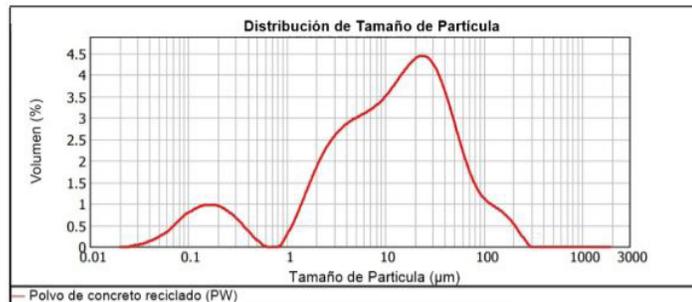


Figura 3. Curva granulométría del polvo de concreto (CWP).
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1.
Valores de distribución granulométrica del polvo de concreto (CWP) de RCD

Muestra	Diámetro medio (µm)	Diámetro d(0,1) (µm)	Diámetro d(0,5) (µm)	Diámetro d(0,9) (µm)
CWP	24,53	0,41	12,27	59,42

Fuente: elaboración propia.

Materiales

Cemento Portland Ordinario (CPO)

En este estudio experimental se empleó cemento Portland ordinario o de uso general de acuerdo a la NTC 121 (INCOTEC, 1982). El CPO fue obtenido de cemento Argos y contiene una adición mineral de piedra caliza. La composición química se muestra en la Tabla 2 mediante FRX.

Polvo de concreto (CWP)

El polvo de concreto reciclado usado en este estudio, se tomó de material de desecho de la trituración de concreto proveniente de los RCD. La composición química se obtuvo mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), en donde se identificó que se compone principalmente de SiO_2 , CaO , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , (ver Tabla 2), además, presentó un porcentaje mayor de Pérdida por Ignición (PI) que el CPO. Por ser un material reciclado, al molerse se combinaron todos los componentes, entre estos el

mortero de cemento Portland y el agregado grueso, lo que hizo que se disminuyera el porcentaje de CaO, el cual es mayor en el cemento Portland, además se aumentó el contenido de SiO₂ por la presencia de arena. Respecto a la morfología del polvo de concreto, se observó mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), como se muestra en la Figura 4, el CWP presentó partículas con morfología irregular de diferentes tamaños.

Tabla 2. Composición química del cemento de uso general (OPC) y el polvo de concreto (CWP)

	Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
CPO	% en peso	19,39	4,13	4,7	55,68	1,7	0,31	0,28	3,9	9,21
CWP	% en peso	39,95	8,55	5,85	26,53	1,66	0,65	0,84	1,11	14,01

Fuente: elaboración propia.

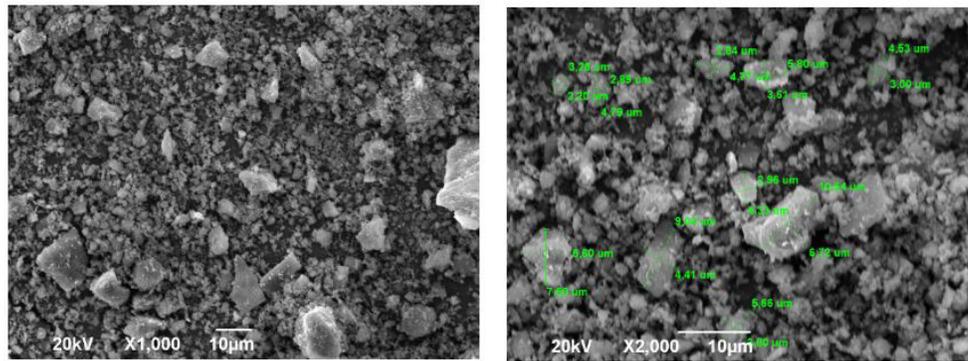


Figura 4. Micrografía del polvo de concreto (x1000 y x2000). Fuente: elaboración propia.

Agregados naturales

En este estudio, se utilizaron agregados naturales de la región. Agregado grueso (grava) con un tamaño máximo de 12,5 mm (½”) y arena de río como agregado fino. La caracterización de este agregado se realizó, de acuerdo con las Normas Técnicas Colombianas (NTC) (ver Tabla 3). Las pruebas de granulometría (NTC 77), masa unitaria (NTC 92), densidad-absorción del agregado grueso (NTC 176), densidad-absorción del agregado fino (NTC 237) y resistencia al desgaste mediante la máquina de los ángeles (ASTM C131).

Tabla 3. Características físicas y mecánicas de los agregados naturales (arena y grava)

Características	Norma	Arena	Grava
Densidad aparente (Bulk) (kg/m ³)	NTC 176 (ICONTEC, 1995)	2610	2740
Absorción (%)	NTC 176 (ICONTEC, 1995)	1,75	1,01
Masa unitaria suelta (kg/m ³)	NTC 92 (ICONTEC, 2019)	1511,80	1458,18
Masa unitaria compacta (kg/m ³)	NTC 92(ICONTEC, 2019)	1644,33	1610,90
Módulo de finura	NTC 77 (ICONTEC, 2018a)	2,88	-
Tamaño máximo (mm)	NTC 77 (ICONTEC, 2018a)	12,7	12,7
Coefficiente de los ángeles	ASTM C131 (ASTM International, 2014)	-	12,8 %

Fuente: elaboración propia.

Aditivo Superplastificante (SP)

El superplastificante utilizado en las mezclas de concreto autocompactante fue Sikaplast 328®, compuesto por resinas sintéticas y polímeros de última generación a base de policarboxilatos, cumpliendo con los requerimientos de la norma ASTM C494 (ASTM International, 2017a) y se clasifica como tipo F.

Métodos de evaluación de la actividad puzolánica de RCD

La evaluación de la actividad puzolánica del polvo de concreto (CWP) fue determinado por medio de dos métodos:

Índice de Actividad de Resistencia (IAR) (ASTM C618)

La ASTM C618 (ASTM International, 2017b) presenta el criterio de índice de actividad de resistencia anteriormente conocido como índice de actividad puzolánica, con el cual se estableció como la relación de la resistencia a la compresión del mortero con 20 % de reemplazo en masa de CPO por la puzolana a evaluar y la resistencia a la compresión del mortero de control (con 100 % CPO). Además, unos requerimientos químicos y físicos para las puzolanas como reemplazo de cemento Portland.

Método químico (Frattini)

La prueba de Frattini se empleó para determinar la actividad puzolánica del CWP, de acuerdo al procedimiento descrito en la norma NTC 1512 a los 7 y 28 días (ICONTEC, 2018b). En esta prueba se comparó el CaO y OH contenidos en una solución acuosa que cubre la muestra hidratada a 40 °C durante un tiempo determinado, con la curva de solubilidad (isoterma de solubilidad) para CH en una solución alcalina a la misma temperatura.

Dosificación y producción de los concretos

En la primera etapa del trabajo experimental se evaluó el efecto del CWP, donde se realizaron un total de 4 mezclas; una mezcla de referencia con un contenido total de cementante de 490 kg/m³ (15,8 % del volumen total del CAC), un contenido de agua de 205 kg/m³, agregado natural (grava y arena) y superplastificante con una dosificación entre 4 y 4,4 kg/m³. Para estudiar el potencial del CWP en el CAC, se reemplazó el cemento en diferentes niveles por CWP (10, 20 y 30 % en volumen) (ver Tabla 4).

Tabla 4.
Dosificación de mezclas de CAC con CWP de RCD

Mezcla	OPC (kg/m ³)	CWP (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)
Patrón	490	0	205	4,4	710,1	980,6
F-10 %	441	42,4	205	4,0	710,1	980,6
F-20 %	392	84,8	205	4,0	710,1	980,6
F-30 %	343	127,2	205	4,4	710,1	980,6

Fuente: elaboración propia.

Pruebas en estado fresco de los CAC

Las propiedades básicas de los CAC se evaluaron a través de las pruebas especificadas y criterios definidos por Experts for Specialised Construction and Concrete Systems (EFNARC, 2005). Con estas pruebas experimentales se evaluaron la capacidad de fluidez y la capacidad de paso y la viscosidad (velocidad de flujo). Las siguientes pruebas fueron realizadas:

Flujo de asentamiento: diámetro final alcanzado por el concreto, y el T500 (tiempo que tarda el concreto en alcanzar un diámetro de 500 mm).

Prueba de embudo en V: tiempo necesario para drenar el volumen completo del concreto del embudo en forma de V.

Caja en L: relación de alturas del concreto de la sección horizontal de la caja en la parte final y la parte antes de las barras (3 barras).

Tabla 5.
Especificaciones EFNARC para los ensayos en estado fresco de los CAC

Propiedad	Ensayo	Parámetros	Clase	Valores admisibles
Fluidez	Flujo de asentamiento	Diámetro final (mm)	SF1	550-650 mm
			SF2	660-750 mm
			SF3	760-850 mm
Viscosidad (tasa de flujo)	Embudo en V	Tiempo de flujo en el embudo (s)	VF1	≤8 s
			VF2	9 – 25 s
Capacidad de paso	Caja en L	Coeficiente de bloqueo (H2/H1)	PA1	≥0,80 con 2 barras
			PA2	≥0,80 con 3 barras

Fuente: EFNARC (2005).

Pruebas en estado endurecido de los CAC

Para determinar las propiedades del CAC en estado endurecido, se utilizaron probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro x 152,4 mm de alto, en donde se llevaron a cabo las pruebas de resistencia a la compresión, según la norma ASTM C39/C39M (ASTM International, 2018), para ello, se aplicó una carga axial de compresión a los cilindros hasta que ocurrió una falla. Posteriormente, se realizó el ensayo de resistencia a la tracción indirecta bajo la norma ASTM C496/C496M (ASTM International, 2017c), mientras que el módulo de rotura se determinó, de acuerdo a la norma ASTM C293 (cargada en el punto medio) en vigas de 75 mm de alto x 75 mm de ancho y 310 mm de largo (ASTM International, 2016). Estas propiedades se evaluaron a 7, 28 y 56 días de curado, con el fin de hacer un seguimiento al efecto de la adición del CWP y determinar su porcentaje ideal. En cada prueba se evaluaron tres muestras y se reportó el promedio de cada ensayo.

Ensayos físicos

La densidad, el porcentaje absorción y el volumen de poros permeables se evaluaron, de acuerdo a la ASTM C642 (ASTM International, 2013a) y la succión capilar mediante el procedimiento descrito en la ASTM C1585 (ASTM International, 2013b). Se utilizó un promedio de 3 muestras para el cálculo de estas propiedades. El procedimiento descrito en la norma ASTM C642 consiste en secar los especímenes a una temperatura de 110 ± 5 °C por no menos de 24 horas hasta obtener una masa constante (A). Después los concretos se sumergen en agua por no menos de 48 horas y se registra la masa saturada (B). Posteriormente, los especímenes se sumergen en agua en un recipiente adecuado y se hierven durante 5 horas, luego se dejan enfriar por un periodo no menor a 14 horas, se retira la humedad superficial con una toalla y se registra la masa hervido (C). Por último, se suspende el espécimen con un alambra y se determina la masa aparente en el agua (D). La absorción, la densidad y la porosidad se determinaron con las ecuaciones 1,2 y 3, respectivamente.

$$\text{Absorción después de inmersión (\%)} = [(B-A)/A] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Densidad aparente} = [A/(A - D)] \times 1 \text{ g/cm}^3 = g_2 \quad (2)$$

$$\text{Volumen de poros permeables (\%)} = [(g_2 - [A/(C-D)] \times 1 \text{ g/cm}^3) / g_2] \times 100 \quad (3)$$

El ensayo de succión capilar permite determinar la tasa de absorción de agua por acción capilar. El tiempo de curado de las muestras para la ejecución de los ensayos fue de 28 días de curado.

Resultados y discusiones

Actividad puzolánica del CWP

Índice de Actividad de Resistencia (IAR)

La Tabla 6 presenta el índice de actividad de resistencia (IAR) del CWP después de 28 días de curado. Según la norma ASTM C618, el IAR debe superar el 75 %. El índice de actividad de resistencia después de 28 días fue de 94 %. Respecto a su composición química, un buen material puzolánico requiere al menos un 70 % de sílice, alúmina y óxidos de hierro. La sumatoria de estos componentes del CWP es de 54,35 %, por lo que el CWP no podría clasificarse como una puzolana natural (clase N), de acuerdo a su composición química a pesar de superar el valor límite del IAR.

Tabla 6.
Propiedades químicas y físicas de las puzolanas, según ASTM C618

Requerimientos	Puzolanas	
	Clase N, ASTM C618	CWP
<i>Requerimientos químicos</i>		
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , %	Min, 70,0	54,35
Trióxido de azufre (SO ₃), %	Max, 4,0	3,9
Contenido de humedad, %	Max, 3,0	3,15
Pérdida por ignición, %	Max, 10,0	14,01
<i>Requerimientos físicos</i>		
Índice de actividad de resistencia a los 28 días, porcentaje de control	Min, 75	94

Fuente: elaboración propia.

Método químico (Frattini)

La actividad puzolánica del CWP también se evaluó por la prueba de Frattini. La Figura 5 muestra la ubicación del CWP, que se localizó por encima de la isoterma de solubilidad, lo que indicó que el Ca²⁺ y OH⁻ liberado en la hidratación del cemento Portland no se consumió efectivamente, como es lo normal en una reacción puzolánica (Liu *et al.*, 2018), por lo que se evidenció que el CWP ensayado no tiene capacidad de generar reacciones puzolánicas a ninguna de las 2 edades evaluadas (7 y 28 días).

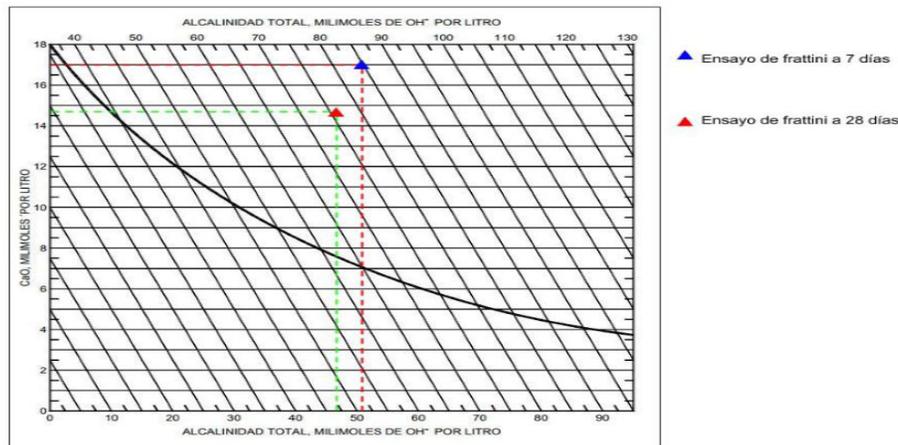


Figura 5. Curva de saturación del método Frattini a 7 y 28 días para el CWP.
Fuente: elaboración propia.

A pesar de no ser un material puzolánico, podría emplearse como reemplazo del material fino, para generar un complemento granulométrico del material fino en los concretos y concebir una mayor compacidad en el material. En el caso específico de los concretos autocompactantes, podría producir efectos positivos en la fluidez y resistencia a la segregación de la mezcla.

Propiedades en estado fresco de CAC con CWP

Con relación a los resultados de las propiedades en estado fresco de los concretos con CWP (ver Tabla 7), la prueba de flujo de asentamiento mostró que el empleo de CWP generó una pérdida del flujo del 10,7 % para el concreto autocompactante con 30 % (F-30 %). A pesar de la disminución en el flujo de asentamiento de los CAC con CWP, todos los concretos cumplieron con los parámetros establecidos en la EFNARC (2005), para la capacidad de relleno, ya que se encontraban dentro del rango de 550 mm y 850 mm establecido por esta directriz (ver Figura 6). Los resultados de la prueba del embudo en V mostraron que el tiempo que tardaron todas las mezclas para pasar a través del equipo estaba en un rango de 7,12 s a 17,20 s, indicando una moderada viscosidad, que evitó la segregación de sus componentes. Este rango está, de acuerdo con los criterios de aceptación para los CAC prescritos por EFNARC. En la prueba de la caja en L, que se llevó a cabo para determinar la capacidad de paso, ninguna de las mezclas cumplió con los requerimientos de esta prueba, ya que el valor mínimo de la relación de bloqueo es de 0,8. Esto puede ser debido a que el empleo de CWP reduce parcialmente la deformabilidad, y es más evidente en la mezcla F-30 %, ya que el concreto en estado fresco no llegó a la parte final de la sección horizontal de la caja en L, por lo que la altura H2 no presenta valor. Una posible solución a la baja deformabilidad, sería una mayor dosis de SP (Kaish; Breesem; Abood, 2018),

Tabla 7.
Comportamiento en estado fresco de los concretos autocompactantes con adición de CWP

Ensayo	Patrón	F-10 %	F-20 %	F-30 %
Flujo de asentamiento (mm)	695	675	650	620
Caja en L (H2/H1)	0,69	0,63	0,51	-
Embudo en V (s)	7,12	11,62	16,05	17,20

Fuente: elaboración propia.



Figura 6. Ensayo de flujo de asentamiento mediante cono de Abrams, (de izquierda a derecha, mezcla patrón, F-10 %, F-20 %, F-30 %).
Fuente: elaboración propia.

Propiedades en estado endurecido

Los resultados de la resistencia a la compresión y a la tracción indirecta de la mezcla patrón y la mezcla con CWP se presentan en las Figuras 7 y 8. La resistencia a la compresión de CAC disminuyó con el empleo del CWP, el cual está relacionado directamente con el porcentaje empleado. Del reemplazo del 10, 20 y 30 % de CPO por CWP resultó en una disminución de resistencia de 1,40 %, 16,49 % y 19,78 %, respectivamente, a los 28 días de curado. Esta disminución se atribuye a que este residuo es no reactivo (Kim, 2017).

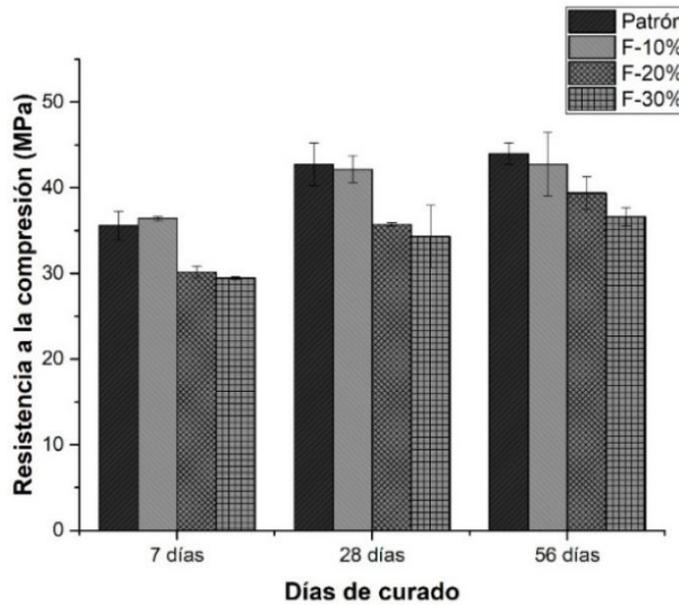


Figura 7. Resistencia a la compresión vs Días de curado, de CACs con CWP. Fuente: elaboración propia.

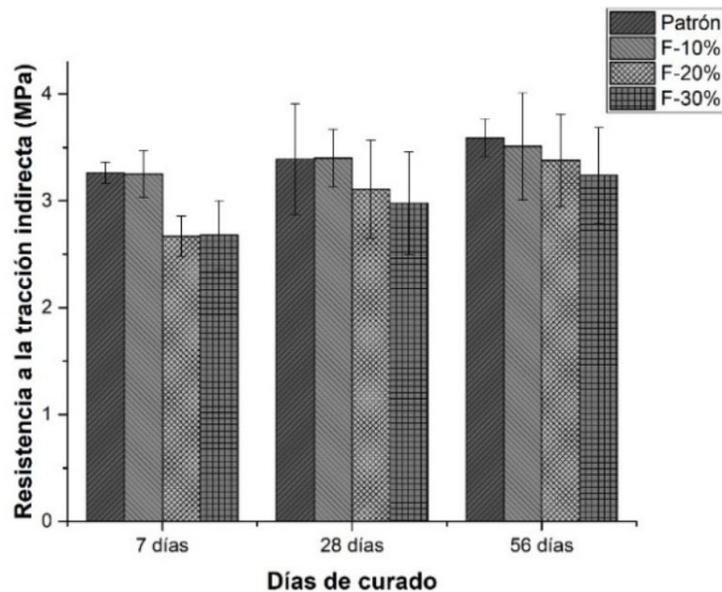


Figura 8. Resistencia a la tracción indirecta vs Días de curado, de CACs con CWP. Fuente: elaboración propia.

Es decir, que con un reemplazo del 10 % de cemento por CWP en volumen, no se presentó una disminución significativa de la resistencia a la compresión respecto a la mezcla patrón, incluso, a los 7 días de curado la resistencia fue mayor un 2,36 % (ver Figura 7).

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta de los diferentes CAC con diferentes contenidos de CWP, se evidenció una tendencia similar en la resistencia a la compresión, donde la presencia de CWP no presentó efectos significativos o potencialmente positivos en la resistencia a la tracción indirecta (ver Figura 8). Sin embargo, la mezcla con 10 % de CWP (F-10 %) presentó una disminución del 2,2 % de esta propiedad en comparación con la mezcla patrón, mientras que las mezclas F-20 % y F-30 % disminuyeron su resistencia en 5,8 % y 9,7 % a 56 días. Este comportamiento es similar al obtenido por Yong y Yun (2012), quienes recomiendan reemplazar hasta un 15 % del cemento por polvo de concreto.

Los resultados de resistencia a la flexión de los CAC con CWP a 28 y 56 días se presentan en la Figura 9. Al igual que con la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión disminuye debido a la presencia de CWP, sin embargo, en el caso de la mezcla F-20 % a 56 días, la resistencia no disminuyó significativamente respecto al CAC patrón.

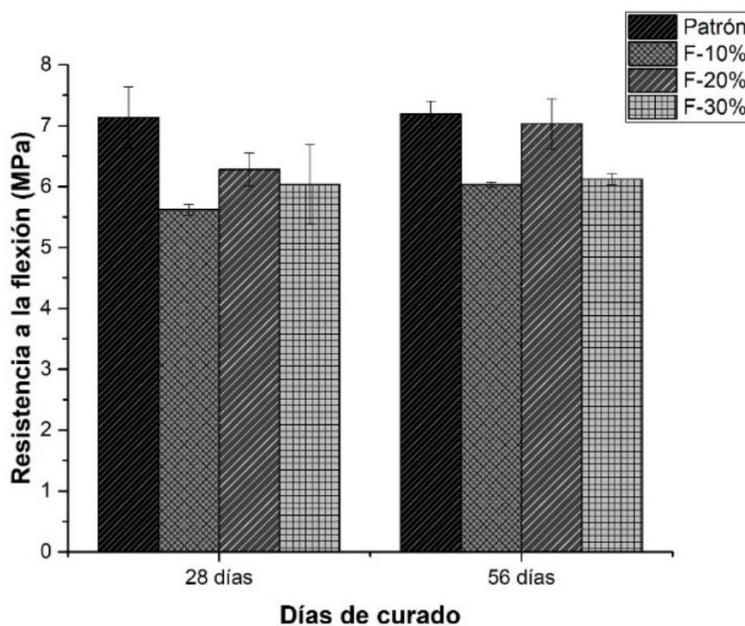


Figura 9. Resistencia a la flexión de CAC con CWP.
Fuente: elaboración propia.

En general, las propiedades mecánicas decaen, lo que puede ser atribuido a que una mayor cantidad de CWP en los CAC produce una mayor cantidad de grietas y poros, la cual es mayor con el aumento de la cantidad de este residuo. Además, el empleo del CWP reduce la cantidad de los productos de hidratación en el concreto (Ma; Li; Wu; Cao, 2019).

Propiedades físicas

Densidad, porosidad y absorción

Los resultados de porosidad, absorción de agua y densidad aparente (gravedad específica) de los CAC se determinaron, de acuerdo con la norma ASTM C642. Se observó que las mezclas presentaron una mayor absorción y porosidad en los concretos que contenían CWP a los 28 días de curado. Esto es atribuido al efecto dilución, ya que al reemplazar el cemento Portland por un material inerte, se disminuyen los productos de hidratación que se pueden formar en el tiempo, lo que incrementa la absorción en la mezcla. Por otra parte, Celik; Meral; Mancio; Mehta; Monteiro (2014) relacionan el incremento

de poros con el efecto dilución debido al impacto que produce un material inerte en el proceso de hidratación del cemento Portland. A su vez, al sustituir el cemento por el CWP, se incrementa la relación agua/cemento y se hace mayor a medida que el contenido de CWP es mayor en los concretos.

En la Tabla 8 se puede observar que la mezcla F-20 % es la que presentó el menor porcentaje de absorción y poros permeables en comparación con los otros CAC adicionados con CWP. Estos resultados están, de acuerdo con los obtenidos en las propiedades mecánicas, las cuales decrecen con la presencia de CWP en la mezcla debido a la mayor porosidad.

Tabla 8.
Densidad, absorción y porosidad del CAC con CWP a 28 días de curado

Mezcla	Absorción después de inmersión (%)	Densidad aparente kg/m ³	Volumen de poros permeables (%)
Patrón	3,83	2582	9,29
F-10%	4,40	2569	10,13
F-20%	4,34	2565	9,99
F-30%	4,43	2559	10,32

Fuente: elaboración propia.

Succión Capilar

En la Figura 10 se presentan las curvas correspondientes a los resultados obtenidos del ensayo de succión capilar, de acuerdo a la norma ASTM C1585. En las ordenadas se presenta la cantidad de agua absorbida por unidad de área de la muestra, y en las abscisas la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. En la gráfica se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de CPO por CWP, la absorción capilar aumenta. Asimismo, se observa que la curva patrón difiere de las curvas de los CAC con CWP y se atribuye a una mayor tortuosidad en los poros capilares generada por los productos de hidratación como los C-S-H. También se destaca, que a pesar de que la mezcla con 20 % de CWP presenta un mayor efecto dilución respecto de la mezcla con 10% de CWP, se presenta una menor absorción capilar. Este comportamiento puede atribuirse a que el 20 % de CWP en la mezcla generaría una pasta que presentaría un peso adecuado para no abrir espacios que puedan generar capilaridad en el concreto, lo que sí ocurre en un concreto convencional, que a mayor relación a/c va a presentar mayor absorción capilar (Taus, 2003).

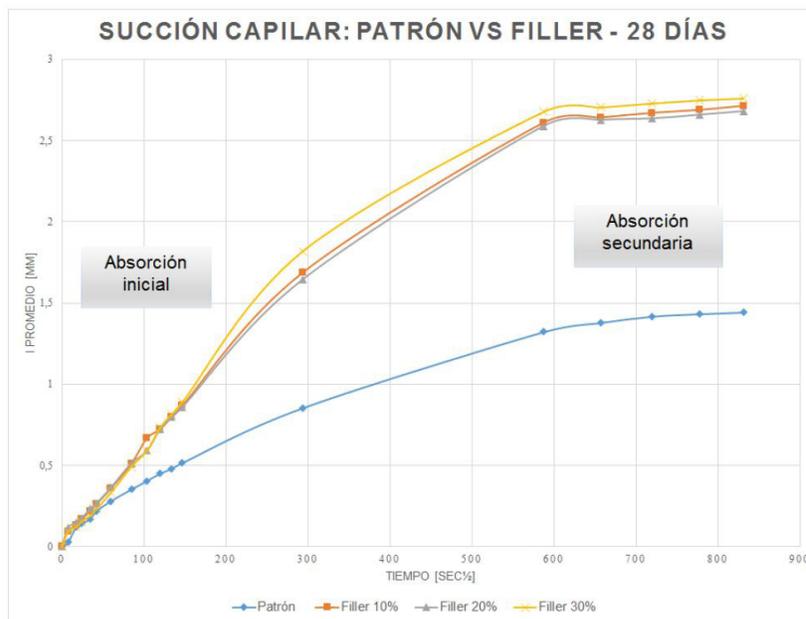


Figura 10. Curvas de succión capilar de los CAC con CWP a 28 días de curado.

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados de este estudio experimental destacan el empleo del CWP como sustitución parcial del CPO en la producción de concreto autocompactante. Sobre la base de los resultados obtenidos, se concluye:

La caracterización del CWP, de acuerdo a su comportamiento químico y físico, reveló que este material no puede ser considerado como materia, a pesar de que el IAR fue superior al especificado por la norma (> 75 %) y que, no presentaba la composición química requerida. Además, en la prueba de Frattini, los puntos representativos del contenido de óxido de calcio en función de la alcalinidad total se ubicaron por encima de la isoterma de solubilidad, indicando que no presentaba un carácter puzolánico a las 2 edades evaluadas (7 y 28 días).

La trabajabilidad de los CAC disminuye con el incremento del porcentaje de CWP. La propiedad en la cual tuvo mayor influencia fue en la capacidad de paso evaluada mediante la caja en L, ya que no estuvieron ni cerca del límite inferior sugerido por las directrices europeas de la EFNARC. Sin embargo, las pruebas de flujo de asentamiento y embudo en V fueron satisfactorias para todos los porcentajes de reemplazo.

Las resistencias mecánicas de las mezclas disminuyen con el aumento de reemplazo de CWP. Esto es atribuido a la baja o nula reactividad de este residuo, lo que conlleva a que se presente el efecto dilución en las mezclas, debido a que la cantidad de agua se mantuvo constante en todas los CAC, la cual fue de 205 kg/m³, lo que genera una mayor relación a/c a medida que el reemplazo de cemento Portland por CWP era mayor.

La absorción, porosidad y succión capilar son características que están relacionadas con la durabilidad de una estructura o elemento de concreto, las cuales aumentaron con la presencia de CWP en los CAC, por lo que se recomienda emplear un 20 % de CWP, ya que con esta cantidad se presenta menor absorción y succión capilar de los CAC con CWP.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por Colciencias para hacer posible esta investigación, por medio del proyecto CI 21060. Igualmente, al Grupo de Materiales Compuestos (GMC) y a la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle.

Referencias

- Arenas, C.; Luna-Galiano, Y.; Leiva, C.; Vilches, L. F.; Arroyo, F.; Villegas, R.; Fernández-Pereira, C. (2017). Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. *Construction and Building Materials* 134, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.119>
- Aslani, Farhad; Ma, Guowei; Yim-Wan, Dominic; Muselin, Gojko (2018). Development of high-performance self-compacting concrete using waste recycled concrete aggregates and rubber granules. *Journal of Cleaner Production* 182, 553-566. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.074>
- ASTM International. (2013a). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. (ASTM C642-13). West Conshohocken, PA, 2013.
- ASTM International. (2013b). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. (ASTM C1585-13). West Conshohocken, PA, 2013.

- ASTM International. (2014). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. (ASTM C131-14). West Conshohocken, PA, 2014.
- ASTM International. (2016). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading). (ASTM C293-16). West Conshohocken, PA, 2016.
- ASTM International. (2017a). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. (ASTM C494-17). West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM International. (2017b). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. (ASTM C618-17). West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM International. (2017c). Standard Test Method for Determination of tensile strength by diametral compression of cylindrical concrete specimens. (ASTM C496/C496M - 17). West Conshohocken, PA, 2017.
- ASTM International. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. (ASTM C39-18). West Conshohocken, PA, 2018.
- Aydin, Abdulkadir; Nasl, Vahid; Kotan, Turkey (2018). The synergic influence of nano-silica and carbon nano tube on self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, 20, 467–475. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.08.013>
- Caicedo, Carlos (2016). *Diseño de un pavimento articulado con adoquines compuestos por reciclados de concreto como agregado fino y cenizas provenientes del bagazo de la caña de azúcar como reemplazo parcial del cemento Portland* (tesis pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Cali Colombia.
- Celik, Kemal; Meral, Cagla; Mancio, Mauricio; Mehta, P.; Monteiro, Paulo (2014a). A comparative study of self-consolidating concretes incorporating high-volume natural pozzolan or high-volume fly ash. *Construction and Building Materials*. 67, 14-19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.065>
- Chen, Meizhu; Lin, Juntao; Wu, Shaopeng (2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3909-3914. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>
- Cremades, Sergio (2011). *Estudio de la robustez en el hormigón autocompactante con bajo contenido de finos* (tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Experts for Specialised Construction and Concrete Systems (2005). *Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante. Especificaciones, Producción y Uso*. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/juanramar/directrices-2006>
- Eguchi, Kiyoshi; Teranishi, Kohji; Nakagome, Akira; Kishimoto, Hitoshi; Shinozaki, Kimihiko; Narikawa, Masafumi (2007). Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction. *Construction and Building Materials*, 21(7), 1542-1551. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.023>
- Elyamany, Hafez; Elmoaty, Abd; Mohamed, Basma (2014). Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. *Alexandria Engineering Journal*, 53(2), 295-307. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.03.010>

- Gómez-Meijide, Breixo (2015). *Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío* (tesis doctoral). Universidad de Coruña, España.
- ICONTEC. (1982). NTC 121. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas/ ICONTEC.
- ICONTEC. (1995). NTC 176. Ingeniería civil y arquitectura. Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso/ ICONTEC.
- ICONTEC. (2018a). NTC 77. Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos/ ICONTEC.
- ICONTEC. (2018b). NTC 1512. Cementos. Ensayo para determinar la actividad puzolánica en cementos con puzolana/ ICONTEC.
- ICONTEC. (2019). NTC 92. Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados/ ICONTEC.
- Kaish, A.B.M.A.; Breesem, K. M.; Abood, M. M. (2018). Influence of pre-treated alum sludge on properties of high-strength self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 202, 1085-1096. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.156>
- Kim, Yong-Jic (2017). Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder. *Construction and Building Materials* 135, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174>
- Kou, S. C., Poon, C. S. (2009). Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31(9), 622-627. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>
- Leite, Fabiana; Motta, Rosângela; Vasconcelos, Kamilla; Bernucci, Liedi (2011). Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*. 25(6), 2972-2979. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105>
- Liu, Yuanyuan; Lei, Shaomin; Lin, Min; Xia, Zhangjie; Pei, Zhenyu; Li, Bo (2018). Influence of calcined coal-series kaolin fineness on properties of cement paste and mortar. *Construction and Building Materials*, 171, 558-565. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.117>
- Ma, Zhiming; Li, Wei; Wu, Huixia; Cao, Chengwei (2019). Chloride permeability of concrete mixed with activity recycled powder obtained from C&D waste. *Construction and Building Materials*, 199, 652-663. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.065>
- Matos, Paulo; Prudêncio-Jr., Luiz; Oliveira, Alexandre; Pelisser, Fernando; Gleize, Philippe (2018). Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 193, 623-630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.228>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). *Noticias-Minambiente*. Minambiente reglamenta manejo y disposición de residuos de construcción y escombros. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://goo.gl/zGVhMS>

- Mohammed, Mahmoud; Dawson, Andrew; Thom, Nicholas (2013). Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. *Construction and Building Materials*, 49, 84-92.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.107>
- Omrane, Mohammed; Kenai, Said; Kadri, El-Hadj; Ait-Mokhtar, Abdelkarim (2017). Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*, 165, 415-430.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139>
- Ortiz, Heinar; Silva, Margarita (2013). ¿De dónde vienen y dónde van a parar los escombros de Cali? *Elpais.com.co*. Recuperado de:
<https://www.elpais.com.co/elpais/infografias/escombros-2013/ruta-escombros-cali-2013.html>
- Özalp, Fatih; Yilmaz, Halit; Kara, Mustafa; Kaya, Ömer; Şahin, Aylin (2016). Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 110, 17-23.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.030>
- Pajares, I.; Sanchez de Rojas, M. I.; Frías, M; Bárbara, J. (2008). La influencia del filler calizo en las propiedades del hormigón autocompactante. *II Jornadas de Investigación en Construcción*. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España. Recuperado de:
<http://digital.csic.es/handle/10261/6311>
- Rahman, M. Aminur; Imteaz, Monzur; Arulrajah, Arul; Piratheepan, Jegatheesan; Disfani, Mahdi (2015). Recycled Construction and Demolition materials in permeable pavement systems: Geotechnical and hydraulic characteristics. *Journal of Cleaner Production*, 90, 183-194.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.042>
- Señas, Lilia; Priano, Carla; Marfil, Silvina (2016). Influence of recycled aggregates on properties of self-consolidating concretes. *Construction and Building Materials*, 113, 498-505.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.079>
- Shi-cong, Kou; Bao-jian, Zhan; Chi-sun, Poon (2012). Feasibility study of using recycled fresh concrete waste as coarse aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 549-556.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.027>
- Silva, Yimmy; Gordillo, Marisol; Delvasto, Silvio (2017). Influencia del residuo de mampostería (RM) como material cementicio suplementario en la elaboración de morteros. *Informador Técnico Colombia*, 81(1), 44-54.
<https://doi.org/10.23850/22565035.719>
- Silva, Yimmy; Robayo, Rafael; Matthey, Pedro; Delvasto, Silvio (2016). Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 639-644.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.057>
- Taus, Valeria (2003). Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados. *Ciencia y tecnología del hormigón*, (10), 7-16. Recuperado de:
<https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/436/01-Taus.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- World Business Council for Sustainable Development (2009). *The Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete*. Recuperado de:
<https://docs.wbcsd.org/2009/07/CSI-RecyclingConcrete-FullReport.pdf>
- Xiao, Jianzhuang; Ma, Zhiming; Sui, Tongbo; Akbarnezhad, Ali; Duan, Zhenhua (2018). Mechanical properties of concrete mixed with recycled powder produced from construction and demolition waste. *Journal of Cleaner Production*, 188, 720-731.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.277>
- Xiao, Zhao; Ling, Tung-Chai; Kou, Shi-Cong; Wang, Qingyuan; Poon, Chi-Sun (2011). Use of wastes derived from earthquakes for the production of concrete masonry partition wall blocks. *Waste Management*, 31(8), 1859-1866.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.04.010>
- Xuan, Dongxing; Zhan, Baojian; Chi-sun, Poon (2016). Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 65, 67-74.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.10.018>
- Xuan, D. X.; Molenaar, A. A.; Houben, L. J. (2015). Evaluation of cement treatment of reclaimed construction and demolition waste as road bases. *Journal of Cleaner Production*, 100, 77-83.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.033>
- Yong, Jic-Kim; Yun, Wang-Choi (2012). Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement. *Construction and Building Materials*, 30, 500-504.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.042>