

Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado¹

Fresh and hardened behavior of a self compacting concrete added with coal slag and made with coarse aggregate from recycled concrete.

Recibido 01-10-2014 Aceptado 25-11-2014

Rafael Andrés Robayo Salazar²
Pedro Enrique Matthey Centeno³
Yimmy Fernando Silva Urrego⁴
Silvio Delvasto Arjona⁵

Resumen

El crecimiento constante de las actividades de construcción, remodelación y demolición en las ciudades genera grandes volúmenes de residuos de concreto demolido, que en la actualidad se han convertido en un problema grave de contaminación ambiental. Por otro lado, dada la necesidad global de incrementar la eficiencia en el consumo de materiales y de energía resulta oportuno estudiar materiales para su reciclaje, sobre todo como en el caso del concreto, que hoy por hoy, es el más producido por año en el mundo y uno de los que causa mayor impacto ambiental. En este sentido, este trabajo de investigación evalúa el efecto de la sustitución parcial y total de los agregados naturales por agregados reciclados, obtenidos a partir de la trituración de residuos de la construcción y demolición sobre el comportamiento en estado fresco y endurecido de un concreto autocompactante. Los resultados mostraron que la incorporación de estos agregados reciclados no afecta significativamente el comportamiento en estado fresco de las mezclas, pero en cambio sí tiene influencia sobre el comportamiento en estado endurecido de los concretos, pues causa una disminución de la resistencia a la compresión de entre el 15% y el 29 %, además de un leve aumento de la cantidad de poros permeables en función de la cantidad de agregado natural que fue sustituido por reciclado (25, 50, 75 y 100 %).

Palabras clave: Residuos de la construcción y demolición; agregados reciclados, agregados naturales; concreto de cemento portland; concreto autocompactante.

Abstract

The steady growth of remodeling, demolition, and in general the construction activity in the populous cities generate large volumes of waste from demolished concrete, which now have become a serious problem of environmental pollution. Furthermore, given the global need to increase efficiency in the consumption of materials and energy, it is imperative to study the recycling of the materials, especially as in the case of concrete, which today, is the material most produced per year in the world, and one of the greatest contributors to a negative impact on the environment. In this sense, this research evaluates the effect of partial and total replacement of natural aggregates by recycled aggregates obtained from the crushing of construction waste and demolition on the behavior in fresh and hardened state of a self-compacting concrete. The results showed that the incorporation of these recycled aggregates did not significantly affect

- 1 Proyecto: Reciclar escombros en concreto. Fecha de inicio: Febrero 2013, Fecha de finalización: Febrero de 2015. Financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones, VRI C.I. 747.
- 2 Colombiano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Grupo Materiales Compuestos, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Contacto: rafael.robayo@correounivalle.edu.co.
- 3 Venezolano, Estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales. Ms.C. Universidad del Valle, Grupo de investigación Materiales Compuestos, Cali, Colombia. pedromatthey@gmail.com
- 4 Colombiano, Ingeniero de Materiales, Universidad del Valle, Grupo de investigación Materiales Compuestos, Cali, Colombia. yimmy.silva@correounivalle.edu.co
- 5 Colombiano, PhD. Universidad del Valle, Grupo de investigación Materiales Compuestos, Cali, Colombia. silvio.delvasto@correounivalle.edu.co

the behavior of the fresh blends, but instead does have an influence on the behavior of the hardened concrete causing a decrease of the compressive strength between 15% and 29 % depending on the percentage of natural aggregate that was replaced by the recycled one (25, 50, 75 and 100 %). In addition, it was observed a slight increase in the amount of permeable pores depending on the amount of natural aggregate that was replaced by the one recycled.

Keywords: Construction and demolition debris; recycled aggregates; natural aggregates; Portland cement concrete; self-compacting concrete.

Introducción

Incrementar la eficiencia en el consumo de materiales y de energía es una necesidad global asimismo, es una prioridad estudiar materiales para su reciclaje, sobre todo como en el caso del concreto, que hoy por hoy, es el material más producido por año en el mundo y uno de los que causa mayor impacto ambiental (Behera *et al.*, 2014). Hoy se producen en el mundo más de diez mil millones de toneladas de concreto, es decir, más de una tonelada por habitante/año. En Colombia, aunque el índice es más bajo, la industria de la construcción es uno de los sectores más dinámicos y de mayor incidencia en el desarrollo económico del país. Una de las consecuencias derivadas de la actividad constructora es la generación de volúmenes considerables de residuos. Los residuos de la construcción y la demolición (RCDs) o Escombros, como son llamados en algunos países latinoamericanos, son materiales de desecho generados durante las diferentes etapas de un proyecto de construcción civil, incluyendo estructuras y materiales rechazados, que han sido utilizados y se han desechado, e inclusive, aquellos derivados de actividades de excavación y limpieza del lugar al finalizar la obra, entre otros. También, resultan residuos en la demolición de edificaciones afectadas por eventos naturales como sismos, inundaciones, deslizamientos, etc. Entre los residuos se destacan, por su mayor volumen, los de concreto (Torgal y Jalali, 2011; Oikonomou, 2005; Poon y Chan, 2007).

La alta demanda de agregados naturales para la producción de mezclas de concreto, como resultado del continuo desarrollo de la industria de la construcción, ha planteado el interrogante de hasta cuándo las canteras y los ríos podrán abastecer esta demanda de materias primas no renovables en países latinoamericanos como Colombia, en donde se ha estimado que cerca de 18 millones de metros cúbicos de agregados naturales son usados anualmente en la producción de 35 millones de toneladas de concreto. En este sentido, una de las alternativas que surge para la

valorización de los RCDs es su uso como material de partida para la producción de gravas y arenas recicladas, que sean aptas para su uso como agregados en la elaboración de mezclas de Concreto Autocompactante (CAC) (Malesev *et al.*, 2012; Deshpande *et al.*, 2011; Shima *et al.* 2005; Ryou y Lee, 2014; Tam *et al.*, 2014).

El CAC se ha descrito como “el desarrollo más revolucionario de las últimas décadas en el campo de la construcción con concreto” y se puede definir como aquel que puede fluir por su propio peso y llenar completamente un encofrado o cimbra, incluso en presencia de un armado denso, sin necesidad de ninguna vibración, al tiempo que mantiene la homogeneidad. Se caracteriza por sus propiedades en estado fresco como son: la capacidad de paso (fluidez limitada), resistencia a la segregación (estabilidad) y su capacidad de relleno (fluidez no limitada) (Okamura y Ouchi, 2003). Estas características, especiales para este tipo de mezclas, son una medida de la trabajabilidad o la facilidad con la que la mezcla puede colocarse y autocompactarse, tratándose de una compleja combinación de aspectos de fluidez, cohesividad, compactabilidad y viscosidad (Domone, 2006).

Se ha establecido que los agregados reciclados pueden tener características y propiedades satisfactorias para su aplicación en concretos autocompactantes, a pesar de que en la mayoría de ocasiones las resistencias obtenidas sean inferiores a las de los concretos fabricados con agregados naturales. Por esta razón se convierte en una opción de aprovechamiento de residuos, que además resulta ser amigable con el medioambiente. En este trabajo de investigación se analizó comparativamente el efecto sobre las propiedades en estado fresco y endurecido de la incorporación de agregados reciclados en un concreto autocompactante. Los agregados fueron obtenidos a partir de la trituración de RCDs provenientes de actividades de demolición en la Universidad del Valle (Cali-Colombia)..

Metodología

Para el desarrollo y ejecución de esta investigación se siguió la metodología que se presenta en la Figura 1: Las propiedades de autocompactabilidad se determinaron mediante los ensayos de flujo de asentamiento con cono de Abrams, tiempo de flujo en el embudo en V y relación de bloqueo de la Caja en L. Con el fin de reducir el efecto de pérdida de trabajabilidad en la variabilidad de los resultados de prueba, las propiedades en estado fresco de las mezclas se determinaron dentro de un período no mayor a 15 min después del vaciado de la mezcla.

Las propiedades en estado endurecido de los CAC como resistencia a la compresión, tracción indirecta y resistencia a la flexión se realizaron de acuerdo con las normas ASTM C39, C496, y C293 respectivamente.

Por otro lado, las propiedades de permeabilidad tales como absorción de agua, densidad y porosidad se evaluaron según las normas ASTM C642 y C1585.

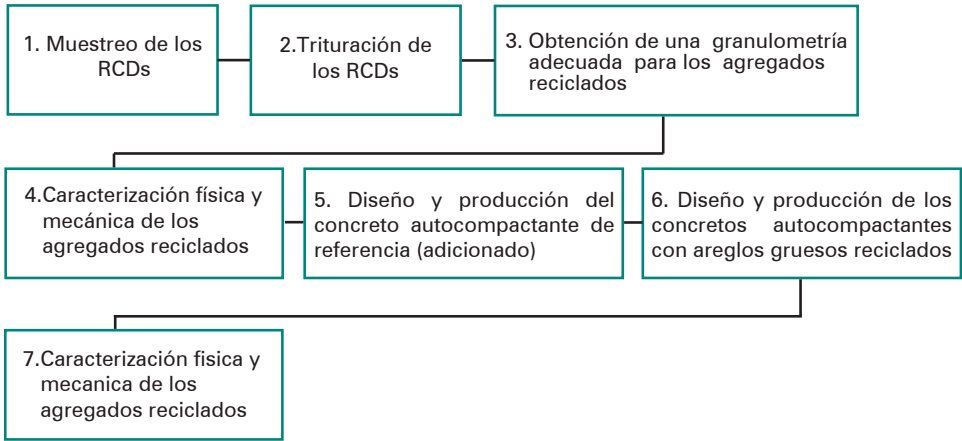


Figura 1. Metodología desarrollada durante la investigación.

Materiales Cemento

Se utilizó un cemento portland tipo I de uso general, está compuesto principalmente por los elementos que se observan en la tabla 1.

Escoria de carbón

La escoria de carbón utilizada como adición para la producción de la mezcla de referencia fue molturada hasta obtener un tamaño de partícula de 19,1 μm similar a la del cemento. Las principales características físico-químicas y su composición se pueden observar en las Tablas 2 y 3 , respectivamente.

Tabla1. Composición química del cemento.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	PI
% en peso	20,20	4,52	4,45	61,54	1,58	0,16	0,27	2,48	4,8

Tabla 2. Caracterización de la escoria de carbón.

Característica	Resultado
Tamaño de partícula inicial	4 mm
Tamaño de partícula (molida)	19,1 μm
Densidad	2280 Kg/m ³
% de Pérdida al fuego	4,17%
% de Humedad	0,18%
Índice de Puzolanicidad	92,58%

Tabla 3 Composición química de la escoria de carbón.

Componente	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	S	P ₂ O ₅	Ba
% en peso	50,99	27,45	6,53	4,92	1,53	1,30	1,11	0,74	0,21	0,17	0,10

Aditivo superplastificante

El aditivo superplastificante (Sp) usado en la preparación de las mezclas fue el SikaPlast 326, que es un aditivo líquido, reductor de agua, de ultra alto poder para largos tiempos de trabajabilidad y compuesto de resinas sintéticas y polímeros de última generación. SikaPlast 326 cumple con los requisitos de la norma ASTM C494 y se clasifica según los parámetros establecidos en esta norma como Tipos A y F, su densidad es de 1.130 Kg/m³.

Agregado fino

La arena usada es silícea, extraída de un río de la región (natural), y presentó un módulo de finura de 2,61 con predominio de partículas redondeadas. Sus principales características se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características físicas de la arena

Característica	Norma	Resultado
Densidad aparente (Bulk)	NTC 237	2,58 gr/cm ³
Absorción	NTC 237	1,89 %
Masa unitaria suelta	NTC 92	1,63 gr/cm ³
Masa unitaria compacta	NTC 92	1,74 gr/cm ³
Módulo de finura	NTC 77	2,61
Tamaño máximo nominal	NTC 77	2,36 mm
Tamaño máximo	NTC 77	12,5 mm

Agregados gruesos

Se utilizaron dos tipos de agregados gruesos; naturales y reciclados. Para ambos tipos de agregados se garantizó un tamaño máximo de 12,5 mm. La Tabla 5 muestra las principales características físicas que presentaron.

Tabla 5. Características físicas y mecánicas de los agregados gruesos.

Característica	Norma	Natural	Reciclada
Densidad aparente (Bulk)	NTC 176	2,54 gr/cm ³	2,26 gr/cm ³
Absorción	NTC 176	2,01 %	7,28 %
Masa unitaria suelta	NTC 92	1,47 gr/cm ³	1,26 gr/cm ³
Masa unitaria compacta	NTC 92	1,59 gr/cm ³	1,46 gr/cm ³
Módulo de finura	NTC 77	6,38	5,64
Tamaño máximo nominal	NTC 77	12,5 mm	12,5 mm
Tamaño máximo	NTC 77	12,5 mm	12,5 mm
Relación di/Di (morfología)	UNE 933-4	0,493	0,499
Coefficiente de los ángulos	ASTM C-131	16,4 %	33,7 %

La distribución granulométrica de los agregados gruesos se puede observar en la Figura 2, en donde se resalta que los agregados reciclados presentan una granulometría más fina, en comparación con los agregados naturales, lo cual está en relación con los módulos de finura obtenidos: 6,38 y 5,64, respectivamente. Además se puede observar que el tamaño máximo de los agregados es de 12,5 mm, como se mencionó anteriormente.

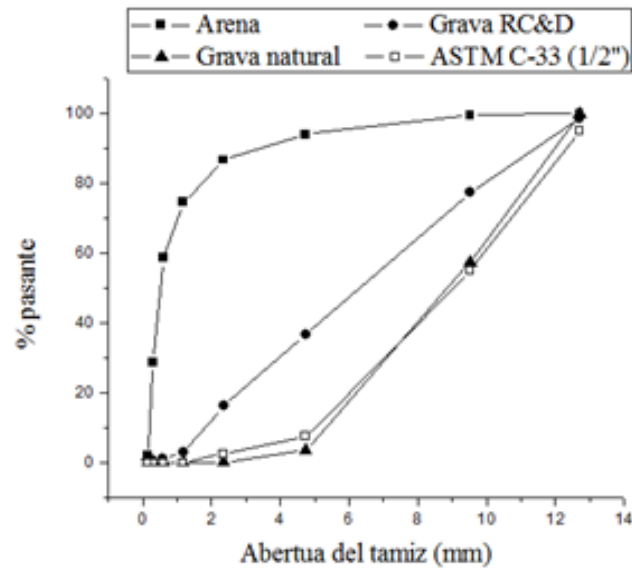


Figura 2. Distribución granulométrica de los agregados.

Diseño de mezclas

Para el diseño de las mezclas de concreto autocompactante se partió de una cantidad de cemento de 480 Kg/m³ y una relación agua/cemento de 0,45, con el objetivo de lograr una resistencia mínima a la compresión de 35 MPa a los 28 días de curado. Sin embargo, para el caso de la matriz de referencia (M-30) se logró sustituir el 30% de cemento por escoria de carbón. Para asegurar el cumplimiento de las propiedades en estado fresco y un asentamiento mayor a los 520 mm

(SF1) se empleó el aditivo superplastificante mencionado anteriormente con una dosificación de entre 0,5% y 0,6%. Con la finalidad de estudiar el efecto en el comportamiento en estado fresco y endurecido de la incorporación de agregados gruesos reciclados sobre la mezcla de referencia obtenida anteriormente, se realizaron sustituciones en peso del 25, 50, 75 y 100 % de grava natural por grava reciclada en sus dosificaciones, como se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Dosificación de las mezclas de concreto con agregados reciclados (peso seco).

Mezcla	Cemento (Kg/m ³)	Escoria (Kg/m ³)	Agua (l/m ³)	Sp (Kg/m ³)	Grava Natural (Kg/m ³)	Grava RCD (Kg/m ³)	Arena (Kg/m ³)
Control	480	0	216	2,64	643	0	965
M-30	336	144	216	2,64	643	0	965
RCD-25	336	144	216	2,64	482	161	965
RCD-50	336	144	216	2,64	322	322	965
RCD-75	336	144	216	2,64	161	482	965
RCD100	336	144	216	2,64	0	643	965

Resultados Ensayos en estado fresco

Se llevaron a cabo ensayos, característicos para este tipo de concretos de alta fluidez, tales como; el cono de Abrams,

la caja en L y el embudo en V (Figura 3), cuyos criterios y parámetros se relacionan en la Tabla 7.



Figura 3. Ensayos realizados en estado fresco, Asentamiento (izquierda), Embudo en V (centro), y Caja en L (derecha).

Tabla 7. Criterios de conformidad para las propiedades en estado fresco de los CAC según la EFNARC.

Propiedad	Criterio	Aplicación en estructuras
Clase de asentamiento SF1	$\geq 520 \text{ mm}, \leq 700 \text{ mm}$	Ligeramente reforzadas
Clase de asentamiento SF2	$\geq 640 \text{ mm}, \leq 800 \text{ mm}$	Medianamente reforzadas
Clase de asentamiento SF3	$\geq 740 \text{ mm}, \leq 900 \text{ mm}$	Altamente reforzadas
Clase del ensayo del embudo en V VF1	$\leq 10 \text{ s}$	Altamente reforzadas
Clase del ensayo del embudo en V VF2	$\geq 7 \text{ s}, \leq 27 \text{ s}$	Medianamente reforzadas
Clase de capacidad de paso PA1	$\geq 0,75$	
Clase de capacidad de paso PA2	$\geq 0,75$	

Los resultados obtenidos mediante estos ensayos son mostrados en la Tabla 8, en donde se puede observar que la incorporación de los agregados reciclados en la mezcla del concreto de referencia no produjo incrementos

significativos en la demanda de agua y la cantidad de aditivo superplastificante requerido para lograr las propiedades de diseño en estado fresco y cumplir con los criterios mínimos de conformidad según la EFNARC (Tabla 8).

Tabla 8. Comportamiento en estado fresco de los concretos elaborados

Característica	M-30% (referencia)	RCD-25	RCD-50	RCD-75	RCD-100
Relación a/c	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
% SP	0,55%	0,55	0,55	0,56	0,56
Asentamiento (cm)	62,5	57	55,5	54	52,8
Embudo en V (seg)	8,74	4,14	5,22	5,04	10,15
Caja en L (H2/H1)	0,77	0,74	0,72	0,71	0,68

Sin embargo, se pudo apreciar que la incorporación de agregados reciclados afecta levemente el asentamiento de las mezclas en función del porcentaje de sustitución, fenómeno (Hadiwidodo y Mohd, 2008; Leite *et al.*, 2013 y Safiuddin *et al.*, 2011), debido a dos factores: el primero, que los agregados reciclados presentan una mayor rugosidad en su superficie luego de ser sometidos a procesos de trituración, en comparación con los agregados naturales; y el segundo, que este tipo de agregados reciclados poseen

una mayor cantidad de finos (pasante # 4) que resultan del proceso de trituración y podrían demandar más agua, lo que afecta el asentamiento de las mezclas, más aun cuando la sustitución de los agregados naturales se acerca al 100%. No obstante, este comportamiento no fue tan notable en el caso del embudo en V, en donde incluso se lograron tiempos menores a los mostrados por las mezclas de referencia. Por último, se pudo observar, en la prueba de caja en L, que la incorporación de agregados reciclados no generó aumentos

en la relación de bloqueo (H_2/H_1), lo que indica que aunque no se redujo el riesgo de bloqueo de los áridos entre las barras de refuerzo, todas las mezclas cumplieron con la capacidad de paso mínima para ser consideradas como CAC.

En términos reológicos, si se consideran los parámetros de flujo de asentamiento y tiempo de flujo como medidas indirectas de la tensión de umbral y la viscosidad de la mezcla, se puede observar que las mezclas con incorporaciones de agregados reciclados alcanzan combinaciones adecuadas de buena fluidez (baja tensión de umbral) y moderada viscosidad que evita la segregación de sus componentes (Robayo *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2013), logrando así, que todas las mezclas puedan ser consideradas como concretos autocompactantes, y que sus propiedades sean promisorias para que estos CAC puedan ser usados en el conformado de estructuras mediana y/o altamente reforzadas, tal como lo establecen los criterios de conformidad de la EFNARC.

Ensayos en estado endurecido Resistencia a la compresión

Los resultados obtenidos por medio del ensayo de resistencia a la compresión (ASTM C39) se pueden observar en la Figura 4. Los cuales muestran que la incorporación de agregados gruesos reciclados en la matriz de referencia (M-30) causa una disminución de la resistencia a la compresión que varía entre el 15% y el 29 %, dependiendo del porcentaje de agregado natural que fue sustituido por reciclado.

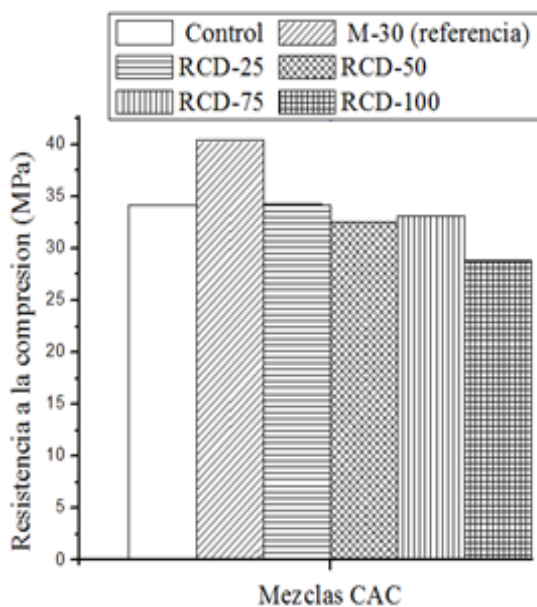


Figura 4. Resistencia a la compresión de los concretos elaborados a los 28 días de curado

Este comportamiento ha sido estudiado por diversos investigadores, alrededor de todo el mundo. Algunos, como Kou y Poon (2009); Leite *et al.* (2013); Tam *et al.* (2005); Etxeberria *et al.* (2007) y Safiuddin *et al.* (2011) afirman que esto es debido a factores como el agua libre, el mortero adherido, la porosidad y las diversas grietas y fallas presentes en los agregados reciclados, como se puede observar en la Figura 5.

El mortero adherido a los agregados obtenidos a partir de la trituración de RCDs es quizás la zona más débil de los mismos; su estructura porosa y el agrietamiento causado por los procesos de molturación durante su reciclaje debilitan la capacidad de soportar grandes esfuerzos de compresión y por tal razón afectan el desempeño mecánico del compuesto (Mardani *et al.*, 2014; McNail y Kang, 2013; Behera *et al.*, 2014). Además, las características de la interfase antigua influyen directamente sobre el comportamiento mecánico del nuevo concreto, ya que de no poseer las propiedades adecuadas podría generar la concentración de grandes esfuerzos cuando este es sometido a una carga y provocar la falla del material (Xiao *et al.*, 2012). No obstante, la nueva interfase es también una zona crítica, ya que según Behera *et al.* 2014; Wang *et al.* 2013; Shayan y Xu (2003); Tam *et al.*, (2009); Khoshkenari *et al.*, (2014) y Leite *et al.*, (2013) la estructura porosa de este mortero antiguo podría liberar parte del agua absorbida luego de saturarse, generar un incremento de la relación agua/cemento de esta zona y provocar la disminución de las resistencias para afectar directamente el compuesto.



Figura 5. Zonas de interfase y absorción de agua de los agregados reciclados

Ambas interfases se pueden observar en la Figura 6 (izquierda), en donde a través de un estereoscopio se pone en evidencia la importancia de la naturaleza del mortero antiguo, ya que como se mencionó anteriormente, de ésta depende que el agregado no se convierta en un macro-defecto (Figura 6, derecha), si no que tenga la capacidad de soportar esfuerzos cercanos a los que puede soportar un agregado perfectamente adherido a la matriz, y contribuya al logro de las resistencias de diseño de los concretos fabricados con agregados naturales.



Figura 6. Zonas de interfase y falla después de la carga, Izquierda y derecha respectivamente.

Resistencia a la tracción indirecta

Los resultados obtenidos en la prueba de tracción indirecta o ensayo brasilero (ASTM C496) se muestran en la Tabla 9, en donde se puede observar una disminución de los valores de resistencia a la tracción indirecta con la sustitución del agregado natural por reciclado, siendo este efecto mayor cuando la sustitución es total (100%), pasando de 3,08 MPa en la mezcla M-30 a 2,03 en RCD-100. Algunos investigadores, como Xiao *et al.* (2008), Zhou *et al.* (2010) y Cheng (2005) reportan que la disminución en las resistencias a esfuerzos uniaxiales se puede dar por el hecho de que la falla no solo comienza en la zona de interfase entre la pasta de cemento y el agregado reciclado, sino que también existen fallas internas en el mismo agregado como tal, que pueden ser producidas en la demolición y trituración de los RCDs; estos defectos son intensificados por los esfuerzos uniaxiales se propaga a través de la matriz hasta la falla o colapso del material cuando estos superan la capacidad de carga del material.

Tabla 9. Resultados ensayo de tracción indirecta a los 28 días de curado.

Mezcla	Carga Máxima (N)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)
Control	56197	3,08
M-30	58725	3,22
RCD-25	41220	2,26
RCD-50	40730	2,23
RCD-75	44190	2,42
RCD-100	37060	2,03

Resistencia a la flexión

Los resultados de resistencia a la flexión reflejan un comportamiento similar al mostrado por estas mismas mezclas en el ensayo de compresión, notándose una leve disminución de los valores de resistencia pero en este caso debido a esfuerzos de flexo-tracción (ASTM C293).

Se observa que la mezcla RCD-25 es la de mejor desempeño entre aquellas que contienen agregados reciclados, no obstante las demás mezclas con RCDs tienen una conducta casi igual. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por diversos investigadores, entre los cuales se encuentran; Soto y Mendoza (2006); Xiao *et al.*, (2012); Hu (2007); Cheng (2005) y Topçu y Sengel (2004) quienes afirman que la disminución de la resistencia a la flexión puede variar entre 0 y 40 %, dependiendo de la dosificación de los agregados reciclados. Incluso hacen énfasis en que la incorporación de dichos agregados afecta la rigidez de las mezclas, lo cual se ve reflejado en un leve cambio de la pendiente de la curva carga-flecha, tal como se puede observar en la Tabla 10 para las mezclas con RCDs.

Tabla 10. Resultados ensayo de flexión de los concretos elaborados a los 28 días de curado.

Mezcla	Carga Máxima (N)	Módulo de ruptura (MPa)
Control	6871	6,32
M-30	7657	6,65
RCD-25	5688	5,12
RCD-50	4975	4,21
RCD-75	5077	4,46
RCD-100	4541	4,16

Ensayos físicos Absorción, densidad y porosidad

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de absorción, densidad y porosidad establecido en la norma ASTM C642, reflejan el efecto sobre propiedades físicas como la densidad y la porosidad de las mezclas elaboradas con RCDs, mostrando que la incorporación de agregados reciclados genera incremento del volumen de poros permeables en función de la cantidad de agregado natural sustituido por reciclado. Este efecto tiene como consecuencia directa que la densidad

de los concretos disminuya, al igual que la capacidad de absorción se incremente, tal como se aprecia en la Tabla 11. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Leite *et al.* (2013), Safiuddin *et al.* (2011), Tam *et al.* (2005), y Etxeberria *et al.* (2007), quienes atribuyen este comportamiento a la porosidad presente en el mortero adherido a los agregados reciclados, lo que genera una disminución de la densidad en relación con los agregados naturales y, en consecuencia, influyen la densidad del concreto final.

permeables, pues se atribuye este fenómeno a la mayor relación agua/cemento que se genera en la nueva pasta, por el agua libre que queda remanente, y que los agregados reciclados no absorben totalmente debido a que el agua de mezclado de la pasta supera su rata de absorción en aquel instante (fraguado de la mezcla); por tal razón, esta agua remanente escapa posteriormente a la superficie dejando a su paso poros capilares que afectan la densidad del material (Belin *et al.* 2014).

Tabla 11. Resultados de ensayo en densidad, absorción y porosidad a los 28 días de curado.

	Absorción %		Densidad ($\times 10^3$) (Kg/cm ³)		Poros (%)
	después de inmersión	después de inmersión y hervido	después de inmersión	después de inmersión y hervido	
Mezcla				aparente	Volumen de poros permeables
Control	5,16	5,54	2,48	2,49	13,07
M30	4,68	5,09	2,49	2,50	12,10
RCD25	6,05	6,25	2,35	2,36	13,85
RCD50	7,01	7,16	2,27	2,27	15,17
RCD75	8,12	8,30	2,22	2,22	17,01
RCD100	7,96	8,06	2,19	2,20	16,38

Succión capilar

Los resultados obtenidos mediante el ensayo de succión capilar (ASTM C1585) se pueden observar gráficamente en la Figura 7. En la Tabla 12, se reportan los valores promedios de la rata de absorción K, la resistencia a la penetración m, y la porosidad efectiva ϵ_e , calculados para las diferentes mezclas a los 28 días de curado.

Estos resultados reflejan que la incorporación de los agregados reciclados en la mezcla de referencia causa una leve disminución de la resistencia a la penetración m, además de un incremento del porcentaje de poros efectivos, proporcional a la cantidad de agregado reciclado incorporado en las mezclas. Sin embargo, estos cambios no son tan significativos; tal como se puede observar al comparar los valores obtenidos para la rata de absorción (K).

Tal vez, el resultado más representativo es el aumento del porcentaje de poros efectivos ϵ_e , el cual es alterado en la medida en que el porcentaje de agregado reciclado aumenta, pasando de ser 7,53 % en la mezcla de referencia (M-30) a 11,85 % para la mezcla RCD-100. Este comportamiento se asemeja al presentado por estas mismas mezclas en la prueba de absorción, densidad y porosidad. Por otro lado, surge la discusión sobre el incremento del volumen de poros

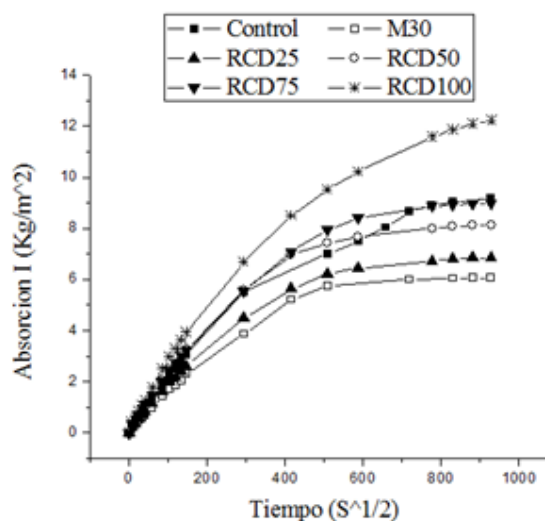


Figura 7. Cinética de succión capilar a los 28 días de curado.

Tabla 12. Resultados del ensayo de succión capilar a 28 días de curado.

Mezcla	K (Kg/m ² s ^{1/2})	m (x10 ⁷)(s/m ²)	Porosidad efectiva ϵ_e
Control	0,021	1,99	9,23 %
M-30	0,015	2,51	7,53 %
RCD-25	0,017	2,40	8,48 %
RCD-50	0,022	1,66	8,82 %
RCD-75	0,021	2,60	10,65 %
RCD-100	0,026	2,10	11,85 %

Si se comparan los resultados de porosidad obtenidos en el ensayo de densidad, absorción y porosidad (ASTM C642) con los de succión capilar (ASTM C1585) se puede observar que el efecto que causan los agregados reciclados sobre la porosidad abierta y la total es similar, logrando aumentar en valores muy cercanos ambas porosidades. Lo que sí se destaca es que de toda la porosidad presente en las mezclas, una fracción cercana a los 2/3 está interconectada entre sí. Este fenómeno, según diversos investigadores, es causado por el agua libre que escapa a la superficie dejando a su paso capilares que conectan la mayor parte de poros a través de una red (Henkensiefken *et al.*, 2009).

Conclusiones

Con base en los resultados de esta investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- la utilización de agregados reciclados obtenidos a partir de la trituración de escombros en la producción de concretos autocompactantes, como sustituto parcial de la grava natural, es totalmente factible, ya que las mezclas presentaron un flujo adecuado, con buena resistencia a la segregación, exudación y excelente capacidad de paso y de relleno, además en estado endurecido un buen aspecto estético y propiedades mecánicas aceptables que le permiten ser usado en estructuras medianas y altamente reforzadas. Estas mezclas brindan un tiempo de manejabilidad apropiado para lograr una colocación y vaciado correctos.
- La incorporación de los agregados reciclados ocasionó una ligera disminución de las propiedades en estado endurecido de la mezcla de referencia, de manera proporcional a la cantidad de agregado reciclado presente en las mezclas. Cabe resaltar que la incorporación del 25% de agregado reciclado generó el mejor comportamiento mecánico entre las mezclas con RCDs, presentando con un desempeño mecánico cercano al 85% en relación a la mezcla de referencia.

- La sustitución de agregados gruesos naturales por los obtenidos a partir de RC Ds en la mezclas elaboradas generó un leve incremento del volumen de poros permeables, en función de la cantidad de agregado reciclado presente en las mezclas. Este efecto tuvo como consecuencia directa que la densidad de los concretos disminuyera hasta en un 15% y, en consecuencia, que la capacidad de absorción se incrementara.

- Todo lo anterior indica que la incorporación de los agregados obtenidos a partir de la trituración de los RCDs genera una leve disminución del desempeño mecánico de los concretos elaborados con los mismos. Sin embargo, cabe anotar que su aprovechamiento en un material tan versátil como el CAC abre la posibilidad de ser usados en lugares donde escasean los agregados de origen natural o donde su sobreexplotación de estos recursos no renovables ha generado un impacto ambiental irreversible que limita su sostenibilidad en el futuro.

Agradecimientos

Los autores presentan sus agradecimientos al grupo de investigación "Materiales compuestos" de la Universidad del Valle; proyecto VRI C.I. 747 "Reciclar escombros en concreto" financiado por la Universidad del Valle, convocatoria 2-2013 de la Vicerrectoría de Investigaciones; Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e innovación (COLCIENCIAS) y su programa Jóvenes Investigadores e Innovadores "Virginia Gutiérrez de Pineda", convocatoria 566 de 2012, por su apoyo a esta investigación.

Referencias

- Behera, M., Bhattacharyya, S., Minocha, A., Deoliya, R y Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C and D waste and its use in concrete- A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, 68: 501-516.
- Belin, P., Habert, G., Thiery, M., Roussel, N. (2014). Cement paste content, water absorption and classification of recycled concrete coarse aggregates. *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-013-0128-z
- Cheng, G. (2005). Experimental Study on the Basic Performance of Recycled Aggregate Concrete with Different Displacement Ratio. *Chinese Concrete*, 11: 67-70.
- Deshpande, N., Kulkarni, S y Patil, N. (2011). Effectiveness of using coarse recycled concrete aggregate in concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 4(96):913-919.

- Domone, P. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*, 28(4):197-208.
- Etzeberria, M., Vázquez, E., Marí, A y Barra, M. (2007). Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37:735-742.
- Hadiwidodo, Y.S y Mohd, S. (2008). *Review of testing methods for self-compacting concrete. International conference on construction and building technology (ICCBT)* (05). pp. 69-82.
- Henkensiefken, R., Castro, J., Bentz, D., Nantung, T y Weiss, J. (2009). Water absorption in internally cured mortar made with filled lightweight aggregate. *Cement and Concrete Research*. 39: 883-892.
- Hu, M. (2007). Mechanical Properties Of Concrete Prepared With Different Recycled Coarse Aggregates Replacement Rate. *Chinese Concrete*, 2: 52-54.
- Khoshkerani, A., Shafigh, P., Moghimi, M y Mahmud, H. (2014). The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. *Materials and Design*, 64: 345-354.
- Kou, S y Poon, C. (2009). Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 31: 622-627.
- Leite, M., Gualberto, J., Filho, F y Lima, P. (2013). Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. *Materials and Structures*, 46(10):1765-1778
- Malesev, M., Radonjanin, V y Marinkovic, S. (2012). Recycled concrete as aggregate for structural concrete production. *Sustainability*, 2: 1204-1225.
- Mardani, A., Tuyan, M y Ramyar, K. (2014). Mechanical and durability performance of concrete incorporating fine recycled concrete and glass aggregates. *Materials and Structures*, DOI: 10.1617/s11527-014-0342-3.
- McNail, K y Kang, T. (2013). Recycled concrete aggregates: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7(1): 61-70
- Oikonomou, N. (2005). Recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 27: 315-318. 2005.
- Okamura, H y Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology*, 1 (1): 5-15.
- Poon, C y Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources Conservation and Recycling*, 50: 293-305.
- Robayo, R., Matthey, P y Delvasto, S. (2013). Comportamiento mecánico de un concreto fluido adicionado con ceniza de cascarilla de arroz. *Revista de la construcción*, 12(2):139-151.
- Ryou, J y Lee, Y. (2014). Characterization of recycled coarse aggregates (RCA) via a surface coating method. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 8(2):165-172.
- Safiuddin, M., Salam, M y Jumaat, M. (2011). Effects of Recycled Concrete Aggregate on the Fresh Properties of Self-Consolidating Concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11(4):1023-1041.
- Shayan, A y Xu, A. (2003). Performance and Properties of Structural Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate. *ACI Materials Journal*, 100:371-80. .
- Shima, H, Tateyashiki, H., Matsushashi, R y Yoshida, Y. (2005). An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 3(1): 53-67.
- Silva, Y., Burgos, D., Valencia, W., Delvasto, S y Álvarez, J. (2013). Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera. *Revista de la Construcción*, 12(2): 166-176.
- Soto, I y Mendoza, C. (2006). Comportamiento mecánico de concreto fabricado con agregados reciclados. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 7(3): 151-164.
- Tam, V., Gao, X y Tam, C. (2005). Microstructural Analysis of Recycled Aggregate Concrete Produced From Two-Stage Mixing Approach, 35: 1195-1203.
- Tam, V., Gao, X., Tam, C y Ng, K. (2009). Physio-chemical reactions in recycle aggregate concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 163:823-828.
- Tam, V., Wang, Z y Tao, Z. (2014). Behaviour of recycled aggregates concrete filled stainless Steel stub columns. *Materials and Structures*, 47(1-2):165-172

- Topçu, B y Sengel, S. (2004). Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research*. 34:1307–1312.
- Torgal, F.P y Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*, Chapter 4: Construction and Demolition (C and D) Wastes: London, England. Springer-Verlag London Limited. pp. 51-74.
- Wang, H., Wang, J., Sun, X y Jin, W. (2013). Improving performance of recycled aggregates concrete with superfine pozzolanic powders. *J. Cent. South Univ*. 20: 3715-3722.
- Xiao, J., Li, B y Yuan, B. (2008). Splitting Tensile Strength Distribution of Concrete with Different Recycled Coarse Aggregates. *Chinese Journal Building Materials*. Vol. 11: 223–229.
- Xiao, J., Li, W., Fan, Y y Huang, X. (2012). An Overview of Study on Recycled Aggregate Concrete in China (1996 – 2011). *Construction and Building Materials*, 31:364-383.
- Zhou, J., He, H., Meng, X y Yang, Y. (2010). Basic Mechanical Properties of Recycled Concrete Experimental Study. *Journal Shenyang Jianzhu University*. 26: 464–468.