

Comparación del comportamiento de elementos estructurales a escala de concreto convencional y de concreto con agregados reciclados*

Conventional concrete versus concrete with recycled aggregates: a comparison of the behavior of structural elements

PEDRO NEL QUIROGA SAAVEDRA¹, NANCY TORRES CASTELLANOS²

1. Ph.D., profesor asociado de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

2. M.Sc., profesora asistente de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

pedro.quiroga@escuelaing.edu.co - nancy.torres@escuelaing.edu.co

Recibido: 22/02/2012 Aceptado: 18/03/2012

Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Mientras en algunos países se recicla casi el 100% de los escombros de construcción y demolición (C&D), en Colombia sólo un pequeño porcentaje se recicla. Esto se debe a varias razones, entre las que se puede mencionar que la mayoría de los constructores, dueños y entidades públicas no sabe que se puede hacer concreto de buena calidad con agregados reciclados. Para promover el empleo de agregados reciclados en concreto estructural es necesario que los usuarios potenciales se familiaricen con el comportamiento de elementos estructurales hechos con este material. En 2010 se inició en el Laboratorio de Estructuras y Materiales, de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, un programa experimental para ensayar elementos estructurales a escala de concreto con 20% de agregado reciclado (como remplazo de agregado grueso natural). Se presentan los resultados de cargas máximas y gráficas carga-desplazamiento de los diferentes elementos.

Palabras claves: agregado reciclado, sostenibilidad, elementos estructurales.

Abstract

While in some countries almost 100% of the construction and demolition (C&D) waste is recycled, in Colombia only a small portion is recycled due to various reasons, including that most contractors, owners and public agencies are unaware that good quality concrete can be made of recycled aggregates. To promote the use of recycled aggregates (RA) as a component of structural concrete it is necessary that users become familiar with the behavior of structural elements made of CRA. Beginning in 2010, as part of a graduate course, small-scale structural elements with CRA have been manufactured and tested at the structures laboratory of la Escuela Colombiana de Ingeniería (ECI). CRA was made replacing 20% of coarse aggregate by crushed concrete. In this paper, maximum loads and load-deflection curves are presented.

Keywords: recycled aggregate, sustainability, structural elements.

* Adaptación del artículo "Comparison of the Performance of Structural Elements Made with Regular Concrete and Concrete with Recycled Aggregates in Colombia", presentado en the Fourth International Conference on Non-Traditional Cement & Concrete. Brno, República Checa, 2011.

INTRODUCCIÓN

En Bogotá se producen alrededor de doce millones de toneladas al año de residuos de construcción y demolición (RCD), parte de los cuales se depositan en las escombreras autorizadas, parte en el relleno sanitario, parte en zonas públicas como humedales, bermas, zonas verdes y en lotes baldíos, y sólo una mínima parte se reutiliza. Al igual que en otras ciudades del mundo, la capacidad de escombreras y rellenos sanitarios podría llegar a su límite en pocos años. Por otro lado, también empiezan a escasear las fuentes de agregados cercanas a Bogotá; de hecho, se suelen traer agregados desde canteras situadas a más de 150 km.

La experiencia mundial indica que se puede reutilizar más del 90% de los RCD, ya sea como material para bases, subbases y rellenos o como agregado para concreto. En Colombia, sin embargo, apenas hay unos pocos ejemplos de uso de agregados reciclados en obras civiles (Bedoya, 2003). Algunas de las razones de esto son que constructores, dueños y la sociedad en general no saben que se puede hacer concreto de buena calidad con agregados reciclados, que las normas técnicas colombianas no incluyen estos agregados y que no existe un marco legal que regule e incentive el empleo de dichos agregados. El éxito de los programas de reciclaje de RCD en algunos países se debe a que la sociedad los apoya, que hay leyes que por ejemplo exigen clasificar los escombros en obra, o que obligan a reciclar todos los RCD, y que las normas técnicas establecen los requisitos para el uso apropiado de los agregados reciclados.

En los últimos años se han hecho en la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (ECI) investigaciones dirigidas a evaluar propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto con agregados o adiciones provenientes de la trituración de concreto, ladrillo y vidrio (Bojacá, 2008; Pinzón, 2009; Quiroga, 2010). El objetivo de estos proyectos es recolectar información que permita desarrollar guías de diseño y normas técnicas para concreto con agregados reciclados.

Para promover el uso de concreto con agregados reciclados, además de ensayos de laboratorio sobre el material, es importante realizar proyectos demostrativos que incluyan elementos estructurales, así como bloques y adoquines para que los usuarios potenciales puedan verificar el desempeño del concreto con agregados reciclados en la realidad. Por tal razón se decidió construir

y ensayar algunos elementos estructurales a escala en el Laboratorio de Estructuras, como parte del curso de posgrado Comportamiento plástico del concreto. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que el uso de agregados reciclados requiere ensayos que aseguren que no tendrán efectos negativos en el concreto. Estos ensayos no tradicionales deben hacerse tanto a los agregados como al concreto.

Este curso incluye una serie de sesiones de laboratorio para ilustrar experimentalmente algunos temas del curso, a saber: vigas continuas con diferentes distribuciones de refuerzo para estudiar la redistribución de momentos y la formación de rótulas plásticas; placas apoyadas en tres bordes para verificar resultados del método de las líneas de fluencia, y vigas altas y ménsulas para verificar resultados del método del puntal-tensor. En 2010 se decidió reproducir estos elementos con concreto con agregados reciclados, para lo cual un estudiante de la maestría en Estructuras construyó y ensayó los especímenes, y luego analizó la información (Arriaga, 2011).

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

Desde mediados de los años noventa, se han realizado en Colombia varios proyectos de investigación que han demostrado que es técnicamente factible producir concretos con agregados reciclados de la resistencia deseada. Sin embargo, para promover el uso de este material es necesario también estudiar el comportamiento estructural de elementos construidos con él. La experiencia mundial indica que las propiedades mecánicas del concreto con hasta 20% de remplazo de agregado grueso natural son similares a las del concreto convencional. El propósito es verificar si esto es válido para materiales y condiciones locales.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Materiales

Se utilizaron cemento comercial en bolsa, agregado grueso y fino de origen sedimentario proveniente del río Tunjuelo y agregado reciclado producido mediante trituración de cilindros de concreto previamente ensayados en el Laboratorio de Materiales. A continuación se presentan las principales características de los agregados (tabla 1).

Tabla 1
Características de los agregados

	Agregado grueso natural	Agregado grueso reciclado	Agregado fino natural
Tamaño nominal máximo (mm)	25	25	6.35
Densidad SSS (kg/m ³)	2450	2290	2530
Masa unitaria (kg/m ³)	1320	1130	1580
Absorción (%)	3,90	7,80	2,40
Coefficiente de forma	0,31	0,24	
Coefficiente de Los Ángeles (%)	30	40	
Coefficiente Micro-Deval (%)	16	31	

Se utilizaron barras corrugadas de $F_y = 420$ MPa y alambres corrugados de $F_y = 550$ MPa para el refuerzo principal, y alambres corrugados de $F_y = 550$ MPa para estribos.

Mezclas de concreto

Se hicieron dos tipos de mezclas de concreto, las cuales eran idénticas, excepto que en una se reemplazó 20% de agregado grueso natural por agregado reciclado. Las características de las mezclas se presentan a renglón seguido (tabla 2).

Tabla 2
Diseño de las mezclas

	Mezcla de concreto convencional	Mezcla de concreto con agregado reciclado
Relación agua-cemento, a/c	0,50	0,50
Agua (kg)	195	195
Cemento (kg)	390	390
Agregado fino (kg)	739	739
Agregado grueso (kg)	859	687
Agregado reciclado (kg)	0	155

Los elementos se fundieron y ensayaron en diferentes momentos de acuerdo con el calendario del curso. Se tomaron cilindros de cada mezcla y se les determinaron la resistencia a compresión y el módulo elástico el día en que se ensayaron los elementos estructurales, cuyos resultados se muestran en la tabla siguiente (tabla 3). Se puede observar que la resistencia a compresión y el módulo elástico de los dos tipos de concreto fueron similares para placas, ménsulas y vigas altas. En el caso de vigas continuas, la resistencia del concreto convencional fue mayor debido a que los elementos de concreto con agregados reciclados se fundieron unos días después.

Tabla 3
Propiedades del concreto

Elemento	Propiedad	Mezcla de concreto convencional	Mezcla de concreto con agregado reciclado
Vigas continuas	$f'c$ (MPa)	33 (25 d) ^a	24 (16 d) ^a
	E (GPa)	20	20
Placas en dos direcciones	$f'c$ (MPa)	18 (12 d) ^a	20 (13 d) ^a
	E (GPa)	15	15
Ménsulas y vigas altas	$f'c$ (MPa)	28 (32 d) ^a	28 (32 d) ^a
	E (GPa)	18	18

^a Edad del concreto en el momento del ensayo.

Elementos estructurales

Vigas continuas

El objetivo de esta práctica es comparar el comportamiento inelástico y la resistencia de dos juegos de tres vigas continuas con diferente distribución de refuerzo cada uno. Las vigas apoyadas en los extremos y en el centro se cargaron con cargas puntuales (figura 1). Se

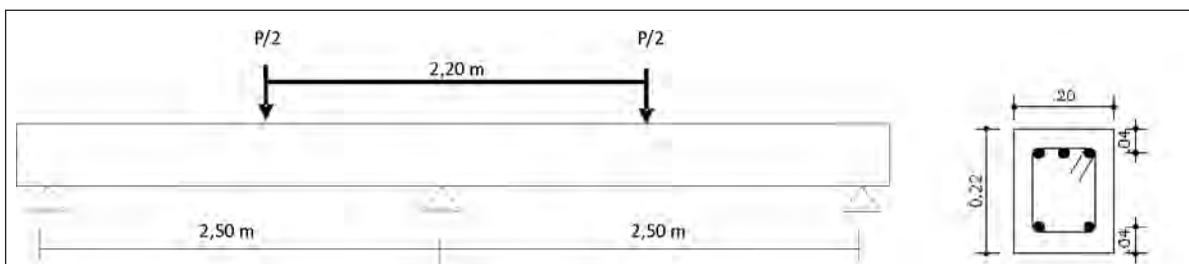


Figura 1. Esquema de las vigas continuas (dimensiones en m).

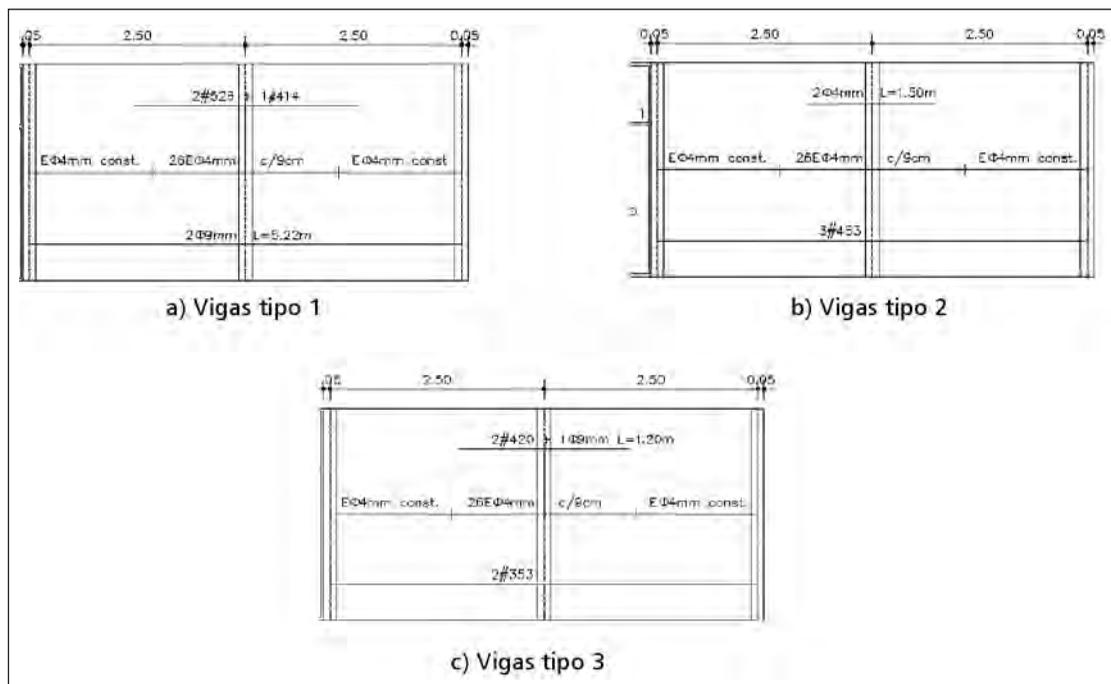


Figura 2. Refuerzo de las vigas continuas.

midieron deflexiones bajo las cargas con deformímetros mecánicos de 0,01 mm de precisión.

Un juego de vigas se hizo con concreto convencional y el otro con concreto con agregados reciclados. En cuanto al refuerzo de las vigas de cada juego, para las vigas tipo 1 el refuerzo negativo en el apoyo central es mucho mayor que el refuerzo positivo; para las vigas tipo 2, el refuerzo positivo es mucho mayor que el refuerzo negativo, y para las tipo 3, el refuerzo negativo es mayor que el positivo, pero éstos son más cercanos a lo requerido por un análisis elástico. Las vigas tipo 1 y tipo 3 tienen que desarrollar grandes curvaturas y rotaciones en las luces antes de que el acero negativo llegue al esfuerzo de fluencia, mientras que en las vigas tipo 2 hay que desarrollar grandes curvaturas y rotaciones en el apoyo central antes de que el refuerzo positivo alcance el esfuerzo de fluencia (figura 2).

Las cargas se incrementaron hasta el colapso de las vigas, definido como el punto en el cual las deflexiones aumentaban drásticamente para incrementos muy pequeños de carga o cuando la carga ya no se incrementaba. A continuación se pueden ver las cargas máximas obtenidas experimentalmente y las cargas calculadas teóricamente por el método del trabajo virtual (tabla 4), así como las gráficas carga-deflexión (figura 3).

Tabla 4
Cargas teóricas y experimentales

Viga	P teórica (kN)	P medida (kN)
CC-1	107	128
CC-2	116	110
CC-3	74	82
CRA-1	86	92
CRA-2	112	102
CRA-3	74	98

CC = vigas de concreto convencional.

CRA = vigas de concreto con agregados reciclados.

Se puede observar que las cargas reales se correlacionan aceptablemente con las cargas teóricas y en general las diferencias son menores que el 20%, excepto para la viga CRA-3, así como también se puede observar que para las vigas tipos 2 y 3 las resistencias para los dos tipos de concreto son similares. Para las vigas tipo 1, hay una diferencia importante entre la capacidad de la viga de concreto convencional y la de concreto reciclado, la cual sin embargo es consistente con la resistencia de dichos concretos en el momento del ensayo (edades diferentes).

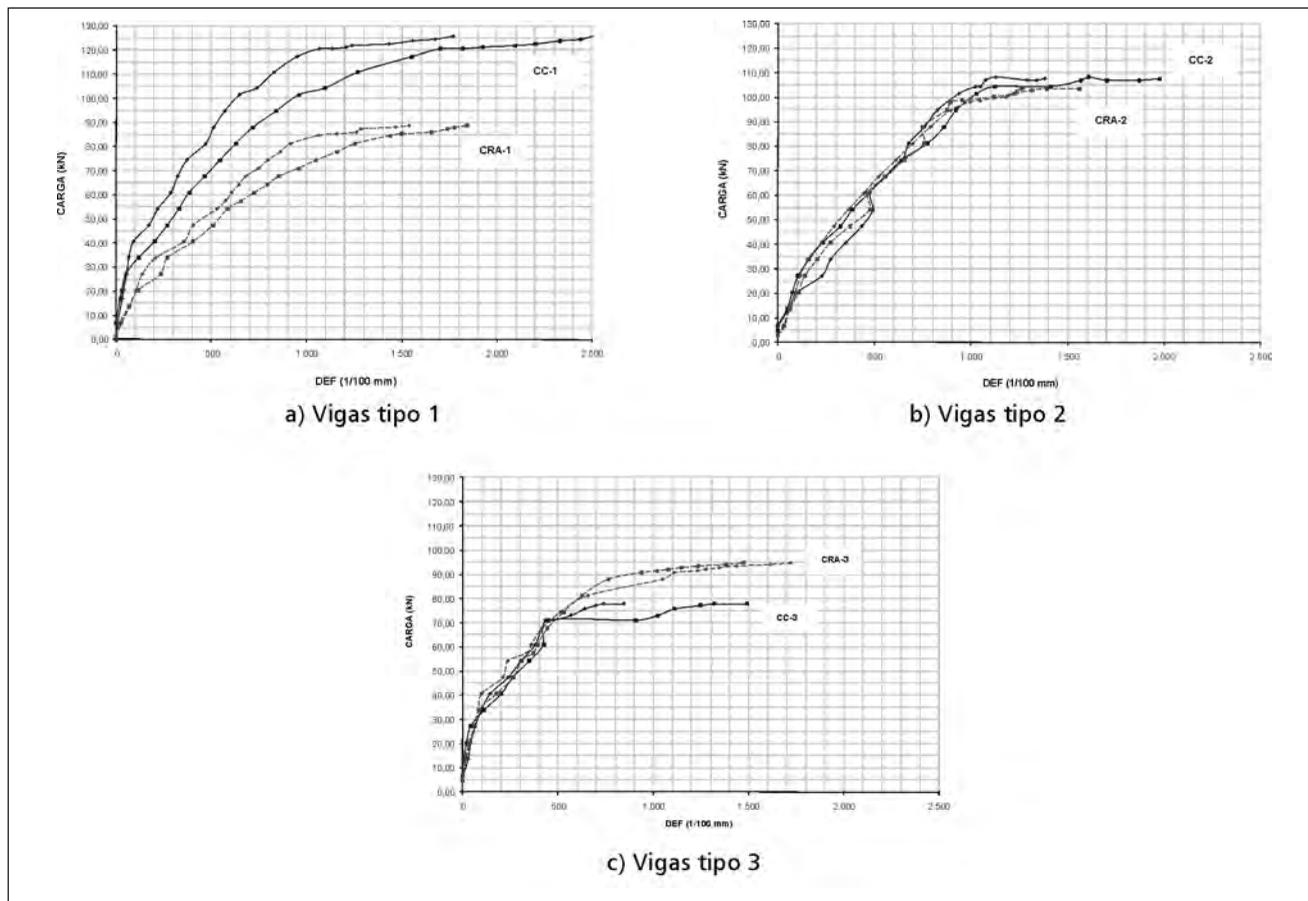


Figura 3. Deflexiones bajo las cargas puntuales de vigas continuas.

Placas en dos direcciones

El objetivo de esta práctica es comparar la carga máxima uniforme que resisten dos placas de concreto con diferente refuerzo, con la carga máxima determinada por medio del método de las líneas de rotura. Las placas eran de 2,0 m de largo por 0,90 m de ancho y 3 cm de espesor, y tenían tres bordes simplemente apoyados y un borde libre (figura 4). El refuerzo se colocó aproximadamente en la mitad de la altura.

Se procedió a construir dos juegos de placas: uno con concreto convencional y otro con concreto con agregados reciclados. Cada juego constaba de dos placas: una con refuerzo en una sola dirección (alambres corrugados de $\phi 6$ mm @ 15 cm) y la otra con refuerzo en dos direcciones (malla electrosoldada con alambres de $\phi 3$ mm @ 15 cm).

Las placas se cargaron en etapas hasta el colapso, utilizando agregado esparcido uniformemente sobre la placa. En cada etapa se medían las deflexiones en

el punto central del lado libre con un deformímetro mecánico. Usando el método de las líneas de rotura se determinaron teóricamente la carga máxima y el patrón de falla. A continuación se presentan los valores experimentales y teóricos de todas las placas (tabla 5), y se muestran las gráficas carga vs. deflexión (figura 4).

Tabla 5
Cargas distribuidas máximas

Placa	Refuerzo	Carga teórica (kN/m ²)	Carga real (kN/m ²)
CC-1	$\phi 6$ mm c/15 cm dirección larga	4.5	5.9
CC-2	$\phi 3$ mm @ 15 cm ambas direcciones	3.0	4.2
CRA-1	$\phi 6$ mm c/15 cm dirección larga	3.4	4.7
CRA-2	$\phi 3$ mm @ 15 cm ambas direcciones	3.5	4.7

CC = placas de concreto convencional.
CRA = placas de concreto con agregados reciclados.

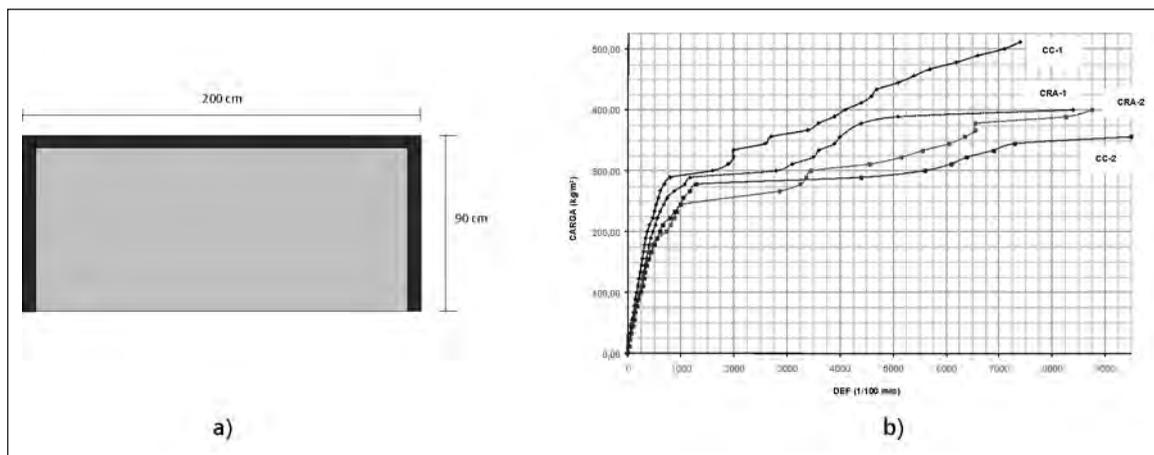


Figura 4. a) Esquema en planta de las placas. b) Gráfica carga uniforme vs. deflexión en la mitad del lado libre de las placas.

Se puede observar que las cargas experimentales son significativamente superiores a las teóricas (del orden del 30%), aunque proporcionales a éstas, y que las placas de concreto con agregados reciclados tienen resistencias similares a las de las placas de concreto con agregados reciclados. Para los cálculos teóricos se usó la posición real del refuerzo en las placas (esto explica las diferencias entre placas similares), en tanto que cálculos se hicieron con el valor medido de F_y ; sin embargo, probablemente el acero entró en la zona de endurecimiento por deformación en las regiones alrededor de las líneas de rotura, lo cual explicaría la diferencia entre los valores teóricos y los experimentales.

Ménsulas

El objetivo de esta práctica es comparar la carga máxima real de dos ménsulas con diferentes tipos de refuerzo con la carga teórica determinada mediante el método del puntal-tensor (tabla 6). Las gráficas carga vs. deflexión se muestran más adelante (figura 6).

Se construyeron dos juegos de dos ménsulas con los dos tipos de concreto. Las dos ménsulas de cada juego tienen el mismo refuerzo pero anclado en forma diferente. En una ménsula el refuerzo principal se soldó a una barra transversal y en la otra el anclaje del refuerzo principal se hizo mediante ganchos a 90° (figura 5).

Se puede ver que la resistencia de la ménsula CRA-1 de concreto con agregados reciclados fue significativamente menor que la ménsula CC-1 correspondiente, mientras que las resistencias de las ménsulas CC-2 y CRA-2 fueron similares. Después del ensayo se en-

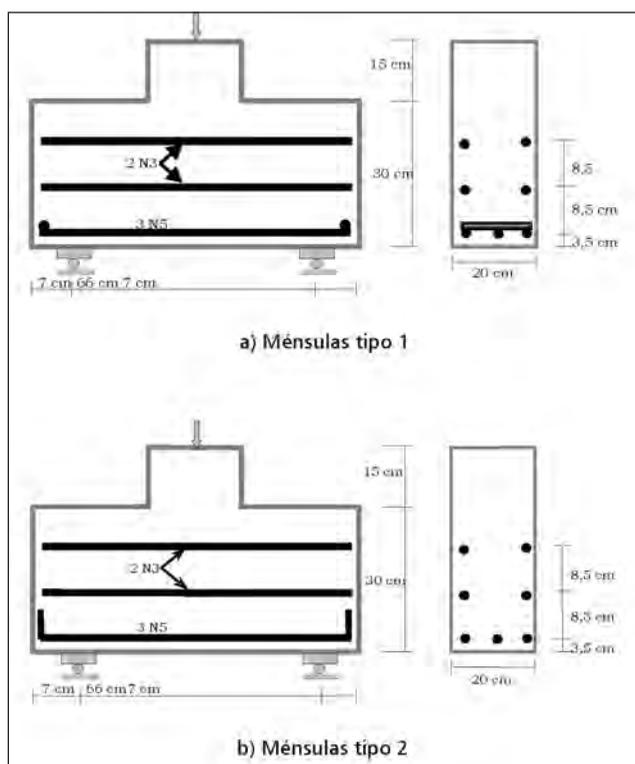


Figura 5. Detalle de ménsulas.

Tabla 6
Cargas teórica y experimental máximas de las ménsulas

Ménsulas	Carga teórica (kN)	Carga real (kN)
CC-1	242	244
CC-2	241	231
CRA-1	234	158
CRA-2	248	219

CC = ménsulas de concreto convencional.
CRA = ménsulas de concreto con agregados reciclados.

contró que el refuerzo de la ménsula CRA-1 se movió durante la fundida, por lo cual quedaron sin anclaje adecuado en uno de los lados. También se pudo observar que con la excepción de la ménsula mencionada, la predicción del modelo puntal-tensor fue muy cercana a los valores experimentales. Las curvas esfuerzo-deformación muestran que inicialmente las ménsulas de concreto convencional tenían la misma rigidez que las de concreto con agregados reciclados. Para cargas mayores, la ménsula CRA-2 se vuelve menos rígida que la correspondiente CC-2. Así mismo, se vio que las fisuras de las ménsulas CRA son más anchas que las de concreto convencional.

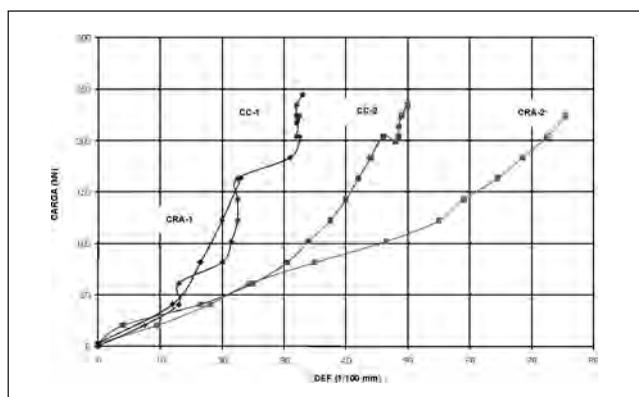


Figura 6. Gráficas carga-deflexión de ménsulas.

Vigas altas

El objetivo de esta práctica es comparar la carga última de dos vigas altas con diferentes tipos de refuerzo, con la carga teórica determinada mediante el método del puntal-tensor.

Se construyeron dos juegos de dos vigas altas con los dos tipos de concreto, las cuales tenían diferente refuerzo (figura 7). Ambas tenían el mismo refuerzo horizontal, pero las vigas tipo 2 tenían además refuerzo vertical.

Las vigas se cargaron gradualmente hasta el colapso con una máquina universal. Las deflexiones se midieron en la mitad de la luz, con un deformímetro mecánico. Más adelante se muestran las cargas máximas medidas y las calculadas (tabla 7).

Se puede ver que la resistencia real de las vigas de concreto con agregados reciclados fue un poco mayor que las de concreto convencional y que el modelo

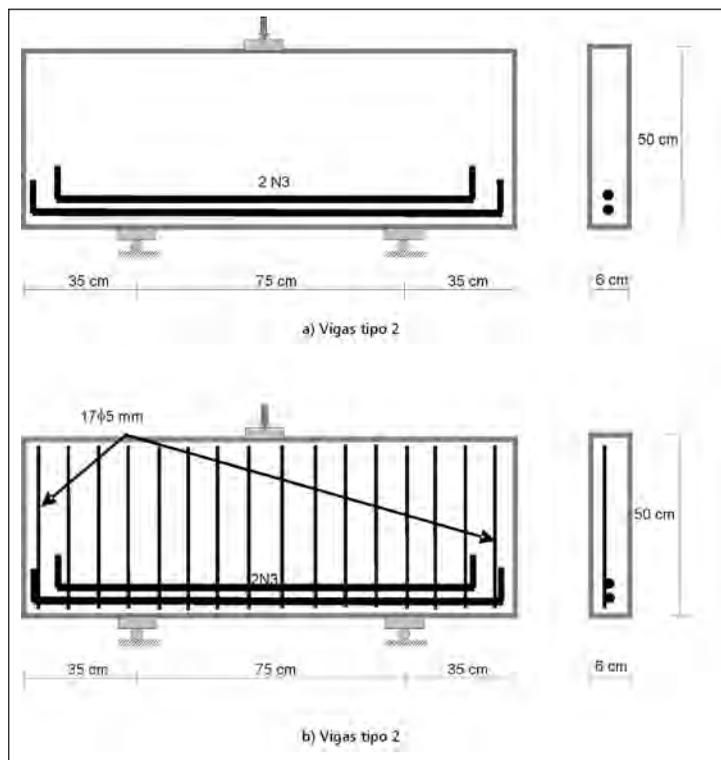


Figura 7. Detalle de vigas altas.

puntal-tensor predijo razonablemente bien las cargas máximas.

Tabla 7

Cargas máximas teóricas y experimentales de las vigas altas

Vigas	Carga teórica (kN)	Carga experimental (kN)
CC-1	129	118
CC-2	157	158
CRA-1	129	152
CRA-2	158	170

CC = vigas altas de concreto convencional.

CRA = vigas altas con agregados reciclados.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados de ensayos de elementos estructurales a escala hechos con concreto con 20% de agregados gruesos reciclados como remplazo de agregado grueso natural, se puede concluir que la resistencia y la rigidez de este tipo de concreto son similares a las

de concreto convencional. En países como Alemania se permiten remplazos hasta de 45%, por lo cual se tiene planeado repetir estos experimentos con mayores contenidos de agregado reciclado. Se recomienda, igualmente, construir elementos estructurales y no estructurales en proyectos reales y monitorearlos para verificar su desempeño.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Arriaga, L. (2011). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado* (tesis de maestría). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [2] Bedoya, C.M. (2003). *El concreto reciclado con escombros como generador de hábitats urbanos sostenibles* (tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- [3] Bojacá, N. (2008). *Concreto sostenible como alternativa estructural, ambiental y económica en la construcción de obras* (trabajo de grado de especialización). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [4] Pinzón, H. (2009). *Valoración de algunas propiedades del concreto adicionado con vidrio pulverizado* (trabajo de grado de especialización). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- [5] Quiroga, P. & Torres, N. (2010). *Concrete with aggregates from construction and demolition waste in Colombia*. Honors Session Proceedings. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona, Italia.
- [6] Quiroga, P. & Torres, N. (2011). *Comparison of the performance of structural elements made with regular concrete and concrete with recycled aggregates in Colombia*. 4th International Conference on Non-Traditional Cement & Concrete. Brno, República Checa.