

# Concrete with recycled aggregates as urban sustainability project

## El concreto con agregados reciclados como proyecto de sostenibilidad urbana

Carlos Bedoya<sup>1\*</sup>, Luis Dzul\*\*

\* Universidad Nacional de Colombia, Medellín. COLOMBIA

\*\* Universidad Internacional Iberoamericana, Campeche. MEXICO

Fecha de Recepción: 14/06/2015

Fecha de Aceptación: 30/07/2015

PAG 99-108

### Abstract

*This article addresses the preparation of a concrete using recycled aggregates obtained from the rubble recovery of concrete and masonry works. The study shows some aspects such as: compressive strength at 3, 7, 14, 28, 56 and 91 days; porosity, ultrasonic pulse speed and carbonation; economic costs compared to a conventional concrete; and a review of the public policies on sustainable construction and the use of rubble, in the city of Medellín, Colombia. For some mixes, the compressive strength and the ultrasonic pulse speed measurements were approximately the 98% of that of the reference mix. Likewise, the mix prepared with 100% of recycled aggregates showed a difference in the carbonation deepness of only 0.7 mm compared with the mix of reference for a simulated age of 27 years. The results obtained with the replacement of natural coarse and fine aggregates in 25%, 50%, and 100%, and the advance in the political-administrative guidelines of the city in the last eleven years, allow deducing the possibility of preparing structural and non-structural concretes for massive use in the construction area.*

*Keywords: Sustainable construction, inverse mining, recycled concrete, urban ecosystem, integrated project management*

### Resumen

Este artículo aborda la confección de un concreto usando agregados reciclados obtenidos de la valorización de escombros de concreto y mampostería. Se muestran aspectos como resistencia al esfuerzo de la compresión a 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días; porosidad, velocidad de pulso ultrasónico y carbonatación; costo económico en comparación con un concreto convencional; y una reseña de las políticas públicas de Construcción Sostenible y aprovechamiento de escombros formuladas en Medellín, Colombia. La resistencia al esfuerzo de la compresión y las medidas de velocidad de pulso ultrasónico en algunas mezclas fueron del orden del 98 % de la mezcla de referencia; así mismo la mezcla confeccionada con 100 % de agregados reciclados, mostró una diferencia en cuanto a la profundidad de carbonatación de tan solo 0.7 mm con respecto a la mezcla de referencia para una edad simulada de 27 años. Los resultados obtenidos con sustituciones de agregados naturales por agregados reciclados gruesos y finos en porcentajes del 25 %, 50 % y 100 %, y el avance en los lineamientos político-administrativos de la municipalidad en los once años recientes, permiten deducir la posibilidad de confeccionar concretos estructurales y no estructurales para uso masivo en la construcción.

**Palabras Clave:** Construcción sostenible; minería a la inversa; concreto reciclado; ecosistema urbano; gestión integral de proyectos

## 1. Introducción

Para la elaboración de un material tan usado como el concreto se requieren materias primas no renovables, las cuales a su vez generan un impacto ambiental negativo al ser obtenidas principalmente mediante minería a cielo abierto. En tal sentido, la comunidad de la ciudad de Medellín se ve afectada por la explotación de canteras para la obtención de agregados, teniendo como consecuencia una degradación ambiental de la corteza terrestre urbana, material particulado en la atmósfera y, derivado de los procesos de demolición y edificación, disposición de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en lotes que pierden su potencial como paisaje o áreas urbanizables. Con una generación de este tipo de residuos de 8 000 t/día (AMVA; 2010), y una actividad extractiva que degrada el ecosistema urbano, esta colectividad que supera los 2.400.000 habitantes (DANE; 2015) experimenta un daño creciente de su ecosistema urbano, ya que para obtener una tonelada de agregados para concreto, es necesario remover varias toneladas de suelo superficial, anulando allí la actividad biótica. Por ello las exigencias que se reclaman desde la industria de la construcción en la actualidad, obligan el desarrollo de nuevas herramientas de

gestión (Gracia y Dzul, 2007; Dzul y Gracia, 2009) que permitan potenciar los recursos, principalmente en países en donde la inversión es limitada.

En Medellín se presentan dos aspectos que han dificultado la implementación de proyectos de construcción que empleen Concreto con Agregados Reciclados (CAR): el bajo costo de los agregados naturales para concreto como también de la disposición controlada de RCD. A estos dos aspectos citados se suma el desconocimiento de determinadas características que son atinentes al desempeño físico-mecánico del concreto, tales como su resistencia al esfuerzo de la compresión a edades mayores a 28 días y su durabilidad ante agentes atmosféricos del lugar. Este vacío científico se presenta como una dificultad en el momento de emprender proyectos de construcción con estructuras de concreto reciclado, ya que garantizar el comportamiento futuro de una edificación u obra civil hace parte de los compromisos contractuales del constructor. Determinar las resistencias al esfuerzo de la compresión a edades de 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días del CAR, así como su comportamiento ante agentes atmosféricos por medio de ensayos de porosidad, absorción y carbonatación, para predecir su durabilidad, se constituyen en un aporte a la comunidad científica colombiana –pues se contaría con el conocimiento necesario para introducir o no un nuevo material ecológico en la actividad constructora–, y en una de las bases para que por medio de los eco-materiales, se justifique la implementación de una política pública de construcción sostenible a escala urbana.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia:

Arquitecto Constructor, Magíster en Hábitat, Candidato a Doctor en Proyectos. Profesor Asociado adscrito a la Escuela de Construcción de la Facultad de Arquitectura. Coordinador de la línea de investigación en Construcción Sostenible.  
E-mail: [cmbedoya@unal.edu.co](mailto:cmbedoya@unal.edu.co)



## 2. Materiales y método

A continuación se describe el método empleado desde la caracterización de las materias primas, hasta los ensayos y discusión de los resultados obtenidos.

**2.1 Selección de materias primas:** para los agregados naturales se escogieron aquellos provenientes de cantera con trazabilidad de óptimo desempeño en mezclas de concreto. En los escombros seleccionados y triturados se mantuvo una proporción de 50 % de concreto demolido y 50 % de mampostería de ladrillo cerámico con mortero de pega, esto, para el caso del agregado fino reciclado. Para el caso del agregado grueso reciclado solo se trabajó con residuos de concreto. Estos agregados fueron caracterizados mediante técnicas físicas: módulo de finura, porcentaje de absorción y densidad aparente seca.

**2.2 Ensayos de resistencia y durabilidad:** se confeccionaron muestras cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, que luego fueron sumergidas en un tanque de curado con agua saturada de cal, a una temperatura de  $23 \pm 3$  °C. Las muestras se llevaron a la prensa hidráulica para determinar su resistencia al esfuerzo de la compresión a edades de 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días. También se analizaron muestras de concreto endurecido para determinar su comportamiento en cuanto a absorción, densidad Bulk, porosidad y carbonatación. Para estos análisis se emplearon hornos, equipo para velocidad de pulso ultrasónico y cámara saturada con CO<sub>2</sub> al 50 % y humedad relativa entre el 50 % y el 60 %, que es el rango más crítico para la carbonatación del concreto endurecido (Moreno E. et al., 2004).

**2.3 Normatividad y contexto político-administrativo:** para este punto se identificaron y analizaron los distintos

acuerdos y decretos, existentes y en curso, que en Medellín y en su área metropolitana abordan los asuntos de gestión y aprovechamiento de RCD y la implementación de la construcción sostenible desde la perspectiva de las políticas públicas.

## 3. Resultados

### 3.1 Obtención de los agregados

Se procedió a homologar los agregados reciclados, gruesos y finos, a la distribución arrojada por los agregados naturales de referencia. Una vez distribuidos los pesos por cada tamiz, se procedió a la selección de cantidades para obtener los distintos tipos de agregados para sustitución:

- a) Agregado grueso natural; b) Agregado fino natural;
- c) Agregado grueso 25-R; 75 % natural-25 % reciclado;
- d) Agregado fino 25-R; 75 % natural-25 % reciclado;
- e) Agregado grueso 50-R; 50 % natural-50 % reciclado;
- f) Agregado fino 50-R; 50 % natural-50 % reciclado;
- g) Agregado grueso 100-R; 100 % reciclado; h) Agregado fino 100-R; 100 % reciclado.

En cuanto a los módulos de finura se evidencia que los agregados gruesos y finos, tanto 100 % naturales (a y b) como 100 % reciclados (g y h), presentan igual valor, debido a que como se explicó anteriormente, se homologaron sus pesos por cada tamiz; sin embargo, en los agregados gruesos y finos 25-R (c y d) y 50-R (e y f) se presentó un cambio, debido a que una vez mezclados los agregados naturales y reciclados se procedió a realizar los ensayos granulométricos.

En la Tabla 2 se comparan estas características en cuanto a los agregados gruesos; en la Tabla 3 se comparan los agregados finos.

**Tabla 1.** Características de los seis tipos de agregados empleados en las mezclas

| Variable                                    | a     | b    | c     | d    | e     | f    | g     | h    |
|---|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Tamaño máximo (mm)                          | 19.05 | –    | 19.05 | –    | 19.05 | –    | 19.05 | –    |
| Densidad aparente seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.87  | 2.74 | 2.82  | 2.69 | 2.63  | 2.66 | 2.53  | 2.52 |
| Módulo de finura                            | 7.20  | 3.30 | 7.40  | 3.45 | 7.57  | 3.50 | 7.20  | 3.30 |
| Porcentaje de absorción (%)                 | 1.28  | 3.00 | 1.34  | 3.06 | 2.70  | 3.10 | 4.20  | 3.20 |

**Tabla 2.** Comparación entre agregados gruesos

| Variable                                    | a              | c                 | e                 | g                 |
|---|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Densidad aparente seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.87           | 2.82              | 2.63              | 2.53              |
|   | <b>(100 %)</b> | <b>(98.26 %)</b>  | <b>(91.64 %)</b>  | <b>(88.15 %)</b>  |
| Porcentaje de absorción (%)                 | 1.28           | 1.34              | 2.70              | 4.20              |
|   | <b>(100 %)</b> | <b>(104.69 %)</b> | <b>(210.94 %)</b> | <b>(328.13 %)</b> |

**Tabla 3.** Comparación entre agregados finos

| Variable                                    | b              | d                 | f                 | h                 |
|---|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Densidad aparente seca (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.74           | 2.69              | 2.66              | 2.52              |
|   | <b>(100 %)</b> | <b>(98.18 %)</b>  | <b>(96.03 %)</b>  | <b>(91.97 %)</b>  |
| Porcentaje de absorción (%)                 | 3.00           | 3.06              | 3.10              | 3.20              |
|   | <b>(100 %)</b> | <b>(102.00 %)</b> | <b>(103.33 %)</b> | <b>(106.67 %)</b> |



### 3.2 Confección de las mezclas; ensayos de resistencia al esfuerzo de la compresión; y ensayos de durabilidad

#### 3.2.1 Confección de las mezclas

Las mezclas fueron confeccionadas en el laboratorio de Construcción de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, empleando mezcladora mecánica. Se utilizó cemento gris Portland tipo I de fabricación nacional, con las siguientes especificaciones, tal como se muestra en la Tabla 4.

Se diseñaron cuatro mezclas de concreto: a) 0-R: 100 % de agregados naturales; b) 25-R: 75 % de agregado grueso natural y 25 % de agregado grueso reciclado, y, 75 % de agregado fino natural y 25 % de agregado fino reciclado; c) 50-R: 50 % de agregado grueso natural y 50 % de agregado grueso reciclado, y, 50 % de agregado fino natural y 50 % de agregado fino reciclado; d) 100-R:

100 % de agregados reciclados. Se buscó un asentamiento del orden de los 5 cm a los 7.5 cm, empleando una relación A/C de 0.50 en las tres mezclas.

En cuanto a la dosificación de las mezclas lo más relevante fue la diferencia presentada en el consumo de cemento y de agua, tomando la mezcla 0-R como referencia, tal como se muestra en la Tabla 6.

#### 3.2.2 Ensayos de resistencia al esfuerzo de la compresión

Se confeccionaron 30 muestras de concreto por cada una de las mezclas, para un total de 120, utilizando probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Se tomaron tres probetas por mezcla para cada edad de fallado (NTC 1377; ASTM C192M). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 4. Propiedades del cemento Portland tipo I utilizado en las mezclas

| Peso específico (g/cm <sup>3</sup> ) | Blaine (cm <sup>2</sup> /g) | Resistencia a la compresión 3 días (MPa) | Resistencia a la compresión 7 días (MPa) | Resistencia a la compresión 28 días (MPa) |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|--|---|
| 3.10                                 | 2 800                       | 9.00                                     | 16.00                                    | 26.00                                     |

Tabla 5. Asentamientos de las mezclas confeccionadas

| Tipo de mezcla | Asentamiento (cm) |
|----------------|-------------------|
| 0-R            | 6.84              |
| 25-R           | 6.50              |
| 50-R           | 6.35              |
| 100-R          | 6.05              |

Tabla 6. Asentamientos de las mezclas confeccionadas

| Tipo de mezcla | Consumo de cemento en kg/m <sup>3</sup> ; diferencia (%) | Consumo de agua en kg/m <sup>3</sup> ; diferencia (%) |
|----------------|--|---|
| 0-R            | 394.40; (0.00)   | 181.89; (0.00)  |
| 25-R           | 402.23; (2.10)   | 189.35; (4.10)  |
| 50-R           | 411.43; (4.32)   | 198.27; (9.01)  |
| 100-R          | 424.76; (7.71)   | 213.17; (17.29)                                       |

Tabla 7. Resistencia al esfuerzo de la compresión; promedio de tres probetas por edad de acuerdo con la NTC 1377 (ASTM C192M)

| Mezcla | Resistencia al esfuerzo de la compresión en MPa |        |         |         |         |         |
|--------|---|--------|---------|---------|---------|---------|
|        | 3 días  | 7 días | 14 días | 28 días | 56 días | 91 días |
| 0-R    | 11.35   | 15.60  | 19.26   | 23.51   | 26.84   | 27.39   |
| 25-R   | 11.15   | 15.33  | 18.90   | 22.91   | 26.35   | 26.83   |
| 50-R   | 10.82   | 14.93  | 18.55   | 22.28   | 25.71   | 25.93   |
| 100-R  | 10.10   | 13.89  | 17.33   | 20.33   | 21.92   | 23.02   |



Tomando como mezcla de referencia la 0-R (Figura 1), se puede hacer un comparativo en porcentaje en cuanto al comportamiento al esfuerzo de la compresión

(Tabla 8, Figura 2), partiendo entonces de que la mezcla 0-R es el 100 %.

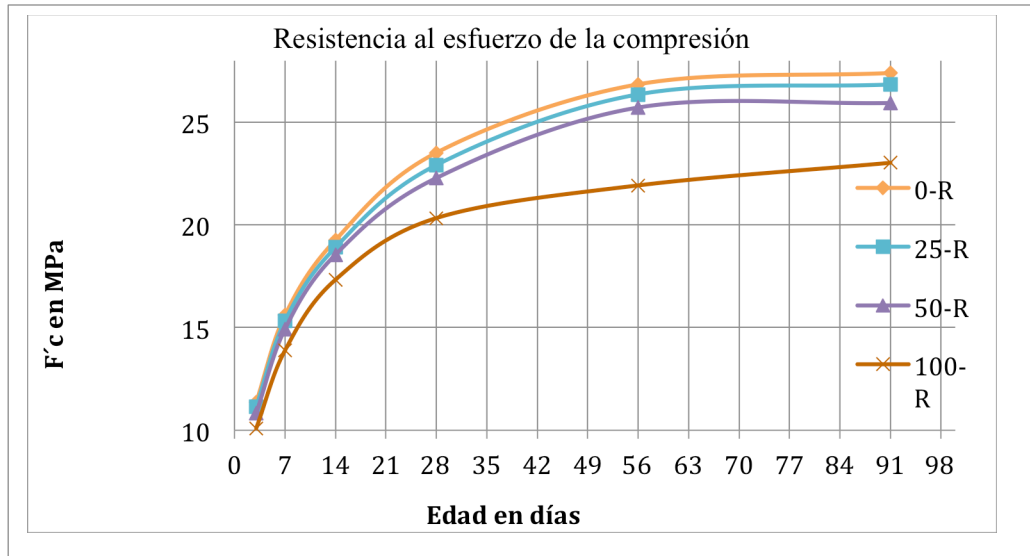


Figura 1. Curva de la resistencia al esfuerzo de la compresión; evolución a 91 días

Tabla 8. Comportamiento comparado de las mezclas al esfuerzo de la compresión

| Mezcla | Comportamiento comparado a la compresión en % |        |         |         |         |         |
|--------|---|--------|---------|---------|---------|---------|
|        | 3 días  | 7 días | 14 días | 28 días | 56 días | 91 días |
| 0-R    | 100.00  | 100.00 | 100.00  | 100.00  | 100.00  | 100.00  |
| 25-R   | 98.20   | 98.25  | 98.14   | 97.46   | 98.18   | 97.94   |
| 50-R   | 95.33   | 95.71  | 96.31   | 94.77   | 95.79   | 94.67   |
| 100-R  | 88.99   | 89.04  | 89.98   | 86.47   | 81.67   | 84.05   |

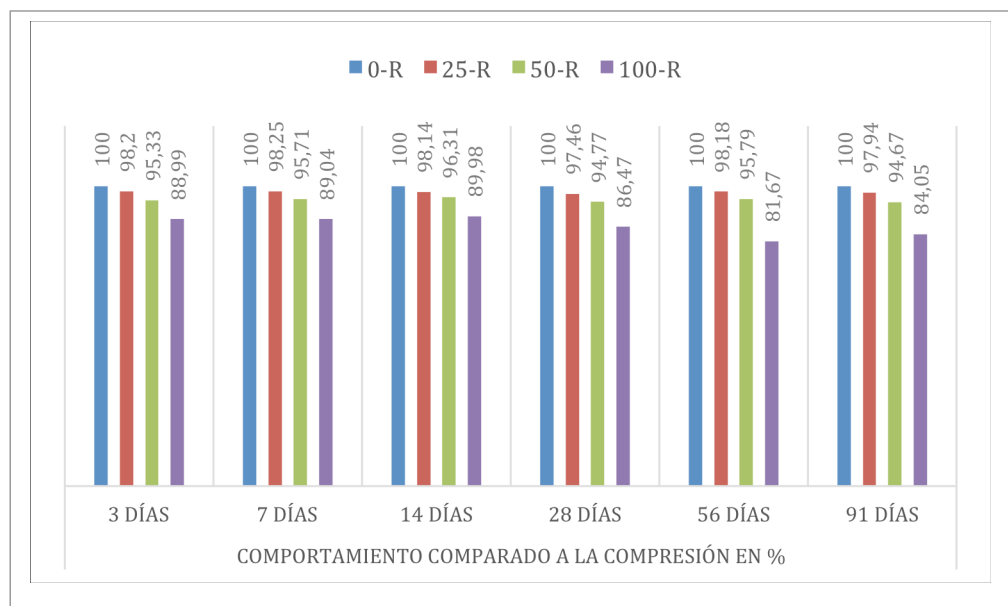


Figura 2. Diagrama de columnas; comparativo de las mezclas al esfuerzo de la compresión

El promedio de los seis resultados de la mezcla 25-R es del 98.03 % en comparación con la mezcla de referencia 0-R; el de la mezcla 50-R es del 95.43 %; y el de la mezcla 100-R es del 86.70 %. Cabe anotar que en las tres mezclas de concreto reciclado –25 %, 50 % y 100 % de sustitución– se reemplazó tanto el agregado grueso como el agregado fino. Mehta y Monteiro recomiendan reemplazar hasta el 20 % del agregado grueso, encontrando que cuando se sustituye más de este porcentaje, la resistencia al esfuerzo de la compresión disminuye hasta en un 20 %, aunque investigaciones posteriores han demostrado que el desempeño en cuanto al esfuerzo de la compresión está entre un 64 % y 100 % de una mezcla de control (Mehta y Monteiro, 2006).

El American Concrete Institute (ACI), que desde 1895 creó el comité 555 “Concrete with Recycled Materials”, ha publicado numerosas investigaciones sobre el comportamiento y factibilidad de los agregados reciclados en el concreto, con resultados que permiten inferir la posibilidad de sustituir agregados naturales por aquellos obtenidos del reciclaje de estructuras demolidas de concreto (ACI 555R-04, 2004). Se reportan resistencias al esfuerzo de la compresión de mezclas con sustituciones del 20 % de agregados finos del orden del 98 % de las mezclas confeccionadas con agregados naturales (Evangelista L. and de Brito J, 2007).

La Internacional Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM), es tal vez la entidad que, conjuntamente con el ACI, más ha trabajado por consolidar un acervo de artículos y ponencias encaminados a hacer de la producción y aplicación del concreto reciclado una práctica con cada vez menos incertidumbre y más factibilidad a escala industrial. Entre sus comités se halla el “RILEM Technical Committee 121-DRG, Specifications for concrete with

*recycled aggregates*”, dedicado exclusivamente al estudio y socialización de avances en este aspecto. Se destacan los informes que en distintas décadas esta entidad ha realizado (Hansen T. C., 2004), reportando el comportamiento de mezclas recicladas en cuanto a resistencia al esfuerzo de la compresión, durabilidad por medio de absorción, porosidad abierta, carbonatación y VPU.

Uno de los trabajos más recientes sobre concreto reciclado de uso estructural, publicado por el *ACI Journal Structural*, reporta un óptimo comportamiento de una estructura de seis pisos de altura en cuanto a sismos, encontrando que el desempeño ante derivas y la disipación de la energía del sismo fueron comparables con el de una estructura en concreto con agregados naturales. Incluso en el nivel máximo, categoría terremoto, la estructura reciclada no colapsó (Xiao T., Ding T. and Pham T., 2015). Así mismo en el *ACI Materials Journal* se reporta un trabajo en el cual se confeccionaron vigas para ser analizadas en cuanto a sus propiedades mecánicas y resistencia al corte, haciendo reemplazos de agregados naturales por agregados reciclados de concreto en porcentajes del 50 % y 100 %, aplicando a su vez los códigos estadounidenses e internacionales para el cizallamiento de vigas, encontrando que en el caso de los elementos con 100 % de reemplazo su desempeño disminuyó en un 11 %, pero las vigas con 50 % de agregados reciclados tuvieron un comportamiento similar a las muestras de control (Arezoumandi M., 2015).

### 3.2.3 Ensayos de durabilidad

Estos fueron: método de ensayo estándar para densidad, absorción y vacíos en el concreto según ASTM C642-06 (Tabla 9); carbonatación (Tabla 10); y velocidad de pulso ultrasónico (Tabla 11). Los resultados se muestran a continuación. Para los ensayos de carbonatación y velocidad de pulso ultrasónico no se analizó la mezcla 25-R.

## Porosidad

Tabla 9. Densidad, absorción y vacíos del concreto endurecido

| Mezcla                | Absorción después de la inmersión y de hervir (%) | Densidad Bulk seca (g/cm <sup>3</sup> ) | Volumen de poros permeables (Vacíos) (%) |
|-----------------------|---|---|--|
| 0-R (1)               | 7.8   | 2.24                                    | 17.4                                     |
| 0-R (2)               | 7.8   | 2.24                                    | 17.5                                     |
| <b>Promedio 0-R</b>   | <b>7.8</b>  | <b>2.24</b>                             | <b>17.5</b>                              |
| 25-R (1)              | 7.9   | 2.20                                    | 18.4                                     |
| 25-R (2)              | 8.0   | 2.19                                    | 18.6                                     |
| <b>Promedio 25-R</b>  | <b>8.0</b>  | <b>2.20</b>                             | <b>18.5</b>                              |
| 50-R (1)              | 9.2   | 2.15                                    | 19.8                                     |
| 50-R (2)              | 10.1  | 2.12                                    | 21.3                                     |
| <b>Promedio 50-R</b>  | <b>9.7</b>  | <b>2.14</b>                             | <b>20.6</b>                              |
| 100-R (1)             | 12.5  | 2.01                                    | 25.1                                     |
| 100-R (2)             | 12.7  | 2.00                                    | 25.3                                     |
| <b>Promedio 100-R</b> | <b>12.6</b>                                       | <b>2.01</b>                             | <b>25.2</b>                              |



Tal como se observa la mezcla 25-R mantiene un comportamiento casi igual a la mezcla de referencia. Las demás muestras recicladas también presentan un comportamiento muy positivo, como es el caso de la mezcla 50-R que, por ejemplo, en cuanto a la densidad Bulk seca fue del 95.54 %; la mezcla 100-R en este mismo aspecto llegó a un 89.73 %. En cuanto a los valores de absorción y porosidad del concreto endurecido, todas las mezclas presentaron un comportamiento que se inscribe en los parámetros establecidos por distintos investigadores, como D. K. Nekrasov, quien expone que los concretos u hormigones registran porosidades que oscilan entre el 20 % y 30 %, o Aportela, quien con agregados calizos y

una relación A/C de 0.50 obtuvo porosidades promedio de 23.3 %. En cuanto a la absorción los valores arrojados por las cuatro mezclas también se inscriben en el rango expuesto por D.K. Nekrasov, que está entre el 10 % y 20 % (Olivarez M., Laffarga J., Galán C. y Nadal P. 2003).

### Carbonatación

Se partieron las probetas cilíndricas en secciones de 5 cm de altura, y por cada sección se hicieron entre ocho y diez mediciones radiales del frente de carbonatación. Como indicador de pH se empleó una solución de fenolftaleína al 1 % en alcohol etílico.

**Tabla 10.** Carbonatación de las mezclas

| t1                       |      |       | t2   |       |       | t3    |       |       | t4    |       |       |
|--------------------------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0-R                      | 50-R | 100-R | 0-R  | 50-R  | 100-R | 0-R   | 50-R  | 100-R | 0-R   | 50-R  | 100-R |
| 3.45                     | 4.85 | 3.30  | 4.50 | 9.20  | 8.25  | 4.4   | 10.90 | 9.00  | 7.00  | 9.80  | 7.40  |
| 2.15                     | 1.60 | 1.60  | 3.30 | 9.00  | 11.65 | 2     | 14.10 | 9.10  | 10.10 | 9.60  | 4.60  |
| 0.00                     | 0.00 | 3.20  | 5.25 | 6.50  | 1.30  | 3.6   | 16.00 | 6.60  | 9.30  | 6.00  | 5.50  |
| 3.30                     | 0.00 | 0.00  | 8.85 | 12.00 | 6.75  | 2.8   | 8.60  | 5.60  | 5.20  | 14.70 | 9.10  |
| 0.00                     | 4.10 | 4.70  | 5.95 | 7.45  | 7.45  | 20.8  | 6.10  | 5.20  | 6.00  | 12.90 | 9.20  |
| 2.30                     | 1.75 | 2.70  | 4.20 | 9.35  | 4.90  | 1.50  | 10.00 | 14.00 | 14.40 | 15.40 | 9.10  |
| 3.20                     | 0.00 | 3.90  | 2.10 | 11.60 | 7.75  | 2.7   | 12.40 | 8.00  | 5.40  | 17.80 | 8.80  |
| 2.10                     | 1.45 | 1.90  | 5.35 | 9.80  | 5.70  | 10    | 8.90  | 12.80 | 6.40  | 14.80 | 11.10 |
| 1.50                     | 4.90 | 1.20  | -    | -     | -     | 0.4   | 11.60 | 9.00  | 5.30  | 15.10 | 8.30  |
| -                        | -    | -     | -    | -     | -     | -     | -     | -     | 14.80 | 7.80  | 17.50 |
| Promedio (mm)            |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2.00                     | 2.07 | 2.50  | 4.94 | 9.36  | 6.72  | 5.4   | 11.0  | 8.8   | 8.40  | 12.40 | 9.10  |
| Mínimo (mm)              |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 0.00                     | 0.00 | 0.00  | 2.10 | 6.50  | 1.30  | 0.4   | 6.1   | 5.2   | 5.20  | 6.00  | 4.60  |
| Máximo (mm)              |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 3.45                     | 4.90 | 4.70  | 8.85 | 12.00 | 11.65 | 20.8  | 16.0  | 14.0  | 14.80 | 17.80 | 17.50 |
| Tiempo de ensayo (días)  |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 14                       |      |       | 35   |       |       | 55    |       |       | 76    |       |       |
| Tiempo de ensayo (horas) |      |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 336                      |      |       | 840  |       |       | 1 320 |       |       | 1 824 |       |       |

**Tabla 10A.** Tiempo equivalente en años para carbonatación acelerada

| Tiempo de exposición en la prueba | t0 | t1   | t2    | t3    | t4    |
|-----------------------------------|----|------|-------|-------|-------|
| Horas                             | 0  | 336  | 840   | 1320  | 1 824 |
| Días                              | 0  | 14   | 35    | 55    | 76    |
| $\sqrt{t}$                        |    | 18.3 | 29.0  | 36.3  | 42.70 |
| Tiempo real (años)                |    | 5.00 | 12.60 | 19.80 | 27.40 |

**Tabla 10B.** Tabla resumen para carbonatación acelerada

| Tiempo de ensayo (días); años | Profundidad de carbonatación (mm) |      |       |
|-------------------------------|-----------------------------------|------|-------|
|                               | 0-R                               | 50-R | 100-R |
| (0); 0                        | 0.0                               | 0.0  | 0.0   |
| (14); 5.0                     | 2.0                               | 2.1  | 2.5   |
| (35); 12.6                    | 4.9                               | 9.4  | 6.7   |
| (55); 19.8                    | 5.4                               | 11.0 | 8.8   |
| (76); 27.4                    | 8.4                               | 12.4 | 9.1   |

Si bien las mezclas recicladas muestran una mayor profundidad de la carbonatación, éstas se mantienen en un rango óptimo de desempeño, pues en el caso de la mezcla 50-R que presenta el mayor valor (12.4 mm) a un periodo de exposición equivalente a 27.4 años, se debe tener en cuenta que, de hacer parte de una estructura ubicada en Colombia, la norma nacional de sismo resistencia NSR-10 exige un recubrimiento del acero de mínimo 50.0 mm. En el caso de las otras dos mezclas su desempeño es aún mejor, siendo la mezcla de referencia 0-R la del valor más bajo.

#### Velocidad de pulso ultrasónico (VPU)

Para este ensayo las probetas cilíndricas se curaron durante 28 días sumergidas en agua saturada con cal y, luego de este periodo de curado, se secaron durante siete días a temperatura ambiente. Se midió el porcentaje de humedad de las probetas secas al aire y se procedió a medir la VPU. A continuación se muestran los resultados de las mezclas 0-R, 50-R y 100-R.

Según Malhotra, un concreto que presenta una VPU que esté entre 3 660 m/s y 4 575 m/s se considera bueno; por debajo de este rango se considera regular y por encima de éste se considera excelente (Pardo F. y Pérez E., 2010). Para las mezclas de uso normal que están entre 21 MPa y 35 MPa, se considera como óptimo un desempeño que se ubique en el rango de 3 660 m/s y 4 575 m/s.

#### 3.3 Costos del concreto reciclado y del concreto natural o convencional

Se tuvo en cuenta una producción a escala industrial estandarizada de agregados reciclados hecha por una planta recicladora ubicada en la ciudad de Medellín, lo que permitió tener un elemento de comparación a la misma escala de la producción de los agregados naturales en la misma zona. Se costeo un metro cúbico para cada porcentaje de sustitución de agregados, teniendo en cuenta que el agregado reciclado presenta el 65 % del costo del agregado natural.

**Tabla 11.** Velocidad de pulso ultrasónico; \*valores promediados por probeta

| Muestra   | Humedad de la muestra (%) | Velocidad (m/s)* | Velocidad promedio (m/s) |
|-----------|---------------------------|------------------|--------------------------|
| 0-R (1)   | 21.56                     | 4 527.0          | 4 502.5                  |
| 0-R (2)   | 21.00                     | 4 478.0          |                          |
| 50-R (1)  | 23.30                     | 4 447.0          | 4 437.5                  |
| 50-R (2)  | 26.10                     | 4 428.0          |                          |
| 100-R (1) | 20.50                     | 4 242.0          | 4 134.5                  |
| 100-R (2) | 20.60                     | 4 027.0          |                          |

**Tabla 12.** Comparación de costos entre concreto convencional y concretos reciclados

| Ítem            | 0-R<br>USD/m <sup>3</sup> | 25-R<br>USD/m <sup>3</sup> | 50-R<br>USD/m <sup>3</sup> | 100-R<br>USD/m <sup>3</sup> |
|-----------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Agregado fino   | 9.53                      | 8.55                       | 7.89                       | 6.01                        |
| Agregado grueso | 9.01                      | 8.01                       | 7.04                       | 5.46                        |
| Cemento         | 77.33                     | 78.87                      | 80.66                      | 83.27                       |
| Agua            | 0.081                     | 0.087                      | 0.091                      | 0.098                       |
| Preparación     | 12.55                     | 12.55                      | 12.55                      | 12.55                       |
| <b>Total</b>    | <b>108.50</b>             | <b>108.08</b>              | <b>108.23</b>              | <b>107.39</b>               |



### 3.4 Normatividad y contexto político-administrativo en el período 2004-2015

A continuación se presenta una tabla donde se

describen los acuerdos y políticas públicas que en este periodo se han dado en la región objeto de estudio.

**Tabla 13.** Acuerdos y resoluciones municipales y metropolitanas sobre RCD y construcción sostenible

| Año  | Acuerdo/Convenio/Ley   | Descripción  | Aporte al estudio   |
|------|--|--|---|
| 2005 | Estudio para el diseño de valorización de residuos de escombros, mediante un sistema de gestión integral de los mismos para la Producción Más Limpia en la ciudad de Medellín.   | Tuvo como base investigaciones realizadas en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín sobre el reciclaje de escombros para la confección de concretos y su análisis desde el punto de vista de ciclo semi-cerrado de materiales.                  | Le mostró al municipio la potencialidad de abastecer sus propias demandas para obras públicas por medio de la valorización de escombros, proponiendo su uso como agregados para concretos no estructurales.   |
| 2006 | Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá. 2005-2020. Convenio número 325 de 2004.   | En este estudio se retoman y actualizan datos del PGIRS de Medellín, en contexto con los nueve municipios y una proyección al 2020 en cuanto a la generación de RCD.   | En cuanto a los RCD se identifican estrategias para una recolección del 100 % e investigación científica y tecnológica con el fin de superar el modelo de recoger-disponer para pasar a uno de recoger-valorizar.   |
| 2010 | Formulación e implementación de una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá. Convenio número 253 de 2009.  | Se establecen objetivos que implican eficiencia energética en edificios, consumo racional de agua, uso de ecomateriales mediante la valorización de RCD e incentivos tributarios para las empresas que construyan con estos parámetros.                    | Produjo el <i>Documento técnico de base para la elaboración de una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá</i> (AMVA; 2010). Expone objetivos y estrategias para declarar la construcción sostenible como hecho vinculante en proyectos del sector público y privado. |
| 2013 | Decreto 1609 de 2013; política pública para la gestión de escombros en la ciudad de Medellín.  | Reglamenta el Acuerdo Municipal 062 de 2009 que establece una Política Pública para la gestión de escombros en la ciudad de Medellín.  | Establece la obligación de aprovechar porcentajes de los RCD generados en las obras; este aprovechamiento será mínimo del 5 % del total de metros cuadrados del proyecto, que deberá crecer cada año en dos puntos hasta llegar a un 15 %.  |
| 2014 | Acuerdo Metropolitano N° 5 (Marzo 14 de 2014). Por medio del cual se declara como Hecho Metropolitano la Construcción Sostenible y se dictan lineamientos básicos para la implementación de una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá. | Da continuidad a los lineamientos establecidos en el Acuerdo número 253 de 2009; contempla como territorio de aplicación no solo a Medellín, sino también a los otros ocho municipios sobre los cuales tiene jurisdicción la entidad de control ambiental. | Incentiva la producción y el consumo de productos sostenibles, donde la confección del concreto reciclado es una estrategia muy importante, ya que la mayoría de obras emplean el concreto como material principal.   |





## 4. Conclusiones

En este trabajo se confirma que los agregados obtenidos del reciclaje de escombros, aunque presentan diferencias en algunas de sus características, pueden ser susceptibles de emplearse como materias primas en un nuevo material para la construcción como el concreto, pues no todas las mezclas se requieren para uso estructural. Sin embargo, es factible confeccionar concretos de uso estructural si se observa que la mezcla con sustituciones del 25 % se mantiene prácticamente igual en su desempeño –resistencia, porosidad y costos– con respecto a la mezcla de referencia, especialmente si se tiene en cuenta que en todas las mezclas recicladas se sustituyeron los agregados gruesos y finos. En otros países se han construido importantes estructuras sustituyendo el 20 % del agregado grueso por árido reciclado, como es el caso del puente sobre el río Turia, en Valencia, España (Alaejos P., Domingo A., 2005). También en Suiza, Andreas Leemann y Cathleen Hoffmann (2012) vienen trabajando desde 2010 en la investigación de concreto reciclado estructural con resultados alentadores.

En la mezcla 50-R se presentó un desempeño superior al 95 % en cuanto a la resistencia al esfuerzo de la compresión, comparada con la mezcla de referencia; la porosidad y la absorción de la mezcla 50-R también presentaron resultados positivos y, en cuanto a la profundidad de carbonatación y velocidad de pulso ultrasónico, su comportamiento se ubicó en los rangos óptimos de cara a la posibilidad de emplear este tipo de mezclas en estructuras convencionales cuyos concretos exijan resistencias al esfuerzo de la compresión de 21 MPa a 35 MPa.

A nivel internacional se identifican trabajos que sustituyen solo el agregado grueso o el fino natural por reciclados, como también otros que sustituyen ambos agregados, concluyendo en general que la densidad de éstos disminuye entre un 5 % y 10 % y que la absorción aumenta dramáticamente, siendo consecuentes estos resultados con los obtenidos en el presente trabajo y con los de otros autores en distintas regiones del mundo como Egipto (Wagih A., El-Karmoty H., Ebid M. y Okba S., 2013), España (Olivarez M., Laffarga J., Galán C. y Nadal P. 2003), entre otras. Así mismo las resistencias al esfuerzo de la compresión reportadas en este artículo son similares a

las de otros autores en otros contextos, permitiendo esto inferir que es posible implementar prácticas de confección y producción de concretos con agregados reciclados en el ámbito local y regional, escalables a nivel mundial, permitiendo con ello un flujo más reflexivo en cuanto a extracción de materias primas no renovables y generación de residuos, obviamente conservando el rigor en cuanto a los respectivos análisis de las características intrínsecas de los materiales en cada contexto.

Si se tiene en cuenta que uno de los factores más críticos a considerar para la durabilidad de las estructuras de concreto es la carbonatación, los resultados en general son muy buenos para todas las mezclas, tanto de referencia como recicladas; basta con observar que a una edad de 27 años y cuatro meses la máxima profundidad alcanzada en el frente de carbonatación fue de 12.4 mm para la mezcla 50-R y 9.1 mm para la 100-R, comparadas con 8.4 mm de la mezcla de referencia, y que la literatura técnica y científica establece que, para concretos estructurales normales, una profundidad estándar es del orden de 20 mm para una edad de 20 años. En este sentido las mezclas presentaron unas profundidades de carbonatación, a una edad de 19.8 años, de 9.97 mm en promedio, siendo 11.0 mm la más alta (50-R) y 5.4 mm la más baja (0-R), estando muy por debajo de la profundidad estándar y, considerando como ya se dijo, que la norma sismo-resistente de aplicación en Colombia exige un recubrimiento mínimo de 50 mm para el acero de refuerzo.

Las mezclas confeccionadas con agregados reciclados presentan un costo muy parecido a la mezcla de referencia, dado que si bien consumen más cemento, el costo del agregado reciclado es menor que el natural. En tal caso se recomienda por distintos investigadores y productores de concreto, invertir el ahorro generado por los agregados reciclados en un aumento de cemento en la mezcla, para incrementar la resistencia al esfuerzo de la compresión y la durabilidad.

Uno de los aportes de esta investigación es la correlación que se hace entre el análisis del desempeño de un material reciclado, su factibilidad económica y las posibilidades de ser producido a escala urbana con el aval de la legislación, de manera que se incentiven la producción y el consumo de un concreto ecológico por medio de acciones vinculantes tales como decretos y políticas públicas.

## 5. Referencias

- Alaejos P., Domingo A. y Monleón S. (2005)**, Puente reciclado sobre el río Turia en Manises (Valencia). En III Congreso de ACHE de puentes y estructuras. Zaragoza, España.
- American Concrete Institute (2004)**, ACI 555R-04 Report, Removal and Reuse of Hardened Concrete, ACI, Michigan, USA, 2004.
- American Society for Testing Materials (2006)**, ASTM C642-06, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
- American Society for Testing Materials (2007)**, ASTM C192 / C192M-07, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007.
- Área Metropolitana de Valle de Aburrá (2010)**, Documento técnico de base para la elaboración de una Política Pública de Construcción Sostenible para el Valle de Aburrá. Medellín, Colombia, p 53-55.
- Arezoumandi M., Drury J., Volz J. and Khayat K. (2015)**, Effect of Recycled Concrete Aggregate Replacement Level on the Shear Strength of Reinforced. ACI Materials Journal, Vol. 112, N°. 4, p 559-568.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2015)**, Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020. Bogotá: DANE. Recuperado de <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/proyecciones-de-poblacion>
- Dzul L. y Gracia S. (2009)**, Contexto actual de los sistemas de costes de la calidad desarrollados y aplicados a proyectos de construcción: la necesidad de la medición de la calidad en el diseño. Revista Informes de la Construcción, Vol. 61, N° 514, Madrid, España, p 41-50.



- Evangelista L. and de Brito J. (2007)**, Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete composites*, V.29 (5), pp. 397-401.
- Gracia S. y Dzul I. (2007)**, Modelo PEF de costes de la calidad como herramienta de gestión en empresas constructoras: una visión actual. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 22, N° 1, Santiago, Chile, p 43-56.
- Hansen T. C. (2004)**, RILEM: Recycling of demolished concrete and masonry (Vol. 6). Ed. CRC Press.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2011)**, NTC 1377, Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio, ICONTEC, Bogotá D.C., 2011.
- Leemann A. y Hoffmann C. (2012)**, Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. *Journal Construction and building materials*, Vol. 35, p 701-709.
- Mehta P. K. and Monteiro P. J. (2006)**, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. Third Ed. McGraw-Hill, New York.
- Moreno E., Domínguez G., Cob J., Duarte F. (2004)**, "Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración". *Ingeniería*, núm. mayo-agosto, p 117-130.
- Nekrasov K. D.: (Citado en Olivarez M., Laffarga J., Galán C. y Nadal P. 2003)**, Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad. *Revista Materiales de Construcción*, Vol. 54, N° 273, Madrid, España, p 21-33.
- Pardo F. y Pérez E. (2010)**, Evaluación del efecto de las barras de refuerzo del concreto sobre las medidas de velocidad de pulso ultrasónico. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- RILEM (2013)**, *Progress of Recycling in the Built Environment*. Final report of the RILEM Technical Committee 217-PRE. Edited by Enric Vázquez. Springer, New York.
- Wagih A., El-Karmoty H., Ebid M. and Okba S. (2013)**, Recycled construction and demolition concrete waste as aggregate for structural concrete. *HBRC Journal*, Vol. 9, N° 3, p 193-200.
- Xiao, J.**, Seismic Performance of a Precast Recycled Concrete Frames Structure. *ACI Structural Journal*, Vol. 112, N° 4, p 515-524.

