

Estudio de factibilidad y caracterización de áridos para hormigón estructural

Feasibility study and characterization of aggregates for structural concrete

Diana Carolina Gámez-García*

Héctor Saldaña-Márquez**

José Manuel Gómez-Soberón***

Universidad Politécnica de Cataluña, España

Ramón Corral-Higuera****

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

* Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, España. Auxiliar de investigación y aspirante a Doctora. Maestra en Ciencias de la Ingeniería. *diana.carolina.gomez@estudiant.upc.edu*

** Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona, España. Auxiliar de investigación y aspirante a Doctor. Maestro en Arquitectura y Nuevo Urbanismo. *hector.saldana@estudiant.upc.edu*

*** Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona, España. Profesor e investigador. Doctor en Construcción por la UPC. *josemanuel.gomez@upc.edu*

**** Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Ingeniería Mochis, México. Profesor e investigador. Doctor en Ciencias de los Materiales. *ramon.corral@uas.edu.mx*

Resumen

El hormigón es un material fundamental en la construcción civil, arquitectónica y de edificios; sin embargo, su producción convencional no corresponde a un desarrollo sostenible. En la actualidad, el prescindir de su uso es complejo por los requerimientos de las normativas, los códigos y las técnicas constructivas, que se basan en su utilización casi exclusiva así como en su exitosa aplicación. Por tanto, es necesario el estudio de hormigones alternativos que sean más amigables con el medio ambiente a partir de propuestas que permitan su aplicación. Los objetivos de esta investigación son: caracterizar las propiedades de los áridos reciclados de desechos de demolición (pavimentos), analizar su factibilidad técnica y económica actual y verificar el comportamiento mecánico básico de un hormigón estructural reciclado (HER) contenedor de los mismos. Los resultados indican que los áridos reciclados que provienen de pavimentos son más ligeros, porosos y absorbentes que los áridos naturales (más acusante en los áridos finos). A pesar de este decremento en la calidad de sus propiedades, estos pueden ser considerados como una opción aceptable en su uso como árido para hormigón estructural (pérdidas poco significativas de resistencia con contenidos de hasta 60%).

Palabras clave: árido reciclado, hormigón de origen, hormigón estructural reciclado, matriz cementante, porosidad.

Abstract

Concrete is an essential material in the civil, architectural and buildings construction; however, its conventional production does not correspond to sustainable development. Today, dispense with its use is complex due to the current requirements of regulations, codes and construction techniques, which are based on its use almost exclusively, as well as by its successful implementation. Therefore, the study of alternative concretes that are more environmentally friendly with proposals to allow its application, is necessary. The aims of this research are the characterization of basic properties of aggregates originating from recycled demolition waste concrete pavements and analyze its feasibility in the use of recycled structural concrete (RSC). The results indicate that the recycled aggregate from pavements are lighter, porous and absorbent than natural aggregates (more accentuated in fine aggregates); despite this decrease in the quality of its properties, these can be regarded as an acceptable option in its use as aggregate for structural concrete (small loss of strength with contents less than 60%).

Keywords: cementitious matrix, original concrete, porosity, recycled aggregate, structural recycling concrete.

Fecha de recepción: 2 de marzo de 2016
Fecha de aceptación: 6 de marzo de 2017

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el hormigón es el material más utilizado en la construcción civil, arquitectónica y de edificios. Algunas condiciones y cualidades tales como su coste, la disponibilidad de su materia prima, sus características físicas y mecánicas, su trabajabilidad y durabilidad, entre otros, son motivos para que la mayoría de los códigos de diseño estén basados en su utilización [1]. Sin embargo, se ha demostrado que usarlo con métodos convencionales es insostenible, ya que para su fabricación se requiere de una gran cantidad de materia prima y energía. Por otra parte, es causante de la generación de grandes volúmenes de residuos y de emisiones contaminantes que resultan de su producción y de su utilización [2]-[6]. Por lo anterior, se están implementando estrategias que mitiguen estas afecciones y permitan garantizar su empleo sin comprometer al medio ambiente [2], [7].

El hormigón reciclado (HR) es un ejemplo de estas acciones, para lo cual (a pesar de su aceptación) sigue siendo necesaria la investigación en lo referente a sus componentes individuales y a él en su conjunto. En este contexto, diversas investigaciones han informado que el tipo de árido reciclado procedente de hormigón (AHR) que se incorpora al HR tiene importante influencia en sus características [8]-[13].

De igual forma, algunos estudios concluyen que es relevante conocer la procedencia del hormigón original (HO) (tipo de hormigón que da origen al AHR) [13], ya que algunas propiedades básicas de este, tales como su resistencia a la compresión y su módulo de elasticidad, están vinculadas a las propiedades de los AHR (en particular del árido grueso) [9]; por lo tanto, mejores características del HO permitirán prever mejores propiedades del HR [8]. Un ejemplo de lo anterior se evidencia en los HR elaborados con desechos procedentes de plantas de elementos prefabricados, los cuales cuentan con una excelente calidad para ser usados en HER, incluso con contenidos de remplazo de hasta 100% [13], siendo por tanto previsible que el uso de AHR procedentes de hormigones de altas resistencias también lo puedan ser.

Por otra parte, caracterizar AHR permite conocer sus propiedades y las diferencias que presentan con respecto a los áridos naturales, para poder asignarles una posible aplicación con base a sus propias capacidades, en usos tales como: relleno de sub-base, hormigón simple o estructural, entre

otros. La obtención de las propiedades básicas del HO y de los AHR, como su porosidad, su absorción, su densidad, su dureza, su granulometría y su consistencia, entre otros, son de utilidad en la fase de diseño de las mezclas del HR, además de ayudar a comprender las propiedades de este en su estado fresco y endurecido.

Analizando esta línea de investigación, en algunos estudios se ha encontrado que, los AHR tienen menor peso específico, mayor absorción y mayor porosidad que los áridos naturales (AN), siendo este comportamiento más destacado en los áridos finos (AF) [11], [14]-[18]. También se ha descrito la pérdida de consistencia del HR, provocada por la capacidad de absorción de los AHR [19]. Por lo tanto, evaluar y conocer dichas propiedades permitiría efectuar mezclas de HR sin comprometer su relación agua/cemento (a/c). Por último, el uso de AHR en hormigón estructural deberá considerar la creación de nuevas zonas de transición interfacial (ZTI) dentro de la matriz del hormigón, las cuales son una consecuencia de las zonas preexistentes en el AHR y las nuevas zonas del HR.

Dada la importancia que significa conocer las propiedades de los áridos reciclados, el objetivo de esta investigación es evaluar dichas propiedades físicas (en su fracción gruesa y fina), estudiándose de ellas, la absorción, la densidad, la porosidad y la dureza, con la perspectiva de utilizar un residuo procedente de hormigón de pavimentación como HO, el cual, según lo establecido en el código de diseño con el que se proyectó, se le considera un hormigón de resistencias relativas altas [20]. Al mismo tiempo, se pretende evaluar la resistencia a la compresión y la densidad del hormigón al que se adicionen dichos áridos. Se espera que las propiedades encontradas sean favorables para que el árido en estudio pueda ser utilizado con altos porcentajes de sustitución en hormigón estructural, y a su vez no se dañen las propiedades básicas de este.

A. Factibilidad económica del uso de árido reciclado en hormigón

Más de 26,8 billones de toneladas de hormigón convencional son usadas globalmente cada año, que con el paso del tiempo pasan a convertirse en una abrumadora cantidad de residuos de construcción y demolición (RCD) [21], que para Europa, EUA y Japón representan 912 millones de toneladas (510, 325 y 77 millones respectivamente). Además, si se considera que

India y China están consumiendo aproximadamente el 50% del hormigón del mundo, su generación de desechos será significativa a medida que su desarrollo continúe [22]; para el caso de China, los RCD alcanzan ya un 30-40% de la generación total de los residuos urbanos, acaecidos por las actividades de urbanización acelerada [23].

A pesar de que las cantidades de los RCD son elevadas, estos se han logrado gestionar con un proceder eficiente en diversas partes del mundo de forma reglada y con éxito. Suiza y Holanda son ejemplos de su recuperación (100% y 95% respectivamente); otros países con altas tasas de recuperación (más del 80%) son: Taiwan (92%), Alemania (89%), Bélgica (86%), Estados Unidos (82%, [40% es exclusivo de HR]), Irlanda (80%) y Japón (80%); y por último, Francia y Noruega llegando a porcentajes de 60%. En el caso de España, la recuperación de estos se da de forma menos exitosa (10%) [22], a causa de la limitación de factibilidad de su uso por la normativa vigente (contenido máximo de 20% de AR en hormigones [24]), que aunado al trabajo intrínseco que conlleva su obtención y a la existencia abundante de canteras vírgenes, hacen que gran parte de los RCD generados no sean necesarios para producir AR [23] (situación similar para países con recursos naturales abundantes o sin necesidad de otras opciones para la obtención de materia).

Por otra parte, a pesar de que el tema de los AR es una línea de investigación explorada, aún se sigue debatiendo su factibilidad económica industrial, pues existe vinculación de esta con la variación en la disponibilidad de materiales naturales de cada país, impidiendo así obtener conclusiones globales (es dependiente de cada región). Por este motivo y por la incertidumbre con respecto al rendimiento del material, la industria del hormigón ha sido renuente a llevar la producción del AR a su máximo potencial [25] cuando su uso no es obligado por legislación. Por citar algunos casos, en reportes previos se ha evidenciado que es más económico producir AN que AR: en España se requeriría aumentar el coste del AN en un 9% para que el del AR fuera inferior a este [26], en Australia la producción de AR para hormigón estructural es un 12% más caro que la producción de AN (64% de ese precio es imputado a tratamientos necesarios para no demeritar su calidad [25]). En cualquier caso, la demanda de un AR se establece por la relación entre su calidad y su precio [23], y alcanzan precios mayores aquellos que obtienen un nivel de refinamiento mayor (menor contenido de mortero residual) [25]. Esta razón hace necesario considerar la procedencia de los AR, ya que

representa una parte importante en la prevención de su sobrecoste, que puede ser menor si su origen proviene de hormigones estructurales o de pavimentación, de plantas premezcladoras o de hormigones en buen estado.

En contraparte, investigadores han encontrado beneficios evidentes en el reciclaje de los AR [21]-[23], [27]-[29] y recomiendan a los constructores, diseñadores, ingenieros e investigadores que colaboren para promover el HR como un material estructural hasta un nivel político para obligar el uso del mismo [21]. La falta de conciencia ambiental, de tecnologías de reciclado y la garantía de que los materiales reciclados sean de calidad, hacen que exista una brecha importante entre la demanda actual con respecto a la demanda potencial que podrían tener los AR [23]. En este contexto, estudios han reportado que los AR son más económicos que los AN de forma notable [27]; en Estados Unidos, por ejemplo, se han determinado ahorros de hasta un 50-60% por su uso [22]; en Brasil se estimó que las actividades finales (selección y trituración) de reciclaje de escombros pueden llegar a ser menores de un 65% al coste de la extracción de la materia prima [29]. De igual forma, se ha encontrado que el coste de envío de material a vertederos muchas veces puede ser superior al coste de separar y vender los desechos del hormigón. Reciclar, por ejemplo, es menos costoso que desechar en Alemania, Holanda y Dinamarca; sin embargo, en países que carecen de infraestructura para el reciclaje y que disponen de abundantes recursos naturales, el coste de reciclar es más alto [22]. La diferencia entre los precios de los áridos naturales y los áridos reciclados está fijada por la oferta y la demanda; en países donde hay una escasez de productos naturales, el reciclaje es el medio para la obtención de recursos, por lo cual el precio tiende a encarecerse. Por otra parte, en los países donde la oferta es muy amplia, el reciclaje se debe impulsar por medio de una normativa para que este funcione. En Europa los AHR se venden entre los 3 y 12 €/t, con un coste de producción de entre 2,5 y 10 €/t [22].

El método más común de reciclaje del hormigón endurecido es por medio de su trituración, que en algunos equipos incorporan también: cuchillas de aire que remueven los materiales ligeros como la madera, precintos y plásticos; imanes, para extraer el acero (que también se recicla); y circuitos cerrados de lavado en húmedo, para recuperar productos más puros y/o para permitir la reutilización de finos [22]. Un esquema simple de elementos de estos sistemas se ilustra en la Fig. 1:

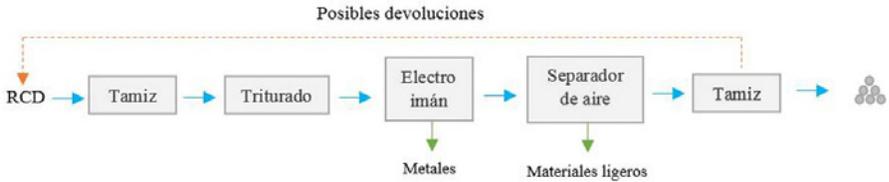


Figura 1. Proceso de reciclaje de los áridos reciclados.

II. METODOLOGÍA

Para efectuar la investigación se obtuvieron los residuos de la demolición de un hormigón proveniente del pavimento de una avenida de la Ciudad de Los Mochis (Sinaloa, México), el cual tenía una antigüedad de 15 años desde su fabricación y fue retirado para poder realizar trabajos de reparación del sistema de alcantarillado de la ciudad; de estos desechos, se obtuvieron los AHR en ambas fracciones (gruesa y fina). Como AN se seleccionó un árido grueso de canto rodado proveniente del Río Fuerte de la Comunidad de Charay (Sinaloa, México) (con un tamaño máximo de partícula de 25,4 mm) y como árido fino, se utilizó arena sílicea del mismo río.

A. Caracterización del hormigón de origen (HO)

Seleccionado el HO, se realizó una revisión superficial para identificar la presencia de posibles problemas de durabilidad (degradación excesiva, expansión causada por carbonatación o invasión de sulfatos provenientes del subsuelo) que pudieran derivar de la función que desempeñó en su vida útil. Los fragmentos evaluados tuvieron una dimensión promedio de 30 cm, eran amorfos con vértices angulosos provocados por el proceso propio de ruptura en la demolición (uso de martillo hidráulico). Del examen ocular se dictaminó al HO como un hormigón en estado adecuado, apto para continuar con los estudios físicos y mecánicos.

Las propiedades seleccionadas para caracterizar al HO fueron: el índice de rebote (IR), la porosidad, la absorción y la densidad por ser estas propiedades elementales en el análisis de hormigones. La obtención del IR se basó en los requerimientos establecidos en la ASTM C805 [30]. La porosidad, la absorción y la densidad del HO se evaluaron de acuerdo con lo establecido en la ASTM C642 [31]. El procedimiento inició con la selección de cinco piezas

de HO con un volumen mayor a 350 cm^3 cada una. Su volumen se obtuvo midiendo el agua desalojada por cada fragmento de hormigón (Principio de Arquímedes) [32], y se continuó con el proceso tal como se indica en el estándar mencionado [31].

Las piezas seleccionadas se muestran en la Fig. 2. Es posible apreciar su forma irregular, sus texturas rugosas y la heterogeneidad de su matriz. Por otra parte, los AN han quedado expuestos después del proceso de demolición (ver marcas rojas en la figura), lo cual puede ser un buen indicador de la calidad de la pasta del HO (ya sea por su baja a/c o por su alta resistencia); ya que la falla que se produce, transcurre seccionando a los áridos y no en el contorno de los mismos (es sabido que en los hormigones de alta resistencia las fallas que se presentan seccionan tanto al árido como a la pasta de cemento; mientras que en los hormigones de baja a media resistencia, los planos preferentes de falla se generan en la pasta, rodeando al árido). Dicho análisis permite prever una "calidad" del AHR mejorada, si el HO proviene de hormigones más resistentes.



Figura 2. Piezas de HO ensayadas con la ASTM C642.

B. Fabricación de los áridos reciclados

Después de la caracterización del HO, se fabricaron los AHR, como se muestra en la Fig. 3. El proceso consistió en una trituration mecánica efectuada con una retroexcavadora con martillo hidráulico (Fig. 3a), a continuación se

crearon piezas de tamaño máximo de 7,62 cm, con la ayuda de un mazo con cabeza de acero (Fig. 3b); por último, se efectuó otra reducción de tamaño mediante una trituradora de mandíbulas de laboratorio (marca Manek, modelo JS-0804, Fig. 3c), que produce partículas de tamaño máximo de 2,54 cm. El equipo utilizado cuenta con un motor de 5 HP y una abertura de mandíbula de 20,32 x 10,16 cm, con capacidad de tamaño máximo de alimentación de 7,62 cm y salida de 2,54 a 0,635 cm. La capacidad de producción de la trituradora va desde las 0,5 a las 1,25 toneladas/hora [33].



Figura 3. Proceso de trituración del hormigón de pavimento.

3a) triturado martillo hidráulico, 3b) reducción manual y 3c) triturado con mandíbula.

Después de fabricar los AHR con una distribución de tamaños combinados, se separaron en dos fracciones: áridos gruesos reciclados (AGR) y áridos finos reciclados (AFR) por medio de un tamizado manual. El límite superior de tamaño de partícula considerado fue de 2,54 cm; el límite de transición entre AGR y AFR fue la malla No. 4 de la ASTM (0,476 cm); y el límite inferior la malla No. 100 de la ASTM (0,015 cm) [34]. En la Fig. 4a) se presenta el AHR. Es notorio el elevado ángulo de su talud natural en el acopio del material, el cual es característico de un árido con perfiles angulosos y con distribución de tamaños reducidos (efecto habitual generado por trituradoras de mandíbula); en la Fig. 4b), se aprecia la separación del AGR y del AFR mediante tamizado, se evidencia la poca generación de fracciones finas obtenidas en el proceso.



Figura 4. Áridos reciclados.
4a) AHR y 4b) separación en AGR y AFR.

C. Caracterización de los áridos naturales y reciclados

Los áridos se caracterizaron mediante los procedimientos que establece la ASTM para áridos gruesos y finos: granulometría con la ASTM C 33; densidad y absorción en gravas utilizando la ASTM C 127; densidad y absorción en arenas con la ASTM C 128; y módulo de finura mediante la ASTM C 136 [34]-[37].

Para obtener las curvas granulométricas de los AGR se consideraron los porcentajes retenidos por las mallas con aperturas de 2,54, 1,905, 1,27, 0,9525 y 0,476 cm. Para los AFR, el material que pasó por la malla de apertura de 0,476 cm se consideró como arena, y se tamizó por las mallas de 0,476, 0,03, 0,01, 0,063, 0,050 y 0,015 cm [34]. Por último, se desechó el contenido de partículas finas que pasaron por la última de las mallas, por ser estas consideradas no aptas para su uso en hormigones estructurales.

D. Caracterización del hormigón estructural reciclado

Se fabricaron seis tipos de mezclas, dos de ellas de referencia, una con áridos 100% convencionales (naturales) y la otra con áridos 100% reciclados, y cuatro mezclas con sustituciones de 20, 30, 60 y 100% AGR. Para todas se utilizó una relación a/c de 0,5 y como aglutinante Cemento Portland Compuesto de resistencia 30 (CPC 30R), los requerimientos físico-químicos se estipulan en la norma NMX-C-414 [38] y equivale al cemento Portland Ordinario Tipo I que establece ASTM C150 [39]. La dosificación necesaria para producir 1 m³ de cada una de las mezclas se puede ver en la tabla I.

Tabla 1. Dosificación de las mezclas

Material (kg)	Mezclas					
	CONV	GR-20	GR-30	GR-60	GR-100	R-100
Agua	175	175	175	175	175	175
AGN	1050	840	735	420	0	0
AGR	0	210	315	630	1050	1050
AFN	700	700	700	700	700	0
AFR	0	0	0	0	0	700
CPC	350	350	350	350	350	350

Fueron utilizadas probetas prismáticas rectangulares de 50 x 15 x 15 cm para medir el índice de rebote y cilindros de $\varnothing 10 \times 20$ cm para la resistencia a compresión simple de acuerdo a la ASTM C192 [40]. Transcurridas 24 horas desde su fabricación, las probetas fueron desmoldadas para después ser sometidas a un curado a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ y humedad relativa del $98 \pm 2\%$ hasta la edad de 28 días, después de la cual se ensayaron siguiendo los procedimientos ASTM C39 [41] (resistencia a la compresión) y ASTM C805 (índice de rebote) [30].

III. RESULTADOS

A. Áridos naturales y áridos reciclados

Los resultados de la caracterización de los AHR ponen en evidencia y facilitan la comprensión de las propiedades físicas, elásticas, mecánicas e incluso de durabilidad del HR, en el cual estén incorporados dichos áridos, además de ser relevantes en el diseño de las mezclas de estos.

En la Fig. 5, se presentan las gráficas con los perfiles granulométricos de los áridos utilizados, y los perfiles de los límites recomendados por la ASTM. Por lo que respecta a la fracción gruesa, para ambos áridos utilizados (AGR y AGN), las gráficas son relativamente semejantes, lo cual puede indicar que los áridos son equiparables en lo referente a la uniformidad prevista de sus mezclas de tamaños y en la reducción de la propia porosidad intrínseca de los AHR. También se puede observar, que ambas gráficas tienen un perfil granulométrico con mayor contenido de gruesos, comparadas con los

l3mites estipulados por la ASTM, lo cual puede suponer un beneficio en el aumento de la resistencia del hormig3n donde se incorporen, puesto que el 3rido grueso tiene un papel determinante en la resistencia mec3nica de los hormigones.

Por otra parte, al evaluar los perfiles granulom3tricos de los 3ridos finos, se puede observar que a pesar de que estos siguen la misma tendencia, los AFR son m3s gruesos en relaci3n a los AFN, lo cual puede repercutir en el dise1o y elaboraci3n de las mezclas, e incrementar de forma considerable la porosidad de los HR.

El m3dulo de finura para los AFR es de 3,38, mientras que para los AFN es de 2,53, lo cual indica un mayor contenido de part3culas gruesas en el 3rido reciclado, derivadas del tipo de triturado que se utiliz3 para su obtenci3n (mec3nico y con trituradora de mand3bulas). Puede ser conveniente para la elaboraci3n de los AFR, utilizar otra alternativa de triturado que permita producir arenas m3s finas, de tal forma que el contenido de poros existente en el mortero adherido a los 3ridos, pueda ser eliminado con el fin de obtener arenas menos porosas y aptas para incluir en el HER (se deber3an validar alternativas de triturado como el uso de molino de conos).

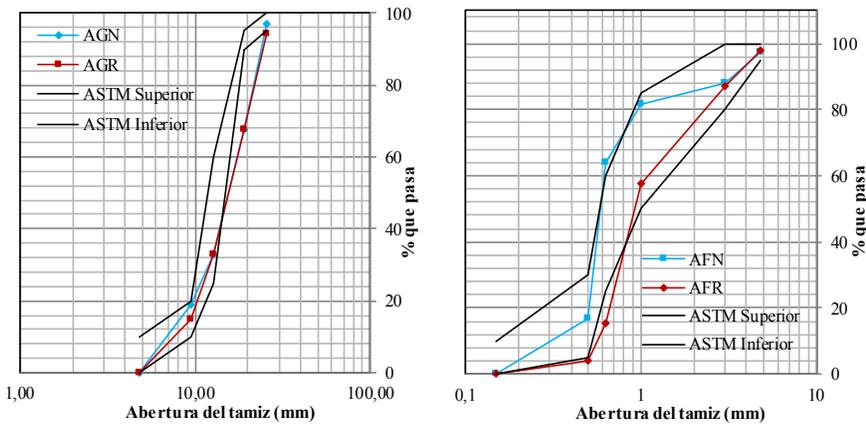


Figura 5. Granulometr3a de los 3ridos utilizados en la investigaci3n.
5a) 3ridos gruesos y 5b) 3ridos finos.

El promedio del IR que se obtuvo para el HO es de 28,15. El IR puede ser comparable con la dureza del HR endurecido, y además, puede servir como valor correlativo de la resistencia a la compresión (como estimación de la resistencia esperada que tienen los hormigones con procedencia de pavimentos). En esta investigación, se determinó que la porosidad de las muestras del HO es del 17,87%, la absorción es del 6,91% y la densidad de 2.360 kg/m³. Estas propiedades difieren de los AN y han influido en las propiedades físicas de los áridos reciclados.

En la Fig. 6, se presentan los resultados de los ensayos físicos efectuados a los AGR y a los AFR. En general, se observa una evidente influencia del HO sobre los AHR. Por ejemplo, su alta absorción (6,91%) y su porosidad (17,87%) provocan que los AHR (tanto finos como gruesos) presenten una absorción aproximada, seis veces mayor que los áridos naturales. El aumento en estos valores, no descarta a los AHR como posibles sustitutos de AN en un HER, ya que, además del proceso indicado para la obtención de los AHR en esta investigación, existen técnicas alternativas (tales como el vibrado) que pueden ayudar a eliminar una mayor cantidad de mortero adherido (para disminuir la porosidad y la absorción de los AHR).

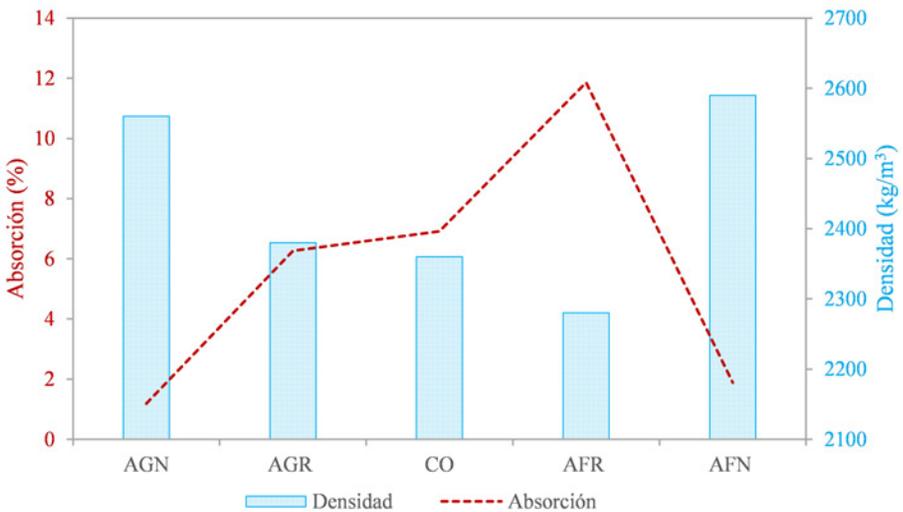


Figura 6. Comparación de las propiedades entre el HO y, los AGR y AFR.

Por otra parte, los AHR son más ligeros que los AN por el alto contenido de porosidad propiciado por el HO, y debido a la naturaleza porosa propia del antiguo mortero adherido a estos [16], [17], [19]. Lo anterior es evidente en especial para el AFR, el cual está constituido en su mayoría de mortero triturado del HO.

Aún con valores mayores en comparación a los AN, los AHR se encuentran por debajo del límite de absorción recomendado (7% para AGR y 13% para AFR). Algunos autores sugieren que no se utilicen los AHR, cuando la absorción del agua supere los límites mencionados [17], ya que se puede poner en riesgo la calidad de la mezcla de HR (por falta de control práctico en el agua utilizada para la pre-saturación de los AHR y el agua utilizada para la propia relación a/c de la mezcla).

Descartando la intención de esta investigación sobre la factibilidad técnica del uso de los AHR para aplicar en HER, estos áridos pueden incorporarse a hormigones ligeros (por ser más livianos y porosos), lo cual deberá ser analizado en futuras investigaciones.

B. Hormigón estructural reciclado

Los resultados de los AR han influido de forma notoria las propiedades del HR analizadas. En la Fig. 7, se observa que al aumento del porcentaje de sustitución del AGR, la resistencia a la compresión disminuye, lo cual concuerda con lo encontrado en investigaciones previas [4], [13], [16]-[19], [42]. Este comportamiento es atribuible a los débiles enlaces de los AR (entre el árido y el mortero, antiguos) y a la mayor cantidad de zonas de transición interfacial (ZTI) [4], [8], [43], [44] que pueden facilitar la formación de cristales de Portlandita y disminuir su resistencia a la compresión [12]; además, los AR confieren una naturaleza porosa al HER [17]-[19], [45], que dificulta la transferencia de esfuerzos y debilita su resistencia mecánica.

Los valores más altos obtenidos tanto para la resistencia a la compresión como para el IR fueron para la mezcla CONV y los mínimos para la R-100. Las mezclas GR-20 y GR-30 obtuvieron pérdidas en su resistencia inferiores al 5% [15], [17], [19], lo que las podría hacer consideradas como aptas para uso en hormigones estructurales. La GR-60 obtiene una disminución del 10%, haciéndola aceptable para su uso en HER (requiere fortalecimiento de

su matriz mediante adición de materiales); y por último, para el objetivo establecido en la investigación, la GR-100 (pérdidas del 40%) y la R-100, no pueden ser aceptables.

De la misma gráfica se observa que el IR disminuye siguiendo similar comportamiento que la resistencia a la compresión, lo cual es congruente con estudios previos [12], [13], [16]-[19], [42]. Esta pérdida en la dureza del material se vincula a la porosidad de los AHR, que provoca en la matriz la incapacidad de oposición a la deformación con origen a la sollicitación mecánica del golpe del martillo (o de esfuerzos externos).

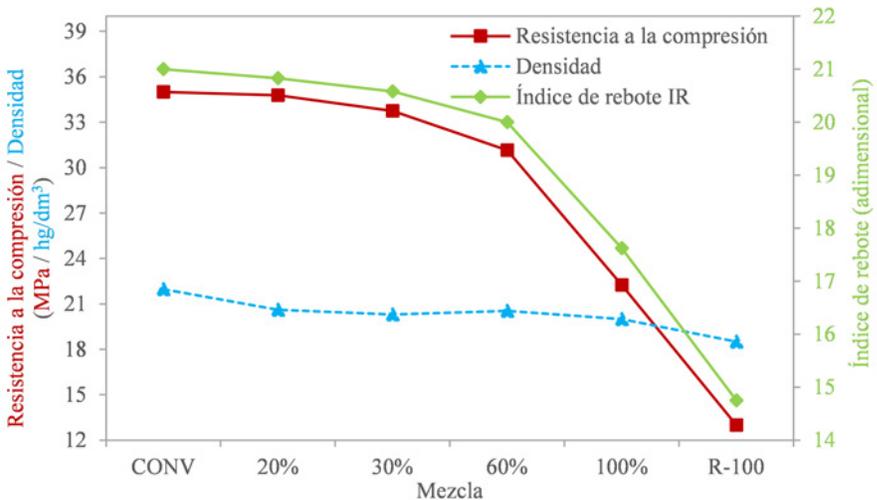


Figura 7. Relación de resistencia a la compresión, densidad e índice de rebote en HR.

Respecto a la densidad de los HR, esta disminuye al incremento de la cantidad de AR (aunque de forma menos evidente, el intervalo de 0 a 100% de sustitución de AR por AN solo provoca reducciones de 6% a 9%), sin embargo, su implicación en la capacidad mecánica del HR se evidencia como relevante al observar su correlación en la Fig. 8. La relación entre la resistencia a la compresión y la densidad se estableció mediante una ecuación polinómica con curvatura cerrada respecto a la vertical, que permite demostrar que pequeñas pérdidas en la densidad implicarán un detrimento importante de la resistencia a la compresión (a partir de porcentajes >30%); antes de este contenido de AGR, la disminución de la resistencia a la compresión

es mínima (a pesar de ser 6% menos densa la GR-20 y 8% la GR-30 que la CONV). Por otra parte, esta relación no queda explicada de forma precisa, ya que el valor R^2 es bajo (0,7961) (la densidad podría no ser el factor determinante), y otras propiedades tales como la porosidad (cantidad, tipo y distribución de poros) podrían ser las variables que provocan la solución no lineal de la ecuación de regresión.

La relación que existe entre el IR y la resistencia a la compresión (Fig. 8) se solventa mediante un comportamiento lineal con un coeficiente $R^2 = 0,997$ que evidencia la fuerte vinculación entre ambas propiedades; lo anterior propicia certeza en cuanto a que el IR puede ser una medida cualitativa confiable de la resistencia a la compresión (comparativa de pérdidas entre mezclas y no como un valor característico) y que la dureza del HR está categóricamente vinculado con su resistencia mecánica (como también lo es en hormigones convencionales).

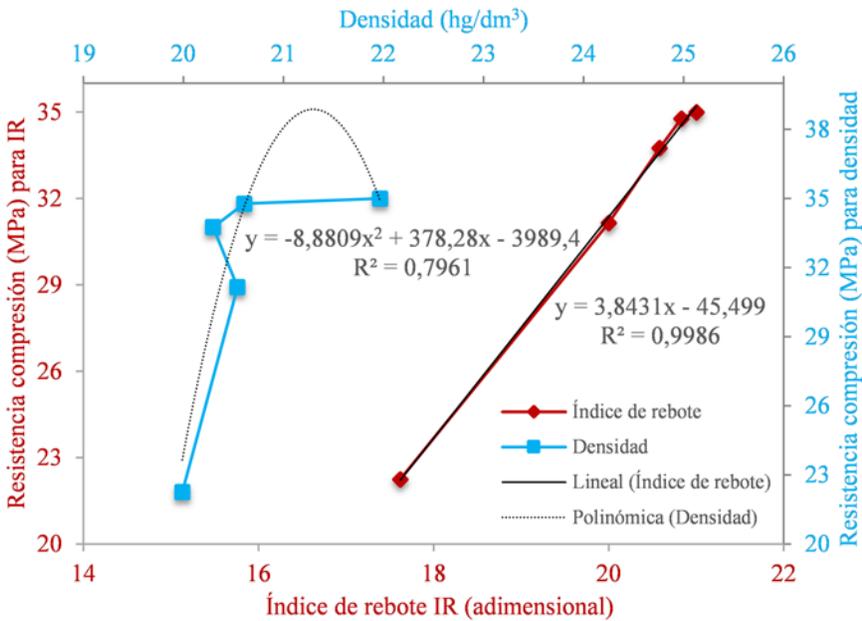


Figura 8. Correlación de resistencia a la compresión y el índice de rebote.

IV. CONCLUSIONES

Las propiedades físicas y mecánicas del HO repercuten en las características de los AHR, por lo que es otro factor a considerar en el propio proceso de obtención de estos. Para este último caso, el triturado que se utilizó en la investigación fue determinante para la obtención específica de los perfiles granulométricos obtenidos y el módulo de finura (para el caso de áridos finos) de los AHR.

Una trituradora de mandíbula puede llegar a ser un instrumento eficiente en la obtención de AGR; sin embargo para la fabricación de AFR, no es recomendable como proceso único, ya que los áridos suelen ser más gruesos que los AN. Lo anterior puede llegar a generar problemas en las mezclas de HER, pudiendo afectar sus capacidades debido a la carencia de uniformidad en sus perfiles granulométricos, al aumento en la porosidad, etc.

En esta investigación se ha evidenciado que la porosidad y la absorción del HO afectan la absorción de los AHR, con valores que oscilan alrededor de seis veces la absorción de los AN, y siendo más notorio para los AFR. Por otra parte, la densidad del HO (inferior a la densidad de los AN) propicia una densidad inferior para los AHR (debido a la naturaleza porosa del mortero antiguo adherido a los áridos). Esto puede ser considerado una ventaja cuando se pretende constituir hormigones ligeros y no estructurales, sin embargo para el objetivo de esta investigación no es recomendable.

Por otra parte, el alto índice de rebote que se reportó del hormigón de origen se puede vincular a que los hormigones de pavimentos están diseñados para cubrir resistencias y módulos de elasticidad relativamente altos, lo cual puede implicar ventajas importantes en su uso como AHR en HER. Estas propiedades pueden conferir dureza y resistencia mecánica a la matriz en la cual sean incluidos, siempre que su fabricación sea de calidad y con una granulometría aceptable.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, los AHR procedentes de desechos de hormigón de pavimentos tienen ventajas mecánicas y físicas en comparación con los AHR provenientes de otros tipos de demoliciones; sin embargo, para el caso de los AFR, se recomienda no utilizarlos con el procedimiento seguido y con fines de constituir un HER.

Es importante identificar las características y la procedencia de la materia prima con la cual se obtienen los AHR, para así poder establecer si esta puede fungir como áridos de alta resistencia, o si su uso se debe limitar a funciones no estructurales. También es importante obtener esta información para el diseño de las mezclas, sobre todo en lo referente al contenido de agua, para garantizar que la relación a/c no se verá afectada por la absorción de los AHR.

Se recomienda que en futuras investigaciones se realice un segundo o nuevo tratamiento a los AFR (por ejemplo, utilizar diferentes trituradoras) que permita la fabricación de estos con un módulo de finura más similar al de los AN.

Los AR son factibles de utilizar en HER con pérdidas relativamente pequeñas en la resistencia a la compresión y la densidad, por lo que pueden sustituirse hasta en un 60% en nuevos hormigones (en la GR-60 con alguna adición). Además, se corroboró que el IR es un buen indicador en la medición relativa y comparativa de la pérdida en la resistencia a compresión

Por último, se recomienda analizar y establecer la forma en que influyen los AHR con procedencias de desechos de hormigón de pavimentos en algunas propiedades mecánicas, como el módulo de ruptura (resistencia a la flexión) y el módulo de elasticidad de los HR u HER, ya que el hormigón de pavimento es diseñado específicamente para cubrir dichas demandas.

REFERENCIAS

- [1] R. Gaimster, C. Munn. (2007). *The role of concrete in sustainable development* [En línea, 03/11/2015]. Disponible en: <http://www.sustainableconcrete.org.nz/portals/137/files/2007sustainabilitypaper.pdf>
- [2] N. Deshpande, S. S. Kulkarni, N. Patil, "Effectiveness of using coarse recycled concrete aggregate in concrete," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 4, no.6, pp. 913-919, 2011.
- [3] J. D. Hernández-Espinosa de los Monteros, M. A. Rodríguez-Salinas, A. Macht, E. Ramos-Guevara, "El manejo de los residuos de la construcción en el estado de México en el marco de la cooperación técnica alemana en México," *Delos*, vol. 1, no. 3, pp. 1-11, 2008.

- [4] J. Xiao, W. Li, Y. Fan, X. Huang, "An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011)", *Construction and Building Materials*, vol. 31, pp. 364-383, 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074
- [5] I. Soto-Izquierdo, M. A. Ramalho, "Aplicação de cinzas residuais e de fibra de sisal na produção de argamassas e concretos: Revisão," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 344-368, 2014. doi: 10.14482/inde.32.2.6167
- [6] F. G. Cabrera-Covarrubias, J. M. Gómez-Soberón, J. L. Almaral-Sánchez, M. C. Gómez-Soberón, J. M. Mendívil-Escalante, "Propiedades en estado fresco de morteros con árido reciclado de hormigón y efecto de la relación c/a ", *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 35, no. 1, pp. 198-218, 2017. doi: 10.14487/inde.35.1.8949
- [7] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, E.M. Garnert, "Sustainable development and climate change initiatives", *Cement and Concrete Research*, vol. 38, pp. 115-127, 2008. doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008
- [8] Q. Liu, J. Xiao, Z. Sun, "Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 41, pp. 1050-1057, 2011. doi: 10.1016/j.cemconres.2011.06.007
- [9] M. Tia, Y. Liu, D. Brown, "Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete", Contract No: BC-354 Final Rep. U.F. Proyect No. 49104504973-12, Dept. of civil and coastal Eng., Univ. of Florida, Gainesville, FL, 2005.
- [10] K. R. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang, "Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 31, pp. 1421-1425, 2001. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00588-9
- [11] A. E. Bezerra-Cabral, V. Schalch, D. Carpena, J. L. Duarte-Ribeiro, "Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 421-430, 2010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011
- [12] H. Yildırım, O. Sengul, "Modulus of elasticity of substandard and normal concretes", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 1645-1652, 2010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.10.009
- [13] J. A. Pérez-Benedicto, M. del-Río-Merino, J. L. Peralta-Canudo, M. de la Rosa-La Mata, "Características mecánicas de hormigones con áridos reciclados procedentes de los rechazos en prefabricación", *Materiales de Construcción*, vol. 62, no. 305, pp. 25-37, 2012. doi: 10.3989/mc.2011.62110
- [14] J. M. Gómez-Soberón, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study", *Cement and Concrete Research*, vol. 32, pp. 1301-1311, 2002. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00795-0
- [15] V. Corinaldesi, "Mechanical and elastic behaviour of concrete made of recycled-concrete coarse aggregates", *Construction and Building Materials*, vol. 24, pp. 1616-1620, 2010. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031

- [16] M. Casuccio, M. Torrijos, G. Giaccio, R. Zerbino, "Failure mechanism of recycled aggregate concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1500-1506, 2008. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.032
- [17] M. Chakradhara-Rao, S. K. Bhattacharyya, S. V. Barai, "Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete", *Materials and Structures*, vol. 44, pp. 205-220, 2010. doi: 10.1617/s11527-010-9620-x
- [18] B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, M. F. Herrador, S. Seara-Paz, "Structural recycled concrete: behaviour under low loading rate", *Construction and Building Materials*, vol. 28, pp. 111-116, 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.010
- [19] B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, D. Carro-López, S. Seara-Paz, "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2335-2342, 2011. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.031
- [20] CEMEX. (2010). *Pavimentos de concreto CEMEX, impulsando el desarrollo de México* [En línea 15/09/2015]. Disponible en: <http://www.cemexmexico.com/Concretos/files/manualDePavimentos2010.pdf>
- [21] S. Senaratne, D. Gerace, O. Mirza, V. W. Y. Tam, W. H. Kang, "The costs and benefits of combining recycled aggregate with steel fibers as a sustainable, structural material", *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, pp. 2318-2327, 2016. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.10.041
- [22] Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible. (2009). *Iniciativa por la Sostenibilidad del Cemento. Reciclado Concreto (42)* [En línea, 15/01/2015]. Disponible en: [http://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport%20\(Spanish\).pdf](http://www.wbcscement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport%20(Spanish).pdf)
- [23] W. Zhao, R. B. Leeftink, V. S. Rotter, "Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China-The case of Chongqing", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, no. 6, pp. 377-389, 2010. doi: 10.1016/j.resconrec.2009.09.003
- [21] G. Valdés-Vidal, O. J. Reyes-Ortiz, G. González-Peñuela, "Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción," *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 29, no. 1, pp. 17-33, 2011.
- [25] M. Wijayasundara, P. Mendis, L. Zhang, M. Sofi, "Financial assessment of manufacturing recycled aggregate concrete in ready-mix concrete plants", *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 109, pp. 187-201, 2016. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.02.007
- [26] A. N. Calderón, E. P. Vergara-González, "Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la comunidad autónoma de La Rioja", Tesis doctoral, Depto. Ing. Mecánica, Universidad de la Rioja, La Rioja, España, 2014.

- [27] G. Moriconi, "Recycled materials in concrete technology: sustainability and durability", in *Sustainable construction materials and technologies, proc. Special sessions of Firts Int. Conf. on sustainable construction materials and technologies*, Coventry, UK, 2007, pp. 1-12.
- [28] C. Rivera, C. Gutiérrez, "Análisis ambiental del mercado de los residuos de la Construcción en la zona metropolitana de la Ciudad de México", en *I Simp. Iberoamericano de Ing. de Residuos*, Castellón, España, 2008.
- [29] *Residuos Sólidos Urbanos. Manual de Gestión Integral*, CEMPRE Uruguay, Montevideo, Uruguay, 1998, pp. 250-258.
- [30] *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*, ASTM C805, 2008. doi: 10.1520/C0805-08.
- [31] *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM C642, 2006. doi: 10.1520/C0642-06.
- [32] Resnick et al., "Capítulo 17", en *Estática de Fluidos. Física I*, 4ta ed., vol. 1. Ed. Continental, 2001, pp. 428-429.
- [33] MANEK. (2012). Ficha técnica JS-0804 [En línea, 15/11/2015]. Disponible en: <http://www.maneklalexports.com/Espanol/Construction/JawCrushers.htm>.
- [34] *Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM C33, 2011. doi: 10.1520/C0033_C0033M-11A.
- [35] *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, ASTM C136, 2006. doi: 10.1520/C0136-06.
- [36] *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*, ASTM C127, 2012. doi: 10.1520/C0127-12.
- [37] *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*, ASTM C128, 2007. doi: 10.1520/C0128-07A.
- [38] *Industria de la Construcción Cementos Hidráulicos, Especificaciones y Métodos de Prueba*, NMX-414-ONNCCE, 2004.
- [39] *Standard Specification for Portland Cement*, ASTM C 150, 2012. doi: 10.1520/C0150_C0150M-12.
- [40] *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*, ASTM C 192, 2007. doi: 10.1520/C0192_C0192M-07.
- [41] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C39, 2012. doi: 10.1520/C0039_C0039M-12.
- [42] Y. Sun, X. Xiao, "Experiment research on basic mechanic property of recycled concrete with different ratio of recycled aggregate", *Advanced Materials Research*, vol. 250, pp. 994-1000, 2011. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.994

- [43] J. Xiao, Q. Liu, Y. C. Wu, "Numerical and experimental studies on fracture process of recycled concrete", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 35, pp. 801-808, 2012. doi:10.1111/j.1460-2695.2012.01673.x
- [44] Z. Hashin, P. J. M. Monteiro, "An inverse method to determine the elastic properties of the interphase between the aggregate and the cement paste", *Cement and Concrete Research*, vol.32, pp. 1291-1300, 2002. doi: 10.1016/S0008-8846(02)00792-5
- [45] S. C. Kou, C. S. Poon, "Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate", *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 69-76, 2012. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.02.032