

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Valorización como árido reciclado mixto de un residuo de construcción y demolición en la confección de hormigones autocompactantes durables en terrenos con yesos

Isabel M. Guerrero ⁽¹⁾, Gracia R. Jerónimo ⁽²⁾ y José R. Montero ⁽³⁾

⁽¹⁾ Graduado en Ingeniería Civil por la Universidad de Granada, España.

⁽²⁾ Departamento de Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica, ETSICCP, Universidad de Granada, España.

⁽³⁾ Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, ETSICCP, Universidad de Granada, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5318>

RESUMEN

Se ha realizado un estudio para intentar valorizar el residuo de construcción y demolición, RCD, de mayor generación en las plantas de reciclaje para su aplicación como árido reciclado mixto, al no encontrarse contemplado su uso en la normativa española vigente. En primer lugar, se han determinado las propiedades más relevantes relacionadas con su empleo en hormigones y posteriormente, se ha diseñado y confeccionado un hormigón autocompactante empleando la totalidad de este residuo, ajustando la dosificación para conseguir la durabilidad en una clase de exposición ambiental IIB+Qb. Los requisitos de autocompactabilidad se han logrado ensayando una gama de dosificaciones en torno a la preconizada por Okamura, ajustando la cantidad de filler y las proporciones de arena y grava, intentando emplear la menor cantidad posible de filler y la mayor proporción de grava. Se ha determinado la resistencia a compresión del HAC finalmente seleccionado y algunas propiedades relacionadas con su durabilidad, como su porosidad, absorción capilar, penetración de agua y especialmente su resistencia al ataque por sulfatos. Los resultados obtenidos permiten afirmar que con este residuo se puede garantizar la autocompactabilidad en el hormigón, conseguir adecuadas resistencias mecánicas y, sorprendentemente, se perciben bastantes indicios de un comportamiento satisfactorio frente a los sulfatos.

PALABRAS CLAVE: hormigón autocompactante, árido reciclado mixto, ataque por sulfatos, durabilidad.

1.- INTRODUCCIÓN

El uso del hormigón, sin duda el material de construcción más importante con el que se construyen la mayoría de las obras civiles, conlleva la extracción de gran cantidad de árido natural de las canteras puesto que este componente entra a formar parte en un 75-80% del

volumen total del hormigón, lo que está afectando de forma importante a los ecosistemas. Por otro lado, con el desmesurado auge de la construcción de los últimos años, se han generado una gran cantidad de RCDs de los cuales un pequeño porcentaje es reciclado, siendo este el principal problema medioambiental causado por la industria de la construcción. Estos hechos han dado lugar a que los investigadores centren sus estudios en la utilización de estos residuos, sobre todo como árido para hormigones, pues de esta manera se reduce la extracción de árido natural y, al mismo tiempo, se elimina parte de unos residuos difíciles de gestionar.

Han sido muchos los autores que han estudiado el comportamiento del hormigón sustituyendo alguna de las fracciones del árido por un material reciclado. La utilización de residuos procedentes únicamente del hormigón como árido grueso en hormigones es bastante conocida e incluso está regulada por la EHE-08, y es el único residuo que permite la normativa española para su empleo en la confección de hormigones. Este hecho limita en gran medida el reciclaje de los residuos de construcción y demolición, pues el de hormigón apenas representa un 15% de la producción total.

En las plantas de reciclaje de RCDs, el material predominante es una mezcla de hormigón, restos cerámicos e impurezas. Las pocas investigaciones que hay sobre su aplicación en hormigones como árido reciclado mixto [1, 2, 3, 4, 5] concluyen que la mayoría de las propiedades del hormigón se ven afectadas negativamente, tanto más cuanto mayor es la sustitución de árido. Esto ha hecho que actualmente haya mucha desconfianza y apenas si se recicla, solo se emplea como relleno de zanjas o en firmes de carreteras.

Sin embargo, es un imperativo para la sostenibilidad valorizar al máximo este residuo, pues aunque puede contener muchas impurezas perniciosas, también es cierto que contiene un material muy interesante, los restos cerámicos, de los que desde tiempo inmemorable se conocen sus beneficiosos efectos puzolánicos [6]. Por este motivo, con este trabajo se ha querido estudiar este residuo más a fondo, intentando valorizarlo como árido reciclado mixto en la confección de hormigones autocompactantes. De esta manera se aprovecharían las ventajas del HAC a la vez que se le daría utilidad a un residuo con cierta aptitud para estos hormigones, debido al efecto puzolánico que posee el material cerámico, el cual podría contrarrestar alguno de sus efectos negativos, como las expansiones que provoca su elevado contenido de yeso.

2.- METODOLOGÍA

2.1.- Caracterización del árido reciclado mixto

El árido reciclado ha sido suministrado por la planta de reciclaje de residuos de construcción y demolición El Soto (Granada, España). Se le han determinado todas las propiedades físicas y químicas que aparecen limitadas en la EHE-08, con objeto de ver el grado de cumplimiento de los resultados con los valores límite establecidos en la misma, y algunas otras, para comprender mejor el comportamiento del hormigón fabricado con este material. Se estudió su composición mineralógica mediante difracción R-X y se determinó su superficie específica BET. Todos los ensayos realizados aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Ensayos de caracterización realizados en el árido

<i>Característica determinada</i>	<i>Método de ensayo</i>
Granulometría	UNE-EN 933-1
Composición macroscópica	UNE-EN 933-11
Equivalente de arena	UNE-EN 933-8
Absorción de azul de metileno	UNE-EN 933-9
Índice de lajas	UNE-EN 933-3
Resistencia a la fragmentación	UNE-EN 1097-2
Absorción	UNE-EN 1097-6
Cloruros totales	ASTM C1152/1152M
Sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1
Contenido total en azufre	UNE-EN 1744-1
Materia orgánica	UNE-EN 1744-1
Partículas ligeras	UNE-EN 1744-1
Mineralogía	Difracción de R-X
Superficie específica	BET con adsorción N ₂

2.2.- Otros componentes del HAC

Para el resto de los componentes del HAC se ha recurrido a los materiales de la zona. El árido de aportación ha sido arena natural lavada procedente del machaqueo de roca caliza dolomítica, con una densidad de 2.855 kg/m³ y un 0,6% de absorción. El filler procedía de la trituración de material de la misma naturaleza, con densidad 2.741 kg/m³. Se ha utilizado un CEM II/A-V/42.5R y agua de la red. Tras probar con varias marcas de aditivos habituales en hormigones autocompactantes, se eligió como más adecuado el superplastificante (SP) MasterEase 3530, que se ha utilizado junto con un plastificante-retardador (P) MasterPozzolith 7000, ambos de BASF.

2.3.- Diseño del hormigón

El procedimiento seguido para dosificar el HAC ha considerado, por un lado, las prescripciones mínimas de la EHE-08 para la clase de exposición ambiental IIB+QB y, por otro lado, el método del profesor Okamura [7]. Por tanto, se ha dosificado con una relación agua/cemento de 0,50 y una cantidad de cemento de 350 kg/m³. Se han confeccionado amasadas con diferentes granulometrías hasta encontrar la que mejor cumplía con los requisitos de autocompactabilidad empleando la mayor cantidad de grava posible. En la Tabla 2 se presentan las diferentes mezclas realizadas. Las distintas dosificaciones se designaron en la forma GX-AY, donde X es el porcentaje de la grava respecto a su densidad de relleno, e Y es el porcentaje de arena en el mortero. Además, se dispuso de un hormigón de referencia, R-G42-A45, sustituyendo el árido reciclado por árido natural y empleando una granulometría satisfactoria para la autocompactabilidad [8].

Tabla 2. Dosificaciones realizadas

Designación	Agua ⁽¹⁾ (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	Filler (kg/m ³)	Árido reciclado (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	SP (%)	P (%)
G50-A40	178,2	350,0	349,3	924,0	680,3	3	2
G50-A45	183,2	350,0	241,9	919,7	793,0	3	2
G52-A48	183,9	350,0	162,3	956,4	839,1	3	2
G55-A50	189,2	350,0	99,2	1.006,8	850,8	3	2
R-G42-A45	178,0	350,0	280,4	⁽²⁾ 807,5	853,2	3	2

⁽¹⁾ Las diferencias en el agua de amasado se deben a que se han tenido en cuenta la absorción y la humedad del árido en el momento de la confección del hormigón.

⁽²⁾ En este caso se trata de grava natural de la zona.

A todas estas amasadas se le realizaron los ensayos que indica la EHE-08 para la caracterización de la autocompactabilidad: escurrimiento, según UNE-EN 12350-8, embudo en V según UNE-EN 12350-9, escurrimiento con anillo J según UNE-EN 12350-12 y caja en L según UNE-EN 12350-10. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Autocompactabilidad de las diferentes dosificaciones confeccionadas

Designación	Escurrecimiento		Embudo en V	Caja en L	Anillo J
	T ₅₀ (s)	d _f (mm)	T _V (s)	C _{bL}	d _{Jf} (mm)
G50-A40	3,4	707	24,4	0,61	697
G50-A45	2,2	695	12,2	0,54	615
G52-A48	1,2	765	6,4	0,94	745
G55-A50	2,3	685	bloqueo	0,70	680
R-G42-A45	-	660	-	0,77	-

A la vista de estos resultados, la dosificación que cumplía todas las especificaciones de autocompactabilidad y además aceptaba la mayor cantidad de árido reciclado posible fue la G52-A48. Por todo ello, esta fue la seleccionada para realizar el estudio.

2.4.- Determinaciones en el HAC endurecido

La resistencia a compresión se ha determinado mediante la norma UNE-EN 12390-3. Las densidades, porosidad accesible, absorción capilar y penetración de agua según las normas UNE 83980, UNE 83982 y UNE-EN 12390-8, respectivamente.

Finalmente, el ensayo más determinante de esta investigación, el que evalúa el comportamiento del hormigón frente al ataque por sulfatos, se ha llevado a cabo manteniendo 6 probetas prismáticas, de 285 cm de longitud, en una disolución concentrada de sulfatos y midiendo los cambios de longitud en distintos plazos, según el procedimiento descrito en la norma ASTM C1012/C1012M.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Caracterización del árido reciclado

En la Figura 1 se presenta la granulometría del árido, el cual posee un 79% de grava y un 21% de arena.

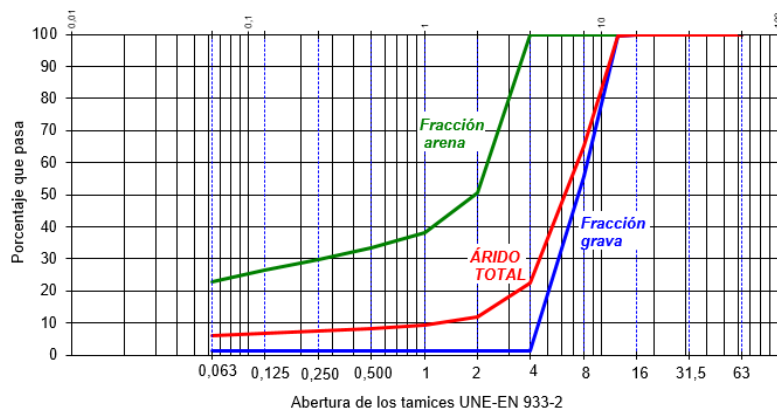


Figura 1. Granulometría del residuo aplicable como árido reciclado mixto

La composición macroscópica de este residuo se muestra en la Tabla 4, estando formado, en su mayoría, por mortero, árido natural y un importante contenido de cerámica.

Tabla 4. Composición macroscópica del árido

<i>Componentes en la fracción gruesa (%)</i>	
Árido natural	48,8
Mortero	32,8
Cerámica	15,6
Asfalto	1,6
Partículas de yeso	1,0
Otros (vidrio, madera, plástico...)	0,2

Los resultados del análisis por difracción de R-X se muestran en la Figura 2, tras el cual se ha concluido que la fase más abundante es la dolomita, justificado por la composición de los áridos de la zona, seguida de calcita y cuarzo en menor proporción. También se detectan cantidades no despreciables de yeso y escasas de filosilicatos (ilita) y plagioclasas.

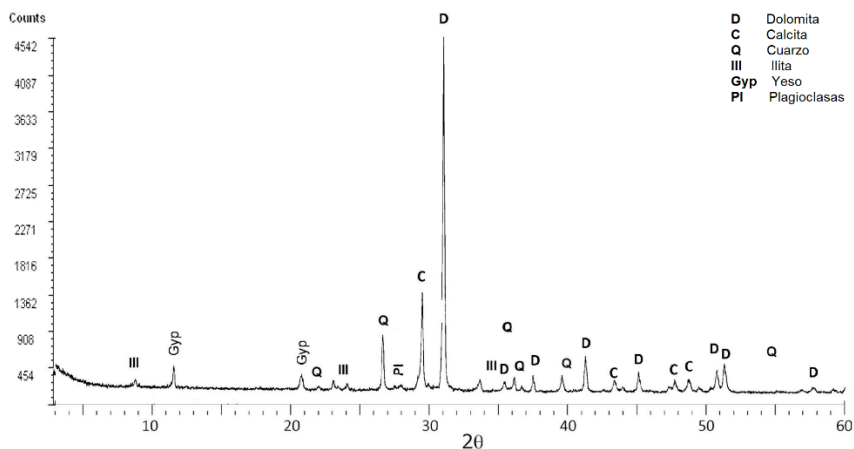


Figura 2. Diagrama de difracción de rayos X del árido

En la Tabla 5 se recogen los valores obtenidos de ensayar todas las propiedades del árido señaladas anteriormente.

Tabla 5. Resultados de los ensayos y limitaciones de la EHE-08

Característica ensayada	Resultado	Limitación EHE-08
Densidad (g/cm ³)	2,75	-
Contenido de finos (%)	5,8	≤ 6
Equivalente de arena	42	≥ 70
Absorción de azul de metileno (g/kg)	2,28	≤ 0,36
Índice de lasjas (%)	8	≤ 35
Resistencia a la fragmentación	27	≤ 40
Absorción (%)	6,4	≤ 5
Cloruros totales (%)	0,09	≤ 0,05
Sulfatos solubles en ácido (%)	3,1	≤ 0,8
Compuestos totales de azufre (%)	3,6	≤ 1
Materia orgánica	Color más claro	Color del patrón
Partículas flotantes (%)	2,7	≤ 1
Superficie específica (m ² /g)	3,187	-

El residuo objeto de estudio no presenta una excesiva cantidad de finos, lo que es lógico debido al proceso de lavado al que se le somete en la planta de reciclaje.

Tanto el equivalente de arena como el valor de azul de metileno son parámetros que determinan la calidad de los finos y, según los resultados obtenidos, no parecen ser adecuados de acuerdo con los criterios de la EHE-08. Pero quizás estos ensayos no permitan distinguir de una manera clara si los resultados se deben a la presencia de material

cerámico y en ese caso no serían perjudiciales. En vista de las propiedades del hormigón resultante, podría pensarse que se trata de arcilla cocida, aunque esta cuestión no se ha clarificado específicamente.

Tanto el índice de lajas como la resistencia a la fragmentación han presentado valores muy por debajo de los límites permitidos, y similares a los obtenidos en otras investigaciones [9,10].

La absorción es ligeramente superior a la limitada por la EHE-08, pero hay que tener en cuenta que es aplicable a los áridos reciclados de hormigón y éste, al tener mayor cantidad de material cerámico, es inevitablemente más absorbente. Muchas investigaciones de las consultadas coinciden en este hecho [2, 9, 10]. En todo caso, la elevada absorción podría contrarrestarse con relativa facilidad añadiendo más agua de amasado al confeccionar el hormigón.

El contenido de cloruros está por encima del límite exigido, lo que podría deberse a la sospecha de que los residuos procedieran de construcciones en ambientes salinos, aunque no se tiene confirmación de ello. No obstante, empleando el resto de los componentes con bajos contenidos de estas sustancias se podrían conseguir hormigones con bajo riesgo de corrosión.

El elevado contenido en sulfatos es el principal problema que presenta este residuo ya que podría provocar reacciones expansivas (etringita secundaria) con los conocidos efectos destructivos.

3.2.- Propiedades mecánicas y de durabilidad del HAC

Los resultados de la resistencia a compresión a 7 y 28 días, tanto del hormigón de estudio como los del hormigón de referencia, se presentan en la Tabla 6. Se observa una pérdida de resistencia respecto al hormigón de referencia del 15%. En otros estudios realizados con HAC empleando el 100% de árido reciclado, pero solo de hormigón, y además con cenizas volantes como adición [11] se han detectado pérdidas de resistencia del mismo orden (13%). Otros autores han estudiado hormigones convencionales con diferentes sustituciones del árido por uno reciclado mixto, obteniendo pérdidas de resistencia del 23% para la sustitución del 100% [1], o pérdidas comprendidas entre el 12 y el 20% [3]. En la Tabla 7 se presentan las restantes propiedades ensayadas.

Tabla 6. Resistencia a compresión de los hormigones estudiados

<i>Resistencia a compresión (MPa)</i>	<i>Edad del hormigón</i>	
	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>
HAC con árido reciclado mixto	37,6	46,2
HAC de referencia	44,3	54,5

Tabla 7. Otras propiedades del hormigón en estado endurecido

<i>Característica ensayada</i>	<i>Resultado</i>	
Densidad aparente (kg/m ³)	2.300	
Densidad en seco (kg/m ³)	2.200	
Porosidad accesible (%)	4,3	
Absorción (%)	2,1	
Penetración de agua	Profundidad máxima (mm)	20,3
	Profundidad media (mm)	6,8
Absorción capilar	Coefficiente de absorción capilar (g/m ² s ^{0,5})	0,0431
	Porosidad efectiva (cm ³ /cm ³)	0,07
	Resistencia a la penetración de agua (min/cm ²)	1.025

De los resultados obtenidos en el ensayo de penetración de agua a presión y de absorción capilar puede afirmarse que el hormigón resultante es muy poco permeable, pese a la idea general de que estos hormigones suelen ser bastante absorbentes, debido a la elevada porosidad que los caracteriza por las propiedades del árido. Este buen comportamiento podría deberse, además de a la elevada cantidad de cemento que contiene, a que el material fino del árido puede contribuir al carácter aglomerante y formar películas impermeables alrededor de los áridos. De hecho, otros autores [11] han obtenido hormigones más permeables en el ensayo de penetración de agua a presión utilizando solo árido reciclado de hormigón, aunque este material posee una absorción menor que el reciclado mixto empleado en el presente estudio. En cuanto a la absorción capilar, según la bibliografía consultada [12], el coeficiente de absorción capilar ronda los 5 g/m²s^{0,5} para una relación a/c de 0,5. Teniendo estos valores en cuenta, se podría afirmar que el hormigón obtenido posee una elevada resistencia a la penetración de agentes agresivos. Los valores de absorción también son inferiores a los obtenidos por otros autores [3].

En la Figura 3 se muestran los resultados de las seis probetas ensayadas para el estudio del ataque por sulfatos, a lo largo de 15 meses, expresados en tanto por ciento respecto a su longitud inicial.

Según la norma ACI C201, para considerar un hormigón resistente a los sulfatos la expansión máxima permitida en 18 meses es del 0,1%. El HAC estudiado apenas ha alcanzado, a los quince meses, una cuarta parte de esta expansión, con lo que cabría pensar que al término del periodo de ensayo no se alcanzará el valor límite establecido ya que se observa una estabilización en la última fase del estudio.

Estos excelentes resultados de las propiedades relacionadas con durabilidad (penetración de agua y resistencia en el comportamiento frente a los sulfatos), podrían deberse al efecto puzolánico del material cerámico que presenta el árido, el cual ha podido contrarrestar el efecto negativo que conlleva la presencia de yeso en el árido y contribuir a que el hormigón sea poco permeable, dando lugar a un hormigón durable.

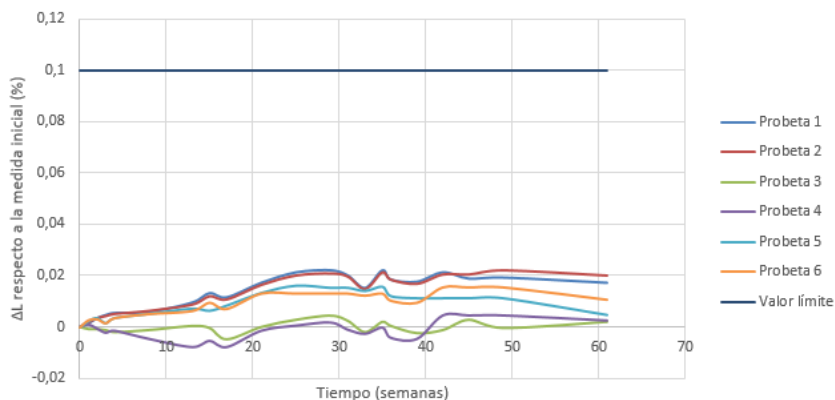


Figura 4. Variaciones dimensionales de las probetas en el ensayo de resistencia al ataque por sulfatos

4.- CONCLUSIONES

- La conclusión esencial del presente estudio es que ha sido posible obtener, con este residuo como árido, un hormigón con muy satisfactorias propiedades de autocompactabilidad, incluso se ha podido incrementar la cantidad de árido grueso respecto a la aconsejada por los precursores del HAC.
- El material estudiado presenta algunas características fuera de los límites establecidos por la normativa para los áridos reciclados, destacando unos finos sospechosos de ser perjudiciales y un elevado contenido en sulfatos. Sin embargo, contiene una proporción importante de material cerámico que posiblemente presenta interesantes efectos puzolánicos.
- La resistencia a compresión ha sido realmente buena, a la que ha debido contribuir la mejor adherencia pasta-árido, consecuencia de las propiedades puzolánicas del árido.
- La resistencia al ataque por sulfatos ha sido sorprendentemente buena, al menos hasta la fecha, lo que podría estar justificado por la poca permeabilidad que ha presentado el hormigón, lo cual dificulta el acceso de sustancias agresivas. También está presentando un excelente comportamiento ante las elevadas cantidades de yeso que posee, que deberían producir una expansión visible en el hormigón, de lo que no existe ninguna evidencia apreciable. Es posible que el efecto puzolánico de la cerámica haga bajar la basicidad en los poros del hormigón y, debido a ello, que la formación de etringita secundaria no se vea tan favorecida.
- Los buenos resultados obtenidos de autocompactabilidad, de resistencia mecánica y de durabilidad debería ser un incentivo para reconsiderar el empleo de este tipo de residuos como árido reciclado mixto para hormigones, lo que también contribuiría a la sostenibilidad del proceso constructivo.

REFERENCIAS

- [1] Isabel Martínez-Lage, Fernando Martínez-Abella, Cristina Vázquez-Herrero, Juan Luis Pérez-Ordóñez, 'Properties of plain concrete made with recycled coarse aggregate' *Construction and Building Materials* **37** (2012) 171-176.
- [2] Benito Mas, Antoni Cladera, Teodoro del Olmo, Francisco Pitarch, 'Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the the properties of concrete for non-structural use' *Construction and Building Materials* **27** (2012) 612-622.
- [3] César Medina, Wenzhong Zhu, Torsten Howind, María Isabel Sánchez de Rojas, 'Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete' *Journal of Cleaner Production* **68** (2014) 216-225.
- [4] C. Rodríguez, C. Parra, G. Casado, I. Miñano, F. Albaladejo, F. Benito, I. Sánchez, 'The incorporation of construction and demolition wastes as recycled mixed aggregates in non-structural concrete precast pieces' *Journal of Cleaner Production* **127** (2016) 152-161.
- [5] Miguel Bravo, Jorge de Brito, Jorge Pontes, Luís Evangelista, 'Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants' *Construction and Building Materials* **77** (2015) 357-369.
- [6] Sánchez de Rojas, M.I., Frías, M., Rivera, J., 'Aprovechamiento del cascote cerámico como material puzolánico' . Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, *Cemento* **915** (2008) 32-41.
- [7] Okamura, H., Ozawa, K., Ouchi, M., 'Self Compacting Concrete. Structural Concrete'. Vol. 1, nº 1.
- [8] Jesús Martín Marín; 'Aplicabilidad de un material fino de desecho para la elaboración de hormigón autocompactante' (Granada, 2008).
- [9] Centro de estudios y experimentación de obras públicas, CEDEX; "Residuos de construcción y demolición, ficha técnica", Noviembre 2014.
- [10] Víctor Luis Gerales, 'Estudio de hormigones reciclados no estructurales fabricados con árido reciclado mixto: propiedades mecánicas y expansión debida al contenido de sulfatos', Universidad politécnica de Madrid, 2013.
- [11] Kanish Kapoor, S.P. Singh, Bhupinder Singh, 'Durability of self-compacting concrete made with Recycled Concrete Aggregates and mineral admixtures' *Construction and Building Materials* **128** (2016) 67-76.
- [12] Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, R., 'Corrosion of Steel in Concrete' 2003.