

Actas del I Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-eficientes

## REUTILIZACIÓN DE ÁRIDO MIXTO RECICLADO PROCEDENTE DE LOS RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES

<sup>1</sup>Medina, C.; <sup>3</sup>Zhu, W.; <sup>2</sup>Frías, M.; <sup>3</sup>Howind, T.; <sup>2</sup>Asensio, E.; <sup>2</sup>Sánchez de Rojas, M.I.

<sup>1y2</sup>Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Madrid, España

<sup>3</sup>University of the West of Scotland, Paisley, United Kingdom

e-mail: <sup>1</sup>cemedmart@yahoo.es

### RESUMEN

Este artículo recoge el estudio de la viabilidad de la utilización de árido grueso mixto reciclado procedente de los residuos de la construcción y demolición como sustituto parcial del árido grueso natural, en la fabricación de hormigones con una resistencia característica de 30 MPa. El árido mixto reciclado utilizado tiene una calidad media – baja, debido a que el contenido de asfalto y partículas flotantes es elevado. Las propiedades físicas (densidad y trabajabilidad) y mecánicas (resistencia a compresión y tracción) fueron estudiadas en los hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución del 50% en peso de árido natural, con y sin partículas flotantes. Los resultados obtenidos, muestran que la incorporación de este árido reciclado no tiene un efecto negativo en la trabajabilidad de los hormigones en estado fresco. Respecto a la densidad y las propiedades mecánicas, se observa como disminuyen estas propiedades a medida que aumenta el contenido de árido mixto reciclado y de partículas flotantes. Finalmente, a la luz de estos resultados se puede señalar que estos áridos mixtos reciclados pueden emplearse en la fabricación de hormigones destinados a la edificación u otras aplicaciones.

Keywords: árido mixto reciclado, partículas flotantes, propiedades mecánicas, hormigones para la edificación u otras aplicaciones.

## 1.- Introducción.

Actualmente, existe una creciente presión social sobre los fabricantes y consumidores con el objetivo principal de fomentar el desarrollo de una construcción sostenible que permita reducir el consumo de recursos naturales e incrementar la reutilización de los residuos procedente de la construcción y demolición (RCD) en la fabricación de hormigones.

En el Reino Unido [1] se generan anualmente 110 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición (RCD) que representan un 60 % del total de residuos generados. Las características y la viabilidad de reutilización de estos residuos dependerá fundamentalmente del proceso de gestión llevados a cabo en las plantas de reciclado, así como de las características del residuos original, que puede presentar en su composición partículas indeseables tales como: materiales cerámicos, asfalto y otros materiales (madera, plástico, vidrio, etc.)

La gestión de los residuos de la construcción y demolición (RCD) está enfocada a reducir el volumen de residuos que son depositados en vertederos y a obtener unos productos finales (ej. Áridos reciclados, etc.) que puedan ser reutilizados y comercializados como materia prima en la fabricación de materiales de la construcción. La norma inglesa de hormigones BS 8500-2 [3] define dos clases de áridos reciclados: árido reciclado de hormigón (RCA), que contiene principalmente hormigón triturado ( $\geq 95$  %), y árido reciclado (RA) que está constituido por material de naturaleza pétreo (hormigón, material cerámico o asfalto), así como materiales orgánicos (madera, plástico y cartones) e inorgánicos (metales y yeso).

Respecto al volumen generado de cada uno de estos materiales finales, indicar que en Europa [4]: el volumen producido de RCA es muy inferior al de RA, habiéndose estimado en España que el 67% del volumen total de árido reciclado obtenido corresponde al árido reciclado mixto (RA) [5].

En la actualidad, el estudio de la viabilidad y el efecto de utilizar áridos mixtos reciclados (RA) procedentes de los residuos de la construcción y demolición [5-9] en la fabricación de hormigones ha sido objeto de un menor número de investigaciones que los árido reciclados procedentes del hormigón, debido a la complejidad que supone trabajar con un material tan heterogéneo que contiene habitualmente un pequeño porcentaje de impurezas (madera, plástico, yeso, etc.) las cuales afectan negativamente al comportamiento de los mismos. Los resultados obtenidos en estas investigaciones muestran la existencia de un descenso de la densidad y un empeoramiento de las propiedades físicas (trabajabilidad) y mecánicas de los hormigones reciclados. La disminución de la resistencia a compresión es progresiva a medida que aumenta el porcentaje de sustitución, alcanzando pérdidas del 30% en los hormigones elaborados con un 100% de RA.

La posibilidad de encontrar una alternativa a la utilización de estos RA como material de ejecución de las bases y sub – bases de carreteras supone una gran importancia desde un punto de vista medioambiental (reducción de la extracción de recursos naturales, de las emisiones de CO<sub>2</sub>, del volumen depositado en vertederos, etc.) y económico (menor coste de transporte y de consumo de energía), ya que el volumen generado de los mismo es elevado, tal y como se indicó anteriormente [10, 11].

El árido reciclado mixto (RA) utilizado en la presente investigación procede de una planta de gestión de residuos de la construcción y demolición de Glasgow (Escocia). El presente trabajo de investigación estudia la viabilidad de incorporar el RA como sustituto parcial (50% en peso) del árido grueso natural en la fabricación de hormigones destinados a la edificación u otras aplicaciones y una resistencia características de 30 MPa. Los efectos que tiene la incorporación del árido mixto reciclado (con o sin partículas flotante), se analiza estudiando las propiedades

físicas (densidad, trabajabilidad y capacidad de absorción de agua) y mecánicas (resistencia a compresión y tracción) de estos nuevos hormigones.

## 2.- Materiales y parte experimental

### 2.1.- Materiales

\* El árido natural es un árido machacado de naturaleza silíceo que se divide en dos fracciones: la fracción gruesa (grava) de morfología irregular, aristas marcadas y un tamaño máximo de 20 mm y la fracción fina (arena) de tamaño inferior a 4 mm. Su composición química se caracteriza por estar constituidos mayoritariamente por sílice y alúmina (> 67 % en peso), seguido por otra serie de óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ) que se encuentran en una menor proporción, así como otros elementos minoritarios. Respecto a su mineralogía, destaca la presencia de cuarzo, junto con otro grupo de minerales pertenecientes al grupo de los feldespatos y filosilicatos.

\* El árido mixto reciclado (RA) procede de una planta de gestión y tratamiento de RCD de Glasgow (Scotland). Este RA tiene un tamaño máximo de partícula de 20 mm en el que visualmente puede observarse dos aspectos (véase figura 1): una gran heterogeneidad en su composición y una morfología variable que varía en función del tipo de material del que se trate. Una vez seleccionado el producto, se procedió a realizar su caracterización composicional, física, química y mecánica



Figura 1. Aspecto y composición de los RA

\* El cemento utilizado es un cemento Portland 52.5 R que cumple con los requisitos físicos, químicos y mecánicos establecidos en la norma BS EN 197-1 [12].

### 2.2.- Caracterización de los áridos reciclados mixtos

La caracterización del RA ha consistido en un primer lugar en la clasificación de los componentes (hormigón, cerámico, asfalto, etc.) que forman parte de este árido, según la norma BS EN 933-11 [13]. Posteriormente, se determinó su composición química y mineralógica así como las propiedades físicas (distribución granulométrica, densidad y absorción [14]) del mismo.

### 2.3.- Diseño de las mezclas de hormigón

Para el presente trabajo de investigación se elaboraron los siguientes tipos de hormigones: un hormigón de referencia (RC), dos hormigones reciclados con 50 % de árido mixto reciclado con partículas flotantes (RCF-50) y sin partículas flotantes (RC-50).

El método de dosificación empleado en el cálculo de las mezclas ha sido el Mix British Method [15], en el cual se establecen como datos de partida la resistencia

mecánica (30 MPa), la clase resistente del cemento (52.5 R), la relación a/c (0.65) y el tamaño máximo de árido (20 mm).

La cantidad de agua añadida fue ajustada para cada mezcla, teniendo en cuenta la cantidad de agua absorbida por el árido reciclado. La relación agua total/ cemento [16] es identificada como relación agua aparente/cemento [(a/c)<sub>aparente</sub>], mientras que la relación agua real / cemento de las mezclas diseñadas fue nombrada como relación de agua efectiva / cemento [(a/c)<sub>efectiva</sub>].

Las mezclas obtenidas cumplen con los requisitos del contenido mínimo de cemento y la máxima relación a/c establecidos en la tabla A.14 de la norma BS 8500-1 [17] para hormigones destinados a la edificación u otras aplicaciones.

La dosificación de los hormigones se muestra en la tabla 1.

Hormigón	Material (kg/m <sup>3</sup> )							
	Arena	Grava	RA*	RA <sub>WF</sub> **	Cemento	Agua	(a/c) <sub>efectiva</sub>	(a/c) <sub>aparente</sub>
RC	953,72	1033,20	-	-	323,08	210,00	0,65	0,65
RCF-50	941,72	510,10	514,84	-	323,08	229,36	0,65	0,71
RC-50	941,72	510,10	-	511,46	323,08	228,57	0,65	0,71

\* Árido reciclado con partículas flotantes

\*\* Árido reciclado sin partículas flotantes

Tabla 1. Dosificación de los hormigones

## 2.4.- Caracterización física y mecánicas de los hormigones en estado fresco y endurecido.

En los hormigones en estado fresco se han estudiado la consistencia mediante el cono de Abrams, de acuerdo a la norma BS EN 12350-2 [18]. Respecto a la otra propiedad física (densidad) fue evaluada de acuerdo a la norma BS EN 12390-7 [19]. Finalmente, la resistencia a compresión y tracción, fue determinada de acuerdo con la metodologías descritas en la respectivas normas vigentes [20, 21].

Para evaluar estas propiedades se han elaborado 63 probetas cúbicas (9 probetas/tipo de hormigón) 100 x 100 x 100 mm<sup>3</sup> de las cuales 27 probetas se han utilizado para determinar la resistencia a compresión. Además se han fabricado 21 probetas cilíndricas (3 probetas/tipo de hormigón) de 10 x 20 cm para evaluar la resistencia a tracción.

## 2.5.- Caracterización química, mineralógica y microestructural.

La composición química fue analizada mediante un espectrómetro de fluorescencia de rayos X por dispersión de longitudes de onda modelo S8 TIGER, de Bruker. Para el análisis se empleó standardless QUANT EXPRESS, del paquete de programas SEPECTRAPlus.

El análisis mineralógico realizado con el objetivo de identificar las fases minerales que se encuentran presentes en los áridos (naturales y reciclado) se realizó mediante la técnica de Difracción de Rayos X (DRX). La medida difractométrica se efectuó con un difractómetro BRUKER Theta – Theta modelo D8 Advance sin monocromador y ánodo de Cu de 2,2 kW.

## 3.- Resultados y discusión

### 3.1.- Caracterización del árido mixto reciclado

#### 3.1.1.- Caracterización composicional

El análisis composicional del árido reciclado mixto fue llevado a cabo según la norma BS EN 933-11.

La figura 2 muestra la composición del árido mixto reciclado (RA), observándose que este árido contiene un 45.64 % de residuos de hormigón (Rc), un 28 % de árido

natural (Ru), un 19 % de asfalto, un 5% de material cerámico (bloques, tejas, sanitarios, etc.); seguidos de otros materiales minoritarios de origen no pétreo (madera, vidrio, metales, etc.). Finalmente, el contenido de partículas flotantes fue de 5 cm<sup>3</sup>/kg.

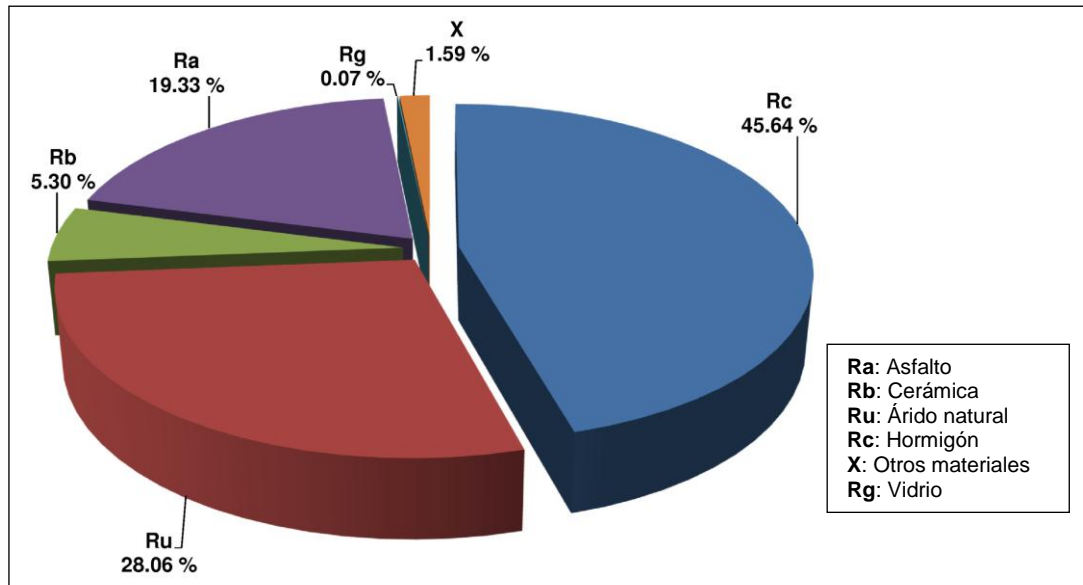


Figura 2. Composición del árido reciclado

El porcentaje de material cerámico está dentro de los requisitos establecidos en la norma BS 8500-2 [3] y BS EN 12620 [22] para los RA utilizados en la fabricación de los hormigones reciclados. Respecto al contenido de asfalto (Ra) y otros materiales (X+Rg) se observa que los valores obtenidos están por encima de los límites, 10% y 1% respectivamente, fijados en la normativa.

### 3.1.2.- Propiedades físicas del árido mixto reciclado

Las propiedades físicas del árido reciclado se recogen en la tabla 2. El tamaño máximo de partícula del árido grueso (natural o reciclado) fue de 20 mm.

Propiedad física	Tipo de árido		
	Grava	RA	RA <sub>WF</sub>
Tamaño máximo de árido (mm)	20	20	20
Densidad (Mg/m <sup>3</sup> )	2,66	2,54	2,56
Absorción de agua (% wt.) a las 24 h	2,66	4,49	4,36

Tabla 2. Propiedades físicas de los áridos gruesos

En esta tabla puede observarse que el árido reciclado tiene una menor densidad que la grava, siendo este descenso para el RA y RA<sub>WF</sub> de un 4,67 % y 3,87 % respecto al árido grueso natural, respectivamente. Este descenso registrado se debe a la menor densidad del: mortero que se encuentra adherido a los áridos y a la menor densidad del material cerámico, tal y como observaron previamente otros autores [23].

Respecto a la absorción de agua se observa que el RA y RA<sub>WF</sub> absorben 1,68 y 1,63 veces más agua que el árido natural debido a la mayor capacidad de absorción de mortero adherido y del material cerámico [24-26]. Además, el hecho de que el RA tenga 3% más de absorción de agua que RA<sub>WF</sub> es debido a que las partículas flotantes, principalmente madera, tienen un coeficiente de absorción alto. Además estos valores se encuentran por debajo del 5%, límite establecido en la norma española de hormigones estructurales [27].

### 3.1.3.- Composición química y mineralógica

La tabla 3, muestra la composición química del RA, en la que puede observarse que está formado químicamente por óxido de sílice (54.37 %), óxido de aluminio (12.90 %), óxido de hierro (8.28 %) y óxido de calcio (7.94 %), seguidos por otros óxidos en una menor proporción (< 5%). Además, también se identifican otros elementos minoritarios expresados en ppm (Sr, Cl, Zr, Cr, etc.). Es importante resaltar que el contenido de óxido de hierro es superior al observado en otros áridos reciclados [28], debido a que el árido grueso natural presenta elevados contenidos de este óxido.

Óxido / Elemento (wt%)	Grava	RCD
SiO <sub>2</sub>	51,26	54,37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,36	12,90
Na <sub>2</sub> O	6,47	2,78
K <sub>2</sub> O	2,96	1,68
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,25	8,28
CaO	4,57	7,94
MgO	2,39	4,07
TiO <sub>2</sub>	1,30	1,44
SO <sub>3</sub>	0,00	0,24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,44	0,28
MnO	0,19	0,15
BaO	0,09	0,09
Sr*	489,84	345,85
Zr*	301,76	166,96
Ce*	639,24	-
Cl*	441,75	563,82
Rb*	191,41	179,57
Zn*	172,61	130,52
Cu*	0,00	0,00
Ni*	55,23	142,68
Cr*	130,51	201,06
LOI	5,39	5,52

\* En ppm

Tabla 3. Composición química de los áridos gruesos

Respecto a su composición mineralógica, se caracteriza por presentar mayoritariamente cuarzo, acompañado por feldespatos (albita, ortoclasa y sanidina), mullita, hematites magnetita y calcita.

## 3.2.- Propiedades del hormigón en estado fresco

### 3.2.1.- Consistencia

La trabajabilidad de los hormigones se mantiene constante (32 mm) a medida que aumenta el contenido de árido reciclado, ya que en el cálculo de la dosificación se ha tenido en cuenta la humedad inicial de los mismos y su absorción, evitando de este modo que la mayor absorción de agua de los áridos reciclados influya negativamente sobre esta propiedad física tan importante.

## 3.3.- Propiedades del hormigón endurecido

### 3.3.1.- Densidad

La tabla 4 muestra los valores obtenidos de densidad de los diferentes hormigones a los 28 días. En esta, se puede observar que la densidad de los hormigones reciclados es menor que la del hormigón de referencia (RC), disminuyendo a medida que aumenta el contenido de árido reciclado, independientemente de que el árido

contenga partículas flotantes o no. Este descenso, es provocado por la menor densidad que tienen los áridos reciclados.

Hormigón	Porcentaje de sustitución de árido reciclado mixto (%)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
RC	RA 0%	2,37
RCF-50	RA 50%	2,32
RC-50	RA <sub>WF</sub> 50%	2,32

Tabla 4. Densidad de los hormigones a los 28 días

### 3.3.2.- Resistencia mecánica

La figura 3 muestra los valores obtenidos de resistencia a tracción y compresión de los hormigones a los 28 días.

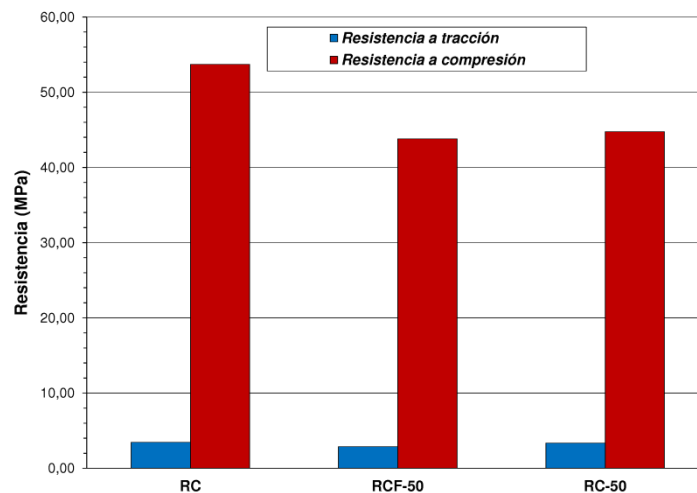


Figura 3. Resistencia a tracción y compresión de los hormigones a los 28 días

Respecto a la resistencia a compresión todos los hormigones elaborados tienen una resistencia superior a 30 MPa. Se observa además que los hormigones reciclados con o sin partículas flotante experimentan un descenso de resistencia del 18% y 17% respecto al hormigón convencional (RC), respectivamente.

En el caso de la Resistencia a tracción indirecta se observa como varía en una mayor o menor cuantía en función de si el árido mixto reciclado contenga o no partículas flotantes, observándose un descenso del 16% y 3% respecto al hormigón de referencia, respectivamente.

Estos resultados obtenidos [29] se deben al efecto negativo que tienen las partículas flotantes sobre las propiedades mecánicas, debido principalmente a la mala adherencia entre estas partículas (madera y plásticos) y la pasta de cemento, dando de este modo una zona de transición (ITZ) débil, tal y como puede observarse en la figura 4

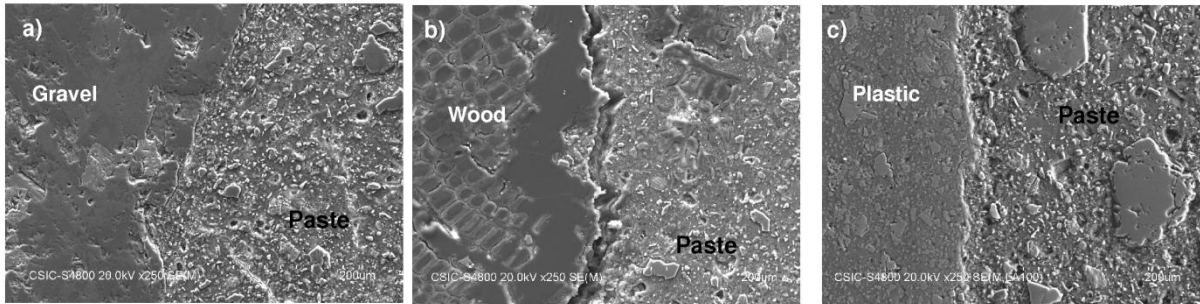


Figura 4. ITZ (x250): a) Grava/pasta; b) Madera/pasta y c) Plástico/pasta

#### 4.- Conclusiones.

Las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos son las siguientes:

1. El árido mixto reciclado utilizado en esta investigación está compuesto principalmente por residuos de hormigón (46%), árido suelto (28%), asfalto (19%) y material cerámico (5%). El contenido de asfalto y otros materiales (X + Rg + Partículas flotantes) superan los límites establecidos en la norma BS EN 8500-2.
2. La consistencia de los hormigones reciclados no se ve afectada por la incorporación del árido mixto reciclado (RA and RA<sub>WF</sub>).
3. La densidad y el comportamiento mecánico de los hormigones son ligeramente inferiores que la del hormigón convencional, particularmente cuando el árido mixto reciclado tiene partículas flotantes.
4. Los áridos mixtos reciclados podrían ser utilizados en un porcentaje de sustitución menor o igual a 50% en peso del árido grueso natural en la fabricación de hormigones destinados para la edificación u otras aplicaciones.

#### Agradecimientos

This research has been made possible through funding from the Spanish Ministry for Science and Innovation's national project ref. BIA2010-21194-C03-01. The main part of the experimental study was carried out in the UK collaboratively with the University of the West of Scotland, during the research visit by the first author.

#### REFERENCIAS

- [1] Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez de Rojas, M.I., Frías, M. Effect of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of recycled concretes. *Construction and Building Materials*, 2013 [Under review].
- [2] Paine, K.A. and Dhir, R.K. Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62(7), 519-530.
- [3] British Standard Institution. BS 8500-2. Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 2: Specification for constituent materials and concrete. p. 462006).
- [4] Vegas, I., Ibanez, J.A., Lisbona, A., Saez de Cortazar, A. and Frías, M. Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5), 2674-2682.
- [5] Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C. and Pérez-Ordóñez, J.L. Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 171-176.
- [6] Yang, J., Du, Q. and Bao, Y. Concrete with recycled concrete aggregate and crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(4), 1935-1945.
- [7] Mas, B., Cladera, A., Bestard, J., Muntaner, D., López, C.E., Piña, S. and Prades, J. Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement. *Construction and Building Materials*, 2012, 34, 430-441.



- [8] Mas, B., Cladera, A., Olmo, T.d. and Pitarch, F. Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*, 2012, 27(1), 612-622.
- [9] Agrela, F., Sánchez de Juan, M., Ayuso, J., Geraldés, V.L. and Jiménez, J.R. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(10), 3950-3955.
- [10] Jiménez, J.R., Ayuso, J., Galvín, A.P., López, M. and Agrela, F. Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, 2012, 34, 34-43.
- [11] Tabsh, S.W. and Abdelfatah, A.S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(2), 1163-1167.
- [12] British Standard Institution. BS EN 197-1. Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. 2011, p. 50.
- [13] British Standard Institution. BS EN 933-11. Tests for geometrical properties of aggregates. Classification test for the constituents of coarse recycled aggregate. 2009, p. 16.
- [14] British Standard Institution. BS EN 1097-6. Test for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption. 2000, p. 32.
- [15] Teychenné, D.C., Franklin, R.E. and Erntroy, H.C. *Design of normal concrete mixes*. IHS BRE Press, Garston, Watford, 2010.
- [16] Fonseca, N., de Brito, J. and Evangelista, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(6), 637-643.
- [17] British Standard Institution. BS 8500:1. Concrete - Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part 1: Method of specifying and guidance for the specifier. 2006, p. 66.
- [18] British Standard Institution. BS EN 12350-2. Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test. 2009, p. 12.
- [19] British Standard Institution. BS EN 12390-7. Testing hardened concrete. Part 7: Density of hardened concrete. 2009, p. 14.
- [20] British Standard Institution. BS EN 12390-3. Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens. 2009, p. 22.
- [21] British Standard Institution. BS EN 12390-6. Testing hardened concrete. Part 6: Tensile splitting strength of test specimens. 2009, p. 14.
- [22] British Standard Institution. BS EN 12620. Aggregates for concrete. 2008, p. 60.
- [23] Gonzalez-Fontebao, B. and Martinez-Abella, F. Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 2008, 43(4), 429-437.
- [24] Medina, C., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Thomas, C. and Polanco, J.A. Gas permeability in concrete containing recycled ceramic sanitary ware aggregate. *Construction and Building Materials*, 2012, 37, 597-605.
- [25] Medina, C., Frías, M. and Sánchez de Rojas, M.I. Microstructure and properties of recycled concretes using ceramic sanitary ware industry waste as coarse aggregate. *Construction and Building Material*, 2012, 21, 112 - 118.
- [26] Senthamarai, R.M., Manoharan, P.D. and Gobinath, D. Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(5), 2413-2419.
- [27] Comisión Permanente del Hormigón. *Instrucción Hormigón Estructural. EHE-08. (Spanish Code on Structural Concrete)*. Ministerio de Fomento. Centro de Publicaciones, Madrid, 2008.
- [28] Bianchini, G., Marrocchino, E., Tassinari, R. and Vaccaro, C. Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal. *Waste Management*, 2005, 25(2), 149-159.
- [29] Ferreira, L., de Brito, J. and Saikia, N. Influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete containing recycled plastic aggregate. *Construction and Building Materials*, 2012, 36, 196-204.