

Efecto Simultáneo de los Residuos de Construcción y Demolición como Árido Grueso y Adicción al Cemento en Hormigones Estructurales

*Simultaneous Effect of Construction and Demolition Wastes as Coarse Aggregate and Cement Addiction in Structural Concretes ***

Blas Cantero Chaparro^a, Isabel Fuencisla Sáez del Bosque^b, María Isabel Sánchez de Rojas Gómez^c, Agustín Matías Sánchez^d, César Medina Martínez^e

^aIngeniero de Caminos Canales y Puertos. Personal Contratado Predoctoral. Universidad de Extremadura (UEX).

^bDoctora en Química. Personal Docente e Investigador. Universidad de Extremadura (UEX).

^cDoctora en Química. Científico Investigador. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC).

^dDoctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura (UEX).

^eDoctor Ingeniero Agrónomo. Personal Docente Investigador. Universidad de Extremadura (UEX).

RESUMEN

Esta investigación presenta un estudio experimental sobre el efecto simultáneo de incorporar residuos de construcción y demolición como árido grueso y como sustituto del cemento en las prestaciones de hormigones estructurales. Los resultados revelan que la sustitución de un 25% de cemento Portland por el material cementante suplementario (MCS), produce una caída de la resistencia a compresión menor del 10% respecto al hormigón convencional. Por otro lado, en términos de eficiencia compresiva, los hormigones fabricados con el nuevo cemento reciclado experimentan entre 1.1 y 1.2 veces mayor eficiencia compresiva que los hormigones fabricados con cemento Portland.

ABSTRACT

This study presents an experimental investigation on the simultaneous effect of incorporating construction and demolition waste as coarse aggregate and as a cement substitute in structural concretes. The findings showed that Portland cement replacement with 25% the supplementary cementitious materials (SCMs), produces a decline in compressive strength less than 10% compared to Portland cement concrete. From another perspective, in terms of the compressive strength efficiency, concretes made from the new recycled cement exhibit between 1.1 and 1.2 folds greater compressive efficiency than concretes made from Portland cement.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reciclado, áridos reciclados, polvo reciclado, resistencia a compresión.

KEYWORDS: Recycled concrete, recycled aggregate, recycled powder, compressive strength

1. Introducción

En la actualidad los residuos de construcción y demolición (RCD) se encuentran entre los residuos más importantes de la UE, y se estima que representan entre un 25% y 30% de todos los residuos generados [1]. La directiva marco UE 2008/98/CE [2] establece que para 2020, el porcentaje de reciclaje de los RCD no peligrosos, debe situarse en un 70%. Sin embargo, a día de hoy el porcentaje de reciclaje medio en la UE se sitúa aproximadamente en un 46% [3].

Una de las formas más efectivas de aumentar las tasas de reciclaje de los RCD, es reincorporarlo como nuevos materiales secundarios en distintas aplicaciones en el sector de la construcción. Según el último informe, publicado en 2016, sobre la gestión de los RCD en la UE, la mayor parte de los RCD se están reutilizando en actividades de construcción de bajo valor económico (restauración paisajista, relleno en zonas excavadas, caminos no pavimentados, etc.).

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo [4]. En la actualidad, existe un consenso entre la comunidad científica en la que es posible reutilizar hasta un 30% de áridos reciclados gruesos (procedentes de la trituración de escombros de hormigón), en hormigones estructurales. Sin embargo, la incorporación de áridos reciclados procedentes de los RCD es a día de hoy un desafío científico –tecnológico. A pesar de ello, existen diversos estudios en los cuales justifican la viabilidad de su utilización como áridos reciclados gruesos en la fabricación de hormigones estructurales [5–7].

Por otro lado, en los últimos años, están surgiendo nuevas investigaciones sobre el deseo de encontrar nuevas adiciones o materiales cementosos suplementarios (MCS) que sean

más sostenibles y reduzcan el consumo de cemento, causante del más de 5% de la emisiones de CO₂ en todo el mundo [8]. Las MCS como las cenizas volantes y el humo de sílice son ya muy conocidos por la industria del cemento [9]. En esta línea, la comunidad científica continúa en la búsqueda de nuevas adiciones que contribuyan a cerrar el ciclo económico, vital para un nuevo modelo de economía circular [10]. Fruto de estas investigaciones nuevos MCS como las escorias de alto horno [11], o cenizas procedentes de la industria la térmica [12,13] se encuentran en estudio. Además, diferentes MCS procedentes de la trituración y molienda de materiales reciclados, como cemento rehidratado [14], sanitarios de porcelana [15] o ladrillos desechados [16] están mostrando resultados prometedores como MCS sustitutos del cemento.

El presente estudio de investigación explora la viabilidad de la valorización simultánea de residuos procedentes de los RCD mixtos como áridos reciclados gruesos y como MCS en el diseño de nuevos hormigones estructurales. En particular se analiza el efecto de incorporar hasta un 25% de MCS como sustituto del cemento y hasta un 50% de áridos reciclados gruesos ambos procedentes de RCD mixtos. Para ello, se ha determinado su trabajabilidad y densidad en estado fresco, y la resistencia a compresión a los 28 días y los 90 días de curado.

2. Materiales y Metodología

2.1. Materiales

2.1.1. Cemento

Los cementos utilizados en este trabajo fueron, un cemento Portland ordinario (CPO) de clase resistente 42.5 R y sin adiciones suministrado por la industria cementera Lafarge

Holcim, Toledo, España y un cemento reciclado (CPR25) compuesto con un 25% de residuos de base cerámica (ladrillos, tejas, bloques, etc.) procedentes de la trituración y molienda de RCD. Este cemento, se encuentra registrado por la patente nº ES2512065 [15] y puede ser clasificado con un CEM II/B o CEM IV/A de clase resistente 42.5 MPa.

La Tabla 1 muestra la composición química determinada por fluorescencia de rayos X del polvo reciclado (PR-RCD) utilizado en la fabricación del cemento CPR25.

Tabla 1. Composición química del polvo reciclado (PR-RCD) y cemento reciclado (CPR25)

Óxidos	PR-RCD	CPR25
SiO ₂	59.63	31.30
Al ₂ O ₃	18.51	8.26
Fe ₂ O ₃	5.92	3.24
CaO	4.78	48.99
MgO	3.08	2.86
SO ₃	0.42	2.43
Na ₂ O	0.70	0.51
K ₂ O	3.58	1.58
TiO ₂	-	0.35
P ₂ O ₅	-	0.19
Cl	-	0.04
LOI ^a	2.15	2.66
SiO ₂ (reactiva)	35.10	-

2.1.1. Superplastificante

El superplastificante (SP) empleado en la fabricación de los hormigones es un policarboxilato modificado a base acuosa con un contenido en sólidos de un 20%, una densidad de 1.1 g/cm³ y un pH de 8.0, suministrado por FUCHS Lubricantes S.A.

2.1.1. Áridos

Los áridos reciclados fueron suministrados por una planta de procesamiento de RCD situada en Plasencia, Cáceres

(Extremadura). Estos áridos se encuentran clasificados en dos fracciones granulométricas 12/22 mm (RCD-1) y 6/12 mm (RCD-2). Los áridos naturales son áridos de machaqueo de naturaleza silíceo, contando con tres fracciones granulométricas: arena natural (AN, 0/6 mm), grava natural (GN, 12/22 mm) y gravilla natural (MN, 6/12 mm).

Las curvas granulométricas de los áridos gruesos utilizados y las limitaciones según la norma EN 12620 [17] para áridos destinados a la fabricación de hormigón, se muestran en la Figura 1

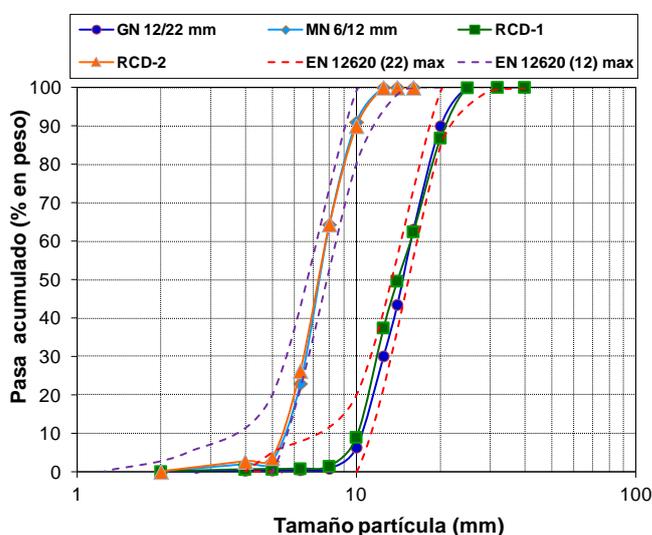


Figura 1. Distribución de partículas de los áridos gruesos y límites permitidos por la EN 12620 para áridos de hormigón.

La Tabla 2 y la Tabla 3 muestran la composición de los RCD y las propiedades físicas y mecánicas analizadas de los AN de los RCD. Respecto a la composición de los RCD, destacar su porcentaje superior al 5% en materiales cerámicos, limitación para su uso como árido grueso según el actual Código Estructural Español del Hormigón (EHE-08) [18]. Las impurezas encontradas, bituminosos y otros (yeso, partículas flotantes, vidrio, etc.) no superan el 1%. La composición de los RCD, (% de cerámicos, %hormigón y mortero, % impurezas) es heterogénea y depende del lugar de recogida y proceso de tratamiento utilizado en la planta de reciclaje [19]

Tabla 2. Composición de los áridos reciclados.

Composición (% peso)	RCD-1	RCD-2	EHE-08
Cerámica	7.2	10.9	<5
Hormigón y mortero	47.0	44.0	-
Árido desligado	44.8	43.8	-
Bituminosos	0.6	0.9	≤1
Otros	0.4	0.4	≤1

Respecto a los resultados de absorción de agua, este es uno de los factores más limitantes para el uso de RCD gruesos en la fabricación de hormigón, ambos RCD muestran valores entre 5.3% y 6.3% para el RCD-1 y RCD-2 respectivamente, superiores al 5% recomendado por la EHE-08. Estos resultados se encuentran dentro del rango (3.6 % - 7.3 %) encontrado por Agrela et al. [20] en áridos reciclados que contienen menos de un 10% de materiales cerámicos y más de un 90% hormigón.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas de los áridos gruesos naturales y reciclados

Propiedades [norma]	GN	MN	RCD-1	RCD-2	EHE-08
Densidad SSS (kg/m ³) [21]	2740	2740	2450	2420	
Absorción de agua (% en peso). [21]	0.8	0.9	5.3	6.3	<5
Coefficiente de los Ángeles (% en peso) [22].	18	16	36	32	<40
Índice de lajas (% en peso) [23]	25	21	10	10	<35

2.2. Metodología

El programa experimental comprende el diseño y fabricación de un total de seis mezclas: i) hormigón de referencia con cemento CPO y áridos naturales (HC); ii) hormigón con cemento CPO y un 25% de áridos reciclados

(HR-25), iii) hormigón con cemento CPO y un 50% de áridos reciclados (HR-50); iv) hormigón con cemento reciclado, CPR25 y áridos naturales (CR); v) hormigón con cemento CPR25 y un 25% de áridos reciclados (CR-25) y vi) hormigón con cemento CPR25 y un 50% de áridos reciclados (CR-50).

La metodología empleada para evaluar los hormigones resultantes de las distintas mezclas ha sido mediante el estudio de su estado fresco y endurecido. Respecto al estado fresco, se ha estudiado la trabajabilidad según la norma EN 12350-7 [24] y la densidad según la norma EN 12350-6 [25]. En estado endurecido se ha evaluado la resistencia a compresión a los 28 días y 90 días de curado. Para ello se han fabricado un total de 32 probetas cúbicas de 150 mm de lado. Todas se fabricaron según la norma EN 12390-1 [26] y fueron curadas bajo agua a 20 ± 2°C según la norma EN 12390-2 [27] hasta el momento de ser ensayadas.

2.3. Diseño de las mezclas

El diseño de las diferentes mezclas se realizó empleando el método de cálculo Mix British Method [28]. Este método establece como datos de partida i) resistencia objetivo del hormigón a compresión a 28 días ($f_{ck}=30$ MPa); ii) clase resistente del cemento (42.5 R); relación a/c efectiva (0.45) y iii) tamaño máximo del árido (20 mm). La Tabla 4 muestra los resultados de dosificación de todas las mezclas de hormigón. En la misma, se puede observar como en todas las mezclas se conserva la relación (a/c) efectiva constante, con el fin de comparar adecuadamente las prestaciones de los hormigones fabricados. Para ello, se han realizado correcciones mediante el método de compensación de agua por absorción de los áridos [29].

Tabla 4. Dosificación de las distintas mezclas de hormigón.

Componentes (kg/m ³)	Mezclas de hormigón					
	HC	HR-25	HR-50	CR	CR-25	CR-50
AN	732.4	720.8	705.4	732.4	720.8	705.4
GN	766.7	565.9	369.2	766.7	566.0	369.2
MN	383.0	282.7	184.4	382.0	282.7	184.4
RCD-1	-	182.8	357.8	-	182.8	357.8
RCD-2	-	90.8	177.6	-	90.75	177.6
CPO	400.0	400.0	400.0	-	-	-
CPR25	-	-	-	400.0	400	400.0
Agua	193.0	202.1	210.6	193.0	202.1	210.6
SP	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2
a/ Caparetre	0.48	0.51	0.53	0.48	0.51	0.53

3. Resultados y Discusión

3.1 Trabajabilidad

Los resultados de trabajabilidad (cono de Abrams) se muestran en la Tabla 5. Como se puede observar en la misma, todos los valores se encuentran entre 11 cm y 14 cm, correspondiente a una consistencia fluida (10-15 cm) según la EHE-08 [18]. Estos resultados revelan como la trabajabilidad de las distintas mezclas no se vio afectada por la incorporación de RCD y cemento reciclado, en consonancia con estudios previos [8,30] de hormigones reciclados, donde en la fase de diseño la humedad inicial y absorción de agua de los áridos fueron consideradas.

3.2 Densidad en estado fresco

Tanto la densidad de las mezclas fabricadas con áridos reciclados (HR-25 y HR-50) como las fabricadas conjuntamente con cemento reciclado (CR, CR-25 y CR-50) experimentan un descenso de la densidad aparente en estado fresco respecto al valor de referencia del hormigón convencional (HC). Este efecto se debe a la menor densidad de los áridos reciclados (RCD-1 y RCD-2) (ver Tabla 3) y el cemento reciclado, al incorporar la

adición procedente de la trituración y molienda procedentes de los RCD.

Tabla 5. Trabajabilidad y densidad en estado fresco de las mezclas

Mezclas	Propiedades	
	Cono de Abrams (cm)	Densidad (kg/m ³)
HC	11±1.1	2447±5.4
HR-25	13±1.3	2383±8.2
HR-50	12±1.8	2362±2.8
CR	13±2.0	2390±6.0
CR-25	13±2.3	2356±4.0
CR-50	14±2.4	2329±7.4
± Desviación estandar		

3.3 Resistencia a compresión

La Tabla 6 muestra los resultados a compresión en cubos a 28 y 90 días de curado. En la misma se puede apreciar como la incorporación de hasta un 50% de RCD (mezclas HR-25 y HR-50) no se vio afectada negativamente en los valores de resistencia compresión de los nuevos hormigones a 28 días curado. Sin embargo, la incorporación simultanea de cemento reciclado y RCD (mezclas con CPR25+RCD) provoca una caída de la resistencia los 28 días entre 10% y un 20% (mezclas CR, CR-25, CR-50). A pesar de estos descensos respecto el hormigón de referencia

(HC), todas las mezclas muestran resistencias a compresión a los 28 días de curado superiores a 30 MPa, válidos para el uso de hormigones estructurales.

Respecto a los valores de resistencia a compresión a los 90 días de curado, la mezclas HR-25 y HR-50 experimentan descensos hasta de un 7% respecto a la mezcla HC, mientras que los hormigones con cemento reciclado y RCD descienden hasta un 17%. Estos descensos observados son muy inferiores a la tasa de sustitución tanto de polvo reciclado (25%) como de RCD (50%) en los nuevos hormigones reciclados.

Finalmente, considerando los resultados a compresión a los 28 días y 90 días de curado, la incorporación de RCD y la incorporación simultanea de CPR25+RCD en el diseño de hormigones estructurales, no muestra efectos adversos en la velocidad de endurecimientos de los nuevos hormigones.

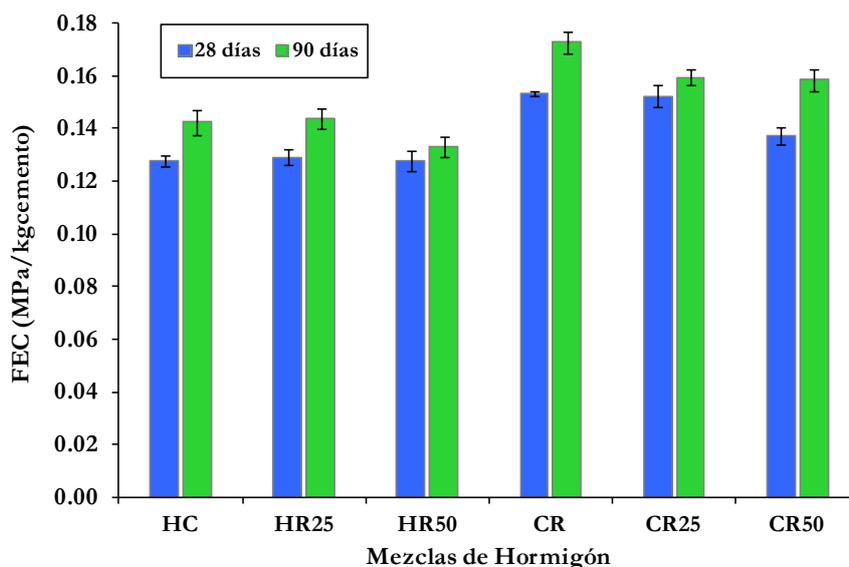
Tabla 6. Resultados a compresión en cubos a los 28 y 90 días de curado

Mezclas	Resistencia a compresión (MPa)	
	28 días	90 días
HC	51.2 ± 0.2	56.9±0.8
HR-25	51.7 ± 0.6	57.1±0.7
HR-50	51.1 ±0.6	53.2±0.4
CR	46.1 ± 0.6	51.8±0.7
CR-25	45.7 ± 1.4	47.9±0.5
CR-50	41.2 ± 0.1	47.5±1.1
± Disviación estandar		

3.4 Eficiencia a compresión

La Figura 2 muestra el factor de eficiencia a compresión (FEC) en los hormigones fabricados a 28 y 90 días de curado. El FEC se ha calculado como la relación entre la resistencia a compresión y la cantidad de cemento OPC utilizada en la fabricación de las mezclas. El FEC toma unidades de MPa/kg cemento. Este parámetro puede dar una idea de la contribución de la adición de PR-RCD al nuevo cemento reciclado en la resistencia a compresión. Como se puede observar en la Figura 2 los hormigones fabricados con el nuevo cemento reciclado (CPR25) muestran un FEC superior respecto a los hormigones fabricados con cemento convencional, tanto en las mezclas con árido natural (HC) como con árido reciclado (HR-25 y HR-50). Además, los hormigones fabricados con el nuevo cemento CPR25 mostraron una mayor mejora a los 90 días de curado entre 1.1 y 1.2 veces mayor respecto a los hormigones fabricados con el cemento CPO. Estos resultados se encuentran relacionados con el carácter puzolánico de estos residuos por el que desarrollan un mayor refinamiento del sistema poroso a largas edades [8]. Asimismo, estos resultados se encuentran en consonancia con las observaciones previas en hormigones fabricados con áridos reciclados de hormigón, cenizas volantes y humo de sílice [31,32].

Figura 2. Factor de eficiencia a compresión (FEC) de las mezclas de hormigón a los 28 y 90 días de curado.



4. Conclusiones

Las principales conclusiones que pueden extraerse de la presente investigación son:

- La incorporación de áridos reciclados y cemento reciclado no causó un efecto negativo en la trabajabilidad de los nuevos hormigones con la misma relación a/c efectiva.
- Los hormigones fabricados con cemento reciclado han mostrado un mayor descenso respecto a la densidad en estado fresco, provocado por la sustitución de polvo reciclado de menor densidad.
- La resistencia a compresión a 28 días y a 90 días de curado se ve afectada principalmente por el tipo de cemento. Sin embargo los descensos observados no superan el 20% respecto los hormigones fabricados con cemento Portland.
- Los hormigones fabricados con el nuevo cemento reciclado procedente de los residuos de construcción y demolición muestran una mayor eficiencia compresiva tanto a los 28 como a los 92 días de curado respecto a los hormigones convencionales fabricados con cemento Portland.

Agradecimientos

La presentación de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del proyecto europeo Interreg-POCTEP “0008_ECO2CIR_4_E” por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea; así como a través de la ayuda GR18122 al grupo MATERIA financiada por la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea.

Referencias

- [1] European Commission, Construction and demolition waste report, (n.d). http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/mixed_waste.htm#links.
- [2] Directive 2008/98/EC. of the European Parliament and of the Council of 19 November, 2008. On Waste and Repealing Certain Directives, (2017). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>.
- [3] E. Comision, Construction and Demolition Waste Protocol, (2016). http://ec.europa.eu/growth/content/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-0_en, (n.d).
- [4] P.D. P. Kumar Mehta, P.D. Paulo J. M. Monteiro, Proportioning Concrete Mixtures, in: Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition,

- McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2014. <https://www.accessengineeringlibrary.com:443/browse/concrete-microstructure-properties-and-materials-fourth-edition/c9780071797870ch09>.
- [5] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M.I. Sánchez de Rojas, M. Frías, Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete, *Journal of Cleaner Production*. 68 (2014) 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.002>.
- [6] A. Ossa, J.L. García, E. Botero, Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry, *Journal of Cleaner Production*. 135 (2016) 379–386. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088>.
- [7] M. Bravo, J. de Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants, *Journal of Cleaner Production*. 99 (2015) 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>.
- [8] B. Cantero, I.F. Sáez del Bosque, A. Matías, M.I. Sánchez de Rojas, C. Medina, Inclusion of construction and demolition waste as a coarse aggregate and a cement addition in structural concrete design, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 19 (2019) 1338–1352. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.08.004>.
- [9] S.C. Kou, C.S. Poon, D. Chan, Influence of Fly Ash as Cement Replacement on the Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*. 19 (2007) 709–717. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:9\(709\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:9(709)).
- [10] C. economy-G.-E. Commission, http://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_en, (2017).
- [11] M. Alnahhal, U. Alengaram, M. Jumaat, M. Alqedra, K. Mo, M. Sumesh, Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolanic Materials in Recycled Aggregate Concrete, *Sustainability*. 9 (2017) 767.
- [12] K.M. Rahla, R. Mateus, L. Bragança, Comparative sustainability assessment of binary blended concretes using Supplementary Cementitious Materials (SCMs) and Ordinary Portland Cement (OPC), *Journal of Cleaner Production*. 220 (2019) 445–459. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.010>.
- [13] M.G. Beltran, F. Agrela, A. Barbudo, J. Ayuso, A. Ramirez, Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates, *Construction and Building Materials*. 72 (2014) 231–238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.019>.
- [14] V. Letelier, E. Tarela, P. Muñoz, G. Moriconi, Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete, *Construction and Building Materials*. 132 (2017) 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>.
- [15] M.F. M. I. Sánchez de Rojas E. Asensio, C. Medina, Sanitary Ware Waste for Cements Manufacture, Obtention Proceeding and Cements that are Included, PCT/ES2014/070406, (2014).
- [16] V. Letelier, J. Ortega, P. Muñoz, E. Tarela, G. Moriconi, Influence of Waste Brick Powder in the Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Sustainability*. 10 (2018) 1037.
- [17] European Committee for Standardization, EN 12620. Aggregates for concrete, 2013.
- [18] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción Hormigón Estructural. EHE-08 (Spanish Code on Structural Concrete), (2008).
- [19] G. Rodriguez, C. Medina, F.J. Alegre, E. Asensio, M.I. Sanchez de Rojas, Assessment of Construction and Demolition Waste plant management in Spain: in pursuit of sustainability and eco-efficiency, *Journal of Cleaner Production*. 90 (2015) 16–24.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.067>.
- [20] F. Agrela, M. Sanchez de Juan, J. Ayuso, V.L. Geraldes, J.R. Jimenez, Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete, *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 3950–3955. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027>.
- [21] European Committee for Standardization, EN 1097. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption., 2014.
- [22] European Committee for Standardization, EN 1097. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 2: Methods for the determination of resistance to fragmentation, 2010.
- [23] European Committee for Standardization, EN 933. Tests for geometrical properties of aggregates. Part 3: Determination of particle shape - Flakiness index., 2012.
- [24] European Committee for Standardization, EN 12350. Testing fresh concrete. Part 2: Slump-test., 2009.
- [25] European Committee for Standardization, EN 12350. Testing fresh concrete. Part 6: Density., 2009.
- [26] European Committee for Standardization, EN 206. Concrete. Part 1: Specification, performance, production and conformity., 2008.
- [27] European Committee for Standardization, EN-12390. Testing hardened concrete. Part 2: Making and curing specimens for strength tests, 2009.
- [28] Teychenné D.C, Franklin R. E., Design of normal concrete mixes, (2010) 42.
- [29] L. Ferreira, J. de Brito, M. Barra, Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties, *Magazine of Concrete Research*. 63 (2011) 617–627. <https://doi.org/10.1680/mac.2011.63.8.617>.
- [30] B. Cantero, I.F. Sáez del Bosque, A. Matías, C. Medina, Statistically significant effects of mixed recycled aggregate on the physical-mechanical properties of structural concretes, *Construction and Building Materials*. 185 (2018) 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.060>.
- [31] C. Lima, A. Caggiano, C. Faella, E. Martinelli, M. Pepe, R. Realfonzo, Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash, *Construction and Building Materials*. 47 (2013) 547–559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.051>.
- [32] N.K. Bui, T. Satomi, H. Takahashi, Influence of industrial by-products and waste paper sludge ash on properties of recycled aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*. 214 (2019) 403–418. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.325>.