

VALORIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA CIVIL

B. Cantero^{1}, I. F. Sáez del Bosque¹, A. Matías¹, M. Frías², M. I. Sánchez de Rojas², C. Medina^{1**}*

¹Departamento de Construcción Escuela Politécnica de Cáceres, Unidad Asociada "SOSMAT"
UEX-CSIC, Universidad de Extremadura
Avenida de la Universidad s/n, 10003, Cáceres (España)
e-mail: bcanterochaparro@gmail.com*/cmedinam@unex.es**

²Departamento de Cemento y Reciclado de Materiales, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Consejo Superior de Investigaciones Científicas
C/ Serrano Galvache, 4, 28033, Madrid (España)

Resumen: La reutilización de los residuos procedentes de la actividad de la construcción y demolición es un aspecto prioritario en el actual contexto europeo de sostenibilidad que trata de reducir y minimizar el volumen de residuos que son generados en las actividades industriales y su posterior acumulación en vertederos. Los residuos derivados de estas actividades constituyen uno de los flujos más importantes de residuos tanto en el ámbito nacional como en el europeo. El presente trabajo de investigación versa sobre la caracterización de los áridos reciclados resultantes en el proceso tecnológico llevado a cabo en diferentes plantas de gestión de residuos de la construcción y demolición (RCD) de la comunidad autónoma de Extremadura, evaluando de este modo su posible aplicabilidad dentro del ámbito de la ingeniería civil. Los resultados obtenidos permiten establecer que los áridos reciclados analizados cumplen, en su mayoría, con las recomendaciones exigidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) para su uso como capas estructurales (sub-base) y para capas de firme de categoría de tráfico pesado T2 a T4.

Palabras clave: áridos reciclados, construcción, demolición, valorización, sub-base.

1.- INTRODUCCIÓN.

Los residuos constituyen unos de los principales retos de las sociedades modernas, en particular de las más avanzadas e industrializadas [1], basadas en un modelo económico de crecimiento lineal (extraer, producir, consumir y eliminar). Actualmente, este modelo de crecimiento supone una amenaza en la competitividad y sostenibilidad de las sociedades modernas. Por ello, las nuevas políticas europeas estimulan el desarrollo de una economía circular, en la cual el valor de los productos, materiales y recursos se mantengan durante el mayor tiempo posible, minimizando la generación de residuos, y contribuyendo a un crecimiento de la sociedad inteligente y sostenible (Estrategia Europea 2020) [2]. En España se generaron 27 millones de toneladas de residuos en el año 2012, según datos del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 [3], de los cuales un tercio de los residuos generados fueron residuos de la construcción y demolición (RCD) [4]. Muchos de estos materiales son reciclables, de manera que pueden recuperarse y transformarse para su uso en un nuevo ciclo de vida útil. El reciclado de los residuos procedentes de la construcción y demolición se regula mediante la normativa Europea [5], nacional y autonómica de gestión de residuos, en las cuales se establece que la tasa de valorización de estos residuos sea igual o superior a un 70% para el año 2020. Actualmente, la tasa de reutilización de RCD en España varía entre el 14% - 17% [6], muy lejos del objetivo

marcado a nivel europeo, lo que supone la necesidad por parte de las administraciones autonómicas y locales, del desarrollo de instrumentos normativos que favorezcan y premien aquellos proyectos o actuaciones que prevean la reutilización de los residuos en las distintas fases de ejecución de la obra. En base a esta finalidad y con el objetivo de alcanzar una mayor tasa de valorización se han publicado algunas normas sobre el uso de áridos reciclados.

Una de ellas es la Orden/FOM/2523/2014 de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos (PG-3) permitiendo el uso de áridos reciclados como material granular para capas estructurales de firme de categoría de tráfico pesado T2 a T4 [7], correspondiente al 64% del total de la red de carreteras del estado [8]. Por otro lado la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-2008) introduce en su Anejo 15 y 19 la posibilidad de utilizar áridos reciclados gruesos en la fabricación de hormigón estructural no estructural, respectivamente [9].

En este trabajo de investigación se han analizado los áridos resultantes del proceso de gestión de diferentes plantas de RCD de la comunidad de Extremadura,

evaluando su posible uso como capas estructurales (sub-base) para capas de firme.

2.- MATERIALES Y METODOLOGÍA.

2.1- Materiales.

Para este estudio, se tomaron 4 muestras de áridos reciclados (ZA-1 a ZA-4) procedentes de varias plantas fijas de reciclado de la comunidad de Extremadura. Para cada material se recogieron muestras representativas de los acopios de las plantas, siguiendo las recomendaciones de la norma UNEEN 932-1.

2.2- Metodología.

Una vez recogidas las muestras y recepcionadas en el laboratorio, se llevó a cabo un pre-acondicionamiento de las mismas, consistiendo éste en introducir los áridos en el interior de una estufa a 50 °C durante aproximadamente 72 horas, hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se procedió a la caracterización composicional de las mismas, según la norma EN 933-11. Una vez clasificados, se procedió a estudiar su potencial uso como material de construcción en ingeniería civil, estudiándose los requisitos exigidos en el artículo 510 “Zahorras” del PG-3, que establece los requisitos de los materiales granulares para su uso en capas de firme. La Tabla 1, muestra las propiedades estudiadas y la metodología empleada para llevar a cabo la caracterización geométrica, física, mecánica y química de los áridos reciclados.

Tabla 1. Ensayos de caracterización realizados a los áridos reciclados.

Propiedad	Parámetro	Norma
Geométrica	Distribución de Partículas	UNE EN 933-1
	Índice de Lajas	UNE EN 933-3
Física	Equivalente de Arena	UNE EN 933-8
	Plasticidad	UNE 103103-103104
	Caras de Fractura	UNE EN 933-5
Mecánica	Coefficiente de los Ángeles	UNE EN 1097-2
Química	Pérdida en el Ensayo de Sulfato de Magnesio	UNE EN 1367-2
	Contenido en Azufre	UNE EN 1744-1
	Contenido en Sulfatos Solubles	UNE EN 1744-1

Para la realización de todos los ensayos fue necesario tomar a partir de la muestra recepcionada una muestra representativa de los áridos, según la norma UNE EN 932-2.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

3.1- Clasificación composicional.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la clasificación composicional de la fracción 5/40 mm de los áridos analizados.

En la misma, puede observarse que los áridos reciclados están constituidos principalmente por hormigón, mortero, áridos naturales con mortero adherido (51,49% - 83,65%) y árido natural sin mortero adherido (14,18%

- 40,30%). Asimismo, también se pueden encontrar de forma minoritaria otros componentes, tales como: material cerámico (0,16% - 0,90%) y materiales bituminosos (1,63% - 7,29%). A partir de estos resultados, los cuatro áridos reciclados pueden clasificarse como áridos reciclados de hormigón al tener un contenido de Rc+Ru >95% peso tal y como queda definido en la EHE-08 [9].

Tabla 2. Composición de los áridos reciclados.

Clase	Tipo	Peso %			
		ZA-1	ZA-2	ZA-3	ZA-4
Rc	Hormigón y mortero	83,65	51,49	78,81	58,50
Ru	Árido natural	14,18	40,30	19,51	36,14
Rb	Material cerámico	0,51	0,90	0,93	0,16
Ra	Material bituminoso	1,63	7,29	0,70	5,17
Y	Yeso	0,00	0,01	0,00	0,00
FL	Partículas flotantes	0,02	0,00	0,05	0,03
X2	Otros ^(a)	0,00	0,00	0,00	0,00

(a) Madera, vidrio, plástico, metales.

3.2- Distribución de partículas.

La Figura 1 muestra los resultados granulométricos de los cuatro áridos analizados, así como los husos granulométricos fijados (ZA 0/32 y ZA 0/20) por el PG-3. Como se puede observar en la misma, la distribución granulométrica de los áridos ZA-1 y ZA-2 se encuentran dentro del huso granulométrico de la ZA 0/32, y los áridos ZA-3 y ZA-4 están dentro del huso granulométrico de la ZA 0/20. Adicionalmente, todos los áridos estudiados cumplen que el cernido por el tamiz 0,063 mm es menor a dos tercios del cernido por el tamiz 0,250 mm de la misma norma. La distribución granulométrica continua de los áridos estudiados permitirá alcanzar una mayor interacción entre partículas y por lo tanto un mayor grado de compacidad y resistencia mecánica en las capas de firme [10].

3.3- Caracterización como material para sub bases de carretera.

La Tabla 3 recoge los resultados de caracterización física, mecánica y química de los áridos reciclados, así como los límites establecidos por el PG-3 para categorías de tráfico de T2 a T4 (menos de 800 vehículos pesados/día). Los valores obtenidos en este trabajo se encuentran en el rango de valores obtenidos previamente por otros autores [10] [11] [12] [13].

Como se puede observar en la tabla los áridos reciclados analizados cumplen en su mayoría con los límites establecidos por la norma. Adicionalmente, todos los materiales son no plásticos y su índice de Lajas se encuentra por debajo del valor límite marcado por el PG-3.

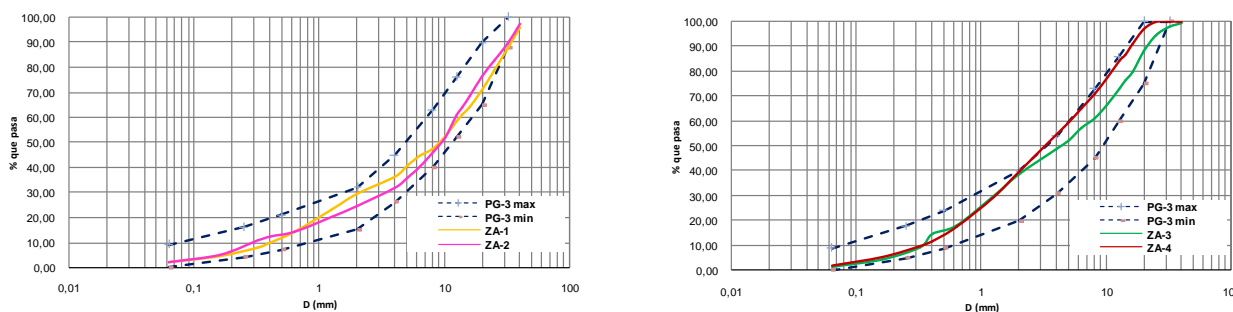


Figura 1. Husos granulométricos de ZA 0/32 (izq), ZA0/20 (der) según PG-3 y distribución granulométrica de los áridos reciclados (% en masa que pasa)

Respecto a las caras de fractura (partículas trituradas y totalmente redondeadas) indicar que no se trata de una propiedad crítica, puesto que todos los áridos reciclados cumplen con el límite establecido por el PG-3, excepto la ZA-3 que tiene un porcentaje de caras totalmente redondeadas un poco superior al requisito exigido.

En cuanto a la resistencia a la fragmentación, esta propiedad está intrínsecamente relacionado con su composición. Los resultados obtenidos permiten observar que los áridos reciclados tienen coeficientes de

los Ángeles superiores al 30% y 35% en peso, incumpliendo de este modo el límite establecido para las categorías de tráfico de T2 a T4, respectivamente. Sin embargo, los valores obtenidos (34%-43%) se encuentran en consonancia a los obtenidos previamente por otros autores [14] [15] [16]. Estos valores obtenidos se deben a la presencia de mortero adherido y hormigón en la composición de los áridos reciclados. Estos componentes se caracterizan por ser materiales porosos, presentar grietas y tener una menor resistencia al desgaste [17] [18].

Tabla 3. Propiedades de los áridos reciclados y límites establecidos por el PG-3

Propiedad	ZA-1	ZA-2	ZA-3	ZA-4	Límite PG-3
Índice de Lajas (IF) (% en peso)	6,3	9,4	12,9	12,5	FI<35
Partículas trituradas (% peso)	79	92	85	89	T1-T2 ≥ 70 T3-T4 ≥ 50
Partículas totalmente redondeadas (% en peso)	7	3	12	10	T1-T4 ≤ 10
Coefficiente de los Ángeles (LA) (% en peso)	41	34	43	38	T00-T2 ≤ 30 T3-T4 ≤ 35
Equivalente de arena (SE) (mm)	38	41	53	44	T2-T4 > 35
Plasticidad	NP	NP	NP	NP	No Plástico (NP)
Sulfato de Magnesio (MgO) (% en peso)	9,7	10,9	10,4	10,2	≤ 18 %
Compuestos de azufres totales (S) (% en peso)	0,19	0,12	0,16	0,08	≤ 0,5 % ^(a) ≤ 1 % ^(b)
Sulfatos solubles (SO ₃) (% en peso)	0,06	0,06	0,07	0,03	< 0,7 %

(a) Materiales en contacto con capas tratadas con cemento, (b) Resto de casos

La pérdida de peso de los áridos reciclados tras 5 ciclos de inmersión en sulfato de magnesio se encuentra por debajo de los límites establecidos en la norma, garantizando de este modo la estabilidad de los mismos frente a los cambios térmicos, lo que permitirá garantizar la estabilidad de los mismos a lo largo de su vida de servicio.

Finalmente, el contenido de compuestos de azufre totales y sulfatos solubles de los áridos reciclados se encuentran por debajo del límite marcado por el PG-3.

4.- CONCLUSIONES.

En este trabajo de investigación se han estudiado cuatro áridos reciclados procedentes de diferentes plantas de reciclaje ubicadas en la comunidad autónoma de Extremadura, con el fin de estudiar su potencial uso como material de construcción en ingeniería civil.

Las principales conclusiones extraídas del presente trabajo son:

- Los áridos reciclados analizados cumplen, en su mayoría, los requisitos físicos, químicos, mecánicos y durables marcados en el PG-3 para su uso como zahorras en la construcción de sub-bases para carreteras de categoría de tráfico pesado T2 a T4.
- La propiedad crítica de estos materiales reciclados para su uso en la construcción de capas estructurarles es el la resistencia a la fragmentación.
- El uso de áridos reciclados procedentes de los RCD, como material de construcción en ingeniería civil, es una solución viable. Su valorización como material de construcción podrá contribuir a aumentar la tasa de reciclaje en España, reducir la necesidad de recursos primarios (minerales y energía), reducir el coste en las obras de construcción y disminuir el impacto ambiental en la búsqueda y apertura de nuevas canteras

- Los ensayos de caracterización realizados en este estudio deben complementarse con ensayos en tramos de prueba de carreteras, para evaluar su uso potencial y superar de este modo la desconfianza existente por los ingenieros en el uso de estos nuevos materiales.

5.- AGRADECIMIENTOS

Finalmente, señalar que este trabajo ha sido realizado gracias a la financiación de los proyectos de investigación BIA 2013-48876-C3-1-R and BIA 2013-48876-C3-2-R concedidos por el Ministerio de Ciencias e Innovación, así como por el convenio de colaboración entre la Consejería de Fomento, Vivienda, Ordenación del Territorio y Turismo de la Junta de Extremadura y la Universidad de Extremadura para el desarrollo de un proyecto de investigación sobre “Valorización de los residuos de la construcción y demolición (RCD) en aplicaciones dentro del ámbito de las infraestructuras viarias”. Asimismo, agradecer la financiación de la ayuda GR 15064 concedida al grupo de investigación MATERIA por parte de la Junta de Extremadura y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional – FEDER.

6.- REFERENCIAS

[1] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, "Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015," ed. BOE, nº49 (26/02/2009).

[2] Comisión E. (2016). Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe. <http://ec.europa.eu/environment/circulareconomy/pdf/circular-economy-communication.pdf>

[3] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. "Resolución de 16 de noviembre de 2015, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros de 6 de noviembre de 2015, por el que se aprueba el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022," BOE, nº 297 (12/12/2015).

[4] Comisión E. "Service contract on management of construction and demolition waste-SR1. European Commission," ed, 2011.

[5] Ministerio de la Presidencia, "RD 105/2008 por la que se regula la producción y gestión de los residuos de la construcción y demolición,"BOE, nº 38 (13/02/2008).

[6] C. Medina, W. Zhu, T. Howind, M. Frías, and M. S. de Rojas, "Effect of the constituents (asphalt, clay materials, floating particles and fines) of construction and demolition waste on the properties of recycled concretes," *Construction and Building Materials*, vol. 79, pp. 22-33, 2015.

[7] Ministerio de Fomento, "Orden FOM/2523/2014, del 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes (PG-3/75), relativos a materiales básicos, a firmes y

pavimentos, y a señalización y balizamiento de vehículos.," ed. BOE, 2015, pp. 584-1096.

[8] Marianini A. C , "Jornadas sobre el reciclaje de residuos como materiales alternativos a la construcción," ed, 2015.

[9] Ministerio de Fomento, "Instrucción Hormigón Estructural. EHE-08," ed. BOE, 2008, pp. 1-304.

[10]C Medina, I. F., Sánchez del Bosque. Matías, B. Cantero, E. Asensio, and M.I., Sánchez, "Recycled aggregate: Compliance with legal requirements," ed. II International Conference on Concrete Sustainability ICCS16, 2016, pp. 1360-1367.

[11]F. Agrela, J. Ayuso, and M. López, "Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras," *Materiales de construcción*, vol. 61, pp. 289-302, 2011.

[12]A. R. Chini, S.-S. Kuo, J. M. Armaghani, and J. P. Duxbury, "Test of recycled concrete aggregate in accelerated test track," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 127, pp. 486-492, 2001.

[13]T. C. Hansen and H. Narud, "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate," *Concrete International*, vol. 5, pp. 79-83, 1983.

[14]R. S. Ravindrarajah, Y. Loo, and C. Tam, "Recycled concrete as fine and coarse aggregates in concrete," *Magazine of Concrete Research*, vol. 39, pp. 214-220, 1987.

[15]M. S. De Juan and P. A. Gutiérrez, "Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 872-877, 2009.

[16]V. W. Tam, X. Gao, and C. Tam, "Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, pp. 1195-1203, 2005.

[17]I. Vegas, J. Ibañez, J. San José, and A. Urzelai, "Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction," *Waste Management*, vol. 28, pp. 565-574, 2008.

[18]T. Park, "Application of construction and building debris as base and subbase materials in rigid pavement," *Journal of Transportation Engineering*, vol. 129, pp. 558-563, 2003.