

Propuesta de clasificación de áridos reciclados mixtos acorde con sus características técnicas y medioambiental*

*Proposal for the classification of mixed recycled aggregates according to their technical and environmental characteristics***

Manuel Cabrera Montenegro^a, José Luis Díaz López^b, Francisco Agrela Sainz^{*,c},

Herminia Cano Linares^d, Julia Rosales García^a

^aDr. Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^bPhD student, Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^cProf. Dr. Area of Construction Engineering, University of Cordoba, Cordoba, Spain

^dDr. Ministry of Transport, Mobility and Urban Agenda. Government of Spain

RESUMEN

La gran cantidad de residuos de construcción y demolición generados en Europa y el nuevo marco legal que regula su valorización en el horizonte 2020, lleva a plantear nuevos usos. Este trabajo muestra un estudio de los áridos reciclados mixtos procedentes de residuos de construcción y demolición con objeto de plantear una clasificación clara e internacional para facilitar su implantación.

Se estudió las propiedades fisicoquímicas y composición de los áridos para tener unos parámetros objetivos de clasificación. Además, se estudió el comportamiento mecánico y análisis ambiental de los lixiviados demostrando la viabilidad técnica y ambiental para su uso en obras de ingeniería civil.

ABSTRACT

The large amount of construction and demolition waste generated in Europe and the new legal framework that regulates its recovery in the 2020 horizon, leads to propose new uses. This work shows a study of recycled mixed aggregates from construction and demolition waste in order to propose a clear and international classification to facilitate its implementation. The physicochemical properties and composition of the aggregates were studied in order to have objective classification parameters. In addition, the mechanical behaviour and environmental analysis of the leachates were studied, demonstrating the technical and environmental viability for their use in civil engineering project.

PALABRAS CLAVE: Residuos de construcción y demolición; áridos reciclados mixtos; propiedades técnicas; lixiviación.

KEYWORDS: Construction and demolition waste; recycled mixed aggregates; technical properties; leachate.

1. Introducción

En Europa en 2016, se generaron aproximadamente 925 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición (RCD), lo que representa el 36,4% del total de residuos generados por todos los países miembros. Para cumplir con las indicaciones de la Directiva Marco de Residuos del Parlamento Europeo sobre residuos para el horizonte 2020, los Estados miembros deben aumentar su tasa de valorización de RCD no peligrosos a un mínimo del 70% en peso.

Hay tres tipos principales de AR obtenidos de a partir de RCD: árido reciclado de hormigón (ARH), compuesto de partículas de hormigón triturado, árido reciclado de mampostería (RMA) compuesto de partículas de cerámica trituradas y árido reciclado mixto (ARM) compuesto de una mezcla de los diferentes materiales de RCD. [1]

En España se han realizado varios estudios de caracterización de ARM en los últimos años [2][3] y numerosos estudios internacionales han demostrado las posibilidades de uso como materiales en la construcción de carreteras [4]; [5]; hormigón reciclado [6] y otras aplicaciones en la fabricación de morteros [7].

Desde un punto de vista medioambiental, es muy importante caracterizar los lixiviados producidos por los áridos reciclados para garantizar la seguridad en el uso de estos materiales [8]. Las pruebas de lixiviación se centran en determinar las concentraciones de contaminantes que están limitadas por la directiva europea 2003/33 / EEC de admisión a vertederos. Los diferentes usos de ARM implican diferentes problemas derivados de la lixiviación, así pues, la fabricación de hormigón está limitada por la concentración de sulfatos [3] o la ejecución de las capas de la carretera que está limitada por la concentración de metales pesados [9].

En este estudio, las características fisicoquímicas de la ARM fueron estudiadas para establecer una clasificación internacional de los diferentes tipos. Este estudio también analizó el comportamiento mecánico de la ARM, que determina sus usos potenciales en la aplicación de construcción de carreteras. Finalmente, los aspectos medioambientales se analizaron mediante el análisis de lixiviación de los materiales para garantizar el cumplimiento de la normativa europea sobre vertederos, además del impacto medioambiental del ARM.

2. Propuesta de clasificación de áridos reciclados

Brito, Agrela y Silva [10] presentaron una propuesta para la clasificación de seis tipos de agregados reciclados (AR) que pueden usarse para la construcción de carreteras, con el fin de simplemente su uso. En esta propuesta de clasificación, los AR se clasifican de acuerdo con su composición principal y una serie de propiedades fisicoquímicas (composición, densidad, absorción de agua, ensayo de abrasión los Ángeles y sulfatos solubles en agua) determinadas a través normas internacionales.

En el presente estudio, se propone la siguiente clasificación (Tabla 1), para ampliar y mejorar la presentada por Brito, Agrela y Silva (2019a). La clasificación muestra cuatro tipos de AR. El tipo ARH (árido reciclado de hormigón), es el árido de mayor calidad, compuesto principalmente por partículas de hormigón y áridos naturales, un mínimo de 90% en peso. El ARM se divide en tres tipos (I, II y III) dependiendo de las cantidades de hormigón, árido natural y mampostería que lo componen. Es el tipo de AR que se obtiene más comúnmente de las plantas de reciclaje de RCD, ya que incluye más cantidad de residuos con un menor proceso de separación. [11]

Además, se limitan los valores de contenido en yeso y sulfatos solubles en ácido, de acuerdo a los resultados obtenidos en estudios previos [12] con objeto de garantizar los límites legales de sulfatos

lixiviados impuestos en la Directiva de vertederos de la UE.

Tabla 1. Propuesta de clasificación de áridos reciclados

Tipo de AR propuesto	Composición					Densidad mínima (SSD)	Absorción de agua (%)	Los Angeles (%)	Sulfatos solubles en agua (%)	Sulfatos solubles En ácido (%)
	Rh+Rn (%)	Rc (%)	Rb (%)	yeso (%)	Otros (No yeso) (%)					
ARH	> 90	<10	<5	<0.5	<0.5	2200	<6	<35	<0.8	<0.9
ARM-I	>70	<30	<10	<2	<3	1900	<8	<40	<0.8	<1.0
ARM-II	>60	<40	<20	<3	<5	1800	<12	<45	<1.0	<1.3
ARM-III	>40	<60	<30	<5	<10	1650	<15	<50	<1.2	<1.6

Rh: Hormigón y productos derivados; Rn: Áridos naturales; Rc: Material cerámico, silicatos cálcicos y restos de mampostería; Rb: materiales bituminosos

La composición principal de los áridos reciclados se determina mediante la norma EN-12620: 20021A1: 2008.

3. Materiales, métodos experimentales y resultados

En el presente apartado se muestran las características fisicoquímicas, comportamiento mecánico y evaluación ambiental de los lixiviados producidos por los áridos reciclados mixtos analizados.

3.1 Materiales

Se han estudiado tres áridos reciclados mixtos (ARM-A, ARM-B y ARM-C) procedentes de la planta de tratamiento de RCD GECORSA SL., ubicada en Córdoba (España), obtenidos a través de diferentes fases en la planta, tal y como se muestra en la figura 1.

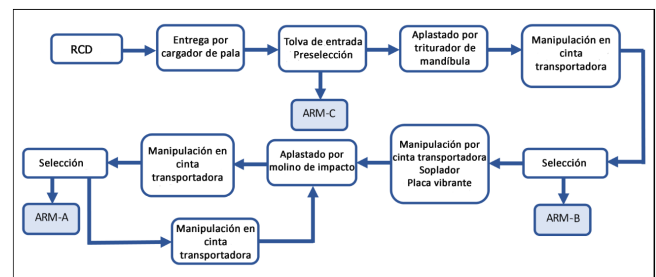


Figura 1. Esquema de producción de los ARM

El árido ARM-C, es obtenido en el primer precibado de la planta, el ARM-B se obtiene de un proceso de trituración y cribado, y el ARM-A, es obtenido después del proceso completo en planta. La calidad de los ARM aumenta con la complejidad del tratamiento para su obtención.

Tabla 2. Composición de los áridos reciclados mixtos

Composición	Rh+Rn (%)	Rc (%)	Rb (%)	Yeso (%)	Otros (No yeso) (%)
ARM-A	83.76	10.78	0.28	3.78	1.4
ARM-B	69.77	22.09	0.68	7.40	0.06
ARM-C	64.89	15.22	5.59	9.25	5.05

Las propiedades fisicoquímicas mostradas en la tabla 1, han sido determinadas para las tres

muestras estudiadas en el presente artículo (Tabla 3), asimismo la composición de los ARM estudiados se muestra en la Tabla 2.

Atendiendo a los criterios de clasificación expuestos y a las propiedades de las muestras

analizadas, la clasificación de cada una de ellas es la mostrada en la tabla 4.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas de los áridos reciclados mixtos

Propiedades	ARM-A	ARM-B	ARM-C	Norma utilizada
Contenido en sulfates soluble en agua (%SO ₃)	0.85	1.05	2.9	UNE-EN 1744-1
Contenido en sulfates soluble en ácido (%SO ₃)	1.07	1.05	2.9	UNE-EN 1744-1
Sales solubles en agua (%)	1.47	2.45	3.22	UNE-EN 1744-1
Materia orgánica (%)	0.33	0.93	1.07	UNE 103204
Densidad-SSD (Mg/m ³)				UNE-EN 1097 - 6
0-4 mm	2.17	2.18	2.33	
4-31.5 mm	2.27	2.30	2.30	
Absorción de agua (%)				UNE-EN 1097 - 6
0-4 mm	6.30	5.90	4.10	
4-31.5 mm	7.40	6.90	6.10	
Los Ángeles	34	36	40	UNEEN 1097 - 2

Tabla 4. Clasificación de los áridos reciclados mixtos analizados

AR	Clasificación
ARM-A	ARM-II
ARM-B	ARM-III
ARM-C	No clasificable

3.2 Comportamiento mecánico

El comportamiento mecánico de las muestras de ARM se ha evaluado a través de los ensayos Proctor modificado (UNE 103501:1994) y obtención de índice CBR (UNE 103502:1995).

En ensayo proctor modificado se utiliza para determinar las propiedades de compactación de un suelo, específicamente, para determinar el contenido óptimo de agua para el cual el suelo puede alcanzar su máxima densidad en seco. Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 2, donde se observa que la muestra ARM-A

presenta la mayor densidad seca máxima de las muestras analizadas, 1,95 Mg/m³, siendo ARM-C el árido que menor densidad seca obtuvo, 1,85 Mg/m³, para un mayor contenido en agua, 13,8%.

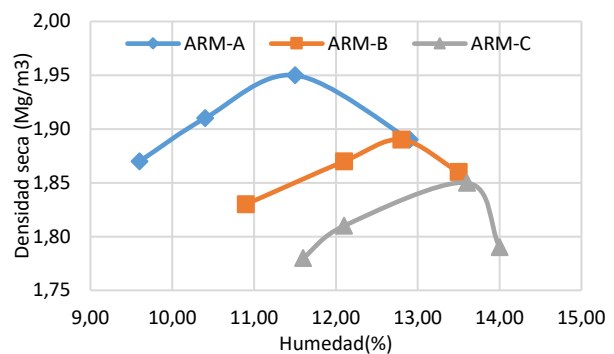


Figura 2. Curvas densidad seca – humedad

El índice CBR, permite estimar la capacidad portante de un suelo.

De acuerdo a los resultados obtenidos, figura 3, en condiciones de no saturación de las probetas, la muestra ARM-A presentó el valor

más alto de CBR (136.87%) seguido de la muestra ARM-B (106.88%). La muestra ARM-C mostró la capacidad de carga más baja (75,97%). Los valores medidos son consistentes con los datos obtenidos por autores anteriores que caracterizaron los áridos reciclados para su aplicación en infraestructuras civiles [13]. De la

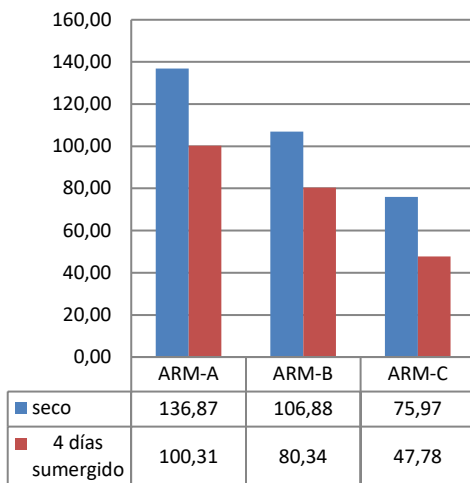


Figura 3. Índice CBR

3.3 Análisis ambiental de los lixiviados producidos

Ensayo de conformidad para la lixiviación (UNE-EN 12457-4:2003) fue aplicado en este estudio para las tres muestras de ARM con objeto de clasificar los ARM de acuerdo con la Directiva de vertederos de la UE. Para ello, se midieron no solo metales pesados sino también aniones inorgánicos (sulfato) y se compararon con los límites impuestos por la normativa. En función a los niveles de concentración de elementos contaminantes las muestras se puede clasificar como: residuo inerte, residuo no peligroso o residuo peligroso.

Los resultados del ensayo de conformidad se muestran en la tabla 5 y figura 4.

comparación entre los datos de CBR sin sumergir y después de 4 días sumergidos, se puede concluir que la influencia del período de saturación empeoró los resultados de índice CBR en todos los casos.

Tabla 4. Concentraciones en lixiviados áridos mixtos reciclados según UNE-EN 12457-4 y criterios de aceptación (Directiva de vertederos de la UE 2003/33 / CE) (mg / kg)

	ARM-A	ARM-B	ARM-C	Límite inerte	Límite no peligroso
Cr	0.142	0.091	0.0054	< 0.5	0.5 - 10
Ni	0.0212	0.0062	0.0237	< 0.4	0.4 - 10
Cu	0.2831	0	0.0162	< 2	2 - 50
Zn	0.0583	0.0311	0.0697	< 4	4 - 50
As	0.0135	0.0105	0.0258	< 0.5	0.5 - 2
Se	0.0177	0.0011	0.0218	< 0.1	0.1 - 0.5
Mo	0.1405	0.0547	0.0792	< 0.5	0.5 - 10
Cd	0	0	0	< 0.04	0.04 - 1
Sb	0.0237	0.0175	0.018	< 0.06	0.06 - 0.7
Ba	0.3799	0.1934	0.3144	< 20	20 - 100
Hg	0	0	0	< 0.01	0.01 - 0.2
Pb	0	0.0053	0	< 0.5	0.5 - 10
SO ₄	8229	9675	12201	1000*(<6000)	20000

Analizando los resultados obtenidos, ninguno de los ARM supera los niveles de residuo inerte en las concentraciones de metales pesados. Por el contrario, las tres muestras superan los niveles de residuo inerte en las concentraciones de sulfatos.

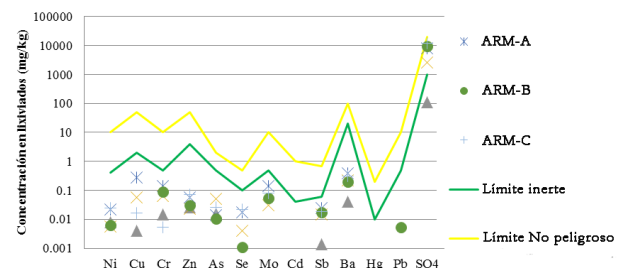


Figura 4. Concentraciones en lixiviados áridos mixtos reciclados según UNE-EN 12457-4 y criterios de aceptación (Directiva de vertederos de la UE 2003/33 / CE) (mg / kg)

4. Conclusiones

El presente trabajo muestra un estudio realizado sobre áridos reciclados mixtos con objeto de proponer una clasificación y estudiar su viabilidad técnica y ambiental de uso en aplicaciones de ingeniería civil. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los áridos reciclados mixtos clasificados como ARM-I pueden ser usados como subbases granulares tratadas con cemento o sin tratar en capas de carreteras. Los ARM-II pueden ser usados como material para formación de explanadas poco solicitadas. Por último, los ARM-III pueden ser usados para la formación de terraplanes.
- El proceso de producción influye enormemente en la composición de los ARM.
- Los ARM con elevados porcentajes en materiales como yeso y otros no especificados no son adecuados para su aplicación en infraestructuras civiles, por lo cual no se pueden clasificar de acuerdo a la propuesta de este trabajo.
- Por el contrario, todas las muestras presentaron un adecuado comportamiento mecánico. Desde un punto de vista exclusivamente técnico su uso es viable.
- Todas las muestras son clasificadas como material no peligroso debido a la concentración en sulfatos lixiviados.
- Una reducción de yeso en composición repercutiría en ARM con una concentración de sulfatos lixiviados dentro de los límites de residuo inerte.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la planta de tratamiento de GECORSA SL su desinteresado aporte de materiales, sin el cual el desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible.

Referencias

- [1] Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201-217.
- [2] Agrela, F., De Juan, M. S., Ayuso, J., Gerdal, V. L., & Jiménez, J. R. (2011). Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, 25 (10), 3950-3955.
- [3] Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., & Valverde-Espinosa, I. (2011). Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08. *Construction and building materials*, 25 (2), 742-748.
- [4] Agrela, F., Barbudo, A., Ramírez, A., Ayuso, J., Carvajal, M. D., & Jiménez, J. R. (2012). Construction of road sections using mixed recycled aggregates treated with cement in Malaga, Spain. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 98-106.
- [5] Poon, C. S., & Chan, D. (2006). Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and building materials*, 20(8), 578-585.
- [6] Gonzalez-Fonteboa, B., Martinez-Abella, F., Eiras-Lopez, J., & Seara-Paz, S. (2011). Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. *Materials and structures*, 44(10), 1759.
- [7] Cuenca-Moyano, G. M., Martín-Pascual, J., Martín-Morales, M., Valverde-Palacios, I., & Zamorano, M. (2020). Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties. *Construction and Building Materials*, 230, 116929.
- [8] Van der Sloot, H. A. (2002). Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long term environmental assessment. *Waste Management*, 22(2), 181-186.
- [9] Cabrera, M., Galvin, A. P., Agrela, F., Beltran, M. G., & Ayuso, J. (2016). Reduction of leaching impacts by applying biomass bottom ash and recycled mixed aggregates in structural layers of roads. *Materials*, 9(4), 228.
- [10] de Brito, J., Agrela, F., & Silva, R. V. (2019a). Legal regulations of recycled aggregate concrete in buildings and roads. In *New Trends in Eco-efficient and*

- Recycled Concrete (pp. 509-526). Woodhead Publishing.
- [11] de Brito, J., Agrela, F., & Silva, R. V. (2019b). Construction and demolition waste. In *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete* (pp. 1-22). Woodhead Publishing.
- [12] Barbudo, A., Galvín, A. P., Agrela, F., Ayuso, J., & Jiménez, J. R. (2012). Correlation analysis between sulphate content and leaching of sulphates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Waste management*, 32(6), 1229-1235.
- [13] Jimenez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., & Galvín, A. P. (2012). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resources, Conservation and Recycling*, 58, 88-97.