

Estudio de la aplicación del árido reciclado mixto en hormigón poroso y como relleno de zanjas en la ciudad de Barcelona

Study of application of mixed recycled aggregates for pervious concrete and backfilling trenches at Barcelona city

M. Etxeberria (*), A. Gonzalez-Corominas (*), A. Galindo (*)

RESUMEN

En este artículo se presentan dos pruebas piloto llevadas a cabo como iniciativas innovadoras en la reutilización de RCD en la ciudad de Barcelona. Por un lado se estudió el uso de árido reciclado mixto (ARM) en la fabricación de hormigón poroso como base de una pavimentación drenante. Una vez caracterizado el hormigón a nivel de laboratorio, se llevó a cabo la prueba piloto. A nivel probeta se determinó la densidad, resistencia a compresión y la permeabilidad así como los componentes lixiviados. La permeabilidad también se determinó in situ. Por otro lado, el material de escombros de zanjas se analizó para utilizarlo como material reciclado de relleno de zanjas. El material fue validado de acuerdo a los ensayos del PG3 de Proctor Modificado, CBR, Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. De acuerdo a los resultados obtenidos, los ARM fueron validados para los casos de estudio llevados a cabo.

Palabras clave: Árido reciclado mixto; hormigón poroso; aplicaciones prácticas; relleno de zanjas; resultados experimentales.

ABSTRACT

This study details two pilot tests carried out within the city of Barcelona, concerning the reuse of CDW in innovative initiatives. The first case study deals with the use of mixed recycled aggregate (MRA) in the production of a pervious concrete to be employed as a draining base for paving. Once the pervious concrete had been characterized within the laboratory, a pilot test was carried out and the concrete's properties of density, compressive strength, permeability and leached components were determined by test specimens. Permeability was also tested on-site. The second case study deals with an analysis of the debris material obtained from trenches in order to determine its suitability as recycled material for trenches backfilling. The material was validated in accordance to PG3 requirements of modified proctor, CBR, liquid limit, plastic limit and plasticity index. In accordance with the obtained results, the MRA were validated for defined case studies.

Keywords: Mixed recycled aggregate; porous concrete; applications; material for backfilling; experimental results.

(*) Universitat Politècnica de Catalunya, BarcelonaTECH. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Persona de contacto/Corresponding author: miren.etxeberrria@upc.edu (M. Etxeberria)

Cómo citar este artículo/Citation: Etxeberria, M., Gonzalez-Corominas, A., Galindo, A. (2015). Estudio de la aplicación del árido reciclado mixto en hormigón poroso y como relleno de zanjas en la ciudad de Barcelona. *Informes de la Construcción*, 68(542): e142, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.062>.

Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de **Informes de la Construcción** se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Attribution License (CC BY) Spain 3.0.

1. INTRODUCCIÓN

De acuerdo a los datos de Eurostat (1) en 2012 en la Unión Europea se generaron 821 millones de toneladas de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), de los cuales 26 millones de toneladas se generaron en España. Los niveles de reciclaje y reutilización de los RCD son diversos según cada estado miembro, aunque en el caso de España la tasa de reciclaje de RCD se sitúa en un 14 % estando este por debajo de la media europea (47%) (2). A nivel nacional, el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 (3) tiene como objetivo frenar el crecimiento en la generación de residuos, erradicar el vertido ilegal, fomentar la prevención y la reutilización de residuos. También la Directiva Europea (2008/98/EC) (4) determina que la mínima tasa de reciclaje estipulada para el 2020 debe ser del 70 %.

El reciclaje de los residuos de construcción y demolición (RCD) y su utilización como sustitución del árido natural es una de las maneras más sostenible medioambientalmente para minimizar su depósito en vertederos y reducir el consumo de recursos naturales no renovables. La presencia de regulaciones y procedimientos para impulsar el uso de RCD reciclado es imprescindible para alcanzar mayores tasas de reciclaje (5). Sin embargo, en España, la legislación que regula el uso de RCD es escasa, aunque se han publicado especificaciones técnicas sobre la utilización de materiales en terraplenes y rellenos, los cuales son recogidos en el PG-3 (6) y el PG-4 (7). Para el caso de estructuras de hormigón, la EHE-08 (8) limita la sustitución de árido natural por el árido reciclado grueso de hormigón al 20 %.

Los áridos reciclados mixtos (ARM) son los productos más abundantes del tratamiento de RCD y están compuestos mayoritariamente por la mezcla de hormigón, cerámicos y mezclas asfálticas (9). Los ARM presentan propiedades físicas inferiores, menor densidad y mayor absorción, y menores prestaciones mecánicas, mayores índices de desgaste o de machacabilidad, que los áridos naturales (5) (9) (10). Los ARM presentan una mayor variabilidad en sus propiedades que los áridos reciclados de hormigón y pueden presentar mayores contenidos de sulfatos u otros contaminantes. Varios autores (9) (10) (11) coinciden en que esta variabilidad en las propiedades del ARM representa un obstáculo para la expansión de su aplicación.

Actualmente, la mayor parte de ARM se utiliza en aplicaciones de bases y subbases de carreteras y obras de bajo grado requerimiento (5). Jiménez *et al.* (12) evaluaron el comportamiento de los áridos reciclados mixtos como capa base en la construcción de carreteras rurales sin pavimentar. Agrela *et al.* (13) y Herrador *et al.* (14) estudiaron el comportamiento de los ARM estabilizados con cemento para la construcción de bases y subbases de carreteras. Estos estudios validaron el uso de ARM en pruebas piloto, afirmando que se podían obtener propiedades similares o mejoradas debido a la capacidad cementante remanente que podían presentar los áridos. Sin embargo, Agrela *et al.* (13) determinó que debía limitarse el contenido de sulfatos totales a un valor inferior al 0.85 % para ser utilizado como capas de pavimentos tratadas con cemento.

El estudio de los ARM para su uso como áridos de hormigón se ha ampliado considerablemente en la última década y se ha centrado, principalmente en el uso de la fracción gruesa de los ARM en hormigones no estructurales (15) (16) (17) o en

aplicaciones de bajo grado de requerimiento (2) (12) (18). Sin embargo, algunos estudios también han analizado la posibilidad de utilizar la ARM en aplicaciones de grado superior, como hormigón de resistencia media (11) (19) (20) y hasta hormigón de altas prestaciones (21). Los ARM reducen las propiedades mecánicas de los hormigones y la mayoría de los estudios recomiendan su uso entre un 20-50 % de sustitución por áridos naturales gruesos. Además también se ha demostrado que los ARM producen menores densidades y mayores absorciones de agua en los hormigones, además de inferiores propiedades de durabilidad. Sin embargo, dosificaciones adecuadas y niveles de reemplazo determinados para cada tipo de aplicación permiten hacer un uso apropiado de los ARM.

En este artículo, se presentan las pruebas piloto llevadas a cabo usando ARM en dos aplicaciones de gran relevancia en la ciudad de Barcelona que pueden contribuir significativamente en el consumo del RCD reciclado. En primer lugar, se describe el uso de ARM grueso procedente de una planta de reciclaje de RCD barcelonesa en la construcción de un pavimento y zanjas de hormigón permeable. Previo a la prueba piloto se llevó a cabo una fase experimental a nivel de laboratorio para caracterizar el hormigón, donde se determinaron las propiedades físicas (densidad, absorción y porosidad), propiedades mecánicas (resistencia a compresión y flexión). A continuación se llevó a cabo la prueba piloto. A nivel probeta se determinó la densidad, resistencia a compresión y la permeabilidad así como los componentes lixiviados. La permeabilidad también se determinó in situ. Esta prueba piloto fue llevada a cabo en una zona de parques y jardines públicos de la ciudad, concretamente, el parque Cervantes en la avenida Diagonal. En segundo lugar, se analizó la viabilidad del uso de ARM procedente del tratamiento y reciclaje de RCD de obras de reparación o construcción de zanjas de los servicios de Aguas de Barcelona para su posterior aplicación en el nuevo relleno de las mismas zanjas. Para la validación del uso de ARM, se realizaron pruebas previas en laboratorio y el material fue validado de acuerdo a los ensayos del PG3 de Proctor Modificado, CBR, Límite líquido, límite plástico y índice de plasticidad.

2. CASOS DE ESTUDIO

2.1. Aplicación 1: Hormigón poroso para bases de pavimentos y zanjas drenantes

2.1.1. Introducción

El primer caso de estudio expuesto en este artículo consiste en la aplicación práctica de árido reciclado mixto grueso en hormigón poroso para la construcción de bases de pavimento drenante y zanjas de un camino de tierra del parque Cervantes en la Ciudad de Barcelona (ver Figura 1). La prueba piloto se llevó a cabo con el objetivo de eliminar los desplazamientos de tierra (sauló) que se producían en el camino del parque hacia la Avenida Diagonal por el agua de las lluvias.

Previo a la ejecución de la prueba piloto se caracterizó el árido reciclado y las propiedades físicas y mecánicas del hormigón que se utilizarían para la construcción del pavimento. Durante la ejecución de la prueba piloto, se fabricaron probetas para determinar las propiedades físicas, mecánicas, permeabilidad y lixiviación del hormigón, además se determinó la permeabilidad in-situ del hormigón colocado.

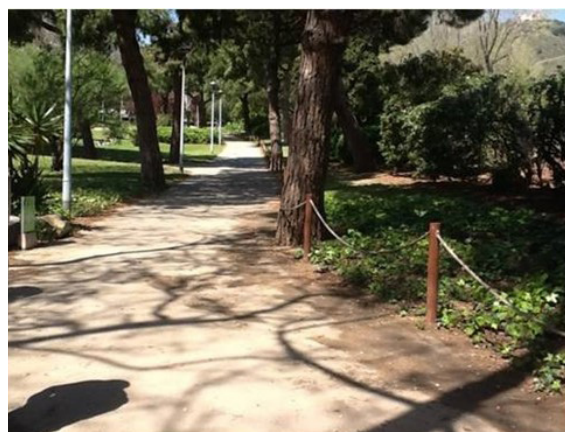


Figura 1. Zona de actuación del parque de Cervantes (Barcelona).

El pavimento permeable ocupó un área total de 100 m² con una pendiente del 7 % situado en la zona de mayor erosión. Se construyeron un total de 8 zanjas de 50 cm de ancho cada una, con una sección de 35 cm de espesor, distribuidas a lo largo del camino para reducir el caudal de agua de lluvia.

2.1.2. Materiales para la fabricación del Hormigón Poroso

• Cemento y aditivo

El cemento utilizado para la realización de la fase experimental y la prueba piloto fue un cemento Portland CEM-II-A-V 42.5R, cemento de alta resistencia con adición de cenizas volantes, procedente de Lafarge-Asland S.A. En la Tabla 1, se observa la composición en masa del cemento.

Se emplearon dos tipologías de aditivos; un aditivo polifuncional de composición lignosulfonato modificado con una dosificación del 0,5 % en peso del cemento y un aditivo superplastificante de composición policarboxilato modificado con una dosificación del 1,2 % respecto el peso del cemento. (En la producción del hormigón poroso no se utilizaron aditivos inclusores de aire).

• Árido Reciclado Mixto

Para la fabricación de los hormigones porosos con árido reciclado se empleó un árido reciclado mixto procedente de la Tecnocatana de Runes S.L. perteneciente a Gestora Catalana de Runes S.A. y situada en Les Franqueses del Vallés (Cataluña). La fracción empleada correspondía a una fracción 12/20 mm, con una distribución de las partículas determinada de acuerdo a la norma UNE-EN 933-1:2012. La densidad y absorción del ARM fueron de 2,1 kg/dm³ y 10,5 %, respectivamente, de acuerdo a la norma UNE-EN 1097-6:2014. Se determinó también el índice de lajas y el índice de Los Ángeles de acuerdo a las normas UNE-EN 933-3:2012 y UNE-EN 1097-2:2010, respectivamente, obteniendo valores adecuados (ver Tabla 2). También se puede observar la composición del ARM que se empleó en la

Tabla 1. Composición en masa del cemento.

Composición	Clinker	Cenizas volantes silíceas	Componentes minoritarios
Masa (%)	80-94	6-20	0-5

sustitución del árido natural de acuerdo a la norma UNE-EN-933-11:2009. Tal y como se puede ver más del 70 %, en peso del ARM, estaba formado por hormigón y árido natural y el 21,2 % de árido cerámico. Al no tener un predominio mayoritario de hormigón o cerámicos se clasificó como árido mixto de acuerdo a las clasificaciones propuestas por Agrela *et al.* (9) y Silva *et al.* (10). El contenido en yeso era más alto que el encontrado en otros estudios (9) (10) (15), el cual podría ocasionar problemas de durabilidad en el caso de ser utilizado en hormigones no porosos.

2.1.3. Diseño del pavimento

Tal y como se puede observar en la Figura 2, la primera capa de 10 cm de espesor, consistió en un árido suelto (Grava 11/22 proveniente de la cantera de Cervelló perteneciente a Lafarge España). La segunda capa, de 12 cm de espesor, estaba formada por el hormigón poroso con árido reciclado mixto, con nombre comercial HRM-D-215/F/20/I ULTRA SERIES RECICLADO. Por último, la tercera capa estaba formada por Hydromedia (hormigón poroso con árido natural) de 8 cm de espesor con el nombre comercial de HDos-225/F/12 HYDROMEDIA.

En las Figuras 3 y 4, se puede apreciar la fabricación de la pavimentación del camino, así como la construcción de las zanjas.

Tabla 2. Composición y propiedades físicas y mecánicas del árido reciclado mixto.

Propiedades	AR 5/20
Composición (%)	
Hormigón y morteros	46,96
Áridos no tratados	26,25
Ladrillos, tejas	21,18
Materiales bituminosos	3,36
Vidrio	0,07
Yeso	1,77
Densidad (kg/dm³)	2,10
Absorción (%)	10,50
Índice de lajas (%)	18
Índice de Los Ángeles (%)	29

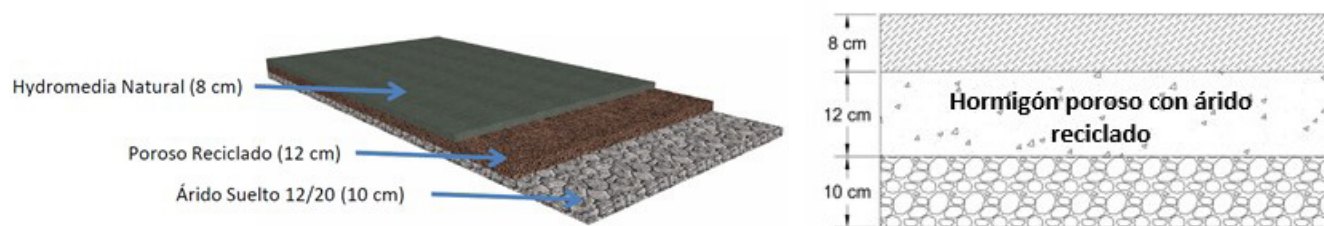


Figura 2. Tres capas de fabricación, realización prueba piloto.



Figura 3. a) Colocación de la primera capa de árido suelto; b) colocación del hormigón poroso con árido reciclado.



Figura 4. Construcción de la zanja.

2.1.4. Dosificación del hormigón poroso

Tal y como se ha mencionado previamente, la segunda capa consistió en un hormigón poroso con árido reciclado. Este material se aplicó por primera vez en una obra del Ayuntamiento de Barcelona y al tratarse de un material novedoso, previamente a la realización del caso de estudio se analizaron sus propie-

dades en los laboratorios de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). La dosificación utilizada se describe en la Tabla 3. Se puede ver que solamente se utilizó árido grueso reciclado de fracción 12/20 mm. No se utilizaron las fracciones más finas de áridos para generar suficientes espacios huecos entre las partículas de árido grueso como para permitir el drenaje de agua de escorrentía y alcanzar porosidades muy elevadas.

La capa superior se realizó con un producto comercial definido como HDos-225/F/12 HYDROMEDIA, producto comercial de Lafarge España.

2.1.5. Caracterización del hormigón poroso de árido reciclado

• Ensayos previos a la prueba piloto

Previo a la ejecución de la prueba piloto, se llevó a cabo la caracterización del hormigón poroso en el laboratorio de Materiales de Construcción de la UPC. Se utilizaron probetas cúbicas de 100 × 100 mm para determinar las propiedades físicas a 7 y 28 días de acuerdo a la norma ASTM C642-13. También se determinaron la resistencia a compresión (probetas cilíndricas de 150 × 300 mm) y la resistencia a flexión (probetas prismáticas de 100 × 100 × 400 mm), siguiendo las normas UNE-EN-12390-3 y UNE-EN-12390-5, respectivamente.

Tabla 3. Dosificación del hormigón poroso.

Cemento CEMII A-V 42,5R (kg)	Árido reciclado 12/20 mm (kg)	Agua (kg)	Aditivo*		Relación a/c
			Polifuncional de composición lignosulfonato modificado (%)	Superplastificante de composición poliacrilato modificado (%)	
215	1.600	161,25	0,5	1,2	0,75

*Es el % respecto al peso del cemento.

• Caracterización de la prueba piloto

Durante la realización de la prueba piloto, se fabricaron probetas para determinar las propiedades físicas (probetas cúbicas de 100 × 100 mm) y mecánicas (compresión en probetas cilíndricas de 15 × 30 cm) del hormigón poroso de árido reciclado. También se determinó la permeabilidad de acuerdo con las recomendaciones dadas por la Portland Cement Association (22), dónde se utilizaron probetas cilíndricas de 50 × Ø100 mm. Además se determinó la permeabilidad in situ del hormigón poroso con árido reciclado del pavimento y zanjas de acuerdo a la normativa NLT-327/00 (ver Figura 5).

Se analizaron los componentes de lixiviación del hormigón poroso mediante la realización del ensayo específico definido por la norma NEN 7345. El test NEN-7345 es un ensayo de difusión en tanque, en el cual los materiales monolíticos, en este caso, discos cilíndricos de hormigón poroso de 50 × Ø100 mm, se ponen en contacto, sin agitación, con el agua acidificado con pH 4 y en una relación líquido-sólido de 5 (en volumen). El líquido se cambia y se analiza en 8 intervalos de tiempo (8 horas, 1, 2, 4, 9, 16, 36, 64 días). Se calcula la lixiviación acumulativa en mg/m² para cada uno de los contaminantes de un total de 8 extracciones. La Legislación Holandesa (NEN 7345) clasifica los materiales en tres categorías según los valores de lixiviación acumulativa obtenidos. La categoría 1 corresponde a un material que no presenta ninguna restricción medioambiental para su utilización (ningún lixiviado supera el límite inferior, límite de material inerte, definido en la normativa). La categoría 2 tampoco presentan ninguna restricción medioambiental para su uso, pero se obliga a la extracción del contaminante que supera el límite inferior al acabar la vida útil del material. Y la categoría 3 los valores de lixiviación acumulativa están por encima del límite superior y en este caso los materiales tienen una utilización restringida.

2.1.6. Resultados

• Ensayos previos a la prueba piloto

Los resultados de propiedades físicas y mecánicas obtenidos por los hormigones porosos fabricados con un 100 % de áridos reciclados mixtos se describen en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados ensayos de propiedades físicas y mecánicas del hormigón poroso fabricado con un 100 % de árido reciclado mixto.

Ensayo	Hormigón poroso de árido reciclado (7 días)	Hormigón poroso de árido reciclado (28 días)
Propiedades físicas		
Absorción (%)	28,00	27,10
Densidad seca (kg/dm ³)	1,49	1,50
Densidad SSS (kg/dm ³)	1,91	1,91
Densidad aparente (kg/dm ³)	2,57	2,53
Poros accesibles (%)	41,88	40,66
Poros de permeabilidad instantánea (%)	17,96	18,10
Propiedades mecánicas		
Compresión (MPa)	4,26	4,17
Flexión (MPa)	–	1,11

Las variaciones con el tiempo de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón poroso fueron mínimas debido a la influencia que presento la altísima porosidad del hormigón. Cabe destacar que la porosidad obtenida por el hormigón poroso reciclado fue muy elevada, llegando aproximadamente a un 40 %. En consecuencia el hormigón obtuvo muy baja densidad, inferior a 1,5 kg/dm³. La ausencia de las fracciones finas de áridos en la fabricación del hormigón poroso permite alcanzar porosidades muy elevadas. El espacio entre las partículas de árido grueso no se rellena de mortero, quedando entre las partículas gruesas huecos de hasta varios milímetros. Estos poros milimétricos también presentan una alta conectividad que genera la permeabilidad suficiente para evacuar el agua que pueda circular por la superficie del hormigón poroso.

Los valores de la resistencia a compresión, según la Portland Cement Association (22), pueden oscilar entre 3,5 MPa a 28 MPa dependiendo del cuál sea su aplicación, y en el caso de los valores de la resistencia a flexión pueden estar entre 1 MPa a 3,5 MPa. El hormigón fue diseñado para una apli-

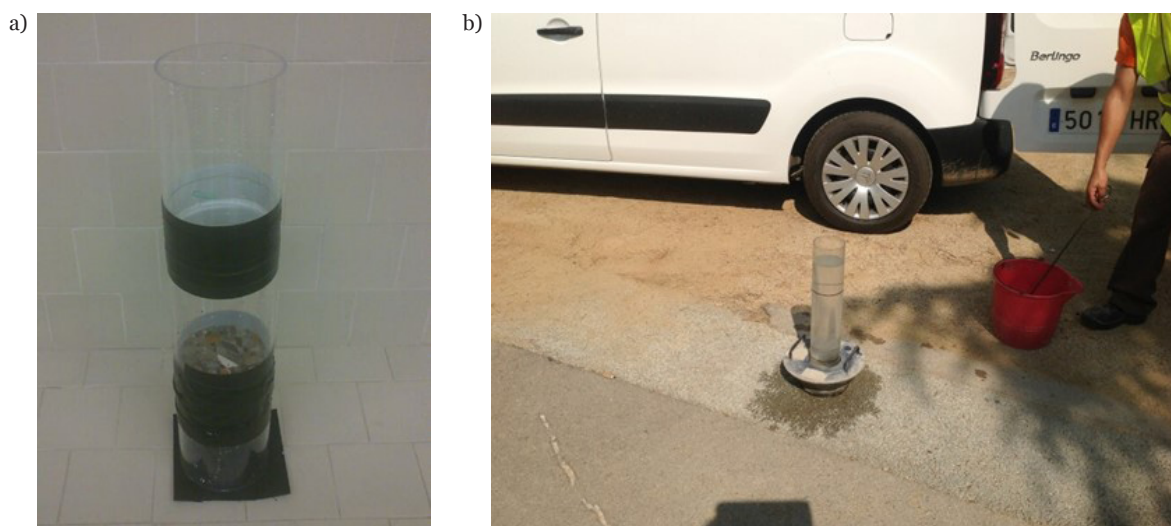


Figura 5. a) ensayo de permeabilidad UPC; b) ensayo permeabilidad zanja.

cación con bajos requerimientos técnicos, encontrándose los valores dentro del margen recomendado. Por lo que se consideraron aceptables los valores obtenidos de 4,26 y 4,17 MPa en resistencia a compresión a 7 y 28 días, respectivamente, y de 1,11 MPa en resistencia a flexión.

El valor medio de la resistencia a compresión a 7 días (4,26 MPa) fue ligeramente superior a la resistencia a 28 días (4,17 MPa) con unas desviaciones típicas de 0,91 MPa a 7 días y de 0,24 MPa a los 28 días. Se considera que a los 7 días se habría alcanzado prácticamente la resistencia máxima, ya que, en un hormigón tan poroso y con resistencias tan bajas, crece la influencia de la estructura porosa y del contacto entre partículas de árido grueso en la resistencia a compresión.

- Caracterización del hormigón fabricado en la prueba piloto

Los resultados obtenidos con respecto a las propiedades físicas, mecánicas y de permeabilidad del hormigón poroso de árido reciclado utilizado en la fabricación de la segunda capa del pavimento y las zanjas permeables del Parque Cervantes se pueden ver en la Tabla 5. Los resultados corresponden a la media de tres valores de cada ensayo.

Los valores de la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de edad fueron considerablemente superiores a aquellos obtenidos en los ensayos previos de laboratorio. Estos valores fueron claramente superiores a los mínimos establecidos por la Portland Cement Association (22) y suficientes para la aplicación de pavimentos y zanjas permeables.

Como aseguran algunos estudios (21) (23) (24) (25), los efectos de los áridos reciclados gruesos en el nuevo hormigón se agravan en mayor medida cuanto mayor es la diferencia entre la calidad de la nueva pasta de cemento o mortero y las prestaciones mecánicas de los áridos reciclados gruesos. Como asegura el estudio de Hoffman *et al.* (11), es preciso el en-

sayo previo de los áridos reciclados mixtos para determinar su adecuada aplicación o exposición. A diferencia de otras aplicaciones de hormigón con áridos reciclados (17) (19) (26) (27), en este caso, el hormigón poroso con una sustitución del 100 % de árido natural por el reciclado mixto alcanzó unos valores de resistencia a compresión adecuados. Se podría considerar entonces que, a nivel mecánico, los áridos reciclados mixtos son aptos para su uso en hormigones porosos para capas de base drenantes.

De acuerdo a la permeabilidad, los caudales típicos de circulación a través del hormigón son de 0,2 cm/s a 0,54 cm/s (22) (28). Mediante el ensayo de permeabilidad realizado en el laboratorio a 28 días de edad, se obtuvo unos valores bastante superior a los considerados como valores habituales ya que el caudal medio circulante a través de los discos de 50 mm de hormigón fue de 6,34 cm/s.

Las pruebas in situ de permeabilidad, tanto en el pavimento como en las zanjas drenantes, se realizaron aproximadamente a los 28 días y a los 3 meses después de su fabricación. Se puede observar en la Tabla 6, que se realizaron 4 mediciones en las zanjas drenantes y 2 mediciones en el pavimento drenante.

Mediante el ensayo in situ, se comprobó que las zanjas drenantes se colmataron ligeramente debido a la pequeña superficie, logrando una permeabilidad (0,33-1,80 cm/s) bastante inferior a la alcanzada en el pavimento drenante (22,31-24,50 cm/s) a los 28 días de edad. La zanja obtuvo una permeabilidad menor debido a su permanente contacto con sauló, material utilizado previamente en la construcción de los caminos del parque, y que podía causar reducciones en la capacidad de drenaje de las zanjas. Sin embargo, cabe destacar que los resultados obtenidos en las zanjas fueron aun así similares o superiores a aquellos valores referenciados en diversos documentos técnicos como valores de permeabilidad habituales (22) (28).

Tal y como se puede ver en la Tabla 6, los datos de la permeabilidad a los 3 meses de la construcción del pavimento y las zanjas drenantes fueron similares a los obtenidos a los 28 días, por lo que se pudo comprobar el adecuado funcionamiento de la obra durante el periodo de julio-octubre. El valor de permeabilidad en el pavimento se mantuvo muy superior a los valores habituales de permeabilidad del agua referenciados (22) (28), evacuando toda el agua del ensayo en un tiempo mínimo.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de lixiviación, en la Tabla 7 se puede observar que ningún lixiviado de metales pesados superó el valor definido como límite in-

Tabla 5. Propiedades del hormigón poroso de la prueba piloto con un 100 % de árido reciclado mixto.

Ensayo	Segunda capa HRM-D-215/F/20/I Ultra Series Reciclado
Propiedades físicas	
Densidad (kg/dm ³)	1,62
Propiedades mecánicas	
Compresión 7 días(MPa)	6,20
Compresión 28 días (MPa)	8,20
Permeabilidad en probeta (cm/s)	6,34

Tabla 6. Permeabilidad de zanjas y pavimento permeables a los 28 días y a los 3 meses después de su ejecución.

	28 días						3 meses		
	Zanja				Pavimento		Zanja		Pavimento
	1	2	3	4	1 parte de arriba	2 parte de abajo	1	3	1 parte central
Masa de agua (kg)	1,734						1,734		
Tiempo (s)	739	136	412	315	11	10	164	151	16
Permeabilidad (cm/s)*	0,33	1,80	0,59	0,78	22,31	24,50	1,49	1,62	15,33

ferir, límite que por debajo se clasifica como material inerte, definido por la norma NEN 7345. Por lo que se considera un material de categoría 1, material inerte, no presentando ninguna restricción ambiental.

2.1.7. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en el caso expuesto se puede concluir que:

- El hormigón poroso fabricado con 100 % de árido reciclado mixto obtuvo una adecuada densidad, porosidad, resistencia a compresión y resistencia a flexión para ser utilizado en la aplicación designada, base de pavimentos y zanjas drenantes.
- Con respecto a la permeabilidad, tanto las probetas ensayadas en el laboratorio como las pruebas realizadas in situ, obtuvieron valores adecuados y fueron similares o superiores a los valores mínimos recomendados.
- Debido a la acumulación de la tierra (sauló) y la tipología del ensayo, la permeabilidad de las zanjas fue inferior a la obtenida en el pavimento drenante. No obstante, los resultados de permeabilidad de la zanja se encontraron dentro de los valores recomendados.
- De acuerdo al ensayo de lixiviación, el material MRA no presenta ninguna restricción medioambiental para su utilización.

2.2. Aplicación 2: Relleno de zanjas

2.2.1. Introducción

El segundo caso de estudio consistió en el análisis de la aplicación de árido reciclado (denominado MRO/8) como relleno de zanjas de canalización de agua. El árido reciclado se obtuvo a partir del tratamiento por parte de la empresa Árids Catalunya S.A., perteneciente al Grupo Sorigué, de los residuos de la reparación y/o construcción de zanjas gestionadas por Aguas de Barcelona (AGBAR) en la ciudad de Barcelona.

El residuo de demolición a tratar para la producción del árido reciclado (MRO/8) provenía de dos tipos de obras: obras de

reparación de zanjas (se identifica como Tipo 1) y de zanjas de obra nueva (Tipo 2). Aproximadamente el 50 % del residuo provenía del Tipo 1 y el otro 50 % del Tipo 2. Este procedimiento de mezcla tuvo como objetivo alcanzar una mayor homogeneidad del material reciclado y obtener un material con valores de propiedades físicas y mecánicas constantes. El material de residuo recogido fue tratado en una planta de reciclaje propia de Árids Catalunya S.A. donde se llevó a cabo la producción del árido reciclado MRO/8.

Previamente a la prueba piloto, el árido reciclado MRO/8 se caracterizó y se validó a nivel de laboratorio para su uso como material de relleno de zanjas. El árido reciclado se recogió de la planta de reciclaje en tres fechas diferentes para analizar la posible dispersión a lo largo del tiempo de las propiedades físicas y de composición del material. En cada ocasión, se conocían las obras de procedencia de los residuos de demolición para poder detectar en caso de anomalía su origen.

Una vez validado el material a nivel de laboratorio (de acuerdo a los requisitos definidos por el PG-3), se llevaron a cabo dos pruebas piloto en la calle Roc Boronat, números 3 y 15, de Barcelona. Las pruebas piloto se ejecutaron durante el mes de julio de 2014, en las cuales se verificó el correcto funcionamiento del MRO/8 en su aplicación práctica como relleno de zanjas.

- Recogida y Tratamiento del residuo de demolición

Las tres recogidas del residuo de demolición se llevó a cabo en diversas obras del Área Metropolitana de Barcelona en el mes de marzo de 2014 (ver Figura 6). La primera recogida de residuos se realizó en una obra de reparación (Tipo 1) y en una obra nueva (Tipo 2), localizadas en la calle Passeig de Sant Joan (Barcelona) y la calle Balmes (Barcelona), respectivamente. La segunda recogida de residuos se realizó en obras del Tipo 1 y del Tipo 2 en las calles Passeig de Sant Joan (Barcelona) y Alzines (Sant Just Desvern), respectivamente. Por último, la tercera recogida corresponde a obras del Tipo 1 que concretamente se llevaron a cabo en las calles Batista i Roca (Sant Just Desvern) y Passeig de Sant Joan. Cada recogida fue aproximadamente de 9.000 kg.

Los residuos recogidos en las tres fases se transportaron a la planta de reciclaje que se encuentra en Cerdanyola del Vallés (Cataluña). En la planta de reciclaje, primero se eliminaron manualmente todos los contaminantes sólidos no pétreos existentes en el material recogido. El material que pudiera llegar muy húmedo a la planta también fue retirado debido a su dificultad de tratarlo.

El material pétreo recogido en las tres fases fue procesado en la planta de reciclaje mediante una planta móvil emplazado en lugar fijo y con un sistema de tratamiento muy básico consistente en dos fases. En primer lugar, el material pasó por una trituradora de impacto y el material menor a 16mm pasó al segundo tratamiento formado por sistema de cribas obteniendo las fracciones de 0/8 mm y 8/16 mm. El material de tamaño mayor a 8 mm volvió a entrar en el ciclo de tratamiento pasando de nuevo por la trituradora de impacto. El material que finalmente pasó por la criba de 8 mm fue el material nominado MRO/8 (árido de fracción 0/8 mm) y el utilizado como material de relleno reciclado en la construcción de las nuevas zanjas.

Tabla 7. Lixiviación, emisiones acumuladas hasta 64 días.

Componentes	Emisiones acumulativas (mg/m ²)	Límites inferior (límite de material inerte) de NEN 7345 (mg/m ²)
Ba	171,34	600
Cr	7,02	150
Cu	2,07	50
Mo	1,23	15
Pb	0,64	100
Zn	1,88	200
Co	0,31	25
V	1,16	250
Br	–	25
Cl	2491	20.000
SO ₄	2015	25.000
F	–	1.500

Fase 1 de recogida	Fase 2 de recogida	Fase 3 de recogida
 Tipo 1. Passeig de Sant Joan	 Tipo 1. Passeig de Sant Joan	 Tipo 1. Calle Batista i Roca
 Tipo 2. Calle Balmes	 Tipo 2. Calle Alzines	 Tipo 1. Passeig de Sant Joan

Figura 6. Obras de recogida de material de residuo de demolición de acuerdo al Tipo 1 (reparación) o Tipo 2 (obra nueva).

2.2.2. Ensayo realizados

• Caracterización del MRO/8

Los áridos reciclados MRO/8 producidos de cada una de las tres fases de recogida se denominaron MRO8-1, MRO8-2 y MRO8-3. En cada una de las fases, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del material MRO/8 para analizar el cumplimiento de las propiedades requeridas y definidas por el PG-3.

Se determinó la granulometría del material de acuerdo a la norma UNE 103101:95, la densidad de las partículas y la capacidad de absorción de agua, según la norma UNE-EN 1097-6:2014 y la composición del árido reciclado, para la fracción superior a 4 mm, se determinó de acuerdo a la normativa UNE-EN 933-11:09.

Además se ensayaron los requisitos físico-mecánicos de acuerdo al PG-3 de: el límite líquido de un suelo por el mé-

todo del aparato de Casagrande (UNE 103103:94), del índice de plasticidad (UNE 103104:93), de la densidad óptima con el ensayo de compactación del Proctor modificado (UNE 103501:1994) y del índice CBR (UNE 103502:1995). En la realización de los ensayos de los requisitos químicos, se siguió la norma UNE 103204:93 para la determinación del porcentaje de materia orgánica y la norma NLT-114/99 para la determinación de las sales solubles en agua (sulfatos). Todos los ensayos se realizaron por triplicado.

• Realización de la prueba piloto Roc Boronat (Barcelona)

Se realizaron dos pruebas pilotos en Barcelona, en la calle Roc Boronat n.º 3 y n.º 15 (ver Figura 7). El material MRO/8 utilizado en la ejecución de las pruebas se caracterizó (granulometría y composición de acuerdo las normas UNE) para poder validarlo como material de relleno de zanjas. Además se realizaron los ensayos de densidad óptima (Proctor modificado) y CBR (de acuerdo en a las normas UNE) para su verificación como relleno de zanjas.

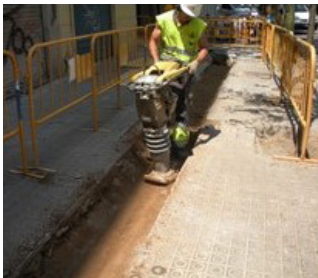
Prueba Piloto 1	Prueba Piloto 2
  Calle Roc Boronat, 3	  Calle Roc Boronat, 15

Figura 7. Imágenes de la realización de las dos pruebas pilotos.

2.2.3. Resultados

En este apartado se describen los resultados obtenidos de la caracterización del MRO/8, así como los resultados obtenidos de las pruebas piloto realizadas.

• Caracterización del MRO/8

La Figura 8 muestra los resultados de la granulometría de las tres muestras producidas en la planta de reciclaje, MRO8-1, MRO8-2 y MRO8-3. Como puede observarse, las tres muestras obtuvieron una granulometría similar, sin embargo la muestra MRO8-3 presentaba menos finos que las otras dos

muestras. Esto fue debido a que la muestra MRO8-3 fue procesada de residuos obtenidos de obras Tipo 2, en los cual la cantidad de hormigón y áridos naturales era superior a las muestras MRO8-1 y -2 (ver Tabla 8). La distribución granulométrica es una propiedad que en gran medida dependiente de los tipos de trituradora y de sus combinaciones (29), como en este caso solo se utilizó un mismo método de trituración era previsible obtener distribuciones similares.

La Tabla 8 describe los resultados de caracterización de las tres muestras, así como los límites que se establecen en el PG-3. Como puede observarse, las tres muestras de MRO/8 cumplieron con los requisitos granulométricos definidos por

Tabla 8. Resultados de la caracterización de las muestras MRO/8 previas a la prueba piloto.

Ensayo	MRO8-1	MRO8-2	MRO8-3	Suelo adecuado PG-3
Granulometría (%)				
Tamiz 8	100	100	100	< 100
Tamiz 2	64	68	56	< 80
Tamiz 0,063	14	13	5	< 35
Densidad				
Densidad aparente (g/cm ³)	2,72	2,77	2,72	
Densidad seca (g/cm ³)	2,29	2,19	2,25	
Densidad SSS (g/cm ³)	2,45	2,40	2,43	
Absorción agua (%)	7,00	9,60	7,66	
Composición (%)				
Cerámico	3,82	6,38	1,64	
Hormigón-mortero	32,21	30,19	34,65	
Árido natural	60,25	59,51	63,70	
Bituminosos	3,58	3,52	0,00	
Yeso	0,15	0,40	0,00	
Madera y plástico	0,00	0,00	0,00	

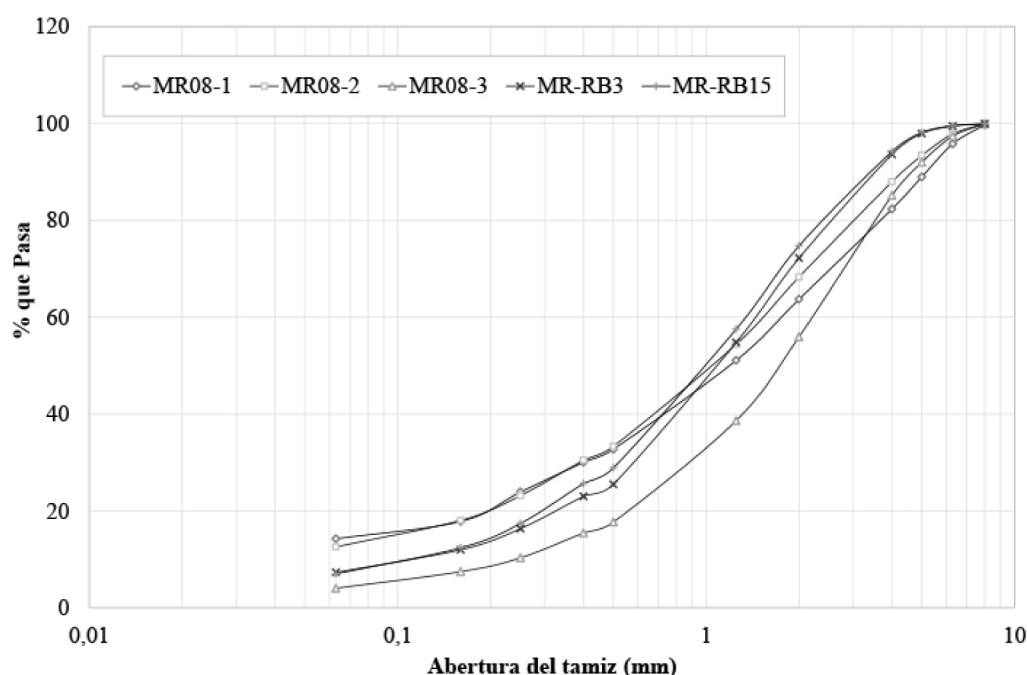


Figura 8. Distribución granulométrica de las muestras de MRO/8 de la caracterización previa del material (MRO8-1, 2, 3) y de las pruebas piloto en la calle Roc Boronat (MRO8-RB3, RB15).

el PG-3 que; el material de tamaño inferior a 8, 2, 0.063 mm debía ser igual o menor al 100, 80 y 35 %, respectivamente.

Las muestras MRO/8 estaban formadas principalmente por árido natural, como componente mayoritario, seguido de material procedente de residuos de hormigón o mortero. El elevado contenido en árido natural, probablemente procedente de subbases de carreteras o del relleno de antiguas zanjas, certifica un adecuado comportamiento del material reciclado. En menor cantidad se encontró material cerámico (1,64-6,38 %) y residuos de las mezclas bituminosas (0-3,58 %), cumpliendo con las recomendaciones de Vegas *et al.* (30). Los contaminantes minoritarios, como el yeso, no presentaron valores limitantes para su uso ya que eran inferiores a los descritos por otros estudios como peligrosos (9) (10).

Los valores obtenidos de densidad seca y capacidad de absorción de agua de las tres muestras fueron entre 2,19-2,29 g/cm³ y entre 7,00-9,66 %, respectivamente, siendo similares a los encontrados en otros estudios (2) (12). Sin embargo, cabe destacar que la densidad de la muestra MRO8-2 fue ligeramente menor y su capacidad de absorción ligeramente mayor que el resto de las muestras analizadas. Esto fue debido a que MRO8-2 presentaba un mayor contenido de cerámicos que las otras dos muestras, siendo las partículas de cerámicos más ligeras y porosas que las de árido natural u hormigón (10) (13).

La Tabla 9 muestra los resultados de los ensayos realizados para validar el uso de MRO/8 en el relleno de zanjas. De acuerdo a las humedades óptimas, determinadas mediante el ensayo de Proctor modificado, se obtuvieron valores muy similares para las tres muestras de material reciclado. Sin embargo, la densidad óptima de la muestra MRO8-3 fue ligeramente inferior debido a que esta muestra presentaba una menor cantidad de finos que pudo influenciar negativamente en la compactación de la muestra.

Los índices CBR encontrados en las muestras fueron entre 27,56-32,10, siendo claramente superiores a los mínimos

exigidos en las especificaciones definidas por el PG-3. En el ensayo CBR se obtuvieron valores muy consistentes entre las muestras ensayadas y ninguna de ellas sufrió un hinchamiento considerable después de 4 días sumergidas en agua (0-0,04 %).

Las tres muestras se definieron como no plásticas y con unos límites líquido y plástico de 0, cumpliendo los límites establecidos por el PG-3 para el límite líquido (<40). Estos valores se deben a que en su composición no se encontró materiales arcillosos típicos de suelos y que pueden ocasionar efectos negativos.

De acuerdo al análisis químico, tal y como se puede observar en la Tabla 9, las muestras de MRO/8 obtuvieron una materia orgánica inferior a 0,70 %, siendo del 1 % el valor máximo permitido por el PG-3 como suelo adecuado. En comparación con otros estudios, los niveles de materia orgánica se encontraron dentro de los niveles recomendados por Vegas *et al.* (30), sin embargo, fueron levemente superiores a los mostrados por Jiménez *et al.* (2) (12).

En el caso de la cantidad de sales solubles, ninguna de las muestras superó un 0,04 % de sulfatos solubles en agua, siendo 0,2 % el límite definido por el PG-3 para suelos adecuados. Además cabe destacar que estos resultados fueron significativamente inferiores a los valores encontrados en otros estudios (2) (12) (30). Este hecho puede correlacionarse con la baja cantidad de yeso encontrada en el ensayo de composición y que puede ser un criterio de selección de los residuos de originales para la producción del material reciclado.

• Resultados de la prueba piloto

En la Tabla 10 se detallan los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales MRO/8 usados en las dos pruebas piloto llevadas a cabo en la calle Roc Boronat, n.º 3 y n.º 15 de Barcelona (MRO8-RB3 y MRO8-RB15). En este caso, los resultados descritos también son la media de tres valores obtenidos en cada ensayo.

Tabla 9. Resultados de los ensayos para la validación de las muestras MRO/8 previas a la prueba piloto.

Ensayo	MRO8-1	MRO8-2	MRO8-3	Suelo adecuado PG-3
Proctor modificado				
Humedad óptima (%)	11,39	11,15	11,75	
Densidad óptima (g/cm ³)	2,17	2,15	2,06	
CBR				
Densidad (g/cm ³)	2,19	2,16	2,02	
Humedad compactación (%)	10,78	11,43	11,46	
Hinchamiento (%)	0,01	0,04	0,00	
Índice CBR	31,52	27,56	32,10	> 5
Límite Líquido (LL)	0	0	0	< 40
Límite Plástico (LP)	0	0	0	
Índice de Plasticidad (IP)	No plástico	No plástico	No plástico	
Análisis químico				
Materia orgánica	0,29	0,59	0,69	< 1
Sales solubles	0,03	0,04	0,02	< 0,2

Tabla 10. Resultados de la caracterización del material MRO/8 usado en la prueba piloto.

Ensayo	MRO8-RB3	MRO8-RB15	Suelo adecuado PG-3
Granulometría (%)			
Tamiz 8	100	100	< 100
Tamiz 2	72	75	< 80
Tamiz 0,063	7	7	< 35
Composición (%)			
Cerámico	14,81	9,96	
Hormigón-mortero	40,89	56,58	
Árido natural	44,30	33,46	
Bituminosos	0,00	0,00	
Yeso	0,00	0,00	
Madera y plástico	0,00	0,00	

Las granulometrías de las muestras recogidas de las pruebas piloto, descritas en la Figura 8, también cumplieron con los requisitos definidos por el PG-3 (Tabla 10); que pase menos o igual al 100, 80 y 35% del material por los tamices 8, 2 y 0,063 mm, respectivamente. Se observa que las dos muestras analizadas tuvieron una distribución granulométrica parecida entre ellas así como a las muestras previamente analizadas en el laboratorio.

Por otro lado, se determinó la composición del material a pesar de no estar contemplado en las especificaciones exigidas en el PG-3. La composición principal de las dos muestras utilizadas en las pruebas piloto estaba formada por material procedente de árido natural y hormigón. La presencia de material cerámico fue ligeramente superior a las anteriormente encontradas, pero sin llegar a niveles no recomendables (30). El material MRO/8 de las pruebas piloto no contenía ningún otro contaminante, pudiéndose así descartar el incumplimiento de la cantidad de sulfatos solubles debido a la presencia de yeso.

En la Tabla 11 se describen los resultados de los ensayos propios marcados por la PG-3 como suelo adecuado para su uso en el relleno de zanjas. Las humedades óptimas de compactación (ensayo Proctor modificado) del material MRO8-RB3 y MRO8-RB15 se encontraron dentro del rango de valores obtenidos por las muestras analizadas previamente. En consecuencia se confirma que los valores de humedad y densidad óptima fueron adecuados en las dos muestras de las pruebas piloto.

Los valores obtenidos del índice de CBR fueron parecidos a los valores que se alcanzaron en la validación de las muestras previas de MRO/8 y muy superiores al mínimo exigido por el PG-3. Además el hinchamiento fue inferior al de las muestras previas y similar a los determinados en otros estudios para áridos reciclados mixtos de características similares (2) (12).

2.2.4. Conclusiones

Después del análisis de las características obtenidas por el material reciclado para rellenos de zanjas, MRO/8, se concluye que:

- De acuerdo a su composición, la componente mayoritaria es el árido natural y como minoritarias estarían en cerámico y asfalto. La presencia de otros componentes como el yeso es mínima o nula.
- Alcanza propiedades físicas, químicas y mecánicas adecuadas de acuerdo a los requerimientos del PG-3 para suelos adecuados. El hinchamiento que sufre es prácticamente nulo y el Índice CBR muy superior al exigido por el PG-3.
- Las muestras procedentes de la planta de reciclaje presentaron muy poca dispersión entre ellas, por lo que se puede asegurar que la variabilidad de la calidad del material reciclado MRO/8 en el tiempo es mínima.

De acuerdo a los resultados obtenidos tanto a nivel de laboratorio como a nivel de prueba piloto, se puede decir que el árido reciclado obtenido del tratamiento del material de desecho procedente de la construcción o reparación de zanjas

Tabla 11. Resultados de los ensayos para la validación de las muestras MRO/8 de la prueba piloto.

Ensayo	MRO8-RB3	MRO8-RB15	Suelo adecuado PG-3
Proctor Modificado			
Humedad óptima (%)	11,5	11,8	
Densidad óptima (g/cm³)	2,09	2,08	
CBR			
Densidad (g/cm³)	2,03	2,07	
Humedad compactación (%)	10,64	11,48	
Hinchamiento (%)	0,01	0,01	
Índice CBR	36	29	> 5

es adecuado para ser utilizado como nuevo material reciclado de relleno de zanjas.

3. CONCLUSIONES

Los dos casos de estudio expuestos en este artículo demuestran la posibilidad de utilizar árido reciclado mixto en aplicaciones de gran uso y de importancia dentro de la ciudad.

Los hormigones porosos fabricados con áridos reciclados mixtos (procedentes de residuos de construcción y demolición que contengan una baja cantidad de impurezas y de fracción 12/20 mm) alcanzan propiedades mecánicas y de permeabilidad adecuadas para ser utilizados como base de pavimento y zanjas drenantes.

El material de desecho obtenido de la construcción o reparación de zanjas, una vez tratado en planta de reciclaje mediante limpieza, trituración y criba de fracción 0/8 mm, es ade-

cuado para ser utilizado como material reciclado de relleno de zanjas, cumpliendo con todos los requisitos definidos por el PG-3 para suelos adecuados.

Por lo tanto, de los dos casos de estudio analizados se puede concluir que los áridos reciclados mixtos pueden ser utilizados como alternativa a los materiales naturales, ya que tiene un comportamiento idóneo para aplicaciones de bajas presiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo quieren agradecer al Ayuntamiento de Barcelona y ACEFAT por el interés que presentan en el uso de áridos reciclados en aplicaciones de la ciudad, y a Gestora de Runes de las Franqueses del Vallés S.L. (Cataluña) por facilitar el árido. Además se quiere hacer una mención especial al Grupo Sorigué y AGBAR por innovar en productos sostenibles de la misma manera que a Lafarge España.

REFERENCIAS

- (1) Eurostat. *Waste statistics in Europe*. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>
- (2) Jiménez, J. R., Ayuso, J., Agrela, F., López, M., Galvín, A. P. (2012). Utilisation of unbound recycled aggregates from selected CDW in unpaved rural roads. *Resour Conserv Recycl*, 58:88-97.
- (3) Spanish Ministry of Environmental (2009). Plan Nacional integrado de residuos para el periodo 2008-2015 (Integrated National Waste Plan for the period 2008-2015) *BOE* (49):19893-20016.
- (4) Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 10 November 2008 on waste. *Official Journal of the European Union*, 2008.
- (5) 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. *Constr Build Mater*, 25:742-748.
- (6) Ministerio de Fomento España. *PG-3 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes*.
- (7) Ministerio de Fomento España (2001). *PG-4 Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras*.
- (8) *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural*. Ministerio de Fomento.
- (9) Agrela, F., Sánchez de Juan, M., 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. *Constr Build Mater*, 25:3950-3955.
- (10) 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. *Constr Build Mater*, 65:201-217.
- (11) Hoffmann, C., Schubert, S., Leemann, A., Motavalli, M. (2012). Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: Influence of variations in composition on the concrete properties and their use as structural material. *Constr Build Mater*, 35:701-709.
- (12) Jiménez, J. R., Ayuso, J., Galvín, A. P., López, M., Agrela, F. (2012). Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Constr Build Mater*, 34:34-43.
- (13) 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. *Resour Conserv Recycl*, 58:98-106.
- (14) Herrador, R., Pérez, P., Garach, L., Ordóñez, J. (2012). Use of recycled construction and demolition waste aggregate for road course surfacing. *J Transp Eng*, 138:182-190.
- (15) Etxeberria, M., Gonzalez-Corominas, A., Valero, I. Application of low-grade recycled aggregates for non-structural concrete production in Barcelona city. *Int. Conf. Sustain. Constr. Mater. Technol.*, Kyoto, Japan: Committees, SCMT3.
- (16) Beltrán, M. G., Barbudo, A., Agrela, F., Galvín, A. P., Jiménez, J. R. (2014). Effect of cement addition on the properties of recycled concretes to reach control concretes strengths. *J Clean Prod*, 79:124-133.
- (17) Mas, B., Cladera, A., Del Olmo, T., Pitarch, F. (2012). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Constr Build Mater*, 27:612-622.
- (18) Etxeberria, M., Ainchil, J., Pérez, M. E., González, A. (2013). Use of recycled fine aggregates for Control Low Strength Materials (CLSMs) production. *Constr Build Mater*, 44:142-148.
- (19) Medina, C., Zhu, W., Howind, T., Sánchez de Rojas, M. I., Frías, M. (2014). Influence of mixed recycled aggregate on the physical – mechanical properties of recycled concrete. *J Clean Prod*, 68:216-225.
- (20) Beltrán, M. G., Agrela, F., Barbudo, A., Ayuso, J., Ramírez, A. (2014). Mechanical and durability properties of concretes manufactured with biomass bottom ash and recycled coarse aggregates. *Constr Build Mater*, 72:231-238.
- (21) Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. (2014). Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Constr Build Mater*, 68:618-626.

- (22) Tennis, P., Leming, M., Akers, D. (2004). *Pervious Concrete Pavements*. 1st ed. Skokie, Illinois (US): Portland Cement Association & National Ready Mixed Concrete Association.
- (23) Gonzalez-Corominas, A., Etxeberria, M. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*, 52:227-235.
- (24) Ajdukiewicz, A., Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cem Concr Compos*, 24:269-279.
- (25) Kou, S., Poon, C. (2015). Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*, 77:501-508.
- (26) Kou, S. C., Poon, C. S., Wan, H. (2012). Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates C & D Waste. *Constr Build Mater*, 36:881-889.
- (27) Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res*, 37:735-742.
- (28) McCain, G. N., Dewoolkar, M. M. (2010). Porous Concrete Pavements: Mechanical and Hydraulic Properties. Invest. Our Transp. Futur. – BOLD Ideas to Meet BIG Challenges. *Transportation Res. Board 89th Annu. Meet.*, Washington, D.C.
- (29) Hendricks, C. (2000). *The Building Cycle*. Aenas Tech. Pbl. The Netherlands.
- (30) Vegas, I., Ibañez, J. A., Lisbona, A., Sáez de Cortazar, A., Frías, M. (2011). Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Constr Build Mater*, 25:2674-2682.

* * *