

Áridos reciclados para hormigones y morteros

J.L. Parra y Alfaro^{(1) (2)}, B. Astudillo Matilla^{(1) (2)}, R. Carretón Moreno⁽¹⁾, J. Castilla Gómez⁽²⁾,
C.M. Sanabria Zapata^{(1) (2)} y E. Antuña Bernardo⁽¹⁾

(1) Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
C/ Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. España. E-mail: joseluis.parra@upm.es

(2) LOEMCO. Laboratorio Oficial para el Ensayo de Materiales de Construcción.
C/ Alenza 1. 28003 Madrid. España. E-mail: bastudillo@loemco.com

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la viabilidad de la utilización de áridos reciclados en la fabricación de morteros y hormigones. Para la realización del mismo se ha procedido a realizar una caracterización completa de los áridos reciclados, recogiendo a continuación dos experiencias de fabricación, respectivamente, de mortero y hormigón, incluyendo una caracterización de estos productos. Como conclusión se puede afirmar que el árido reciclado, convenientemente elegido y caracterizado, puede ser viable técnicamente como componente para la fabricación de mortero y hormigón.

Palabras clave: áridos, hormigones, morteros, reciclados

The spanish situation concerning CDR (Construction and Demolition Residue) as aggregates. The application in the making of concretes

ABSTRACT

The purpose of the present work is the study of the application of recycled aggregates in the production of masonry mortar and concrete. Recycled aggregates are obtained by processing of construction and demolition waste from building and civil constructions. A complete characterization of the recycled aggregates has been made, previously to two experiences of fabrication of masonry mortar and concrete with them. Both products have been also characterized. As final conclusion, selected and well characterized recycled aggregates are suitable to be used in the production of masonry mortar and concrete.

Key words: aggregates, concretes, mortars, recycled

Introducción

Los cambios legislativos en materia medioambiental acontecidos en España e impulsados enormemente desde el ingreso de ésta en la Unión Europea (CE, 2000), han conducido a la necesidad de dar respuesta al problema de la gestión de los residuos ocasionados por las demoliciones de edificios y estructuras, así como por su construcción.

Actualmente la situación ofrece un marco legislativo en el que empieza a considerarse que no reutilizar dichos desechos no es viable ni ventajoso económicamente para la sociedad, estando en algunos casos obligado a hacerse por ley.

A este hecho se ha unido el impulso, por parte gubernamental, consistente en la implantación del Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición (BOE, 2001), así como los correspondien-

tes desarrollos a nivel autonómico (BOCM, 2002), quedando pendiente la disposición estratégica de centros de tratamiento y puesta en valor de áridos reciclados, así como un más amplio impulso a la investigación sobre las distintas aplicaciones que estos productos puedan tener para la industria.

Todo lo anteriormente descrito ha abierto el camino a la realización de diferentes estudios sobre las posibilidades de reinserción, en el ciclo productivo, de los residuos de construcción y demolición (RCD) como material de aportación en la fabricación de morteros y hormigones para la industria de la construcción, así como a la necesidad de presentar nuevas propuestas de plantas de puesta en valor de RCD orientadas a realizar esta tarea de forma eficaz y eficiente tanto técnica como económicamente, y al mismo tiempo respetuosa con el medio ambiente.

En la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de

Minas de Madrid se viene investigando en este tema desde 1996, con sucesivos proyectos basados en la caracterización de RCD's como áridos reciclados para distintas aplicaciones (Parra y Alfaro, 2001). En este artículo se presenta un resumen de algunos resultados referidos a su uso en la fabricación de hormigones y morteros.

Desarrollo experimental

Caracterización del árido reciclado

El árido de origen reciclado utilizado en el presente proyecto proviene de la planta *La Palentina* propiedad de la empresa TECREC sita en la Comunidad Autónoma de Madrid (España).

El producto obtenido en esta planta se presenta inicialmente en varios husos granulométricos, proviniendo de dos circuitos diferentes de molienda, un circuito primario en el que se produce la primera etapa de conminución, de la que se obtiene el árido denominado (a efectos del estudio) RCDc1, y un circuito secundario que trata el rechazo mineral del anterior circuito y tras el que se obtiene un árido denominado RCDc2.

La caracterización de este árido se ha realizado tanto sobre productos procedentes del circuito primario de trituración (RCDc1) como del circuito secundario de trituración (RCDc2).

Árido reciclado de origen primario. RCDc1

Los ensayos realizados sobre los áridos reciclados procedentes del circuito primario de molienda, denominados genéricamente RCDc1, han sido orientados a determinar sus propiedades cualitativas y cuantitativas.

Los valores presentados a continuación en forma de tablas representan los resultados obtenidos tras la realización de ensayos físicos (Tabla 1 y 2).

Árido reciclado de origen secundario. RCDc2

El material denominado RCDc2, procedente del circuito secundario de molienda, es un material formado mayoritariamente por clinker de cemento, restos de hormigones y asfaltos. Debido a su composición los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización han resultado más favorables que los correspondientes al árido RCDc1 (Tabla 3 y 4).

Ensayo	Resultado %
Coeficiente de absorción de agua	3,2
Índice de lajas	8,57
Ensayo de los ángeles	40

Tabla 1. Ensayos físicos RCDc1
Table 1. RCDc1 physical tests

Ensayo	Norma	Resultados
Determinación de los cloruros solubles en agua. Método de Volhard	UNE-EN 1744-1:1999	0,00%
Determinación de los sulfatos solubles en agua	UNE-EN 1744-1:1999	0,00%
Determinación del contenido total de azufre	UNE-EN 1744-1:1999	0,52%
Determinación de los sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1:1999	0,38%

Tabla 2. Ensayos químicos normalizados RCDc1
Table 2. RCDc1 standardized chemical tests

Ensayo	Resultado %
Coeficiente de absorción de agua	4
Índice de lajas	4,11
Ensayo de los ángeles	36

Tabla 3. Ensayos físicos RCDc2
Table 3. RCDc2 physical tests

Ensayo	Norma	Resultados
Determinación de los cloruros solubles en agua. Método de Volhard	UNE-EN 1744-1:1999	0,00%
Determinación de los sulfatos solubles en agua	UNE-EN 1744-1:1999	0,00%
Determinación del contenido total de azufre	UNE-EN 1744-1:1999	0,39%
Determinación de los sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1:1999	0,33%

Tabla 4. Ensayos químicos normalizados RCDc2
Table 4. RCDc2 standardized chemical tests

Análisis de lixiviados

Árido reciclado de origen primario. RCDc1

LIXIVIADOS	Resultado (mg/l)	Método
Arsénico	< 0,0014	Espectrometría de absorción atómica
Antimonio	0,0367	Espectrometría de absorción atómica
Cadmio	<0,0001	Espectrometría de absorción atómica
Cobre	0,058	Espectrometría de absorción atómica
Cromo	0,1155	Espectrometría de absorción atómica
Cromo VI	<0,01	Espectrometría de absorción atómica
Mercurio	0,0076	Espectrometría de absorción atómica
Níquel	0,0428	Espectrometría de absorción atómica
Plomo	0,0092	Espectrometría de absorción atómica
Vanadio	0,1751	Espectrometría de absorción atómica
Zinc	<0,0060	Espectrometría de absorción atómica

Tabla 5. Contenido en metales RCDc1
 Table 5. RCDc1 content in metals

Árido reciclado de origen secundario. RCDc2

LIXIVIADOS	Resultado (mg/l)	Método
Arsénico	< 0,0014	Espectrometría de absorción atómica
Antimonio	0,0137	Espectrometría de absorción atómica
Cadmio	<0,0001	Espectrometría de absorción atómica
Cobre	0,0463	Espectrometría de absorción atómica
Cromo	0,0739	Espectrometría de absorción atómica
Cromo VI	<0,01	Espectrometría de absorción atómica
Mercurio	0,0078	Espectrometría de absorción atómica
Níquel	0,0212	Espectrometría de absorción atómica
Plomo	0,0028	Espectrometría de absorción atómica
Vanadio	<0,0048	Espectrometría de absorción atómica
Zinc	<0,0060	Espectrometría de absorción atómica

Tabla 6. Contenido en metales RCDc2
 Table 6. RCDc2 content in metals

En el análisis de lixiviados del árido reciclado (Tablas 5 y 6) se observa que los elementos en el presente no se encuentran en concentraciones suficientes como para que éstos puedan considerarse potencialmente nocivos para el medio ambiente (Kosson et al., 2002).

Fabricación de morteros con árido reciclado

Esta fase se ha llevado con financiación procedente de la cátedra-empresa ANEFA, de la E.T.S.I. Minas de Madrid.

Elección de las materias primas

Para la fabricación de morteros de albañilería secos industriales, entre otras características, se debe tener un árido de granulometría apropiada. Para este estudio inicial se ha optado por la utilización de áridos RCDc1 y RCDc2 de granulometría comprendida de 0 mm. a 2 mm., cuyas curvas granulométricas se muestran en la Figura 1 y 2.

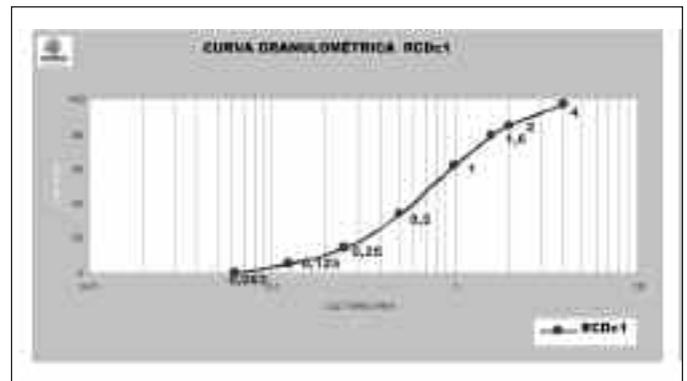


Fig. 1. Curva granulométrica RCDc1
 Fig. 1. RCDc1 granulometric curve

De igual forma será necesaria la utilización de un cemento adecuado para la fabricación de morteros de albañilería, así, la elección del mismo se ha basado en la determinación de cuatro factores como son la clase de exposición, la clase resistente (o lo que es lo mismo, resistencia alcanzada a 28 días de edad) el

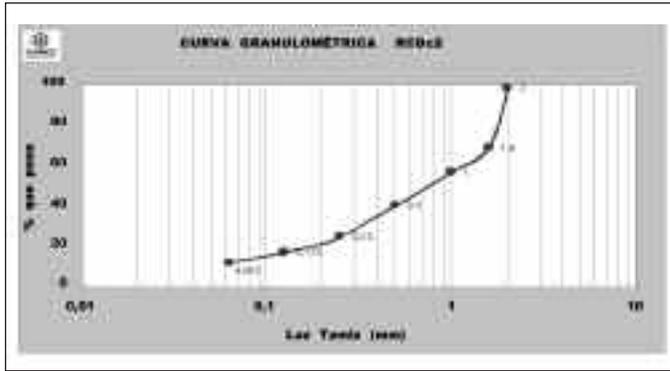


Fig. 2. Curva granulométrica RCDc2
Fig. 2. RCDc2 granulometric curve

tipo de adiciones que contenga y por último el color. De acuerdo con todo lo anterior se ha utilizado como conglomerante hidráulico un Cemento Blanco clase II/A-L 42,5 R.

Determinación de las formulaciones de ensayo

Mediante la combinación de diferentes dosificaciones con iguales relaciones agua/cemento se obtendrá la familia muestral de ensayo. Dicha familia de ensayo se describe a continuación definiendo la proporción fija de cemento y agua en la dosificación patrón y posteriormente las proporciones variables de áridos en cada una de las dosificaciones de las muestras de la familia de ensayo (Tabla 7).

Desarrollo experimental

Una vez definidas las familias de ensayo, se ha procedido a la realización de los ensayos normativos

Elemento:	CEMENTO	ÁRIDO	AGUA
Descripción:	BL II/ A-L 42,5 R	Arena Normalizada UNE EN 196-1	Desmineralizada
Porcentaje en masa	25	75	46 s.p.c
t/m ³ de producto	0,625	1,875	0,287

s.p.c: sobre peso de cemento

Tabla 7. Dosificación patrón de estudio
Table 7. Reference formula

FAMILIA	MUESTRA	TIPO DE ÁRIDO		
		RECICLADO		NATURAL
		RCDc1 %	RCDc2 %	%
MR - A	MR-A1	100	0	0
	MR-A2	90	0	10
	MR-A3	80	0	20
	MR-A4	50	0	50
MR - B	MR-B1	0	100	0
	MR-B2	0	90	10
	MR-B3	0	80	20
	MR-B4	0	50	50
MR - C	MR-C1	40	40	20
	MR-C2	25	25	50

Tabla 8. Distribución del árido en las familias de muestras de ensayo
Table 8. Distribution of aggregates in the families tests samples

(AENOR, 1995) orientados a determinar la sensibilidad del mortero así como su resistencia a edad de 28 días de curado.

Los resultados obtenidos de dicho estudio son los representados, de forma esquemática en la Tabla 8 y se completan con las figuras 3, 4 y 5.

Áridos reciclados para hormigón. Prueba industrial

Esta fase del proyecto se ha llevado en colaboración con CEMEX España, y la financiación de la cátedra-empresa CEMEX, de la E. T. S. de Ingenieros de Minas de Madrid. En ella se pretende avanzar en el estudio de la viabilidad de la utilización controlada de RCD como áridos reciclados para la fabricación de hormigones, dado que esta aplicación, aunque es la de mayor exigencia en aspectos de calidad, también es la que mayor cantidad de áridos precisa.

El objetivo ha consistido en elaborar un hormigón, a escala industrial, con áridos reciclados y verificar el comportamiento y prestaciones de dicho hormigón tanto inicialmente como con el tiempo, mediante la construcción de diversas estructuras. Las instalaciones donde se ha realizado dicha prueba pertenecen a la empresa CEMEX España.

Los áridos que se han utilizado son los que normalmente se emplean en la planta de hormigón preparado de CEMEX Hormigón; como se pretende que

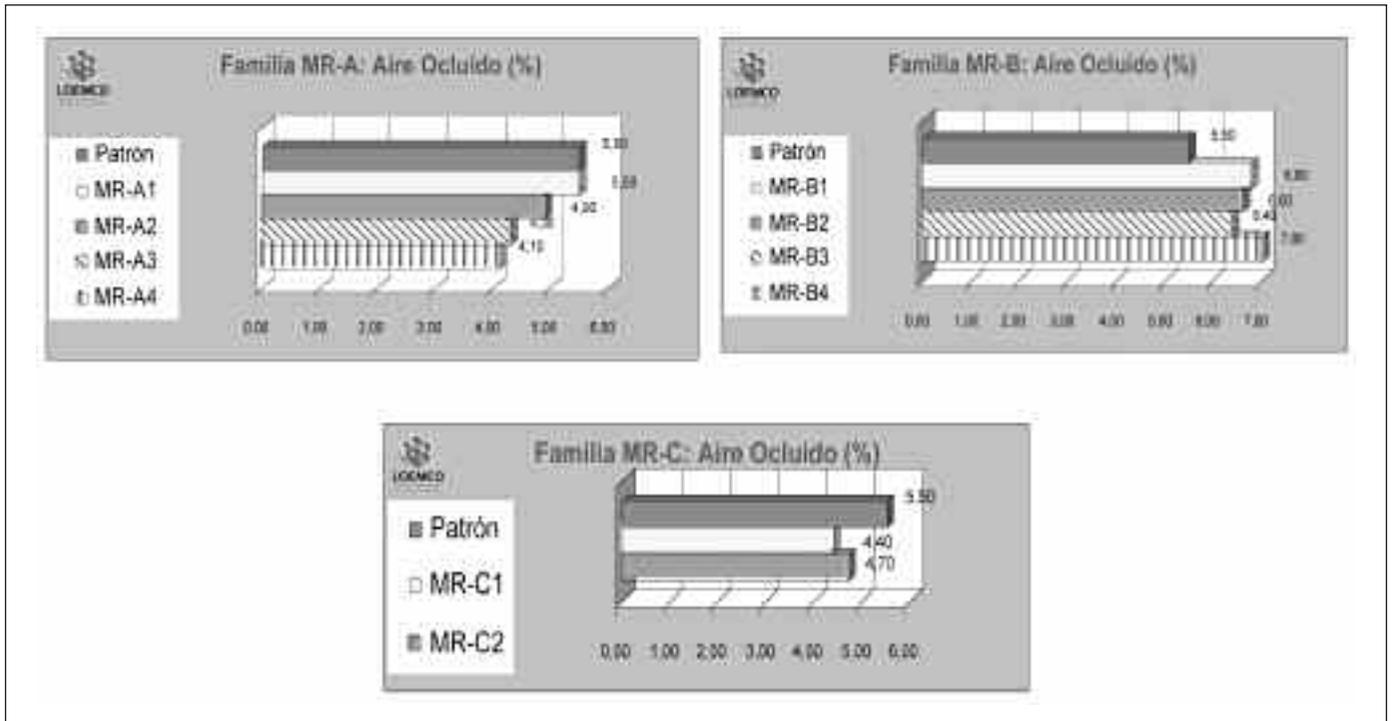


Fig. 3. Contenido en aire ocluido
Fig. 3. Content in closed air

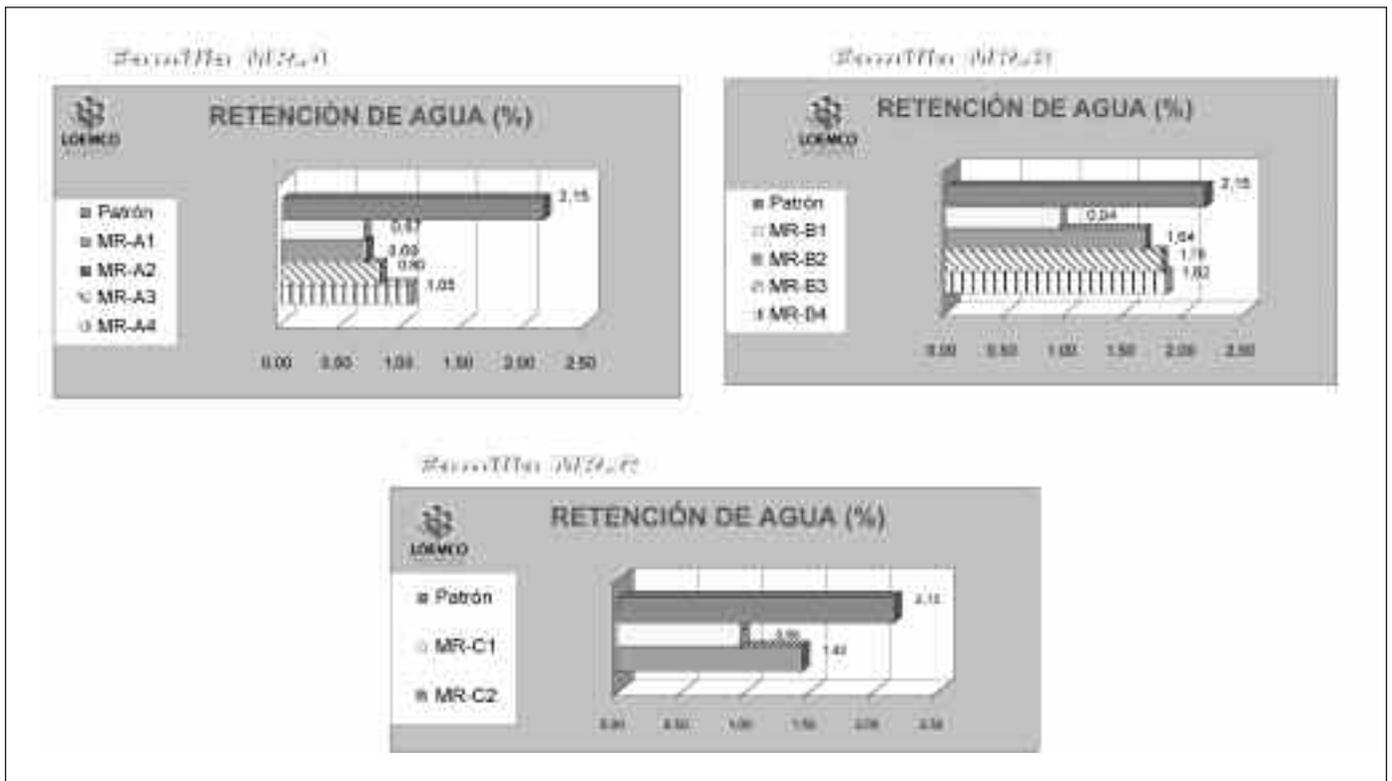


Fig. 4. Retención de agua
Fig. 4. Retention of water

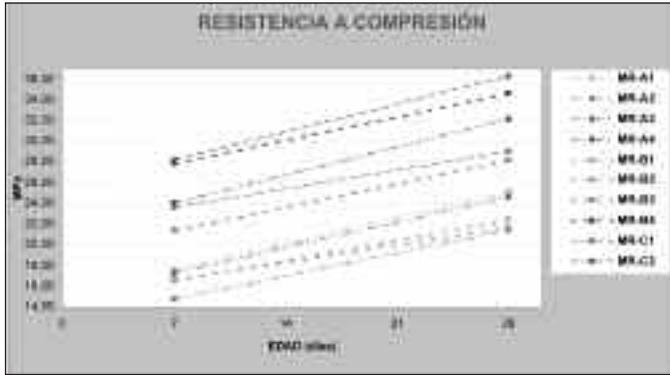


Fig. 5. Resistencia a compresión a edad de 28 días
 Fig. 5. Resistance to compression of 28 days age

el hormigón se asemeje lo más posible a un hormigón convencional, se optó por un árido de tipo calizo, que tiene características similares al árido reciclado, puesto que los dos provienen de instalaciones de machaqueo.

El cemento seleccionado es el empleado habitualmente dicha planta de hormigón preparado. Es de tipo resistente 42.5, denominado CEM II/A-P 42.5 R, fabricado por CEMEX España en su fábrica de Castillejos (Toledo, España).

Dosificación del árido reciclado

La dosificación inicial que se ha pretendido utilizar se determinó previamente en una serie de trabajos llevados a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid, con la colaboración de CEMEX Hormigón, a lo largo de varios años.

Esta línea de investigación se llevó a cabo en varias fases, en las que se estuvieron determinando en laboratorio las características de distintas mezclas de áridos reciclados (hormigón y cerámica) con áridos naturales, siendo la grava la fracción sustituida. Se experimentó el comportamiento de estas mezclas de áridos y el comportamiento del hormigón elaborado con estas mezclas. Finalmente, se llegó a la conclusión de que una mezcla que contuviera un porcentaje de árido reciclado en torno al 50 %, siendo éste de naturaleza mayoritariamente procedente de hormigón reciclado (aunque permitiendo una cierta presencia de materiales de origen cerámico no superiores al 15 % del total de la masa del árido reciclado), sería en principio apta para la fabricación de hormigones estructurales, a falta de comprobar sus características de durabilidad de forma fiable, y siempre previa caracterización.

Dosificación del hormigón

El hormigón elegido para realizar la prueba ha sido el más común de los usados en edificación: HA-25/B/20/I. La dosificación para este tipo de hormigón es la siguiente:

- Árido fino 820 kg/m³
- Grava 1000 kg/m³
- Cemento (CEM II/A-P 42.5 R) 320 kg/m³
- Aditivo (Sikament 390) 1.2 % del peso del cemento

El Sikament 390 es un aditivo superplastificante específico para hormigones.

Elaboración de probetas de hormigón

Se realizaron las pruebas para comprobar el comportamiento del material reciclado, elaborando una serie de probetas de hormigón, la mitad con hormigón fabricado con árido reciclado y la otra mitad con hormigón convencional. Se introdujo un 50 % de material reciclado, de tamaño grava, formando parte del árido grueso. Este porcentaje es aquél que se corresponde con el determinado en pruebas anteriores. Para el hormigón convencional y el hormigón con áridos reciclados las cantidades que se utilizaron fueron las recogidas en la Tabla 9.

Los resultados obtenidos en el ensayo de rotura a compresión se recogen en la Tabla 10 y se representan en la Figura 6.

El aspecto más importante de estos resultados es que ambos hormigones no difieren mucho en los resultados.

Componente	Dosificación por m ³	Cantidad empleada	
		Hormigón convencional	Hormigón reciclado
Árido fino	885 kg	23.3 kg	23.3 kg
Grava caliza	1000 kg	26.3 kg	13.68 kg
Grava reciclada		—	12.62 kg
Cemento (CEM II/A-P 42.5 R)	320 kg	8.42 kg	8.42 kg
Aditivo (Sikament 390)	3200 cm ³	84 cm ³	84 cm ³
Agua	160 l	4.2 l	4.2 l

Tabla 9. Dosificación de las probetas con árido reciclado
 Tabla 9. Composition of the samples made with recycled aggregate

Hormigón	7 días	28 días
Convencional	32.8 MPa	40.1 MPa
Reciclado	34.3 MPa	38.7 MPa

Tabla 10. Resultados de resistencia a compresión
 Tabla 10. Results of resistance to compression

Realización de la prueba industrial

De las aproximadamente 40 toneladas de árido reciclado empleado, de una fracción 0/40 mm, se realizaron los siguientes cortes: 0/6 mm; 6/20 mm; 20/40 mm.

Se confeccionaron 4 m³ de hormigón de tamaño máximo de árido grueso 20 mm, la mitad con áridos reciclados y el resto exclusivamente con áridos naturales.

Las características de las losas que se construyeron son las siguientes: losas rectangulares de hormigón armado de 5.2 x 3 m de lado con un grosor de 20 cm, con mallazo convencional (Fig. 7).

De las losas se fueron extrayendo testigos a intervalos de tiempo determinados y ver su evolución. En principio se tomaron testigos cada treinta días a partir de la realización de la prueba.

También se construyó un pilar de sección cuadrada de 2 m de longitud y 30 cm de lado (Fig. 8).

Para realizar otros ensayos se tomaron muestras de hormigón fresco, con el que se elaboraron probetas normalizadas, según la Norma UNE 83-301-91. Con cada tipo de hormigón se construyeron 8 probe-

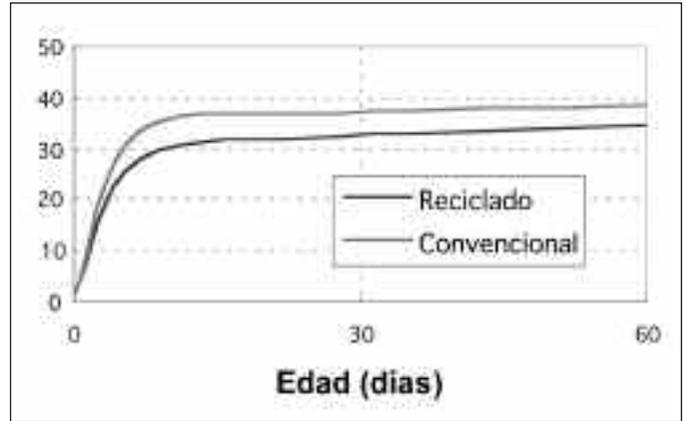


Fig. 6. Gráfica de resistencia a compresión
 Fig. 6. Graphic of resistance to compression

tas cilíndricas de 30 X 15 cm. Asimismo se elaboraron 6 probetas cúbicas de 10 cm de lado.

Del mismo modo se determinó la consistencia del hormigón fresco mediante el método del cono de Abrams, según la Norma UNE 83313:1990

Estas probetas se desmoldaron y se depositaron en cámara húmeda en condiciones normalizadas para el curado de hormigón, según la Norma UNE 83-301-91

Resultados de la prueba industrial

Para la prueba industrial y dadas las características de la planta, se consideró conveniente hacer una dosifi-



Fig. 7. Encofrado de las losas
 Fig. 7. Timbered of slabs



Fig. 8. Encofrado del pilar
Fig. 8. Timbered of pillar

cación de árido reciclado al 50 % con árido natural, por motivos operativos

La prueba comenzó con la elaboración del hormigón con árido reciclado, con el que se confeccionaron el pilar y una de las losas, ambos descritos anteriormente (Fig. 9). Del mismo modo se elaboró el hormigón convencional y su losa correspondiente (Fig. 10). En la dosificación se tuvo en cuenta la humedad contenida en la arena.

La consistencia del hormigón fresco, determinado por el método del cono de Abrams fue de 60 mm para el hormigón reciclado y 80 mm para el hormigón convencional. Los resultados de las probetas elaboradas durante la prueba industrial se recogen en la Tabla 11 y se representan, gráficamente, en la Figura 11; mientras que los resultados de las probetas testigo, extraídas de los elementos construidos, se indican en la Tabla 12 y se visualizan en la Figura 12.

Conclusiones

El análisis de las propiedades cualitativas y cuantitativas del árido reciclado permite concluir que este tipo de áridos, los áridos reciclados, presentan unas propiedades similares y en algunos casos idénticas a los áridos naturales, actualmente en comercialización.

En el ámbito de la aplicación de los áridos reciclados para la fabricación de morteros y hormigones, se puede afirmar, basándose en las características cualitativas y cuantitativas de los mismos, que pueden ser aptos para la fabricación de morteros de albañilería y hormigones sin responsabilidad estructural, previa su adecuada caracterización.

En lo referente a criterios medioambientales, de los resultados obtenidos del ensayo de lixiviación de los áridos reciclados del presente estudio, se concluye que no contienen contaminante alguno en proporciones que puedan ser consideradas nocivas para el medio ambiente.

Respecto a la aplicación de los áridos reciclados como material de aportación en la fabricación de morteros de albañilería, en concordancia con los resultados obtenidos, se puede afirmar que los materiales estudiados son aptos para la fabricación de



Fig. 9. Elaboración de la losa de hormigón reciclado
Fig. 9. Elaboration of the slab made with recycled concrete



Fig. 10. Elaboración de la losa de hormigón convencional
 Fig. 10. Elaboration of the slab with conventional concrete

Edad	Reciclado	Convencional
7 días	27.4 MPa	33.4 MPa
28 días	31.9 MPa	36.4 MPa
60 días	34.4 MPa	38.4 MPa

Tabla 11. Resultados de resistencia a compresión. Prueba industrial
 Table 11. Results of the resistance to compression. Industrial experiment

Tipo	28 días	60 días
Reciclado (pilar)	32.3 MPa	37.8 MPa
Reciclado (losa)	35.9 MPa	37.4 MPa
Convencional	37.7 MPa	40.7 MPa

Tabla 12. Resultados de resistencia a compresión. Probetas testigo
 Table 12. Results of the resistance to compression. Witness samples

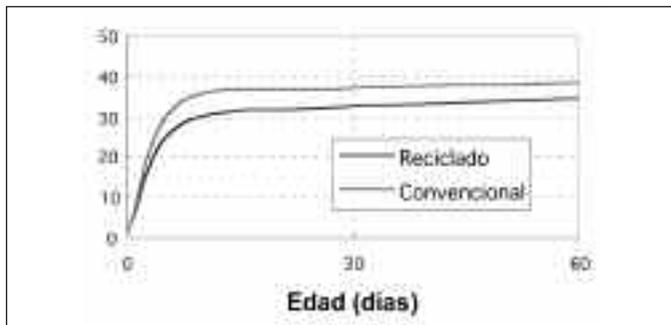


Fig 11. Gráfica de resistencia a compresión. Prueba industrial
 Fig 11. Graphic of resistance to compression. Industrial experiment

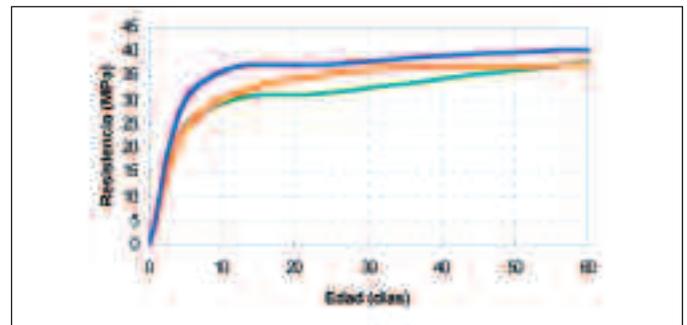


Fig 12. Gráfica de resistencia a compresión. Probetas testigo
 Fig 12. Graphic of resistance to compression. Witness samples

dichos productos, obteniéndose de su aplicación morteros de similares características a los fabricados con áridos naturales.

En cuanto a la aplicación de los áridos reciclados para la fabricación de hormigones a escala industrial, de la experiencia realizada se puede concluir que el uso de este tipo de materiales para esta aplicación es viable, si se lleva a cabo una adecuada caracterización de los mismos y se emplean en un cierto porcen-

taje del árido grueso componente de dichos hormigones, obteniéndose una adecuada trabajabilidad y clase resistente de diseño. Queda pendiente de establecerse su durabilidad en condiciones normales de uso.

Los resultados obtenidos concuerdan en líneas generales con las referencias bibliográficas internacionales consultadas (Folliard y Berke, 1997; Park, 1999, Gómez Soberán et al., 2001).

Referencias

- AENOR. 1995. Ensayos de Hormigón, morteros y sus componentes. *Asociación Española de Normalización y Certificación*. Madrid.
- BOCM. 2002. Plan de Gestión Integrada de los Residuos de Construcción y Demolición de la Comunidad de Madrid 2002-2011. *Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid*, 82.
- BOE (2001). Plan Nacional de Residuos de Construcción y Demolición 2001-2006. *Boletín Oficial del Estado*, 166.
- CE. 2000. Management of construction and demolition waste. *Comisión Europea. Dirección General de Medio Ambiente*.
- Folliard, K.J. and Berke, N.S. 1997. Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixtures. *Cement and Concrete Research*, 27 (9), 1357-1364.
- Gómez Soberón, J.M., Vázquez Ramonich, E. y Agulló Fité, L. 2001. Hormigón con áridos reciclados. Una guía de diseño para el material. *CIMNE*. Barcelona.
- Kosson, D.S., Van der Sloot, H.A., Sánchez, F. and Garrabrant, A.C. 2002. An Integrated Framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials. *Environmental Engineering*, 19 (3).
- Park, S. 1999. *Recycled concrete construction. Rubble as aggregate for new concrete*. Branz.
- Parra y Alfaro J.L. 2001. Caracterización de RCD en la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para la fabricación de hormigones. *Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid*.

Recibido: Septiembre 2005

Aceptado: Julio 2006