

Estudio sobre las propiedades del árido reciclado mixto para la fabricación de hormigón no estructural

ÁREA C: Aplicaciones de los áridos. Calidad de producción y de producto.

V. L. Geraldès (1), M. Sánchez de Juan (2), P. Alaejos (3)

(1) Lic. Ingeniería Civil y Medioambiental. Ecole Centrale de Nantes. Francia.

Tel: 91 335 74 72

Correo electrónico: victor.geraldes@cedex.es

(2) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de la División de Tecnología de Hormigones del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. Ministerio de Fomento.

Tel: 91 335 74 01

Correo electrónico: marta.sanchez@cedex.es

(3) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Área de Ciencia de Materiales del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. Ministerio de Fomento. Madrid, España.

Tel: 91 335 74 02

Correo electrónico: pilar.alaejos@cedex.es

RESUMEN

Actualmente la normativa española permite el empleo de hasta un 100% de árido reciclado procedente de residuos de hormigón para la fabricación de hormigones no estructurales, excluyendo sin embargo el empleo del árido reciclado mixto (ARM). Este último se obtiene por procesamiento de los residuos procedentes de una mezcla de residuos de hormigón y cerámicos.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es estudiar las posibilidades de utilización del árido reciclado mixto para la fabricación de hormigón reciclado en aplicaciones no estructurales. Este hecho supondría la posible valorización de un gran porcentaje de residuos de construcción y demolición, ya que según los datos disponibles, aproximadamente un 80% de este tipo de residuos lo forman las fracciones minerales (cerámicos, hormigón, y árido natural), que componen mayoritariamente los residuos mixtos, en comparación con el 12% procedente de residuos de hormigón.

Para llevar a cabo esta tarea, se ha realizado primero un estudio bibliográfico extenso para conocer el estado actual del conocimiento sobre las propiedades del árido reciclado mixto y la normativa internacional asociada.

En una segunda parte, se ha realizado la caracterización completa de ocho áridos reciclados mixtos gruesos de distinta calidad, procedentes de tres plantas de tratamiento diferentes, comparándose con las tendencias obtenidas en el estudio bibliográfico. En particular, se ha analizado la composición, la densidad y absorción, la granulometría, el coeficiente de Los Ángeles, el índice de lajas, el contenido de finos, las partículas ligeras y el contenido de sulfatos. Se estudian también las correlaciones que existen entre las diferentes propiedades, con el fin de encontrar criterios de calidad de un árido reciclado mixto para un hormigón reciclado no estructural. A raíz de este estudio experimental, se han determinado las propiedades más restrictivas en el empleo de un árido reciclado mixto, siendo éstas el elevado contenido de sulfatos y la elevada absorción.

1. INTRODUCCIÓN

El problema ambiental que plantean los residuos de construcción y demolición no sólo deriva del creciente volumen de su generación, sino de su tratamiento, que todavía hoy no es adecuado en muchos casos.

La aplicación del árido reciclado para hormigón es todavía minoritaria, debido a la calidad inferior del árido reciclado respecto al árido natural y a la falta de marco normativo específico (excepto la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [1] que recoge únicamente el empleo del árido reciclado de hormigón, tanto para hormigones estructurales como no estructurales). No obstante, existen razones técnicas para pensar que en las aplicaciones no estructurales podría considerarse la utilización de áridos reciclados de origen mixto (mezcla de residuos de hormigón y cerámicos

mayoritariamente), aprovechando de esta forma un mayor porcentaje de residuos de construcción y demolición.

De esta forma, se considera necesario realizar estudios experimentales para determinar las propiedades del árido reciclado mixto y del hormigón reciclado fabricado con él, que permitan concluir la idoneidad de ambos en aplicaciones no estructurales.

El presente artículo recoge los resultados del estudio experimental sobre las propiedades del árido reciclado mixto para la fabricación de hormigón no estructural llevado a cabo en el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, así como los resultados obtenidos en el Tarea 2.2 del proyecto CLEAM (Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medioambiente), coordinado por el CEDEX, y en el que se seleccionaron 10 plantas de reciclaje de RCDs de diferentes ámbitos geográficos, realizando un control periódico del árido mixto reciclado que producen (caracterizando un total de 36 muestras).

2. NORMATIVA INTERNACIONAL

La Instrucción española EHE-08 [1] establece en el Anejo nº15 “Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados” que se recomienda utilizar hasta un 20% de árido grueso reciclado procedente de residuos de hormigón en sustitución del árido grueso natural en aplicaciones estructurales. Para el hormigón no estructural, se permite el uso de hasta un 100% de árido reciclado de hormigón que cumpla las mismas especificaciones establecidas en el Anejo nº15, quedando por lo tanto excluido el empleo de áridos reciclados mixtos. Sin embargo varias normativas internacionales contemplan el uso de los áridos gruesos reciclados mixtos, regulándolo mediante los requisitos recogidos en la tabla 1.

Como puede observarse, existe una gran heterogeneidad en los límites establecidos por las distintas normativas, especialmente en la absorción máxima (con requisitos desde

el 7% al 15%) y en el contenido de impurezas.

País	Alemania Tipo 2	Reino Unido RA	Holanda	Brasil	Portugal
Densidad seca kg/m ³	≥2000	-	≥2000	-	≥2200
Absorción	≤15%	-	-	≤12%	≤7%
Material de densidad ≤1000 kg/m ³	-	≤1%	-	-	-
Contenido de metales, vidrios, materiales blandos, betún	≤3,5%	≤1%	-	≤3%	≤0,5%
Partículas ligeras	-	-	≤0,1%	-	≤1%
Contenido de finos (<0.063 mm)	≤4%	≤3%	≤3%	≤10% (<75 μm)	≤4%
Contenido de sulfatos (SO ₃)	-	≤1%	≤1%	≤1%	≤0,8%

Tabla 1: Especificaciones internacionales para el árido reciclado mixto [2-6]

3. PROPIEDADES DE LOS ÁRIDOS RECICLADOS MIXTOS

3.1 Materiales y programa experimental

Se han seleccionado ocho áridos reciclados mixtos distintos, procedentes de tres plantas de tratamiento diferentes (planta N, S y V).

La caracterización de estos áridos se ha complementado con los resultados del proyecto CLEAM sobre áridos reciclados mixtos [7], así como con los procedentes de una extensa recopilación bibliográfica realizada en el CEDEX.

3.2 Resultados obtenidos

3.2.1. Caracterización de los áridos reciclados

Los áridos reciclados presentan una gran heterogeneidad en sus propiedades debido principalmente a la gran variedad de la calidad del material del que procede y del tipo de procesamiento al que son sometidos.

En la tabla 2 se presentan los resultados de los ensayos de caracterización de los áridos reciclados mixtos, incluyendo también las especificaciones recogidas del conjunto de las normativas internacionales consultadas.

	Norma de ensayo	ÁRIDOS RECICLADOS								Requisito
		ARM(N1)	ARM(N2)	ARM(N3)	ARM(N4)	ARM(N5)	ARM(S1)	ARM(S2)	ARM(V1)	
Composición (%)	UNE-EN 933-11									
Asfalto (A)		4,5	4,5	4,0	2,8	0,6	2,6	0,4	2,3	≤1
Cerámicos (B)		14,8	14,5	22,2	30,1	9,4	40,5	41,2	32,6	-
Hormigón y mortero (C)		46,6	78,7	70,4	24,5	54,7	35,2	43,6	28,8	-
Áridos naturales (U)		31,8			40,6	31,9	21,1	12,6	29,1	-
Terrones de arcilla (X1)		0,9	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0	-
Vidrio (X2)		0,3	0,0	0,2	0,2	0,1	0,0	0,2	2,4	≤2
Yeso (X3)		1,0	2,1	2,6	1,8	3,3	0,4	1,4	3,9	
Otros (madera, papel, plásticos...)		0,0	0,0	0,4	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	≤0,5
Contenido de materiales no deseados X=X1+X2+X3+Otros		2,2	2,2	3,4	2,1	3,4	0,6	1,9	6,3	≤0,5-3,5
Absorción (%)		UNE-EN 1097-6	7,0	8,1	8,8	7,2	8,9	10,4	9,7	11,6
Densidad saturada con superficie seca (kg/dm ³)	2,26		2,29	2,27	2,23	2,26	2,18	2,23	2,29	-
Densidad de partícula tras secado en estufa (kg/dm ³)	2,15		2,12	2,09	2,08	2,08	1,98	2,04	2,05	≥2-2,2
Contenido de compuestos totales de azufre (S)(%)	UNE-EN 1744-1	0,30	0,26	0,50	0,27	0,53	0,38	0,60	1,36	≤1
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO ₃)(%)		0,76	0,87	1,00	0,67	1,00	0,71	-	2,78	≤0,8-1
Índice de lajas	UNE-EN 933-3	-	13	16	15	12	23	20	21	≤35
Coeficiente de Los Ángeles	UNE-EN 1097-2	-	42	45	47	53	40	38	49	≤50
Desclasificados inferiores	UNE-EN 933-1	-	2	3	5	3	4	7	12	-
Contenido de finos		-	3,2	4,3	8,4	2,1	2,2	2,6	5,3	≤3-10
Partículas de peso específico inferior a 1	UNE-EN 1744-1	-	-	-	-	0,80	0,46	0,11	0,05	≤0,1-1

Tabla 2: Propiedades de los áridos reciclados mixtos ARM(N), ARM(S), ARM(V) [1-6]

Composición. El árido reciclado mixto es un árido mayoritariamente compuesto de materiales cerámicos, de hormigón y de áridos naturales (Fotografías 1, 2 y 3). Suele contener también ciertos porcentajes de impurezas como vidrio, metales, madera, yeso, tierras etc (Fotografía 4 a 6). Estas impurezas pueden influir negativamente en las propiedades del hormigón reciclado, por lo que deben limitarse. El ensayo de composición del árido reciclado (realizado según la norma UNE-EN 933-1 [8]) es un ensayo de especial importancia para clasificar los áridos reciclados según su naturaleza, así como para ofrecer un índice de su calidad.



Fotografía 1: Ladrillo, cerámicos ARM(V1) (M_B)

Fotografía 2: Base cemento – Mortero ARM(V1) (M_C)

Fotografía 3: Áridos no ligados ARM(V1) (M_U)



Fotografía 4: Yeso ARM(V1) (M_{X3})



Fotografía 5: Asfalto ARM(V1) (M_A)

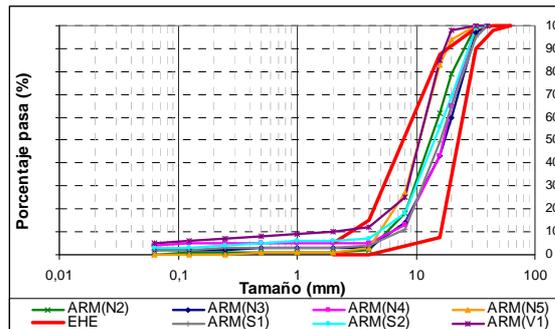


Fotografía 6: Vidrio ARM(V1) (M_{X2})

Los áridos reciclados procedentes de la planta S presentan reducidos contenidos de impurezas (entre un 0,6% y 1,9%), los de la planta N unos contenidos medios (entre un 2,1% y 3,4%) y los de la planta V unos contenidos altos (alcanzando el 6,3%).

La **granulometría** de los áridos reciclados mixtos procedentes de las plantas S y N es adecuada, ajustándose a los husos establecidos en la norma UNE-EN 12620 (Gráfica 1).

Todas las muestras ensayadas procedentes de estas plantas presentan un contenido de *desclasificados inferiores* reducido (partículas inferiores a 4 mm), de entre un 2 % y un 7%, y un *contenido de finos* también bajo, comprendido entre un 0% y 4%. Sin embargo, la planta V presenta mayores porcentajes tanto de arena como de finos, quedando fuera del huso granulométrico de referencia.



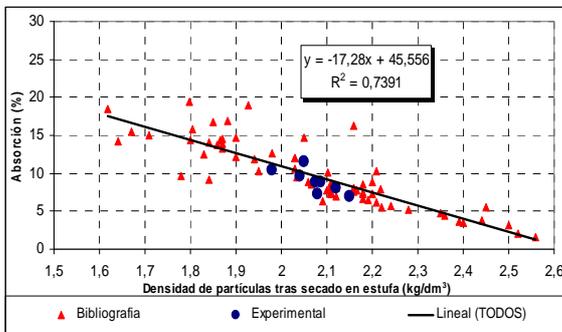
Gráfica 1: Granulometría de las distintas muestras de árido reciclado mixto

La *densidad* del árido reciclado mixto es inferior a la de un árido reciclado de hormigón, y por supuesto es también inferior a la de un árido natural. La densidad de partícula tras secado en estufa suele variar entre 1,6 y 2,5 kg/dm³, mientras que la densidad de partícula saturada con superficie seca suele estar comprendida entre 1,9 y 2,6 kg/dm³. En el caso de los áridos reciclados analizados en este estudio, los rangos se reducen notablemente (Gráficas 2 y 3).

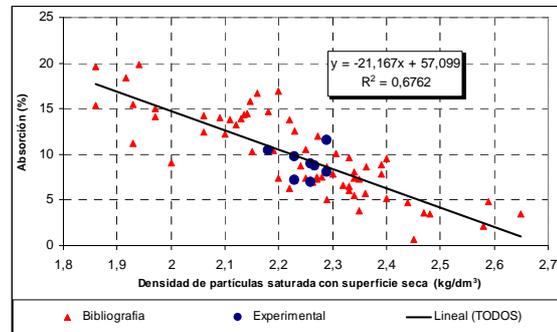
La *absorción* es una de las propiedades físicas del árido reciclado mixto que presenta una mayor diferencia con respecto al árido natural. Varía en un amplio rango según los estudios bibliográficos consultados, entre el 2% y el 20%. En el caso de los áridos reciclados analizados en este estudio, la absorción varía entre 6 y 10%. La absorción supera en la gran mayoría de los casos el límite del 7% establecido por la Instrucción EHE para árido reciclado de uso en hormigón no estructural, y están próximos a los valores menos exigentes de las normativas alemanas y brasileñas (15% y 12 % respectivamente) pero incumpliendo todos la normativa más exigente portuguesa (7%).

La elevada absorción del árido reciclado mixto es un aspecto importante a tener en cuenta para la fabricación del hormigón reciclado, siendo necesario cuantificar con precisión el agua absorbida por el árido para garantizar una buena consistencia del hormigón.

En las Gráficas 2 y 3 se relaciona la absorción de agua con la densidad tras secado en estufa y la densidad saturada con superficie seca de los áridos reciclados mixtos respectivamente. Se completa con los resultados obtenidos para los áridos ARM(N), ARM(S) y ARM(V), obteniéndose en ambos casos unas buenas correlaciones lineales ($R^2=0,74$ y $R^2=0,68$ respectivamente).

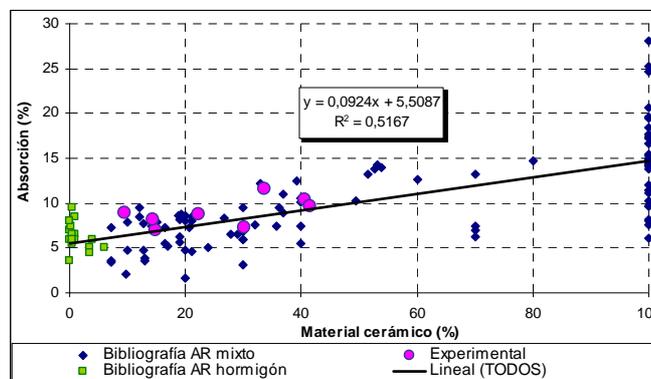


Gráfica 2: Relación entre la absorción y la densidad de partículas tras secado en estufa [7][9-32]



Gráfica 3: Relación entre la absorción y la densidad de partículas saturada con superficie seca [7][9-10][14][18-20][22][24-26][28][31][33-39]

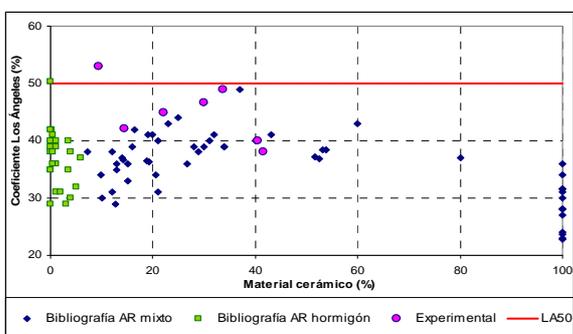
En general, la absorción de los áridos reciclados va a depender principalmente del contenido de material cerámico de la muestra, presentando valores elevados cuanto mayor es la proporción de cerámicos (Gráfica 4).



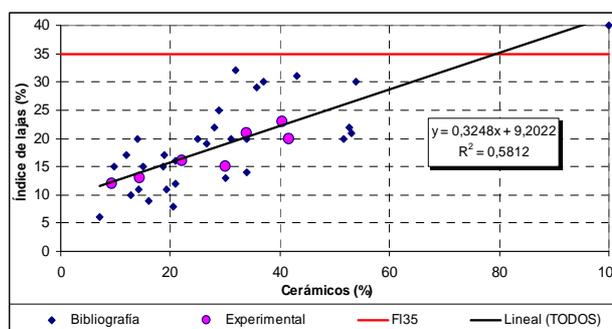
Gráfica 4: Relación entre la absorción y el contenido de material cerámico [7][9][15-16][18-19][22][24][33-35][37-41]

El *coeficiente de los Ángeles* se sitúa entre 42-53%, situándose en la mayoría de los casos dentro de la categoría LA50 que recoge la norma UNE-EN 12620 “Áridos para hormigón”. La Instrucción EHE fija, para hormigones de resistencia característica inferior a 30 N/mm², un coeficiente de desgaste de Los Ángeles de hasta un 50%, con lo que prácticamente la totalidad de las muestras cumplen este límite.

El *índice de las* de los áridos reciclados es superior al de los áridos naturales, observándose a mayor cantidad de material cerámico, un valor más elevado del contenido de las, aunque en todos los casos se cumple el límite del 35% establecido en la Instrucción EHE (Gráfica 6).



Gráfica 5: Relación entre el coeficiente de Los Ángeles y el contenido de material cerámico [7][9-12][21-22][24][27][32][33-34][36-37][41][43]



Gráfica 6: Relación entre el índice de las y el contenido de material cerámico [7][9][11-12][33][42-43]

La cuantificación del contenido de *partículas ligeras*, de densidad inferior a 2000 kg/m³ según la norma UNE-EN 1744-1, incluye partículas como mortero o ladrillo que no son tan perjudiciales como los que son objeto de la norma. En este caso, se recomendaría la realización del ensayo determinando el porcentaje de partículas de peso específico inferior a 1 (criterio fijado en varias normativas internacionales). Con este nuevo criterio, los valores obtenidos son muy reducidos, en todos los casos inferiores al 1%.



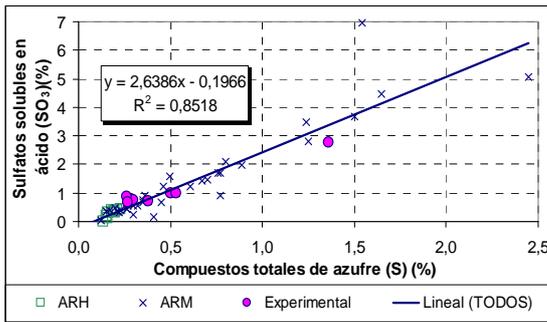
Fotografía 7: Partículas ligeras
ARM(S2) ($\rho < 2$)



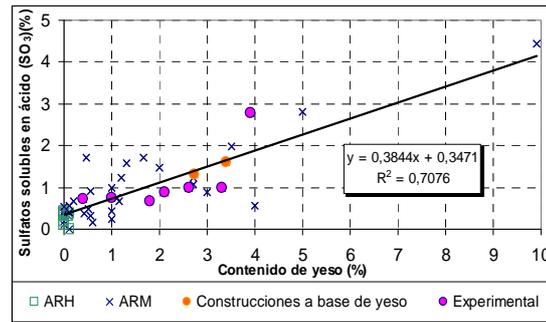
Fotografía 8: Partículas ligeras
ARM(S2) ($\rho < 1$)

El *contenido de sulfatos* puede ser muy variable en los áridos reciclados mixtos, dependiendo de las características del material de entrada, del procesamiento sufrido en la planta de reciclaje y de la presencia de contaminantes como el yeso (generalmente presente cuando el material procede de edificación). En general, suele presentar altos porcentajes de sulfatos, en muchas ocasiones por encima del límite del 0,8% establecido por la Instrucción EHE para el contenido de sulfatos solubles en ácido, con lo que se considera adecuado el límite del 1% propuesto por las normativas inglesas, holandesas y brasileñas.

Se ha obtenido una buena correlación entre el contenido de sulfatos solubles en ácido y el contenido de compuestos totales de azufre (Gráfica 7). La mayor parte de estos sulfatos provienen de partículas de yeso, según se observa en la Gráfica 8, en la que se obtiene que el contenido de sulfatos de áridos sin yeso se sitúa próximo a 0,35%. En las gráficas anteriores se han incluido datos procedentes de áridos reciclados procedentes de hormigón (ARHC y ARH).



Gráfica 7: Relación entre el contenido de contenido de compuestos totales de azufre y los sulfatos solubles en ácido [7][9][33][41][44-45]

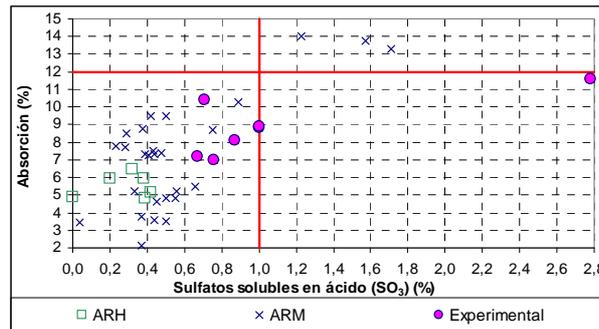


Gráfica 8: Relación entre el contenido de yeso y los sulfatos solubles en ácido [7][9][12][41-42]

3.2.2 Correlación entre la absorción y los sulfatos solubles en ácido

De acuerdo a los resultados anteriores, se considera el contenido de sulfatos y la absorción de agua las propiedades más restrictivas en la utilización del árido reciclado mixto, por lo que se ha estudiado la relación que existe entre ambos parámetros (Gráfica 9). Esta relación se debe fundamentalmente a que las muestras que presentan una mayor absorción son las que contienen un mayor porcentaje de material cerámicos, que al proceder habitualmente de estructuras de edificación, suelen presentar un cierto contenido de yeso como impurezas y por lo tanto, de sulfatos.

Como se puede observar en la gráfica 9, los áridos reciclados cuya absorción es inferior al 12% suelen tener unos contenidos de sulfatos solubles en ácido inferiores al 1% (límite propuesto en diferentes normativas internacionales [3-5]). Al contrario, aquellos áridos que tienen una absorción superior al 12% suelen tener un contenido de sulfatos solubles en ácido elevado, superior al 1%. El límite del 12% de la absorción coincide con el requisito propuesto por la normativa brasileña. A partir de estas consideraciones, se proponen estos dos requisitos como indicadores de calidad del árido reciclado mixto.



Gráfica 9: Relación entre la absorción y los sulfatos solubles en ácido [7][9-11][41]

4. CONCLUSIONES

- Se han caracterizado ocho muestras de árido grueso reciclado de origen mixto (mezcla mayoritariamente de residuos cerámicos y de hormigón), procedentes de tres plantas de reciclado de residuos de construcción y demolición diferentes, comparando sus propiedades con las de los áridos reciclados consultados en la bibliografía.
- La calidad de los áridos reciclados depende fundamentalmente de la calidad del material de origen y del procesamiento realizado en la planta de reciclado.
- Los áridos reciclados mixtos se caracterizan por presentar una granulometría adecuada, así como un coeficiente de Los Ángeles y un coeficiente de lajas que pueden cumplir los requisitos actuales establecidos para los áridos naturales para la fabricación de hormigón (50% y 35% respectivamente).
- Se recomienda limitar el contenido de partículas ligeras, estableciendo un contenido máximo de partículas de peso específico inferior a 1 del 1%.
- Las dos propiedades más restrictivas en el empleo de los áridos reciclados mixtos para hormigones no estructurales son la absorción de agua y el contenido de sulfatos, presentando en ambos casos valores muy elevados. Para estas dos propiedades se proponen nuevos límites del 12% y 1% respectivamente.
- La tabla 3 recoge las especificaciones recomendadas para los áridos gruesos reciclados mixtos, así como algunos límites orientativos (contenido de material cerámico, densidad saturada con superficie seca, densidad de partículas tras secado en estufa, absorción a los

10 minutos y contenido de yeso) que provienen de las correlaciones obtenidas en este estudio.

	REQUISITOS
Absorción	≤12%
Contenido de sulfatos solubles en ácido (SO ₃)	≤1%
Contenido de materiales no deseados (vidrio, plásticos, papel)	≤1%
Índice de lajas	≤35%
Coefficiente de Los Ángeles	≤50%
Desclasificados inferiores	≤5%
Contenido de finos	≤4%
Partículas de peso específico inferior a 1	≤1%
	LÍMITES ORIENTATIVOS
Contenido de material cerámico	≤70%
Densidad saturada con superficie seca	≥2,15 kg/dm ³
Densidad de partícula tras secado en estufa	≥1,95 kg/dm ³
Contenido de yeso (%)	2%

Tabla 3: Requisitos y límites orientativos sobre las propiedades del árido reciclado mixto

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, así como al Proyecto CLEAM (Construcción Limpia, Eficiente y Amigable con el Medio Ambiente), del que proceden algunos de los resultados presentados en este trabajo, el interés por el tema planteado.

REFERENCIAS

- [1] Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- [2] DIN 4226-100: Aggregates for mortar and concrete. Part 100: Recycled aggregates. 2002.
- [3] “Recycled Standardization in Brazil”. Universidade Estadual Paulista, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Universidade de Taubaté – 2004.
- [4] Especificação LNEC “Guia para a utilização de agregados reciclados grossos em betões de gigantes hidráulicos” – 2006.
- [5] BS 8500-2:2006: “Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1. Part2
- [6] NEN 5905:1997 “Aggregates for concrete. Materials with a density of at least 2000 kg/m³”
- [7] “Usos de áridos reciclados mixtos procedentes de Residuos de Construcción y Demolición” Investigación prenormativa. IHOBE. Gobierno Vasco. Resultados del proyecto CLEAM, Tarea 2.2 “Reciclado de RCDs como Áridos de Hormigones no Estructurales”.
- [8] UNE-EN 933-11:2009 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 11: Ensayo de clasificación de los componentes de los áridos gruesos reciclados.
- [9] AGRELA F., SÁNCHEZ DE JUAN M., AYUSO J., GERALDES V. L., JIMÉNEZ J. R., “Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete” Construction and Building Materials 25. 2011 pp 3950 – 3955.
- [10] WRAP Aggregate Research Programme “Performance Related Approach to Use of Recycled Aggregates” February 2007.

- [11] DHIR R. K., PAINE K. A., “Demonstration Project Utilising Coarse Recycled Aggregates”. Concrete Technology Unit. Report CTU/2403. 2003 pp 109.
- [12] JIMÉNEZ J. R., AGRELA F., AYUSO J., LÓPEZ M., “Estudio comparativo de los áridos reciclados de hormigón y mixtos como material para sub-bases de carreteras” *Materiales de construcción*, Vol. 61, nº302. Abril-junio 2011, pp 289-302.
- [13] KHATIB J. M., “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate”. *Cement and Concrete Research* 35, pp 763-769, 2005.
- [14] BRITO J., PEREIRA A. S., CORREIA J. R., “Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates”, *Cement and Concrete Composites* 27 , p. 429-433. 2005.
- [15] KIBRIYA T.; SPEARE, P.R.S.; “The use of crushed brick coarse aggregate in concrete”, *Concrete for Environment Enhancement and Protection*. Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, p.495-503. 2006.
- [16] POON C. S., CHAN D., “Paving blocks made with recycled concrete aggregate and crushed clay brick », Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. June – December 2004.
- [17] POON C. S., CHAN D., “Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates”, Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Environmental Engineering Unit. November 2004 – June 2005.
- [18] BARRA M., “Estudio de la durabilidad del hormigón reciclado en su aplicación como hormigón armado.” Tesis Doctoral. Escola Tècnica Superior d’Enginyers de Canals i Ports. 1996.
- [19] MANSUR M. A., WEE T. H., LEE S. C., “Crushed Bricks as Coarse Aggregate for Concrete”, Ref.8, p. 505-514. *Concrete for Enhancement and Protection*. Edited by R K Dhir and T D Dyer. Published by E & F N Spon, London. 1996.
- [20] ESTEFANO DE OLIVEIRA M. J., SILVEIRA DE ASSIS C., WANDERLEY TERNI A., “Study on compressed stress, water absorption and modulus of elasticity of produced concrete made by recycled aggregate”
- [21] ZAKARIA M. “Strength and elasticity of brick and artificial aggregate concrete” Bangladesh. University of Engineering and Technology.
- [22] KHALOO A. R “Crushed Tile Coarse Aggregate Concrete”, *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, Vol. 17 nº2, Diciembre 1995, pp119-125.
- [23] RAMAMURTHY K., GUMASTE K. S. “Properties of recycled aggregate concrete”. *The Indian Concrete Journal*. January 1998.
- [24] PARRA J. L, ALFARO; “Caracterización de RCDs de la Comunidad de Madrid como áridos reciclados para fabricación de hormigones”, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid 2001.
- [25] BARRA M., VÁZQUEZ E.; “Properties of concretes with recycled aggregates: influence of properties of the aggregates and their interpretation”, University of Uberlandia, Spain. In “Use of recycled concrete aggregate”, 1998.
- [26] JONES N., SOUTSOS M.N., MILLARD S. G., BUNGEY J. H., TICKELL R. G. “Developing precast concrete products made with recycled construction and demolition waste” University of Liverpool.
- [27] MAS GRACIA B., CLADERA BOHIGAS A. “Efecto de la incorporación de arido mixto reciclado en las propiedades de hormigones no estructurales” Universidad de las Islas Baleares. *Hormigon y acero*, nº253, 2009, pp 83-94.
- [28] CACHIM P.B., “Mechanical properties of brick aggregate concrete”. University of Aveiro & LABEST, DECivil, Portugal. *Construction and Building Materials* 23. 2009, pp 1292-1297.
- [29] SHIMIZU G. “Recycling of crushed bricks from demolished buildings as cement-based porous materials”. Nihon University College of Science & Technology, Department of Architecture, Tokyo. *Key Engineering Materials Vols 302-303*. 2006, pp 301-307.

- [30] DE BRITO J., GOMES M., “Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance” Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal. *Materials and Structures* 42. 2009, pp 645-662.
- [31] POON C. S., CHAN D., “Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base” Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University. *Construction and Building Materials* n°20. 2006, pp 578 – 585.
- [32] MAS B., CLADERA A., BESTARD J., MUNTANER D., LÓPEZ C. E., PIÑA S., PRADES J., “Concrete with mixed recycled aggregates: Influence of the type of cement” Universidad de las Islas Baleares. *Construction and Building Materials* n°34. 2012, pp 430-441.
- [33] MAS GRACIA B, PIÑA ÁLVAREZ S., CLADERA BOHIGAS A., LÓPEZ HINOJOSA C. E., PRADES LACASTA J., “Hormigón no estructural con áridos mixtos reciclados” Universidad de las Islas Baleares. V Congreso de ACHE.
- [34] RIBEIRO DE LIMA J. A., “Proposição de diretrizes para produção e normalização de residuo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos”. Tesis doctoral. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 1999
- [35] AKHTARUZZAMAN A. A., HASNAT A., “Properties of Concrete Using Crushes Bricks as Aggregate”, *Concrete International*. February, 1983.
- [36] SENTHAMARAI R. M., DEVADAS MANOHARAN P., “Concrete with ceramic waste aggregate” College of Engineering Guindy, Anna University, Madras, India. 2005. ref 53.pdf
- [37] DEBIEB F., KENAI S., “The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete”, University of Medea and University of Blida, Algeria. *Construction and Building Materials* 22. 2008, pp 886 - 893.
- [38] CHEN H-J., YEN T., CHEN K-H., “Use of building rubbles as recycled aggregates”, Department of Civil Engineering, National Chung-Hsing University, *Cement and Concrete Research* 33. 2003, pp 125 – 132.
- [39] KHALAF F. M., DEVENNY A. S. “Properties of New and Recycled Clay Brick Aggregates for Use in Concrete”, School of the Built Environment, Edinburgh. March 2003.
- [40] CIRELLI ANGULO S. “Variabilidade de agregados graúdos de residuos de construção e demolição reciclados”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia. 2000.
- [41] SANCHEZ DE JUAN, M.; “Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado en Hormigón Estructural”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2004.
- [42] VEGAS I., IBAÑEZ J. A., LISBONA A., SÁEZ DE CORTAZAR A., FRÍAS M., “Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections” Tecnalia, IHOBE e Instituto Eduardo Torroja (CSIC), Spain. *Construction and Building Materials* 25. 2011, pp 2674 - 2682.
- [43] MARTÍNEZ LAGE I, PÉREZ ORDÓÑEZ J. L., VÁZQUEZ HERRERO C., MARTÍNEZ ABELLA F., “Hormigones en masa fabricados con áridos reciclados mixtos” Universidade da Coruña. V Congreso de ACHE.
- [44] WRAP “Low-strength Concrete Ground Engineering Applications for Recycled and Secondary Aggregates”
- [45] MIST Mineral Industry Sustainable Technology “Measuring the potential reactivity of sulfides in aggregates” Final report. REID J. M., AVERY K., Project Code Number:MA/7/G/5/001. Mayo 2009