

Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas

Recycled aggregates concrete: aggregate and mix properties

B. GONZÁLEZ-FONTEBOA, F. MARTÍNEZ -ABELLA

Universidad de La Coruña

Persona de contacto/Corresponding author: bfonteboa@udc.es.

Fecha de recepción: 21-X-04
Fecha de aceptación: 14-II-05

ESPAÑA

RESUMEN

Se aborda el estudio de hormigones estructurales fabricados con áridos reciclados procedentes de hormigón, incidiéndose en dos aspectos:

1. Caracterización de tales áridos, procedentes del mercado español. Para ello se llevan a cabo ensayos de densidad, absorción, granulometría, coeficiente de forma, índice de lajas y dureza. Los resultados obtenidos han puesto de manifiesto que, a pesar de que existen diferencias notables (sobre todo en cuanto a densidad y absorción) con los áridos naturales, las características de los áridos hacen posible la fabricación de hormigones.

2. Ensayos sobre propiedades básicas de los hormigones: se establecen parámetros de dosificación para hormigones estructurales en ambientes no agresivos. Con dichos parámetros se fabrica un hormigón convencional y a continuación se ajusta la dosificación para la fabricación de un hormigón reciclado, en el que se sustituye el 50% de las fracciones gruesas naturales. Se llevan a cabo ensayos de caracterización de propiedades físicas (densidad en fresco, en estado endurecido y absorción) y propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a tracción y módulo de deformación). Los resultados indican que la sustitución del 50 % del árido grueso proporciona hormigones de características físicas y mecánicas similares a las del hormigón convencional.

PALABRAS CLAVE: árido reciclado, hormigón reciclado, resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo elástico.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Una de las líneas de trabajo que contempla el concepto de construcción sostenible es la minoración, reutilización, reciclaje y revalorización de los residuos que genera la propia actividad constructiva (residuos de construcción y demolición, RCD). El Informe Symonds (1) realizó una

SUMMARY

This study of structural concrete made with recycled concrete aggregate focuses on two issues:

1. The characterization of such aggregate on the Spanish market. This involved conducting standard tests to determine density, water absorption, grading, shape, flakiness and hardness. The results obtained show that, despite the considerable differences with respect to density and water absorption between these and natural aggregates, on the whole recycled aggregate is apt for use in concrete production.

2. Testing to determine the values of basic concrete properties: mix design parameters were established for structural concrete in non-aggressive environments. These parameters were used to produce conventional concrete, and then adjusted to manufacture recycled concrete aggregate (RCA) concrete, in which 50% of the coarse aggregate was replaced by the recycled material. Tests were conducted to determine the physical (density of the fresh and hardened material, water absorption) and mechanical (compressive strength, splitting tensile strength and modulus of elasticity) properties. The results showed that, from the standpoint of its physical and mechanical properties, concrete in which RCA accounted for 50% of the coarse aggregate compared favourably to conventional concrete.

KEYWORDS: recycled aggregate, recycled concrete, compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity.

1. INTRODUCTION AND OBJECTIVES

One of the lines of action explored in connection with sustainable construction covers the reduction, reuse, recycling and revaluation of waste generated by the construction industry itself (construction and demolition waste, CDW). In 1997 Symonds et al. (1) made a

primera estimación en 1997 de la cantidad de RCD generados en la Unión Europea, su composición estimada y el porcentaje de reutilización y reciclaje que se llevaba a cabo en los distintos países. Para España se indicaban 326 kg/hab/año, cifra obtenida a partir de datos puntuales que se han ido ampliando por comunidades con el desarrollo de planes territoriales de gestión. En la actualidad se puede considerar que la cantidad media generada es de 750 kg/hab/año, de los que aproximadamente el 75% corresponden a residuos inertes compuestos por material cerámico, áridos, rocas y hormigón. Esta importante fracción puede ser incorporada al proceso constructivo, tras un proceso de reciclaje, en forma de áridos con diversos usos en función de su composición, origen y propiedades.

En España existe un mercado en desarrollo dedicado a la reutilización de áridos reciclados, que incide fundamentalmente en el ámbito del material de relleno (zahorras, etc.). En otros países se ha desarrollado normativa específica para la utilización de tales áridos como componentes de nuevos hormigones estructurales, lo que en general se hace permitiendo la sustitución de una parte de los áridos gruesos naturales por áridos reciclados que cumplan una serie de especificaciones que, en general, implican eliminar la fracción de tipo cerámico. Los áridos reciclados procedentes de hormigón suelen cumplir las exigencias normativas pero plantean algunas particularidades que es necesario conocer, de forma especial cuando el porcentaje de sustitución supera el 20% de los áridos gruesos.

El trabajo desarrollado presenta, en primer lugar, las características de los áridos reciclados procedentes de hormigón que en la actualidad pueden encontrarse en el mercado español, cuyo destino principal es el de material de relleno (clasificado en el huso 0-40 mm) y, en algún caso, su integración en hormigones pobres de bajo control. En segundo lugar, se fabrican con esos áridos hormigones estructurales reciclados (HR) estudiándose tanto el proceso de fabricación como las propiedades fundamentales. En todo el trabajo se comparan las propiedades determinadas con las del hormigón convencional (HC) de referencia.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Los trabajos se desarrollaron en dos fases. En la primera fase se seleccionaron los áridos, naturales y reciclados, el aditivo, y el cemento, y se determinaron las características fundamentales de todos ellos. En la segunda se ajustó la dosificación del hormigón objetivo, HR, se fabricaron numerosas amasadas, y se realizaron ensayos de caracterización de las propiedades básicas de los hormigones HR, siempre comparadas con las del hormigón convencional de referencia.

preliminary estimate of the amount of CDW generated in the European Union, its approximate composition and the percentage reused and recycled across the Union. The figure given for Spain, 326 kg/per capita/year, was based on fairly sketchy data which have been gradually corrected as regional management plans have come on stream. At this time the average amount generated is estimated to be 750 kg/per capita/year, approximately 75% of which is inert waste consisting of fired clay, aggregate, stony and concrete materials. This is the fraction that can be recycled into the construction process and used as aggregate for different purposes, depending on composition, origin and properties.

In Spain there is a growing market for recycled concrete aggregate, essentially for backfill (graded aggregate and so forth). The specific legislation enacted in other countries on the use of this material as a component in new structural concrete normally deals with areas such as the percentage of natural coarse aggregate that can be replaced with recycled aggregate and the specifications the latter must meet; these usually include provisions on the elimination of fired clay products. While on the whole recycled concrete aggregate is compliant with regulatory requirements, it is characterized by certain particularities that must be understood and accommodated, especially when used in substitution of over 20% of the coarse aggregate.

The present study analyzed the RCA found on the Spanish market at this time, which is primarily used as backfill (particles passing the 40-mm sieve) and occasionally to produce poor concrete subject to fairly lax control. This recycled aggregate was used to make structural concrete (recycled aggregate concrete - RAC) and both the production process and the essential properties were studied for comparison to conventional concrete (CC).

2. EXPERIMENTAL PROGRAMME

The work was conducted by stages. In the first, the natural and recycled aggregate, admixture and cement to be used were chosen and their essential characteristics determined. In the second, proportioning was adjusted for the recycled aggregate concrete; finally, a series of batches of RAC and CC were prepared for testing and comparison.

2.1. Materiales

Cemento (C): Cemento Portland CEM I-42,5R. Se analizaron las características físicas, químicas y mecánicas de las partidas de cemento utilizadas, considerando los resultados adecuados a al pliego (RC-97).

Aditivo (A): Para obtener consistencias blandas (cono de Abrams entre 6 y 9 cm) se empleó superfluidificante (naftalenosulfonato) que garantizaba su compatibilidad con el cemento.

Áridos reciclados: se trabajó con material español procedente de demoliciones reales, de bajo control y clasificación única 0-40 mm (0-40R), formado fundamentalmente a partir de residuos de hormigón (72%) y piedra (20%) (Gráfica 1, Tablas 1 y 2). Las fracciones de áridos gruesos reciclados se obtuvieron a partir de un proceso de cribado y lavado del material citado, obteniéndose así dos fracciones, 4-12 mm (4-12R) y 10-25 mm (10-25R), despreciándose las restantes (0-4R y 25-40R).

Áridos naturales: como áridos naturales se utilizaron dos fracciones de árido grueso (AG), catalogadas como cuarcitas filonianas, de 4-12 mm (4-12C) y 10-25 mm (10-25C). El árido fino (AF) de 0-4 mm (0-4C) fue de origen calizo. Los áridos se sometieron a un proceso de lavado y cribado en planta.

2.1. Materials

Cement (C): Portland cement, CEM I – 42.5 R. The physical, chemical and mechanical characteristics of the cement were analyzed for conformity to standard RC-97.

Water-reducing admixture (A): A superfluidifier (Bettor Melcret 222) with guaranteed compatibility with the cement was used to obtain a softer concrete (6- to 9-cm slump, Abram's test).

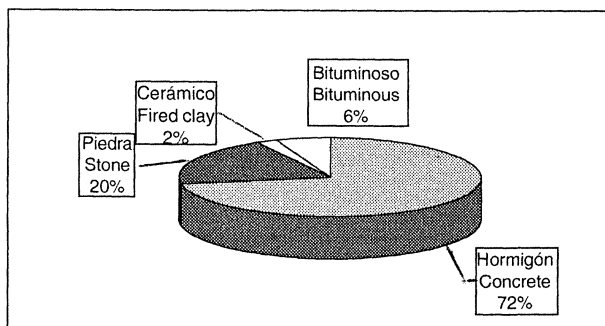
Recycled aggregate: the material used was singly classified (0-40 mm) (0-40R), laxly controlled concrete taken from demolition debris actually generated on Spanish worksites, comprising primarily concrete (72%) and stone (20%) rubble (Graph 1, Tables 1 and 2). The above material was sieved and washed for classification into several recycled coarse aggregate fractions, two of which - 4-12 mm (4-12R) and 10-25 mm (10-25 R)-were retained and the remainder discarded (0-4R and 25-40R).

Natural aggregate: the natural aggregate used consisted in two fractions of coarse, vein quartz aggregate (AG): 4-12 mm (4-12C) and 10-25 mm (10-25C). Limestone fines were used (0-4-mm, 0-4C). All aggregates were industrially washed and sieved.

TABLA 1/TABLE 1

Propiedades físicas de las fracciones 0-5 mm y 5-40 mm del 0-40R
Physical properties of the 0-5 mm and 5-40 mm fractions of the 0-40R

	0-5 mm	5-40 mm	
Densidad real muestra seca (g/cm^3)	2.13	2.32	Density (g/cm^3)
Densidad real muestra saturada superficie seca (g/cm^3)	2.32	2.44	Water saturated surface dry density (g/cm^3)
Coefficiente de absorción de agua (%)	9.30	5.00	Water absorption (%)
Equivalente de arena (%)	64.75	--	Sand equivalent (%)
Coefficiente "Los Ángeles" (%)	--	39.65	Abrasion resistance ("Los Angeles" coefficient) (%)



Gráfica 1.- Composición en peso de la fracción 0-40R (%).

Graph 1.- Composition of the 0-40R fraction (% referred to the weight).

TABLA 2/TABLE 2

Índice de lajas (UNE EN 933-3:1997) de la fracción 5-40 mm del 0-40R
Flakiness index (UNE-EN 933-3: 1997) for the 5-40 mm fraction of 0-40R

Fracción (mm) Fraction (mm)	Índice de lajas Slab index
25-31,5	12
20-25	8
12,5-16	10
10-12,6	10
6,3-10	12

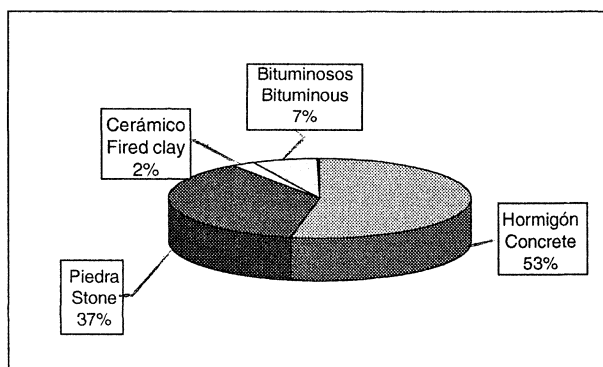
2.2. Propiedades de los áridos utilizados

Composición:

La composición del árido grueso utilizado para la fabricación de hormigones corresponde (Gráficas 2 y 3) a esperada para un árido procedente principalmente de hormigón. Se observa que el contenido de bituminosos supera, sin embargo, las recomendaciones de algunas normativas europeas al respecto (2, 3, 4).

Forma, Granulometrías y propiedades físico-mecánicas:

Para la caracterización de los áridos se obtuvieron muestras siguiendo las normas UNE-EN-932-1:1997 y UNE-EN-932-2:1999 y utilizando la UNE-EN 1097-5:2000 cuando se realiza el secado de las muestras previo al ensayo. La Tabla 3 resume los resultados obtenidos, que a continuación se presentan.



Gráfica 2.- Porcentaje en peso de la fracción 10-25R (%).

Graph 2.- Composition of the 10-25R fraction (% referred to the weight).

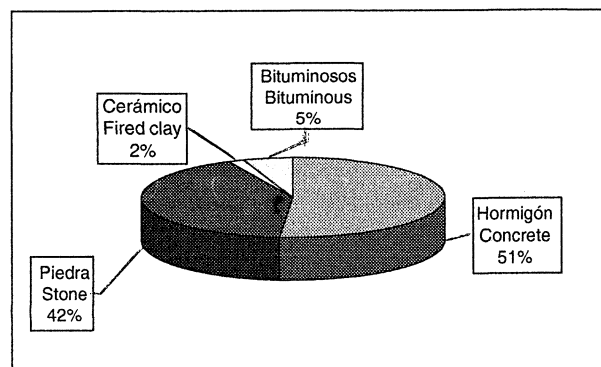
2.2. Aggregate properties

Composition:

The components of the coarse aggregate used to manufacture the concrete fell within a range typical of recycled concrete aggregate (Graphs 2 and 3), although the bituminous content was higher than recommended by certain European standards (2, 3, 4).

Shape, grading and physical-mechanical properties:

The aggregate was sampled for characterization as set out in Spanish/European standards UNE-EN-932-1:1997 and UNE-EN-932-2:1999 and dried to standard UNE-EN 1097-5:2000 prior to testing. The results are summarized in Table 3 below.



Gráfica 3.- Porcentaje en peso de la fracción 4-12R (%).

Graph 3.- Composition of the 4-12R fraction (% referred to the weight).

TABLA 3/TABLE 3

Propiedades físicas de los áridos utilizados Physical properties of the aggregates used

	EHE	0-4C	4-12C	10-25C	4-12R	10-25R	
Coefficiente de forma	(≥ 0.20)	--	0.19	0.22	0.20	0.23	Shape index
Módulo granulométrico	--	5.81	10.73	14.48	9.87	13.25	Fineness modulus
Finos (% que pasa por el tamiz 0,063 mm)	AG < 1 AF < 10	< 8.8	< 0.1	< 0.1	< 0.2	< 0.2	Fines content (% passing through a 0.063 mm sieve)
Partículas de tamaño inferior a 4 mm (%)	< 10	--	1.5	0.4	4.7	0.6	Particles less than 4 mm in size (%)
Índice de lajas (%)	(<35)	--	25	11	9	7	Slab index (%)
Densidad (g/cm^3)	--	2.68	2.64	2.64	2.35	2.37	Density (g/cm^3)
Densidad real saturada superficie seca (g/cm^3)	--	2.70	2.65	2.64	2.47	2.48	Water saturated surface dry density (g/cm^3)
Absorción (%)	--	0.88	0.07	0.17	4.82	4.59	Water Absorption (%)
Dureza (Los Ángeles) (%)	(≤ 40)	--	32	27	32	34	Abrasion resistance ("Los Angeles" coefficient) (%)

Granulometría (UNE-EN 933-1:1998 and UNE-EN 933-2/1M:1999): En general todos los áridos presentan curvas granulométricas continuas y módulos granulométricos similares para fracciones equivalentes, lo que influirá positivamente en la docilidad de todas las mezclas. La curva granulométrica de la arena está comprendida dentro del huso definido por la EHE, aunque para tamaños intermedios de 1,25 y 2,00 mm se sitúa muy cerca del límite inferior.

Porcentaje de finos y contenido de partículas de tamaño inferior a 4 mm: (UNE-EN 933-1:1998 y UNE-EN 933-2/1M:1999): las cuatro fracciones de árido grueso y la fracción fina se ajustan a los límites establecidos por la EHE.

Coeficiente de forma (UNE 7238-1971): es muy similar para cualquiera de las fracciones y supera el límite de 0,2 en las 10-25C y 10-25R. Tanto los áridos gruesos naturales como los reciclados presentan formas angulosas, con numerosas caras de fractura. Esto hace suponer que la trabajabilidad (menor en este tipo de áridos que en los redondeados) se verá influida de forma similar en todas las mezclas (incorporen o no áridos reciclados).

Índice de lajas (UNE 933-3-1997): es mayor en los áridos naturales utilizados aunque en ningún caso rebasa el límite de 35.

Dureza (UNE 1097-2:1999): en general, los áridos reciclados presentan mayor desgaste que los naturales a causa del desprendimiento de los restos de mortero adherido (5). En este caso no superan el valor límite de 40, presentando coeficientes similares a los naturales cuya baja dureza se conocía previamente.

Densidad (fracción fina UNE 83133-1990, fracción gruesa UNE 83134-1990): según los resultados obtenidos la densidad de la fracción 4-12R es un 11,4% menor que la fracción 4-12C y la de la fracción 10-25R un 10,1% menor que la 10-25C (Tabla 3). Esto se debe, nuevamente, al mortero que tienen adherido los áridos reciclados, lo que se ajusta a los resultados de otros autores (5).

Absorción (fracción fina UNE 83133-1990, fracción gruesa UNE 83134-1990): como ocurre con la densidad, a causa del mortero adherido, la absorción de los áridos reciclados es muy superior a la de los naturales. Para la fracción 4-12R es 56 veces superior y para la fracción 10-25R, 26 veces superior que las correspondientes naturales.

Propiedades físico-químicas de los áridos reciclados

Sobre la fracción gruesa de áridos reciclados, de los que no se tenía experiencia previa para la fabricación de hor-

***Grading** (UNE-EN 933-1:1998 and UNE-EN 933-2/1M:1999): all the aggregates were found to have continuous grading curves and similar fineness moduli for equivalent fractions, thereby ensuring good workability of the respective mixes. The grading curve for the sand was within the range defined in Spanish standard EHE, although with values very close to the lower limit for the intermediate sizes (1.25 to 2.0 mm).*

***Fines content and percentage of particles under 4 mm.** (UNE-EN 933-1:1998 and UNE-EN 933-2/1M:1999): all four coarse aggregate fractions and the fines fraction were EHE-compliant in respect of these parameters.*

***Shape index** (UNE 7238-1971): the values found were very similar in all the fractions and above the 0.2 threshold for the 10-25C and 10-25R fractions. Both the natural and recycled materials had angular shapes, with several faces resulting from fracture. Workability (poorer with angular than rounded aggregate), then, could be expected to be similarly affected in all the mixes (with or without recycled aggregate).*

***Flakiness index** (UNE 933-3-1997): this index was higher in the natural aggregate used, although never over the established limit of 35%.*

***Hardness (abrasion resistance)** (UNE 1097-2:1999): generally speaking, wear was greater in the recycled than the natural aggregate due to the detachment of the mortar adhered to the material (5). None of the RCAs exhibited values of over 40, and in fact their coefficients were similar to the previously known low figure that characterized the natural aggregate.*

***Density** (fines fraction UNE 83133-1990; coarse fractions UNE 83134-1990): the 4-12R fraction was found to be 11.4% less dense than the 4-12C fraction and the 10-25R fraction 10.1% less dense than the 10-25C fraction (Table 3), because of the mortar attached to the recycled aggregate. This finding concurs with results reported by other authors (5).*

***Water absorption** (fines fraction UNE 83133-1990; coarse fraction UNE 83134-1990): as in the case of density, due to the mortar adhered to the used aggregate, water absorption was found to be much greater in recycled than in natural aggregate: 56-fold for the 4-12R fraction and 26 times for the 10-25R fraction.*

Physical-chemical properties of recycled aggregate

In the absence of prior experience with recycled coarse

migones, se recopilaron y realizaron ensayos de propiedades físico-químicas (Tabla 4)

Terrones de arcilla (UNE 7133-58): el contenido de terrones de arcilla de los áridos reciclados es nulo, lo que cumple con las especificaciones de la EHE.

Partículas blandas (UNE 7134-58): el ensayo cuantifica, además de los áridos blandos, todas las partículas que contienen pasta adherida, ladrillo o material bituminoso. Eso lleva a determinar contenidos muy elevados, lo que plantea reconsiderar la validez del resultado del ensayo para este tipo de áridos.

Material retenido en el tamiz de 0,063 que flota en un líquido de peso específico 2 (UNE 7244-71): el ensayo cumple con las especificaciones de la EHE.

Compuestos totales de azufre, sulfatos solubles en ácido y cloruros (UNE 1744-1-99): el contenido de cloruros, así como el de sulfatos cumple con las especificaciones de la EHE. Los datos han sido obtenidos de los trabajos realizados con los mismos áridos por Etxeberria *et al.* (6)

En resumen, las propiedades de los áridos reciclados seleccionados son, en general, adecuadas para la fabricación de hormigones según la norma EHE. Densidad y absorción son las propiedades donde las diferencias con los áridos convencionales son más significativas. Ambas propiedades influirán negativamente en la docilidad de las mezclas de hormigón diseñadas.

2.3. Diseño de las mezclas de hormigón

El método de diseño de mezclas utilizado para la realización de este trabajo se basó en el de Bolomey. Inicialmente se trabajó con los áridos en estado natural, pero la gran variabilidad de sus humedades imposibilitaba el control de la consistencia de las mezclas. Se decidió, pues, secar los áridos mediante resistencias eléctricas. Las re-

aggregate for concrete manufacture, this fraction was tested for its physical-chemical properties (Table 4).

Clay content (UNE 7133-58): *with its nil clay content, the recycled aggregate was obviously within the limit laid down in standard EHE.*

Soft particles (UNE 7134-58): *in addition to the soft aggregate, the test quantified all the particles with mortar, brick or bituminous material attached. The high soft particle content values observed pose questions about the suitability of this test for this type of aggregate.*

Lightweight particles (UNE 7244-71): *the test results were standard EHE-compliant.*

Total sulphur, acid sulphate and chloride content (UNE 1744-1-99): *both the chloride and sulphate content were within the range specified in standard EHE. The data used were taken from the studies conducted on the same aggregate by Etxeberria et al (6).*

By and large, the recycled aggregate selected was suitable for producing concrete pursuant to Spanish standard EHE. RCA differed most significantly from conventional aggregate in terms of density and water absorption in ways, moreover, that would reduce the workability of the concrete mixes designed.

2.3. Concrete mix design

The mix design method used for this study was based on the Bolomey procedure. Initially, the aggregate was used in its natural state, but moisture was found to vary so widely that it proved to be a serious obstacle to controlling mix consistency. To surmount this difficulty, the aggregate was dried with electrical resistors. This procedure yielded

TABLA 4/TABLE 4

Propiedades físico-químicas de los áridos gruesos reciclados
Physical- chemical properties of the recycled aggregates

	Terrones de arcilla	Partículas blandas	Material retenido en el tamiz de 0,063mm que flota en un líquido de peso específico 2	Compuestos totales de azufre	Sulfatos solubles en ácidos	Cloruros
EHE (%)	≤0.25	≤5	≤1	≤1	≤0.8	≤0.05
Ensayo/Test (%)	0	20.36	0.04	0.55	0.2	0.0055
	<i>Clay content</i>	<i>Soft particles</i>	<i>Lightweight particles</i>	<i>Total sulphate (SO₃⁼)</i>	<i>Acid sulphate (SO₃⁼)</i>	<i>Chlorides (Cl)</i>

ducciones de humedad en este proceso permitieron trabajar con los áridos en estado prácticamente seco, obteniéndose humedades para todas las fracciones del orden del 0,1%.

No se consideró la sustitución de árido fino convencional por árido fino reciclado de acuerdo a normativas como la japonesa (7) o inglesa (2). En efecto, el árido fino reciclado contiene una mayor cantidad de mortero adherido lo que se traduce en dificultades para conseguir consistencias blandas, aumentos considerables de deformación por retracción y fluencia, disminución elevada del módulo de deformación y aumento considerable de las pérdidas de resistencia (8). Diversas normativas y autores contemplan la posibilidad de introducir áridos reciclados en la fabricación de hormigón estructural (Rilem (3), Bélgica (4), Hong Kong (9), Holanda (10)), estableciendo límites variables al porcentaje de sustitución del árido grueso, lo que se liga directamente a la pérdida de resistencia del hormigón resultante. Por debajo del 20% los efectos son mínimos, mientras que por encima del 50% comienzan a ser importantes.

Se establecieron como parámetros de diseño los correspondientes a un hormigón para armar sometido a una clase de exposición normal (IIa y IIb) y consistencia blanda (6-9 cm de asiento en Cono de Abrams), características habituales en el campo de la edificación española. Con este dato como partida, se establece, según la EHE: relación W/C (agua total/material cementante) $\leq 0,55$ (este valor incluye el agua que aportan los áridos debida a su humedad y que se calcula previamente a la fabricación), contenido de **cemento** $\geq 300 \text{ kg/m}^3$, **resistencia** a compresión a alcanzar en 28 días (UNE 83304:1984) $\geq 30 \text{ MPa}$, y **consistencia** blanda, definida por un asiento en cono de Abrams entre 6-9 cm.

Tras numerosos tanteos se ajustaron los parámetros de dosificación (tabla 5) según las siguientes pautas:

- Ajuste del de la relación W/C, contenido cemento y porcentaje de superfluidificante en los HC teniendo en cuenta los objetivos de consistencia y resistencia apuntados.
- Ajuste del porcentaje de sustitución de áridos gruesos naturales por áridos gruesos reciclados al 50%

virtually dry aggregate, with the moisture content in all the fractions declining to around 0.1%.

The possibility of replacing conventional fines with recycled fines, further to Japanese (7) or British (2) standards, was ruled out. The larger proportion of adhered mortar in recycled fines makes fluid concrete consistencies more difficult to achieve and causes substantial increases in strain as a result of shrinkage and creep; a significant drop in the modulus of elasticity and a steep decline in strength (8). The possibility of using recycled aggregate to produce structural concrete has been addressed in a number of standards (Rilem (3), Belgium (4), Hong Kong (9), Netherlands (10)), which establish variable limits for the percentage of coarse aggregate that can be replaced, a factor directly associated with loss of concrete strength. The effects are negligible when less than 20% RCA is used, and particularly relevant when it accounts for 50% or more of the total.

The mix was designed in accordance with standard building practice in Spain, i.e., a fluid (6-9 cm slump in the Abrams test) concrete for reinforcement, apt for exposure to normal weathering (IIa and IIb). Building on this premise and standard EHE requirements, the following values were established: W/C ratio (total water/cementitious material) ≤ 0.55 (this value includes the water from aggregate moisture, computed prior to concrete production); cement content $\geq 300 \text{ kg/m}^3$; compressive strength to be developed in 28 days (UNE 83304:1984) $\geq 30 \text{ MPa}$; and consistency, as required to attain a 6-9-cm slump (Abrams test).

After numerous trials, the mix parameters (Table 5) were adjusted to the following guidelines:

- *Adjustment of W/C ratio, cement content and percentage of water-reducing admixture in the CC to take account of the consistency and strength objectives established.*
- *Adjustment of the proportion of natural coarse aggregate to be replaced with recycled coarse*

TABLA 5/TABLE 5

Parámetros básicos de dosificación
Basic proportion parameters

	0-4C	4-12C	4-12R	10-25C	10-25R	C	W/C	A/C	AF/AG	(AG+AF)/C	
	%	%	%	%	%	kg/m ³	kg/kg	kg/kg x100	kg/kg	kg/kg	
HC	100	100	0	100	0	325	0.55	1.35	0.97	6.08	CC
HR	100	50	50	50	50	345	0.55	1.26	0.96	5.43	RC

(en volumen), en función de las resistencias a compresión mínimas a 28 días.

- Ajuste del contenido de cemento del HR para obtener consistencias similares al HC manteniendo el porcentaje de superfluidificante. Con este objetivo se aumentó la cantidad de cemento en un 6,2%, resultado coincidente con los trabajos de Ravindrarajah y Tam (11).

2.4. Diseño de los ensayos

Se realizaron 10 amasadas de HC y 10 de HR. El programa de ensayos para cada amasada suponía la realización de 212 ensayos (146 de resistencia a compresión a distintas edades y para diferentes velocidades, 18 de resistencia a tracción indirecta a diferentes edades, 40 de módulo de deformación a diferentes edades y 8 de absorción según ASTM-C642-97). El total de ensayos de caracterización de cada material fue, pues, de 2.120.

3. RESULTADO DE LOS ENSAYOS

3.1. Consistencia (UNE 83313:1990)

Tras el período de amasado se realizó el ensayo de consistencia mediante el cono de Abrams según el cual todas las mezclas presentaron consistencia blanda según EHE (cono de Abrams entre 6 y 9 cm, tolerancia ± 1) (Tabla 6).

3.2. Densidad en estados fresco (UNE 83317:1991), y endurecido (UNE 83312:90 y ASTM-C642-97)

Sobre todas las probetas fabricadas se determinaron densidad en estado fresco y en estado endurecido. En la Tabla 5 se observan los valores medios y las variaciones (en porcentaje), con respecto al HC. Tras analizar los valores de la densidad en estado fresco (Tabla 7), se constata que el HC presenta los valores más altos, con una media de 2,40 t/m³. Los hormigones reciclados presentan, en general, valores menores. En estado fresco se reproducen las observaciones apuntadas.

aggregate to 50% (by volume), subject to the minimum 28-day compressive strength values established.

- *Adjustment of the concrete content in the recycled aggregate concrete to obtain consistencies similar to the consistency obtained for the CC, without varying the percentage of the superfluidifier. This led to increasing the amount of cement by 6.2%, a figure that concurs with the results reported by Ravindrarajah and Tam (11).*

2.4. Test design

Ten batches of CC and 10 of RAC were prepared. The test programme called for 212 trials on each batch (146 for compressive strength at different ages and loading rates, 18 for splitting tensile strength at different ages, 40 for modulus of elasticity at different ages and 8 for water absorption as per ASTM-C642-97). A total of 2120 trials was conducted, therefore, on each type of material.

3. TEST RESULTS

3.1. Consistency (UNE 83313:1990).

The slump test (Abrams method) showed that all the mixes had a fluid consistency, as defined in Spanish standard EHE (6-9-cm slump, tolerance ± 1) (Table 6).

3.2. Density of fresh (UNE 83317:1991) and hardened (UNE 83312:90 and ASTM-C642-97) concrete

Fresh and hardened density values were found for all the specimens. Table 5 gives the mean values, along with the variations with respect to CC (in per cent). It will be noted from the density values for fresh concrete in Table 7 that the highest density was found for CC, with a mean of 2.40 t/m³. The values for the recycled concrete aggregate concrete were generally lower. The fresh concrete was observed to follow a similar pattern.

TABLA 6/TABLE 6

Resultados de consistencia
Consistency

	Asiento en cono de Abrams (cm) de las amasadas										Media (cm)	
HC	9.0	6.0	7.5	8.0	8.0	6.5	7.0	6.0	7.0	8.0	7.3	CC
HR	7.5	5.0	8.0	8.5	8.0	9.5	6.5	9.0	7.0	6.5	7.6	RC
	<i>Slump values (Abrams method) (cm)</i>										<i>Average (cm)</i>	

TABLA 7/TABLE 7

Densidad media (t/m^3) en estado fresco (UNE 83-317-91) y endurecido (UNE 83-312-90 y ASTM-C642-97) a 28 y 115 días
Average Density (t/m^3) of fresh (UNE 83317:1991) and hardened (UNE 83312:1990, ASTM-C642:97) concrete at 28 and 115 days

	Fresco	Endurecido			
	Muestra según se recibe a 28 días (UNE 83317-91)	Muestra según se recibe a 28 días (UNE 83312-90)	Muestra seca a 115 días (ASTM-C642-97)	Muestra saturada a 115 días (ASTM-C642-97)	
HC	2.40 (0.00 %)	2.40 (0.00 %)	2.29 (0.00 %)	2.41 (0.00 %)	CC
HR	2.37 (-1.16 %)	2.38 (-1.01 %)	2.25 (-1.75 %)	2.39 (-0.83 %)	RC
	<i>Specimen at 28 days (UNE 83317:1991)</i>	<i>Specimen at 28 days (UNE 83312:1990)</i>	<i>Dry Specimen at 115 days (ASTM-C642:97)</i>	<i>Saturated Specimen at 115 days (ASTM-C642:97)</i>	
	<i>Fresh</i>	<i>Hardened</i>			

Nota: entre paréntesis (Densidad HR-Densidad HC) x 100 / Densidad HC.

NB: in brackets (RC Density- CC Density) x 100 / CC Density.

TABLA 8/TABLE 8

Absorción media tras inmersión (%) y tras inmersión y hervido (%) (ASTM-C642-97) a 115 días
Average Water Absorption after immersion (%) and after immersion and boiling (%) (ASTM-C642:97) at 115 days

	% Absorción tras inmersión	% Absorción tras inmersión y hervido	
HC	5.287 (0.00 %)	5.622 (0.00 %)	CC
HR	6.165 (16.61 %)	6.520 (15.96 %)	RC
	<i>% Absorption after immersion</i>	<i>% Absorption after immersion and boiling</i>	

Nota: entre paréntesis (Absorción HR-Absorción HC) x 100 / Absorción HC.

NB: in brackets (RC Absorption-CC Absorption) x 100 / CC Absorption.

3.3. Absorción (ASTM-C642-97)

Se realizaron ensayos de absorción sobre probetas cúbicas de cada uno de los hormigones siguiendo la norma ASTM-C642-97. De cada material se tomaron al menos tres probetas cúbicas que se seccionaron por la mitad. Sobre cada una de estas mitades se realizó el ensayo de absorción. Los resultados obtenidos indican una mayor absorción en los hormigones reciclados (Tabla 8), con un porcentaje de aumento en la absorción tras inmersión de 16,61% y de la absorción tras inmersión y hervido de 15,96%. El mortero adherido de estos áridos es poroso lo que provoca que la penetración de agua en los poros accesibles aumente con respecto a un hormigón convencional.

3.4. Resistencia a compresión (UNE 83304:1984)

Los resultados de roturas en probetas cúbicas y cilíndricas a distintas edades se presentan en la Tabla 9. Puede

3.3 Water absorption (ASTM-C642-97)

Cubes of each of the types of concrete were tested for water absorption as described in standard ASTM-C642-97. At least three cubes were split down the middle and tested for each type of material. Water absorption studies were conducted on both halves. The results obtained showed greater absorption by the recycled aggregate concrete (Table 8), with values 16.61% higher after immersion and 15.96% after immersion and boiling. The porous mortar adhering to the recycled aggregate and facilitating water penetration into the accessible pores was chiefly responsible for these differences.

3.4. Compressive strength (UNE 83304:1984)

The results of cubic and cylindrical specimen failure at different ages are shown in Table 9. The strength of these

TABLA 9/TABLE 9

Resistencias a compresión media (MPa) (UNE 83304:1984) a distintas edades (7, 28 y 115 días)
Average compressive strength (MPa) (UNE 83304:1984 at different test ages (7, 28 and 115 days))

	CILÍNDRICA / CYLINDER			CÚBICA / CUBE			
	$f_{c,7}$	$f_{c,28}$	$f_{c,115}$	$f_{c,7}$	$f_{c,28}$	$f_{c,115}$	
HC	30.72 (0.00)	36.04 (0.00)	39.02 (0.00)	37.89 (0.00)	42.93 (0.00)	47.55 (0.00)	CC
HR	30.44 (-0.93)	35.85 (-0.53)	40.21 (3.03)	36.97 (-2.42)	42.77 (-0.38)	48.52 (2.05)	RC

Nota: entre paréntesis ($f_{c,j}$ HR- $f_{c,j}$ HC) x100/ $f_{c,j}$ HC, siendo "j" la edad en días

NB: In brackets (f_c, j RC- f_c, j CC) x100/ f_c, j CC, with "j" representing their age in days.

considerarse que la resistencia de estos hormigones, con el 50 % de áridos gruesos naturales sustituidos por áridos reciclados, se controla por tres fenómenos:

- Cantidad de agua que es realmente efectiva en las mezclas. Los áridos reciclados presentan una elevada absorción de forma que, estando secos inicialmente, incorporan una cierta cantidad de agua que no reaccionará con el cemento. Así, la cantidad de agua en la pasta de estos hormigones es menor que la de los hormigones convencionales, lo que provoca que puedan llegar a desarrollar mayores resistencias.
- Cantidad de cemento. El aumento en la cantidad de cemento de los hormigones reciclados para mantener las consistencias, aun manteniendo la relación W/C, produce un aumento en la cantidad de pasta en la mezcla, con lo que se consigue cerrar mejor los huecos y se produce una mayor acción conglomerante.
- Características de los áridos. A pesar de que los áridos reciclados utilizados presentaban unas buenas características en cuanto a granulometrías, forma, y dureza, la unión mortero adherido-mortero nuevo constituye un punto débil en los hormigones fabricados con estos áridos.

Trabajando con un aumento de un 6,2% en el contenido de cemento y con los áridos en estado seco las resistencias a compresión de los HR resultaron similares a las de los HC.

El estudio sobre la evolución de resistencias a compresión con la edad indicó de forma sistemática (tanto en probeta cilíndrica como en probeta cúbica) que el aumento de resistencias de los hormigones reciclados a partir de los 28 días es más notable que el de los hormigones convencionales (Gráficas 4 y 5).

3.5. Resistencia a tracción (UNE 83306:1985)

Si realizamos un estudio comparativo de los resultados de las resistencias a tracción obtenemos los resultados

concretes, in which 50% of the natural coarse aggregate was replaced with recycled aggregate, depends on three factors:

- Amount of water actually in the mix. Since recycled aggregate has a high absorption rate, and is initially dry, it takes up a certain amount of water that fails to react with the cement. The smaller amount of water in RAC than in conventional concrete paste may lead to greater strength in the former.
- Amount of cement. The larger amounts of cement added to recycled aggregate concretes to maintain the consistency without varying the W/C ratio, translates into a greater amount of paste in the mix, decreasing porosity and enhancing binding.

Aggregate characteristics Despite the good grading, shape and hardness of the recycled aggregate, bonding between the adhered and the new mortar is a weak point in concretes made with such aggregate.

When the cement content was raised by 6.2% and dry aggregate used in its manufacture, the RAC yielded compressive strength values similar to the values recorded for CC.

The analysis of compressive strength trends with age consistently showed (both in cylindrical and cubic specimens) that after 28 days, strength rose more rapidly in recycled aggregate concrete than in conventional concrete (Graphs 4 and 5).

3.5. Splitting tensile strength (UNE 83306:1985)

Table 10 compares the splitting tensile strengths for the two types of concrete. It may be inferred from these

TABLA 10/TABLE 10

Resistencias a tracción indirecta media (MPa) (UNE 83306:1985) a diferentes edades (7, 28 y 115 días)
 Average tensile splitting strength (MPa) (UNE 83306:1985) for the various test ages (7, 28 and 115 days)

	$f_{ct,7}$	$f_{ct,28}$	$f_{ct,115}$	
HC	3.12 (0.00)	3.15 (0.00)	3.32 (0.00)	CC
HR	3.17 (1.51)	3.00 (-4.77)	3.37 (1.42)	RC

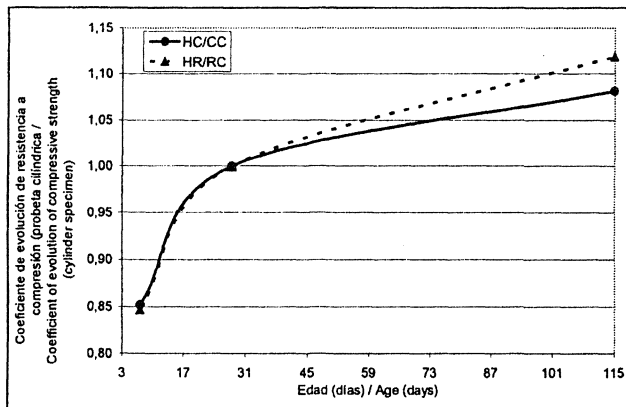
Nota: entre paréntesis $(f_{ct,j} HR - f_{ct,j} HC) \times 100 / f_{ct,j} HC$, siendo "j" la edad en días

NB: in brackets $(f_{ct,j} RC - f_{ct,j} CC) \times 100 / f_{ct,j} CC$, with "j" representing j their age in days

TABLA 11/TABLE 11

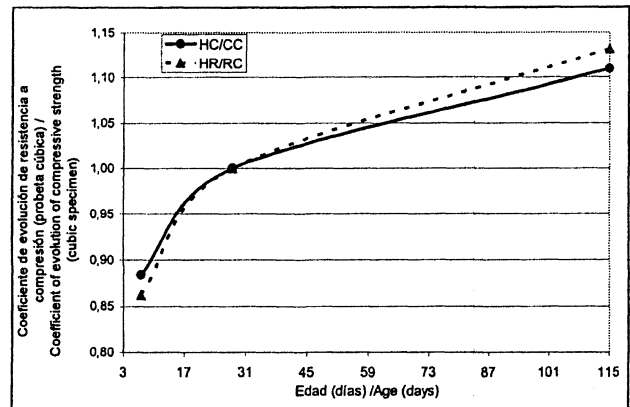
Módulo de deformación medio (MPa) (ASTM C 469) a diferentes edades (7, 28 y 115 días)
 Average static modulus of elasticity (MPa) (ASTM C 469) for the various test ages (7, 28 and 115 days)

	$E_{c,7}$	$E_{c,28}$	$E_{c,115}$	
HC	28324.46 (0.00)	32227.84 (0.00)	32478.07 (0.00)	CC
HR	26194.59 (-7.52)	28576.54 (-11.33)	28854.55 (-11.16)	RC



Gráfica 4.- Coeficientes de evolución de resistencias a compresión en probeta cilíndrica ($f_{c,j} / f_{c,28}$, siendo «j» la edad en días).

Graph 4.- Coefficient of evolution of compressive strength using cylinder specimens ($f_{c,j} / f_{c,28}$, with «j» representing j their age).



Gráfica 5.- Coeficientes de evolución de resistencias a compresión en probeta cúbica ($f_{c,j} / f_{c,28}$, siendo «j» la edad en días).

Graph 5.- Coefficient of evolution of compressive strength using cubic specimens ($f_{c,j} / f_{c,28}$, with «j» representing j their age).

que se resumen en la Tabla 10. Tras el análisis de dichos resultados se puede concluir que la incorporación de árido reciclado no tiene especial influencia en la resistencia a tracción de los hormigones con los que se ha trabajado. En este caso, el estudio sobre la evolución de resistencias a tracción con la edad mostró que ésta se produce en igual magnitud en hormigones convencionales que en reciclados (Gráfica 6).

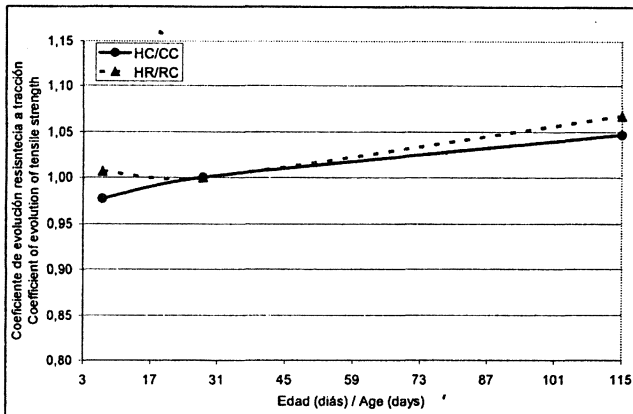
3.6. Módulo de deformación (ASTM C 469)

Los resultados de módulo de deformación en probetas cilíndricas para las distintas edades de ensayo se adjuntan en la Tabla 11, en la que se observan los valores medios y las variaciones obtenidos. Se observa que las

findings that the inclusion of recycled aggregate had no particular impact on the tensile strength of the concretes studied. Indeed, a review of splitting tensile strength trends showed that the values of this parameter increased at the same rate in conventional and recycled aggregate concretes (Graph 6).

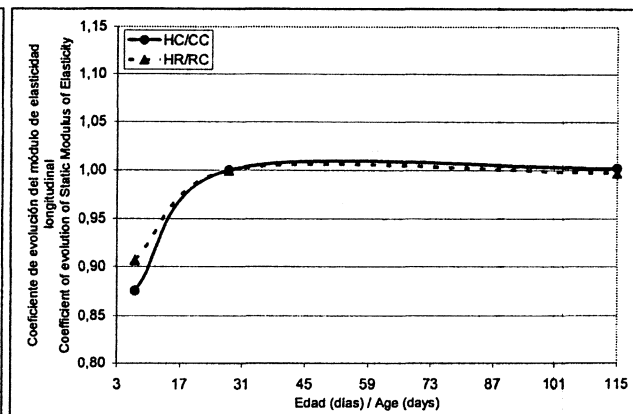
3.6. Static modulus of elasticity (ASTM C469)

The mean modulus of elasticity values for cylindrical specimens at the various test ages are given in Table 11, along with variations compared to CC. The recycled aggregate concrete specimens showed lower modulus of



Gráfica 6.- Coeficientes de evolución de resistencias a tracción indirecta ($f_{ct,j}/f_{ct,28}$, siendo «j» la edad en días).

Graph 6.- Coefficient of evolution of tensile splitting strength ($f_{ct,j}/f_{ct,28}$, with «j» representing j their age).



Gráfica 7.- Coeficientes de evolución de módulo de deformación longitudinal ($E_{c,j}/E_{c,28}$, siendo «j» la edad en días).

Graph 7.- Coefficient of evolution of static modulus of elasticity ($E_{c,j}/E_{c,28}$, with «j» representing j their age).

TABLE 12/TABLE 12

Resistencia a compresión media (MPa) a 115 días
Average compressive strength (MPa) at 115 days

	f_c (velocidad normalizada: 8,66 kN/s) ($f_{c,vn}$)	f_c (velocidad lenta: 0,06 kN/s) ($f_{c,vl}$)	$(f_{c,vl} - f_{c,vn}) \times 100 / f_{c,vn}$	
HC	38.88	37.03	4.77 %	CC
HR	38.35	34.89	9.03 %	RC
	f_c (standard speed: 8.66 kN/s) ($f_{c,ss}$)	f_c (low speed: 0.06 kN/s) ($f_{c,ls}$)	$(f_{c,ls} - f_{c,ss}) \times 100 / f_{c,vn}$	

probetas que presentaron menores valores de módulo de deformación fueron las correspondientes a los hormigones que incorporan árido reciclado (-11,32% a 7 días y -17,60% a 28 días).

Como en resistencias a tracción indirecta, la evolución del módulo de deformación de los hormigones reciclados es muy similar a la de los hormigones convencionales (Gráfica 7).

3.7. Roturas a carga lenta. Fenómenos de fatiga

Aunque no se realizaron ensayos de fatiga propiamente dichos, sí se realizó un ensayo a partir del que es posible estimar el comportamiento frente a fatiga de los distintos hormigones. Se tomaron cuatro probetas cilíndricas de cada material y se rompieron a compresión, dos a velocidad normalizada (8,66 kN/s) (UNE 83304:1984) y dos a velocidad lenta (misma norma pero con velocidad 0,06 kN/s). Los resultados obtenidos (Tabla 12) indican que las pérdidas de resistencia mayores se producen en los HR (9,03%), lo que hace suponer un comportamiento bajo efectos de fatiga peor que el de los HC.

elasticity values (-11.32 % after 7 days and -17.60 % after 28 days).

As in the case of splitting tensile strength, the pattern observed for the static modulus of elasticity values was much the same in recycled aggregate and conventional concrete (Graph 7).

3.7. Sustained load. Fatigue

Although no fatigue tests were conducted per se, the fatigue performance of the various concretes could be estimated from one of the tests run. Four cylindrical specimens of each material were compression tested to failure, two at a standard loading rate (8.66 kN/s) (UNE 83304:1984) and two at a slower rate (same standard, but at a loading rate of 0.06 kN/s). The greatest strength losses (Table 12) were observed in the RACs (9.03%), which is an indication that they would resist fatigue less effectively than CCs.

4. CONCLUSIONES

- Las características de los áridos reciclados hacen a éstos adecuados, a priori, para la fabricación de hormigones que vayan a estar sometidos a clase II (según EHE). Destacan, frente a los áridos naturales, su menor densidad y mayor absorción.
- La sustitución del 50% de los áridos gruesos naturales por áridos gruesos reciclados ha precisado, para mantener la trabajabilidad de las mezclas sin modificar la relación W/C, aumentar la cantidad de cemento en un 6,2%. Con este aumento se constata la posibilidad de fabricar hormigones reciclados que, con consistencias blandas, alcanzan resistencias a 28 días superiores a 30 MPa.
- Los hormigones reciclados presentaron valores de densidad, en estado fresco y en estado endurecido, inferiores a las de los naturales y valores de absorción superiores.
- La resistencia a compresión de los hormigones reciclados fue similar a la de los convencionales, intuyéndose una mayor ganancia de resistencias en los hormigones reciclados para edades superiores a los 28 días.
- Las resistencias a tracción indirecta no presentan diferencias entre los HC y los HR, ni en valores obtenidos, ni en la evolución temporal.
- En todos los hormigones reciclados se ha constatado una disminución del módulo de deformación, así como un peor comportamiento frente a cansancio. El envejecimiento de los HR no mejora estas propiedades, a diferencia de las resistencias a compresión.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el proyecto “Diseño Integrado de Hormigones de Altas Prestaciones dirigido al Usuario (DIHAPO)”, ref 1FD97-1973-C02-01, financiado con fondos FEDER de la Unión Europea. Se agradece el apoyo de las empresas Cuarzos Industriales, Excansa, Ferroaltántica, Cementos Cosmos, Bettor y Sogama, así como la colaboración de la UPC, de María Recarey e Julio C. Añón y de todo el personal del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITTEC) de la Universidad de La Coruña.

4. CONCLUSIONS

- *For its characteristics, the recycled aggregate was found, a priori, to be suitable for the manufacture of concrete to be exposed to class II (EHE standard) actions. Compared to natural aggregate, it was observed to be less dense and more prone to absorb water.*
- *Replacing 50% of the natural coarse aggregate with recycled coarse aggregate necessitated a 6.2% increase in the amount of cement in the mix to maintain workability without varying the W/C ratio. The fluid, recycled aggregate concrete so produced developed 28-day strengths of over 30 MPa.*
- *The recycled aggregate concrete was less dense, both when fresh and after hardening, and absorbed more water than the concrete made with natural aggregate.*
- *Compressive strength was similar in recycled aggregate and conventional concrete, with higher strength gains in the recycled than the conventional product after 28 days.*
- *No differences in splitting tensile strength were found between CCs and RACs either in terms of absolute values or development over time.*
- *All the recycled aggregate concretes exhibited lower modulus of elasticity values and poorer fatigue performance than the conventional product. Unlike compressive strength, these properties did not improve with age in the RAC.*

ACKNOWLEDGEMENTS

This study forms a part of the project titled “Diseño Integrado de Hormigones de Altas Prestaciones dirigido al Usuario (DIHAPO)” (Integrated design of high performance concrete for users), ref. 1FD97-1973-C02-01, financed with European Union FEDER funds. The authors wish to express their gratitude to the following companies for their support: Cuarzos Industriales, Excansa, Ferroaltántica, Cementos Cosmos, Bettor and Sogama, as well as to María Recarey and Julio C. Añón and the entire staff of the Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITTEC-Centre for Technological Innovation in Building and Civil Engineering) of the University of La Coruña for their assistance and co-operation.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Symonds, Argus, Cowi y PRC Bouwcentrum; "Construction and Demolition Waste Management Practices, and Their Economic Impacts"; Report to DGXI European Commission (febrero 1999).
- (2) Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1: Part. 2: Specification for constituent materials and concrete.
- (3) RILEM, Technical Committee, TC 121: "121-DGR, Guidance for Demolition and Re-use of Concrete and Masonry. Specifications for Concrete with Recycled Aggregates"; Materials and Structures Vol. 27, N° 173 (1994), pp. 557-559.
- (4) B. P. Simons, F. Henderieckx: "Guidelines for Demolition with Respect to the Reuse of Building Materials: Guidelines and Experiences in Belgium"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen (1993), pp. 25-34; ISBN: 0-412-32110-6.
- (5) S. Nishibayashi, K. Yamura: "Mechanical Properties and Durability of Concrete from Recycled Coarse Aggregate Prepared by Crushing Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai (noviembre 1988), pp 652-659, ISBN: 0-412-32110-6.
- (6) M. Etxeberria Larrañaga: "Experimental study on microstructure and structural behaviour of recycled aggregate concrete"; Tesis doctoral dirigida por Antonio R. Marí Bernat y Enric Vázquez I Ramonich; en la Universitat Politècnica de Catalunya (marzo 2004), pp. 1-230.
- (7) Y. Kasai: "Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium; Ed. Erik K. Lauritzen (1993), pp. 93-104; ISBN: 0-412-32110-6.
- (8) Roos: "Verification of the Dimensioning Values for Concrete with Recycled Concrete Aggregate"; Use of Recycled Concrete Aggregate, Sustainable Construction; Ed. Dhir, Henderson y Limbachiya; (1998) pp 309-320, ISBN: 0-7277-2726-5.
- (9) B(W) 209/32/105 Group 5, 12. Works Bureau Technical circular 12/2002: Specifications Facilitating the Use of Recycled Aggregates.
- (10) CUR. Rapport 125: Betonpuingranulaat en metselwerk-puingranulaat als toeslangmateriaal voor beton.
- (11) R. S. Ravindrarajah, C.T. Tam: "Methods of Improving the Quality of Recycled Aggregate Concrete"; Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Vol. 2 Reuse of Demolition Waste, Proceedings of the Second International RILEM Symposium; Ed. Y. Kasai (noviembre 1988), pp. 575-584, ISBN: 0-412-32110-6.

* * *