

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Hormigón ligero estructural con áridos reciclados

Francisco J. Benito ⁽¹⁾, Isabel Miñano ⁽¹⁾, Carlos J. Parra ⁽¹⁾, Jesús Alcaraz ⁽¹⁾ y Pilar Hidalgo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Grupo de Ciencia y Tecnología Avanzada de la Construcción (CTAC). Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación / Universidad Politécnica de Cartagena, España.

⁽²⁾ Departamento de Calidad y Medio Ambiente, Cementos La Cruz, S.L., Abanilla (Murcia), España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5614>

RESUMEN

La investigación propone la reutilización de residuos industriales (plástico y corcho) nanomoléculas de sílice y adiciones activas (cenizas volantes), para la fabricación de hormigones estructurales ligeros, cumpliendo con los estándares de resistencia y durabilidad requeridos en la normativa española asociada a este tipo de productos.

La consecución de todas las fases de esta investigación ha pretendido profundizar en el conocimiento y puesta en práctica en laboratorio e implantación industrial de hormigones de altas resistencias y ligero para uso estructural con subproductos industriales.

La menor densidad de los hormigones diseñados (ECOHUL) y su alta durabilidad lo hacen idóneos para su utilización en zonas sísmicas. La utilización de áridos ligeros reciclados varía sustancialmente la densidad de los hormigones y sus resistencias a compresión (de forma prácticamente lineal). Sin embargo, y de forma muy positiva, se ha constatado que las dosificaciones adoptadas, con y sin residuos, se han comportado de forma similar en los ensayos de durabilidad: cloruros, carbonatación y absorción capilar.

PALABRAS CLAVE. Hormigón ligero, Altas prestaciones, Residuo industrial.

1.- INTRODUCCIÓN

El medio ambiente necesita de nuevas soluciones sostenibles que reduzcan el excesivo consumo de recursos naturales y la contaminación del mismo, a través de la incorporación y revalorización de los desechos industriales, que a día de hoy carecen de poco valor añadido. El sector de la construcción aporta impactos ambientales negativos, tales como un consumo excesivo de recursos naturales no renovables. Por ello la industria del hormigón, y en especial Cementos La Cruz S.L., cada vez más concienciada con estos aspectos medioambientales, tiende a disminuir el alto consumo de recursos naturales con la reutilización de desechos industriales, a través del diseño de unos nuevos hormigones más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Para ello, se diseñó y planificó una amplia

campana experimenta basada en conseguir innovar en el campo de los hormigones reciclados estructurales ligeros y más respetuosos con el medio ambiente.

2.- CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

La Figura 1 muestra la composición química y la distribución del tamaño de las partículas (análisis granulométrico) de la ceniza volantes y del cemento CEM I 52,5 R de la empresa Cementos La Cruz, S.L. (Murcia), obtenida por fluorescencia de rayos X y por granulometría laser (Mastersizer 2000).

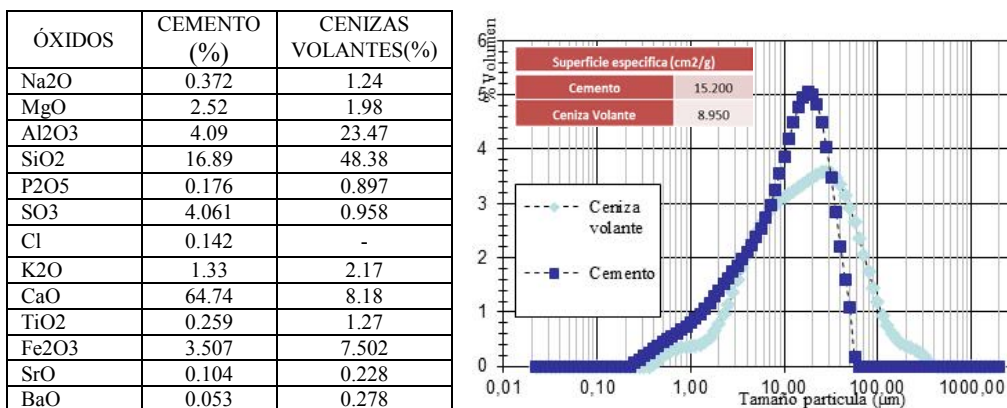


Figura 1. Composición química de los componentes mayoritarios. Análisis granulométrico laser y superficie específica de las partículas cementante

Los análisis mineralógicos se hicieron mediante difracción de rayos X (DRX), esto nos permite conocer la estructura atómica, siendo está una característica fundamental que define las propiedades cementantes. Las cenizas volantes están compuestas en su mayor parte de materia mineral (65%) en forma de partículas fundamentalmente vítreas con una pequeña proporción de fase cristalina (35%). Mientras que el cemento esta compuestas en su mayor parte de materia mineral básicamente cristalino (entre 70-90%). Los minerales más importantes encontrados en las cenizas volantes y el cemento son la: mullita, sílice, aluminatos cálcicos, anhidrita y óxido de calcio libre.

El ensayo de granulometría (UNE EN 933-1:2012) de los áridos empleado en la investigación, se muestra en la Fig. 2. Además de áridos de corcho, se utilizó un granulo en base de propileno (PP) recuperado (Alfafil), reforzado con un 40% de carbonato cálcico ultrafino.

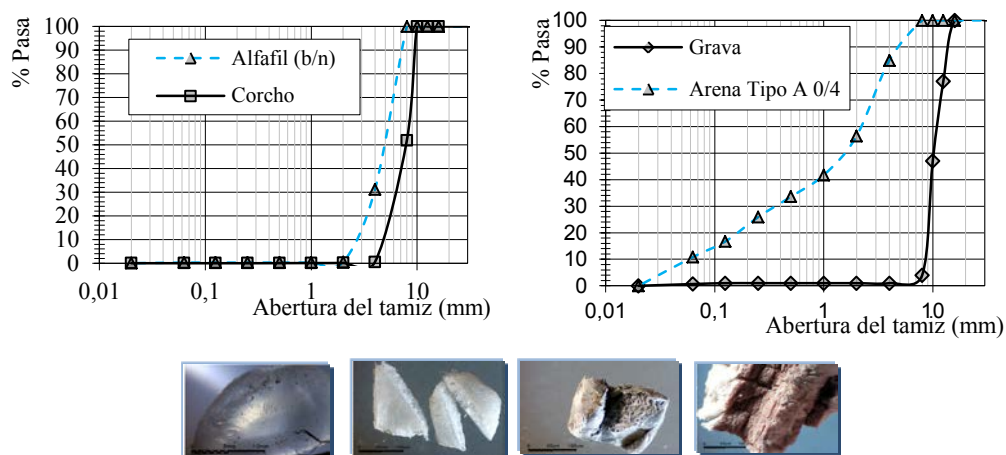


Figura 2. Curva granulométrica de los diferentes áridos empleados y micrografía a diferentes escalas del árido Alfafil y gránulo de corcho

En todas las dosificaciones se ha incorporado árido fino calizo de machaqueo de fracción granulométrica 0-4 y árido grueso de fracción 4-10 mm. Estos áridos son sustituidos en parte por gránulos de corcho y Alfafil de fracción granulométrica similar. A todos los hormigones se le añade un aditivo superplastificante (MasterGlenium ACE 459 BASF) y nanosílice (MasterRoc MS 685 BASF).

Las mezclas se efectuaron en laboratorio con una relación agua/ material cementante que se mantuvo constantes en 0,25. La mezcla HP550 y ECOHUL550 posteriormente fue replicada a nivel industrial (I).

Tabla 1. Dosificaciones estudiadas

	DOSIFICACIÓN								
	Agua l	Cemento kg	CV kg	NanoSiO ₂ l	Arena (0-4) kg	Grava kg	SP l	Alfafil kg	Corcho kg
HP550	160	550	130	14	1015,16	507,58	11,00		
HP700	180	700	70	14	927,19	463,6	11,75		
ECOHUL700	180	700	70	14	593,39	129,82	11,5	189,49	19,77
ECOHUL550	160	550	130	14	646,94	142,7	11,00	206,16	21,5

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El programa de ensayos establecido evalúa la influencia de diferentes niveles de sustitución de árido natural por diferentes subproductos en dos hormigones de alta resistencia y dos hormigones estructurales ligero en estado endurecido, frente a las propiedades mecánicas y a la durabilidad. Por último, y como fase final de la investigación, con los resultados con mejores expectativas de ser comercializados se han desarrollado las pruebas industriales consistente en fabricar unas viguetas estructurales de 2 metros de longitud.



Figura 3. Pruebas industriales en la planta de Hormicruz S.L. (Murcia)

3.1.- ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO EN ESTADO ENDURECIDO

3.1.1.- Resistencia a compresión y densidad

El ensayo de resistencia a compresión se realizó según rige la norma UNE- EN: 12390-2, a la edad de 7, 28 y 90 días y la densidad según UNE- EN: 12390-7:2009.

Tabla 2. Resistencia media a compresión a la edad de 7, 28 y 90 días

	7 días	28 días	90 días
HP 550	71,5	84,9	97,7
HP 700	74,6	89,5	106,9
ECOHUL 550	26,7	27,6	30,2
ECOHUL 700	27,5	29,5	33,8
ECOHUL 550 (I)	21,1	22,6	23,1
HP 550 (I)	71,5	80,4	87,2

Se define como hormigón ligero estructural aquel hormigón de estructura cerrada, cuya densidad aparente, medida en condición de seco hasta peso constante, es inferior a 2.000 kg/m³, pero superior a 1.200 kg/m³ y que contiene una cierta proporción de árido ligero, tanto natural como artificial [Anejo 16, EHE-08]. En este sentido, en la Fig. 4 se representan los hormigones analizados, junto con resultados de ensayos previos y a investigaciones de otros autores, remarcando la zona delimita para hormigón ligero estructural.

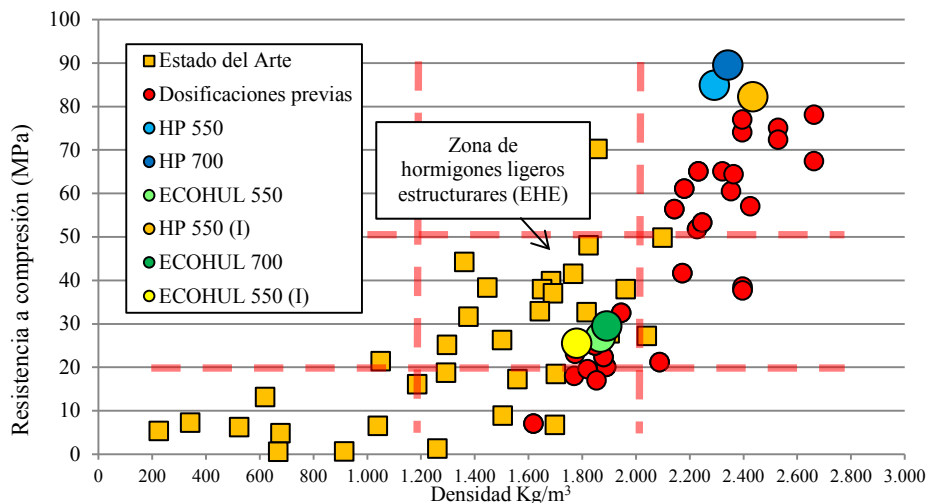


Figura 4. Resistencia media a compresión a 28 días en relación con la densidad

La menor resistencia de los ECOHUL es debido principalmente a la baja unión entre la superficie del Alfil y el corcho a la pasta de cemento. En las microfografías (Fig. 5) todos los ECOHUL la matriz presenta microfisuras en torno a los gránulos de corcho, lo que reduce sustancialmente la resistencia a compresión.



Figura 5. Micrografía de la unión Alfil-pasta de cemento y del corcho-pasta de cemento

3.1.2- Resistencia a flexión de vigas

Con el objeto de comprobar el comportamiento estructural de los hormigones realizados, se han fabricado vigas con el hormigón de las pruebas industriales HP550 (I) y ECOHUL550 (I). Se realiza un ensayo de 4 puntos aplicando la carga en el tercio central de forma que se someta la viga a flexión pura. La viga tiene una sección de 200x100 mm², una longitud total

de 2,00 m y una longitud entre puntos de apoyo de 1,8 m. La sección tiene una armadura interior formada por 3 barras de diámetro 12 mm y una armadura superior de 2 barras de diámetro 12 mm de acero B500SD. Se ensayan dos vigas por amasada a la edad 60 días.

Los resultados de la rotura de las vigas muestran una rotura clara en dominio 2 con plastificación de la armadura previamente a la rotura. La gráfica fuerza-desplazamiento (Fig. 6) muestra una primera zona lineal hasta el acañamiento mecánico de la armadura en torno a una carga de 10 kN, posteriormente el comportamiento sigue siendo lineal, pero con una pendiente diferente hasta alcanzar la carga de rotura. La carga de rotura es similar en ambos hormigones (87,71 kN y 87,45 kN). No obstante, se aprecia que la viga fabricada con ECOHUL tiene un peor comportamiento a cortante, lo que provoca que el mecanismo arco se active antes que en las vigas realizadas con hormigón HP550 (Fig. 6).

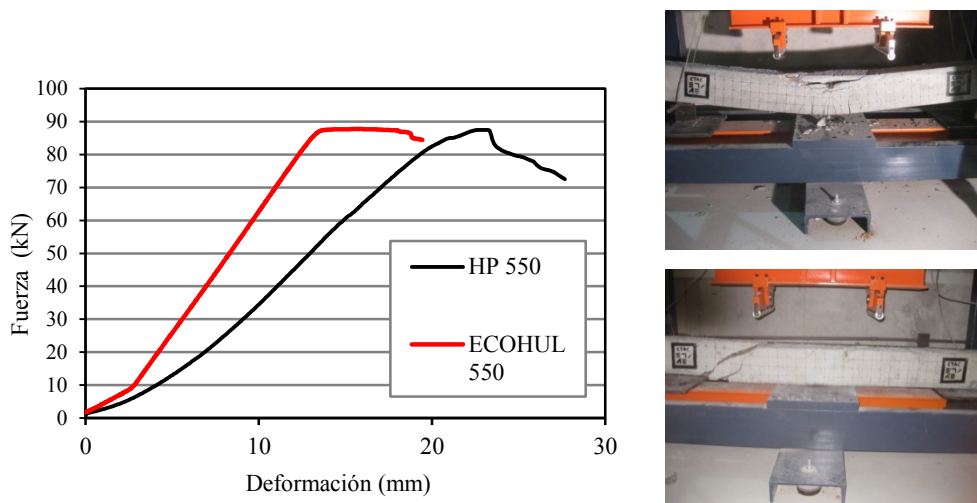


Figura 6. Relación carga aplicada deformación en centro de vano. Vigas ensayadas a flexión ECOHUL (arriba) y con HP 550 (abajo)

3.2.- ESTUDIO DE LA DURABILIDAD

3.2.1.- Porosimetría de intrusión de mercurio

El ensayo se realizó a la edad de 60 días según la especificación ASTM D4404-84-2004, validado por la literatura técnica para la caracterización del hormigón. En la Figura 7 se muestra la distribución por tamaño de la porosidad.

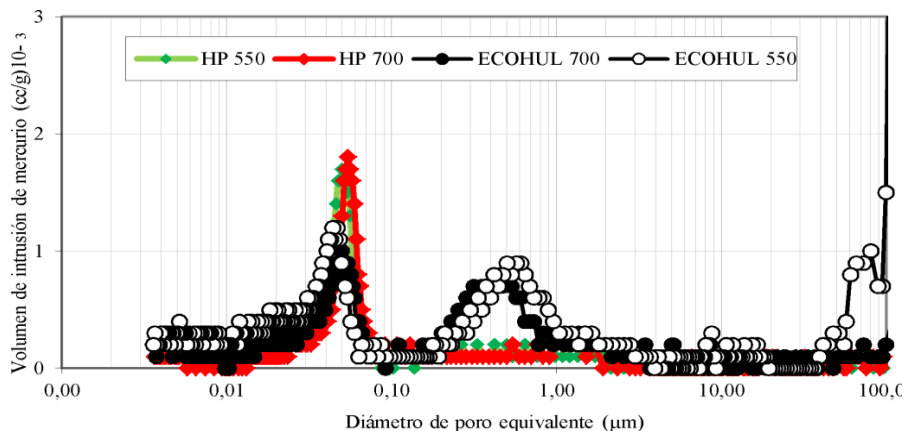


Figura 7. Distribución por tamaño de la porosidad

En todos los hormigones, la distribución de volumen de los poros sigue un patrón similar, cada curva tiene dos picos: uno alrededor de tamaños de poro de 90 μm y otro, mucho más pronunciado, alrededor de tamaños 0.05 μm y para el caso especial de los ECOHUL, con corcho en su interior, se destaca un tercer pico en las 100 μm originado por la propia estructura porosa del corcho, con grandes poros. Además, la mayor porosidad de los ECOHUL es claramente influida por la alta porosidad del corcho. El HP550 claramente tiene una porosidad más fina que el HP700, desplazándose la curva hacia izquierda (Fig. 7) y a la vez tiene ligeramente una menor porosidad total [Tabla 4]. Ambos resultados concuerdan con los resultados mecánicos obtenidos. La menor porosidad del HP550 hace disminuir las diferencias mecánicas con el HP700.

Tabla 4. Porosidad de los hormigones por intrusión de mercurio

	<i>HP550</i>	<i>HP700</i>	<i>ECOHUL550</i>	<i>ECOHUL700</i>
Porosidad total (%)	9,831	10,012	17,763	11,846

3.2.2.- Absorción capilar

El ensayo se realiza según UNE 83982-08. Se observa un incremento de absorción capilar en el hormigón que contiene mayor cantidad de residuo plástico y corcho que en el hormigón de referencia con áridos de cantera [Albano et al. 2009]. La forma de los áridos reciclados y la unión interfacial árido-pasta formada es el mayor responsable de este comportamiento (Fig. 8).

Por ello, los ECOHUL550 con un contenido de ALFAFIL de 206.16 kg/m^3 , frente a los 189.49 kg/m^3 que contienen los ECOHUL700, presentan una mayor absorción capilar. Claramente se constata que el hormigón con una mayor absorción es el ECOHUL550 seguido del ECOHUL700. Esto es debido principalmente a los áridos ligeros utilizados de corcho (21,5 kg/m^3) que por su estructura porosa propia y por las fisuras que se crean en su

Hormigón ligero estructural con áridos reciclados

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

contacto con la matriz cementante, crean un camino para el paso del agua por capilaridad. En el ECOHUL700 ocurre algo similar por disponer en su mezcla el mismo árido ligero, pero al contar con más cantidad de cemento y menos contenido de Alfafil y corcho (contenido de corcho $19,77 \text{ kg/m}^3$), se ha generado una matriz cementante más densa e impermeables, lo que reduce su absorción por capilaridad frente al ECOHUL550.

En el caso de los hormigones de referencia (HP550 y HP700), su absorción es mucho menor que los ECOHUL, por no tener áridos ligeros como el corcho que facilitan la absorción. El HP550 es un 8,20% más absorbente que el HP700, por la mejora de la matriz cementante como se ha comentado para el ECOHUL 700, con un 14% de menos absorción que el ECOHUL 550 (Fig. 8).

La utilización de áridos ligeros reciclados hace a los hormigones de media un 54% más absorbentes (58% para los de 550 kg de cemento y un 50% para los 700 kg de cemento).

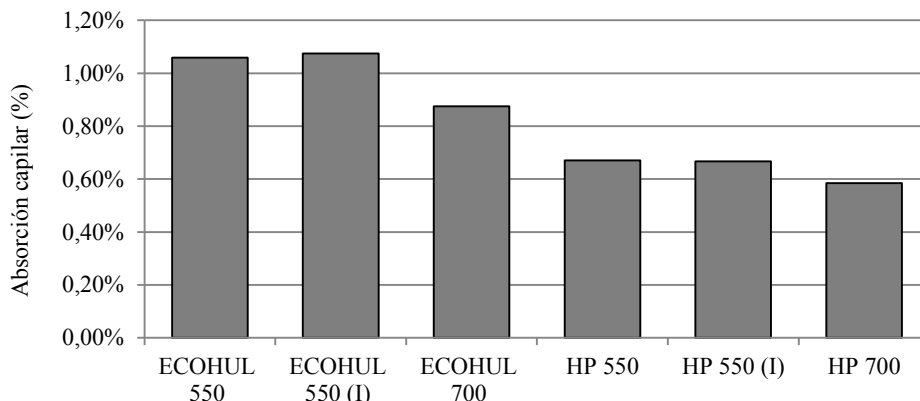


Figura 8. Absorción capilar de los hormigones analizados

3.2.3.- Resistencia a la penetración de agua a presión

El comportamiento de los hormigones, tanto mecánico como de su durabilidad, está condicionado mayoritariamente a las características de la microestructura de éste. Los hormigones con alta penetración o absorción de agua generalmente cuentan con alta porosidad y menor densidad de la matriz. En la Figura 9 se muestran los valores medios de ensayos realizados a 56 días.

Por lo general, en los hormigones, con el aumento de la porosidad (poros conectados, ensayo PIM) aumenta la penetración de agua bajo presión y disminuye la densidad de los mismos-

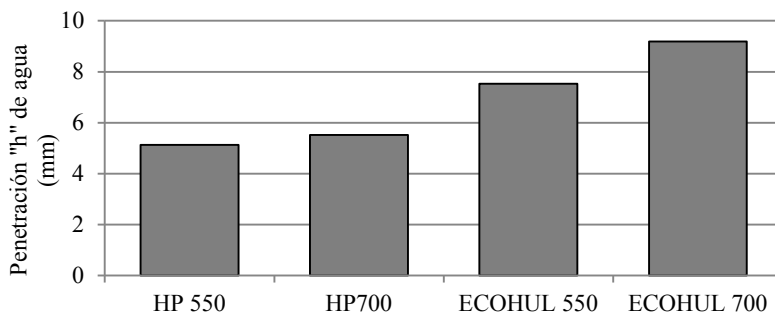


Figura 9. Resultados del ensayo de resistencia a la penetración de agua bajo presión a la edad de 56 días

3.2.4.- Profundidad de carbonatación acelerada (UNE EN 13295) y cloruros (AASHTO T259)

Si analizamos los resultados medios para cada hormigón [Tabla 6], se puede concluir con la baja penetración a la carbonatación, siendo nula en el HP700. En el HP550, con 150 kg menos de cemento por m³, el frente medio de carbonatación llega a los 2.9 mm. Para ambos ECOHUL la carbonatación penetra ligeramente algo más, posiblemente por sus áridos ligeros de corcho, con una gran porosidad abierta, pero son valores muy bajos para este ensayo, frente a otras investigaciones similares.

Tabla 6 Resultados de carbonatación acelerada y cloruros a 28 días

	Carbonatación media (mm)	Cloruros media (mm)	
		28 días	56 días
HP550	2.9	3.6	5.9
HP700	0.0	5.7	8.6
ECOHUL550	1.7	6.2	8.2
ECOHUL700	4.0	7.0	8.6

El refinamiento de la estructura porosa debido al empleo de adiciones puzolánicas y el uso de nanosílice, que provocan un efecto de microllenado, hace más tortuosa la matriz y mejora la durabilidad frente al ataque de cloruros, coincidiendo esto con los resultados obtenidos frente a la penetración a carbonatación. Esto significa un gran avance para aumentar la vida útil de las estructuras al darle mayor protección a sus armaduras.

4.- CONCLUSIONES

- La incorporación de áridos reciclados produce un descenso de la resistencia a compresión debido a la superficie más lisa y a su menor resistencia, empeorando la zona interfacial árido-pasta. La combinación Alfafil con corcho permite ajustar la

Hormigón ligero estructural con áridos reciclados

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

densidad y resistencia para cumplir con la EHE-2008 como hormigones ligeros estructurales.

- En todos los hormigones, la distribución de volumen de los poros obtenidos sigue un patrón similar. El HP550 tiene una menor porosidad total, pero es más fina que el HP 700. La menor porosidad del HP550 hace disminuir las diferencias mecánicas con el HP700.
- Los ECOHUL550, con un contenido de ALFAFIL de 206.16kg/m^3 , frente a los 189.49kg/m^3 que contienen los ECOHUL700, presentan una mayor absorción capilar. La utilización de áridos ligeros reciclados hace a los hormigones de media un 54% más absorbentes (58% para los de 550 kg de cemento y un 50% para los de 700 kg).
- Se diseñaron hormigones de muy alta durabilidad para diferentes aplicaciones estructurales. Ello permite alargar la vida útil de las estructuras y reducir la huella de carbono, sobre todo en los ECOHUL por los áridos reciclados utilizados.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto CDTI-IDI-20130144 de la empresa Cementos La Cruz S.L. con la colaboración del Grupo de Investigación de Ciencia y Tecnología Avanzada de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cartagena. Nuestro agradecimiento a la empresa BASF y HORMICRUZ S.L. por su ayuda e interés.

REFERENCIAS

- [1] Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural, EHE-08, (Ministerio de Fomento, Madrid, 2008).
- [2] Albano, C., Hernández, M., Matheus, A. and Gutiérrez, A., 'Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behaviour at different w/c ratios', *Waste Management* **29** (2009) 2707-2716.
- [3] Hewlett, P., 'Chemistry of cement and concrete', 4th Edn (New York, Butterworth Heinemann, 1988).
- [4] Lorca, P., 'Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante', Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia. Dpto. Ing. Construcción y Proyectos de Ing. Civil (2014).
- [5] Kumar, R. and Bhattacharjee, B., 'Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete', *Cement and Concrete Research* **33** (2003) 155-164.