

53. Hormigones sostenibles ligeros y de altas prestaciones

Miñano, Isabel^{(1,*), Benito, Francisco J.⁽¹⁾ Parra, Carlos J.⁽¹⁾, Hidalgo, Pilar⁽²⁾}

(*)Grupo de Ciencia y Tecnología Avanzada de la Construcción. Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación / Universidad Politécnica de Cartagena, ctac@upct.es y 677466916

(1) Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación / Universidad Politécnica de Cartagena.

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

Resumen La investigación nace de la problemática ambiental que se deriva de la producción, almacenamiento y generación en grandes cantidades diarias de residuos industriales. Para ello se propone la reutilización de subproductos de origen plásticos, madereros y lodos de la industria papelera para la fabricación de hormigones reciclados de altas prestaciones (HP) y hormigones ligeros (ECOHUL). Se utilizan además nanomoléculas de sílice y adiciones activas (cenizas volantes) para aumentar la durabilidad de los hormigones. Las principales ventajas de este nuevo material son su baja densidad, haciéndolo idóneo para su función en zonas sísmicas y una alta impermeabilidad.

En general, los hormigones diseñados y analizados en esta investigación han demostrado que 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- destacando la pequeña carbonación, y baja penetraciones de cloruros (menores de 1 cm) en todos los hormigones estudiados.

Palabras clave. Hormigón ligero, Altas prestaciones, Residuo industrial.

1 Introducción

El alto consumo de recursos naturales, la producción de gran cantidad de desechos industriales y la contaminación del medio ambiente requieren de nuevas soluciones para un desarrollo sostenible. El sector de la construcción aporta impactos ambientales negativos, tales como un consumo excesivo de recursos naturales no renovables para la extracción de materias primas (sobreexplotación). Por ello la industria del hormigón, cada vez más concienciada con los aspectos medioam-

bientales, tiende a reducir el consumo de recursos naturales con la reutilización de desechos, que minimizan los efectos medioambientales del sector.

La creciente degradación del medio ambiente y la preocupación de la industria para cumplir con las legislaciones de residuos hacen que algunos de ellos de origen industrial, como las cenizas volantes, sean cada vez más utilizados para sustituir parte del cemento en la producción de hormigón.

La consecución de todas las fases de esta investigación ha pretendido profundizar en el conocimiento de hormigones de altas resistencias (HP) y ligeros (ECO HUL) para uso estructural, a la vez que más respetuosos con el medio ambiente.

2 Caracterización de los materiales

Para este estudio se empleó Cemento Portland CEM I 52.5 R, fabricado en las plantas de Cementos La Cruz, S.L. La composición química de las cenizas volantes y los lodos de papel, empleados como sustitutivos del cemento fueron obtenidos por fluorescencia de rayos X.

Tabla 1 Composición química de los componentes mayoritarios

ÓXIDOS	CEMENTO	CENIZAS VOLANTES	LODOS DE PAPEL (LP calcinado)	LODOS DE PAPEL (LP sin tratamiento)
Na ₂ O	0.372	1.24	2.84	1
MgO	2.52	1.98	2.82	0.698
Al ₂ O ₃	4.09	23.47	4.77	1.56
SiO ₂	16.89	48.38	3.68	1.19
P ₂ O ₅	0.176	0.897	4.66	1.71
SO ₃	4.061	0.958	2.09	1.36
Cl	0.142	-	0.17	0.17
K ₂ O	1.33	2.17	0.544	0.292
CaO	64.74	8.18	61.44	23.14
TiO ₂	0.259	1.27	0.294	0.122
Fe ₂ O ₃	3.507	7.502	0.624	0.151
SrO	0.104	0.2285	0.0434	0.050
BaO	0.053	0.278	-	0.014

Las características fundamentales que se buscan en la investigación es usar lodo de papel, aportado por la empresa Compost Reciclables S.L, como adición activa al cemento.

Los lodos se reciben con un 50% de humedad debido al proceso industrial por el cual se obtienen como residuo reciclado del papel. Fue necesario desecar previamente durante 24h en estufa a 105°C. Posteriormente se calcinaron en el horno de mufla a 750°C durante aproximadamente 120 minutos, con objeto de eliminar la materia orgánica y promover la transformación cristalográfica de los

compuestos mineralógicos que disponen. Con la calcinación se observó una pérdida en peso aproximada del 32,18%, quedando carbonato cálcico y otros compuestos estables.

Para investigar el efecto de los lodos de papel de partida y calcinados se analizó la resistencia a compresión (UNE-EN 196-1) en probetas de mortero normalizadas (4x4x16cm) con sustituciones parciales del 1.33% y 2.66 % hasta 90 días de edad. La composición normalizada de estos morteros comprende: árido natural silíceo (1350g), agua (225g) y cemento de referencia CEM I 52.5R (450g), como mortero de referencia, (REF 0%). Se plantearon sustituciones parciales de 1.33% y 2.66% del cemento por de lodos sin tratamiento (LP sin tratamiento) y lodos calcinados (LP calcinado).

Los resultados obtenidos (Fig. 1) revelan que las matrices de cemento elaborado con porcentajes de sustitución de lodos de papel calcinado iguales a 1.33 % en relación al cemento, aumentan la resistencia a compresión con respecto al mortero de referencia, siendo este mayor que el que experimentan con los morteros con sustituciones de 2.66%. Los lodos sin tratamiento térmico tienden a presentar resistencias a compresión inferiores al mortero control. Una disminución del tamaño de partícula (Fig. 2) y una mayor proporción del SiO₂ vítrea (Tabla 1) incrementa la actividad puzolánica de los lodos, debido a un mayor contacto entre partículas de cemento y los lodos de papel, lo que justificaría en parte el resultado.

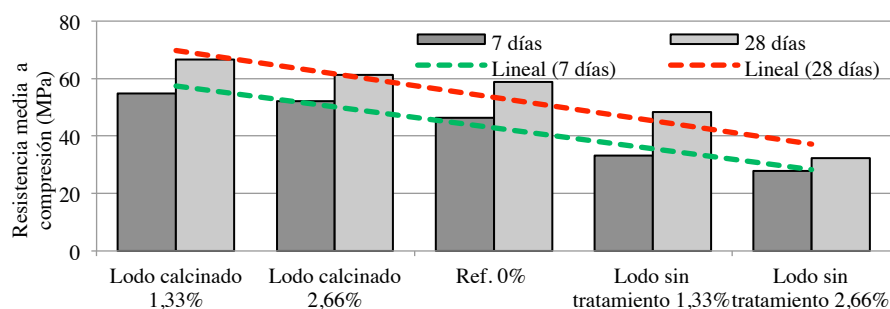


Fig 1 Resistencia media a compresión de morteros con lodos de papel calcinados y sin tratamiento

Para determinar la distribución de tamaños de partículas muy pequeñas se obtuvo la granulometría mediante el analizador de partículas Mastersizer 2000 de Malvern Instruments. La Fig. 2 muestra una comparación entre las curvas granulométricas del cemento y las adiciones empleadas en este estudio. Puede verse como el lodo de papel de partida (representado en color rojo), es el material más grueso, con el pico de máxima concentración en 300 μ m. Con el tratamiento térmico, el pico de máxima concentración desciende a 4 μ m, muy inferior al del cemento (11 μ m).

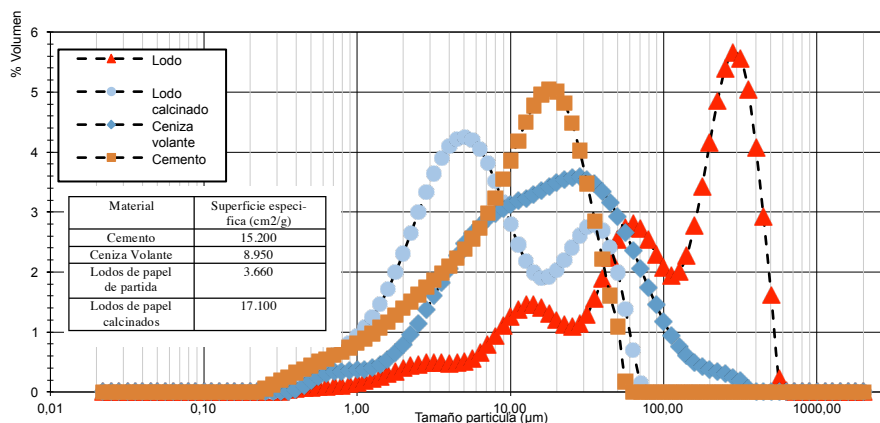


Fig 2 Análisis granulométrico laser y superficie específica de las partículas cementante

En la investigación de Lorca, P. (2014) indica que cuando las partículas presentan una mayor superficie específica las reacciones se producen con una velocidad mayor, ya que la energía necesaria para activar la reacción es menor. Por lo general, menores tamaños de partículas utilizadas son más reactivos por tener una superficie específica mayor, como es el caso de los lodos de papel calcinados. Es decir, la mayor superficie de reacción en una partícula hace que su hidratación sea más rápida y efectiva.

Los análisis mineralógicos se hicieron mediante difracción de rayos X (DRX). Para la operación del equipo se utilizó radiación CuK θ (1.542 Å) en las siguientes condiciones para todos los análisis: rango de barrido de 10 a 80° 2 θ , para un paso de 0.03° 2 θ y un tiempo de incidencia de 3 segundos por paso. La identificación de fases minerales presentes se ha realizado por medio de la base de datos del JCPDS (Joint Comité on Powder Diffraction Standards). La estructura atómica es una característica esencial que concreta las propiedades cementantes del material.

Para los materiales de reemplazo del cemento, como es el caso de las cenizas volantes y lodos de papel, se requiere un estado estructural amorfo -elevada energía interna e inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente- (Hewlett, P. (1998)).

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%) (Tabla 2).

Los minerales más importantes encontrados en las cenizas volantes y el cemento son la: mullita, sílice, aluminatos cálcicos, anhidrita y óxido de calcio libre.

A continuación, se recoge el análisis estructura por difracción de rayos X de la parte cristalina, medido en % (p/p).

Tabla 2 Análisis estructura de la parte cristalina (% (p/p))

Fases	Cemento	Ceniza Volante	Lodos de papel calcinados	Lodos de papel sin tratamiento
Silicato	79	9	0	
Silicato de calcio	79	9		
Óxidos	11	87	56	
Cuarzo		32		
Mullita		49		
Corindón		6		
Oxido de Ca, Mn, Fe y Al	9			
Oxido de Ca y Al	2			
Perovskita			29	
Oxido de Calcio			27	
Fosfatos			28	
Hidroxicapatita			28	
Carbonatos		4		100
Calcita				100
Dolomita		4		
Otros	10		16	
Anhidrita	10			
Yesos	<1			
Portlandita			16	
Cristalinidad (%)	78	35	69	71
Suma (%)	100	100	100	100

Los mejores materiales de remplazo no son los 100% amorfos, sino que es necesario que exista una pequeña proporción de fase cristalina ya que actúan como sitios de nucleación del gel CSH y por ende la resistencia a compresión de estos materiales incrementa notablemente. En base a esto, se puede decir que las características amorfas de los materiales empleados en la investigación se encuentran en rangos aceptables y se puede esperar propiedades cementantes apropiadas.

Se ha efectuado el ensayo de granulometría de las partículas a los distintos áridos empleado en la investigación (Fig. 4), según rige la norma UNE EN 933-1:2012. El Alfafil es un granulo en base de propileno (PP) recuperado, reforzado con un 40% de carbonato cálcico ultrafino. Y presenta color negro y blanco como se muestra en la micrografía de la Fig 4. (derecha), junto al corcho (izquierda).

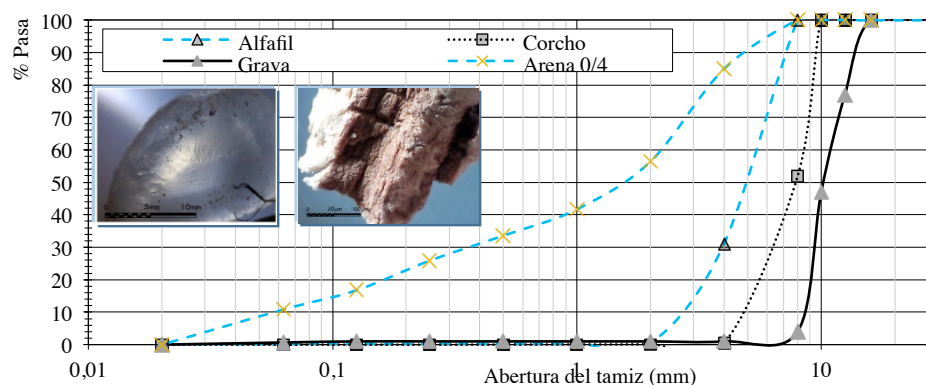


Fig 4 Curva granulométrica de los diferentes áridos empleados y micrografía a diferentes escalas del árido Alfafil y los gránulos de corcho

2 Estudio de las dosificaciones

En todas las dosificaciones se ha empleado un cemento tipo CEM I 52.5R (este tipo de cemento se caracteriza por presentar un contenido en clínker igual o superior al 95%) al que se incorpora árido fino calizo de machaqueo de fracción granulométrica 0-4mm y árido grueso de fracción 4-10mm. 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), siendo su uso necesario dado la consistencia seca de las diferentes dosificaciones y nanosílice (MasterRoc MS 685 BASF).

En cuanto a los criterios de sustitución de los áridos, se selección de la fracción granulométrica de árido natural (grava) por los gránulos de corcho y en sustituir árido natural 0/4 por residuos de plástico Alfafil, de manera que el volumen total de los áridos se mantuviera constante, ya que residuos de plástico se aproximaban más al árido de tamaño 0/4, aunque carezcan de fracciones finas.

Las dosificaciones empleadas se han obtenido tras un amplio programa experimental previo. Las mezclas se efectuaron con una relación agua/ material cementante que se mantuvo constantes de 0.25 para el HP700 y el ECOHUL700 y de 0.26 para el HP550 y el ECOHUL550. Además se estudiaron las propiedades mecánicas del ECOHUL550(L) y el HP550(L) con adiciones de lodo de papel, en torno al 1.33%, ya que este fue el que mejor resultados obtuvo en la caracterización de materiales.

Tabla 3. 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	11.75	189.49	19.77
ECOHUL550	160	550	130	14	646.94	142.27	11.00	206.16	21.5

3 Resultados y discusión

Las dosificaciones de hormigón se caracterizaron mediante el siguiente plan experimental:

3.1 Estudio del comportamiento en estado endurecido

3.1.1 Resistencia a compresión y densidad

Se ensayan tres probetas para cada dosificación, realizándose el ensayo según rige la norma UNE- EN: 12390-2, a 7, 28 y 90 días, para resistencia a compresión y la densidad (UNE- EN: 12390-7:2009).

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 2000 kg/m³, pero superior a 1200 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. 5 se representan los hormigones analizados remarcando la zona delimita para hormigón ligero estructural.

“Para el caso de hormigones ligeros estructurales, la resistencia mínima se establece en 15 ó 20 N/mm² en tanto que la resistencia máxima depende del tipo de árido ligero que se trate y del diseño particular de la mezcla. Si bien existen aplicaciones de hormigones ligeros de alta resistencia, la resistencia máxima del hormigón ligero estructural se limita a 50 N/mm²” (Anejo 16, EHE-08).

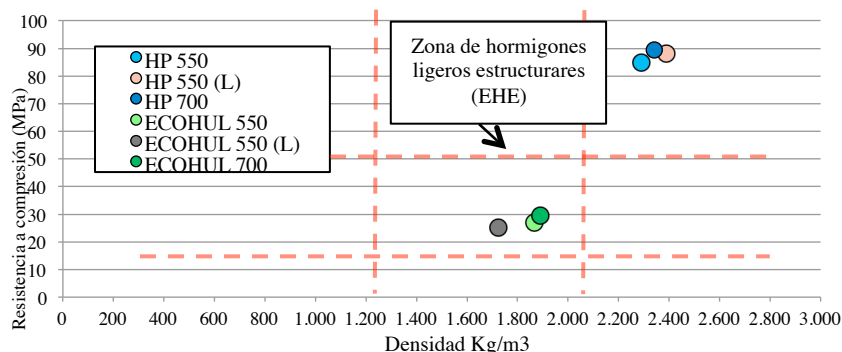


Fig 5 Resistencia media a compresión a 28 días en relación con la densidad

La evolución de la resistencia a compresión es un parámetro muy importante a la hora de estudiar las propiedades mecánicas. La menor resistencia de los ECOHUL es debido principalmente a la baja unión entre la superficie del Alfafil y el corcho la pasta de cemento, en las micrografías (Fig. 6) la matriz presenta microfisuras en torno a los gránulos de corcho, lo que mermara sustancialmente la resistencia a compresión, en todos los ECOHUL.

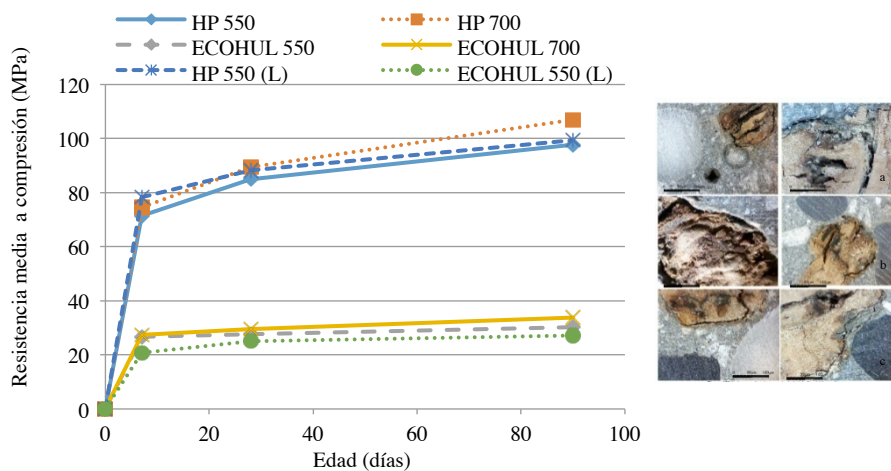


Fig 6 Evolución de la resistencia media a compresión y micrografías a la edad 28 días (a) ECOHUL700, (b) ECOHUL550 y (c) ECOHUL550(L)

3.2 Estudio de la durabilidad

3.2.1 Porosimetría de intrusión de mercurio

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

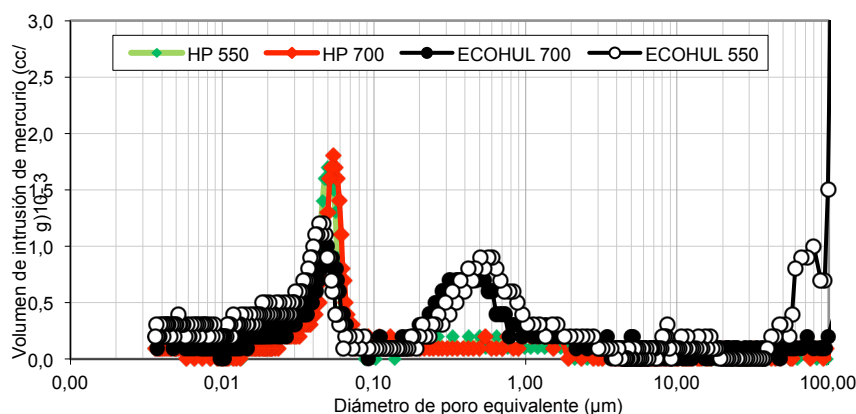


Fig 7 Distribución por tamaño de la porosidad

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 $90 \mu\text{m}$ y otro, mucho más pronunciado, alrededor de tamaños $0.05 \mu\text{m}$ y para el caso especial de los ECOHUL, con corcho en su interior, se destaca un tercer pico en las $100 \mu\text{m}$ 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 HP 550 claramente tiene una porosidad más fina que el HP 700, 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 HP 550 hace disminuir las diferencias mecánicas con el HP 700.

Tabla 4 Porosidad de los hormigones por intrusión de mercurio

	HP 550	HP 700	ECOHUL 550	ECOHUL 700
Porosidad total (%)	9.831	10.012	17.763	11.846

Como resumen de todo lo indicado se destaca que con la utilización de los áridos ligeros, sobre todo del corcho, los hormigones son más porosos, con mayor cantidad de macroporos pero también con mayor cantidad de poros de menor tamaño, y no tanto en sus propiedades resistentes (Kumaret al. (2003), Mehta et al. (2007)) y así se ha constatado en la investigación.

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 el hormigón que contiene áridos naturales solamente, la forma del árido plástico y la unión interfacial árido-pasta (Fig 6) fue el mayor responsable de este comportamiento (Tabla 5).

Por ello los ECOHUL-550 con un contenido de ALFAFIL de 206.16Kg/m³, frente a los 189.49 Kg/m³ que contienen los ECOHUL 700, presentan una mayor absorción capilar. Claramente se constata que el hormigón con una mayor absorción es el ECOHUL 550 seguido del ECOHUL 700. Esto es debido principalmente a los áridos ligeros utilizados de corcho (21.5 Kg/m³) que por su estructura propia porosa y por las fisuras que se crean en su contacto con la matriz cementante, crean un camino para el paso del agua por capilaridad. En el ECOHUL 700 ocurre algo similar por disponer en su mezcla el mismo áridos ligeros, pero en menor proporción (contenido de corcho 19.77Kg/m³), pero al contar con más cantidad de cemento y menos contenido de Alfil y corcho se ha generado una matriz cementante más densa e impermeables, lo que reduce su absorción por capilaridad frente al ECOHUL-550.

En el caso de los hormigones de altas prestaciones (HP 550 y HP 700), su absorción es mucho menor que los ECOHUL, por no tener áridos ligeros como el corcho que facilitan la absorción. El HP 550 es un 8.20% más absorbente que el HP 700, 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.

Además, de los resultados mostrados, se puede concluir que la utilización de áridos ligeros reciclados hace a los hormigones de media un 54% más absorbentes (58% para los de 550kg de cemento y un 50% para los 700).

En el caso del ECOHUL con lodo la tendencia se invierte, obteniendo un 35% menos de absorción que el hormigón de árido convencional. La diferencia más acrecentada se obtiene entre el ECOHUL 550 y el ECOHUL 550 con lodo (L), con un 80% mayor el que no contiene lodo.

Tabla 5 Absorción de los hormigones analizados en %

HP 550	HP 700	ECOHUL 550	ECOHUL 700	ECOHUL 550 (L)	HP 550 (L)
0.671	0.585	1.059	0.875	0.585	0.792

3.2.3 Profundidad de carbonatación acelerada (UNE EN 13295) y cloruros (AASHTO T259)


De los resultados se puede indicar que, por lo general, los hormigones fabricados se han carbonatado muy poco, con caras de probetas en las que prácticamente no ha profundizado el frente de carbonatación. Esto ocurre en las 8 caras del HP 700 analizado. Si analizamos los resultados medios para cada hormigón (Tabla 6), se puede concluir indicando los muy buenos resultados del HP, por su nula carbona-

tación. El HP 550, con 150kg menos de cemento por m³, el frente medio de carbonatación llega a los 2.9mm. 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.

Los resultados obtenidos para la penetración media de iones cloruros, a la edad de 28 días y 56 días, y de carbonatación media (Tabla 6).

Tabla 6 Resultados de carbonatación acelerada y cloruros a 28 días

	Carbonatación media (mm)	Cloruros media (mm)	
		28días	56días
HP 550	2.9	3.6	5.9
HP 700	0.0	5.7	8.6
ECOHUL 550	1.7	6.2	8.2
ECOHUL 700	4.0	7.0	8.6



El excelente comportamiento frente a la penetración de los iones cloruros que presentan los hormigones, en parte se puede atribuir al refinamiento de la estructura porosa como consecuencia por un lado al empleo de adiciones puzolánicas y el uso de nanosílice que provocan un efecto de microllenado por hacerla más tortuosa la matriz.

Esto es coincidente con los ensayos de penetración a carbonatación, lo que puede significar que la dosificación de referencia para los hormigones analizados, incluyendo similares cantidades de cenizas volantes y nanosílice, esta optimizada para conseguir hormigones muy impermeables y resistentes a ataques exteriores como carbonatación o penetración de cloruros. Esto significa un gran avance para aumentar la vida útil de las estructuras al darle mayor protección a sus armaduras.

4 Conclusiones

1. En todos los hormigones, la distribución de volumen de los poros obtenidos sigue un patrón similar. El HP 550 tiene una menor porosidad total, pero es más fina que el HP 700. La menor porosidad del HP 550 hace disminuir las diferencias mecánicas con el HP 700.

2. Los ECOHUL-550 con un contenido de ALFAFIL de 206.16Kg/m³, frente a los 189.49 Kg/m³ que contienen los ECOHUL-700, presentan una mayor absorción capilar. En el caso de los hormigones de altas prestaciones (HP 550 y HP 700), su absorción es mucho menor que los ECOHUL, por no tener áridos ligeros. El HP 550 es un 8.20% más absorbente que el HP 700, quizás por la menos densa matriz cementante. La utilización de áridos ligeros reciclados hace a los hormigones de media un 54% más absorbentes (58% para los de 550kg de cemento y un 50% para los 700).

3. En el caso del ECOHUL 550(L) los resultados son muy buenos por la mejora de la matriz producida principalmente por su actividad puzolánica. El ECOHUL (L) es un 35% menos absorbente que los HP 550 y un 80% menos que ECOHUL 550.

4. Con los resultados obtenidos el uso de lodos de papel es una adición con buenas prestaciones para ser empleada en materiales base cemento. Las dosificaciones analizadas son óptimas para conseguir hormigones muy impermeables y resistentes a ataques exteriores como carbonatación o penetración de cloruros. En el caso de los ECOHUL, la gran cantidad de materiales reciclados utilizados en su dosificación, los hacen muy sostenibles, contribuyendo a reducir aún más huella de carbono de las estructuras de hormigón.

Referencias

- Hewlett, P (1998) Chemistry of cement and concrete.4th Ed. New York: Butterworth Heine-mann.
- Albano C, Hernández M, Matheus A, Gutiérrez, A (2009) Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behaviour at different w/c ratios. Waste Management 29:2707-2716.
- Payá J, Monzó J, Borrachero MV, Peris-Mora E (1995). Mechanical treatment of fly ashes Part I: Physico-chemical characterization of ground fly ashes. Cement and Concrete Research. 25:1469–1479.
- Lorca P (2014) 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.
- Kumar R, Bhattacharjee B (2003) Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. Cement and Concrete Research 33:155-164.
- Mehta PK, Monteiro PJ (2007) Concrete; Microstructure, Properties and Materials. McGraw-Hill Education.

Agradecimientos

Proyecto CDTI-IDI-20130144. Contrato de Investigación entre el Grupo de Investigación de Ciencia y Tecnología Avanzada de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cartagena y la empresa Cementos La Cruz S.L. Nuestro agradecimiento a la empresa Compost Reciclables S.L, BASF, y HORMICRUZ S.L. por su ayuda e interés.