

Durabilidad de hormigones autocompactantes con prestaciones especiales expuestos en atmosferas marinas y urbanas.



**José Luis García
Calvo¹**



**Mercedes Sánchez
Moreno¹**



Mª Cruz Alonso¹



Bryan Barragán²

RESUMEN

El hormigón autocompactante es aún una tecnología relativamente nueva y se tiene un escaso conocimiento acerca del comportamiento frente a durabilidad de este material. Sin embargo, la creciente tendencia al desarrollo de códigos y normativas que contemplan tanto la durabilidad del hormigón desde la fase de diseño como el empleo de nuevos materiales, implica un mayor conocimiento de las propiedades durables de este tipo de hormigón. En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos a partir de un estudio de durabilidad con hormigón autocompactante convencional fabricado con filler calizo, así como hormigones autocompactantes, con la misma dosificación pero modificados bien con incorporación de fibras (metálicas y poliméricas) o bien con sustitución del filler calizo por residuos de lodos de naturaleza caliza. Se han llevado a cabo tanto ensayos en laboratorio para determinación de indicadores de durabilidad como ensayos de exposición durante un año a atmósferas naturales (marina y urbana con distinta humedad relativa). Los indicadores de durabilidad analizados arrojan una elevada calidad de los distintos hormigones autocompactantes, lo cual se confirma a partir de ensayos de exposición en atmósferas reales. Si bien no se ha visto que la incorporación de fibras influya en la interacción de este material con el cloruro ni con el CO₂, la sustitución del filler calizo por residuo de lodo indica un ligero aumento en la carbonatación y el transporte de cloruros.

PALABRAS CLAVE

Durabilidad, vida útil, fibras, lodos calizos.

¹ Centro de Investigación en Seguridad y Durabilidad estructural y Materiales (CISDEM-CSIC), Serrano Galvache 4, 28033, Madrid, Spain, jolgac@ietcc.csic.es, mercesanc@ietcc.csic.es, mcalonso@ietcc.csic.es

² BASF Construction Chemicals, Admixture Systems Europe, Via Vicinale delle Corti 21, 31100, Treviso, Italia, bryan.barragan@basf.com

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de las ventajas asociadas al HAC, fundamentalmente en relación a las mejoras de la trabajabilidad en el estado fresco, éste no termina de introducirse como material de uso común en obra, sobre todo cuando se contempla su aplicación in-situ. La causa más extendida a la que se atribuye este hecho es debido a los elevados requisitos exigidos para este tipo de hormigón en estado fresco, no siempre capaces de ser alcanzados en un ambiente exterior. Otra razón muy importante a la que responde esta situación es la escasez de conocimiento en relación a su comportamiento a largo plazo, en particular en términos de durabilidad, dado que, con una existencia que no supera las tres décadas de antigüedad, existe poca información en este sentido [1]. Además, en la actualidad existe una creciente tendencia al desarrollo de códigos y normativas que contemplan la durabilidad del hormigón desde la fase de diseño. De este modo, la incorporación de estos nuevos hormigones al cálculo y ejecución de una estructura pasa por la necesidad de conocer sus propiedades frente a durabilidad con el fin de poder aplicarles los modelos de vida útil del mismo modo que se hace en la actualidad con el hormigón convencional.

Cabe notar que la necesidad de conocer el comportamiento durable del HAC puede cobrar incluso mayor importancia que en el caso del hormigón vibrado tradicional, puesto que el material permite una mayor optimización de la sección resistente, reduciendo espesores y ajustando el recubrimiento de la armadura convencional.

Actualmente la evaluación de la durabilidad de un hormigón vibrado convencional suele basarse en la definición de unos indicadores de durabilidad [2]. Esta metodología lleva a una clasificación de los hormigones en base a clases que van a permitir predecir su durabilidad [3]. La relevancia teórica en la cuantificación y predicción de la durabilidad junto a la existencia de métodos de ensayo reproducibles a nivel de laboratorio, ha llevado a identificar algunos de estos indicadores de la durabilidad como *indicadores universales* [4], que pueden completarse con el empleo de otros indicadores [5,6].

En el presente trabajo se incluyen resultados obtenidos a partir de un estudio de durabilidad de un HAC fabricado con filler calizo (HAC-F) así como otros hormigones autocompactantes, con la misma dosificación pero modificados bien con incorporación de fibras (metálicas, HAC-M, y poliméricas, HAC-P) o bien con sustitución del filler calizo por residuos de lodos de naturaleza caliza (HAC-L). En el estudio se han llevado a cabo tanto ensayos en laboratorio para determinación de indicadores de durabilidad de estos hormigones como exposición a atmosferas naturales (marina, costa de Barcelona, y urbanas con distinta humedad relativa, Madrid y Barcelona). El presente trabajo complementa los estudios preliminares presentados en [6].

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

La Tabla 1 muestra la dosificación de las cuatro mezclas de hormigones autocompactantes evaluados en el presente estudio. El filler utilizado es un subproducto del machaqueo de áridos calizos (excepto en el HAC-L que procede de lodos calizos procedentes del residuo del mármol) y el superplastificante es de base policarboxilato. Las fibras metálicas del HAC-M son de 30 mm de longitud y 0,67 mm de diámetro, y las incluidas en la mezcla HAC-P son fibras poliméricas de 54 mm de longitud y 0.05 mm de diámetro.

Tabla 1. Dosificación empleada por m³ de hormigón.

Componente / kg·m ⁻³	HAC-F	HAC - M	HAC - RP	HAC - L
Cemento (Cem. I – 52.5R)	426	426	426	426
Filler calizo	128	128	128	---
Lodo de naturaleza caliza	---	---	---	128
Arena	963	963	963	963
Grava	647	647	647	647
Agua	192	192	192	192
Aditivo (SP policarboxilato)	6.40	6.40	6.40	6.40
Fibras metálicas (galvanizadas)	---	40	---	---
Fibras de polipropileno	---	---	3	---

2.2 Métodos

2.2.1 Estudios en laboratorio.

En Sánchez et al [6], se analizó la durabilidad potencial de HAC-F, HAC-M y HAC-P a partir de la determinación de indicadores de durabilidad. Esos mismos indicadores se han utilizado en el presente trabajo para analizar la durabilidad potencial del HAC-L. Los indicadores de durabilidad seleccionados, propuestos en la literatura [3,4] para la caracterización del hormigón convencional, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la durabilidad potencial del HAC-P: indicadores de durabilidad estudiados y métodos de ensayo empleados.

Indicador de durabilidad		Método de ensayo	
Porosidad del hormigón		Porosimetría de mercurio	
Coeficiente de absorción capilar		PrUNE 83982 [7]	
Resistividad eléctrica del hormigón saturado en agua		PrUNE 83988-1 [8]	
Coeficiente de difusión Cl ⁻	Efectivo	D _{eff(dif)}	Ensayo en celda de difusión [9]: 1ª ley Fick
		D _{eff(mig)}	PrUNE 83987 [10]

La susceptibilidad a carbonatación se ha evaluado a partir de ensayos acelerados en cámara de carbonatación manteniendo las probetas de HAC en condiciones controladas de temperatura y humedad (21°C, 65% HR) durante 56 días, pesando las probetas periódicamente y, pasados los 56 días de estudio, midiendo el frente de carbonatación a partir del método colorimétrico de la fenoftaleína (UNE 112-011-94).

También se ha determinado el coeficiente de difusión aparente de cloruro en todos los hormigones, tras un año de exposición al agresivo (disolución 1 M de NaCl), mediante ensayo ponding [11], aplicando para su cálculo la 2ª ley Fick.

2.2.2 Exposición a atmósferas naturales.

Se ha tratado además de validar los resultados obtenidos en el laboratorio en relación a sus propiedades frente a durabilidad, evaluando la profundidad del frente de carbonatación y calculando los coeficientes de difusión de ión cloruro tras un año de exposición a atmósferas reales: 1) Ambiente marino: exposición de probetas en el puerto de Barcelona, a menos de 50 del mar; 2) Ambiente urbano: exposición de probetas a dos tipos de ambientes urbanos con diferente condición de humedad relativa: HR media (≈65%) en Barcelona y HR baja (≈50%) en Madrid.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 “Durabilidad potencial” del HAC a partir de la determinación de indicadores de la durabilidad. Ensayos de laboratorio.

En [6] se determinó que la presencia o no de fibras en el hormigón autocompactante no parece influir de manera significativa en los indicadores de durabilidad del hormigón, dado que en función de estos indicadores, cabía esperar una “durabilidad potencial” muy similar para los distintos HAC evaluados. En la tabla 3 se resumen los valores de los indicadores de durabilidad considerados para caracterizar el HAC-L, comparándolo con los valores obtenidos para el HAC-F [6]. En la columna de la derecha se ha incluido a su vez el intervalo de valores establecido por algunos autores [3,4] en la literatura como criterio para clasificar un hormigón como “de elevada durabilidad potencial”.

Tabla 3. Indicadores de durabilidad determinados para HAC junto al intervalo de valores establecido en [3,4] como criterio de “hormigón de elevada durabilidad potencial”.

<i>Indicador de durabilidad</i>		<i>HAC – L</i>	<i>HAC-F</i>	<i>Elevada durabilidad potencial</i>
Porosidad del hormigón / %		11.9	9.11	9 – 12
Coeficiente de absorción capilar / mm·min ^{-0.5}		0.10	0.07	< 0.1
Resistividad eléctrica del hormigón saturado en agua / kΩ·cm		97	83	50 - 100
Coeficiente difusión Cl ⁻ (3 meses)	D _{eff(dif)} / 10 ⁻⁸ ·cm ² ·s ⁻¹	3.17	1.42	0.1 – 1
	D _{eff(mig)} / 10 ⁻⁸ ·cm ² ·s ⁻¹	1.47	1.46	0.1 – 1

Los ensayos de laboratorio para la determinación de los indicadores de durabilidad seleccionados reflejan una mayor porosidad para el HAC-L con respecto al HAC-F, si bien este aumento no parece tener un claro efecto negativo en otros parámetros relacionados como el coeficiente de absorción capilar o la resistividad del hormigón. Por tanto, a partir de los indicadores indirectos de durabilidad, se podría asumir también una elevada durabilidad potencial para el HAC-L, obtenido por sustitución del filler calizo por lodos procedentes del residuo del mármol. Sin embargo, los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos se sitúan ligeramente por encima del límite atribuible a una buena calidad de hormigón.

3.2 Carbonatación y transporte de Cloruros mediante ensayos de laboratorio.

3.2.1 Carbonatación acelerada de varios tipos de HAC.

Se realizaron estudios de laboratorio acelerados para caracterizar el transporte del CO₂ a través de los poros de los HAC elaborados. Los resultados del aumento de peso por exposición a una atmósfera del 1% de CO₂ se incluyen en la figura 1, mientras que en la figura 2 se muestran fotografías de los cuatro HAC tras el ensayo acelerado de carbonatación y aplicación del método colorimétrico de la fenolftaleína. La parte coloreada indica zonas no carbonatadas, y la parte incolora (en el borde) la profundidad alcanzada por el frente de carbonatación. En la tabla 4 se muestran las profundidades medias de carbonatación medidas en cada uno de los hormigones tras los 56 días de ensayo.

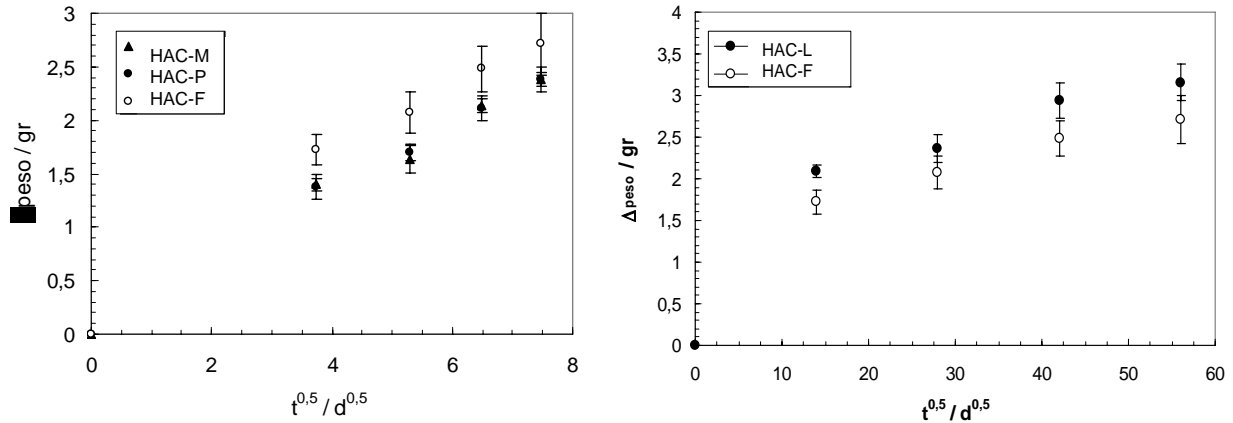


Figura 1. Incremento de peso de los HAC por carbonatación (1% CO₂, 56 días). Izda: HAC-F, HAC-M, HAC-P; dcha: HAC-F y HAC-L.

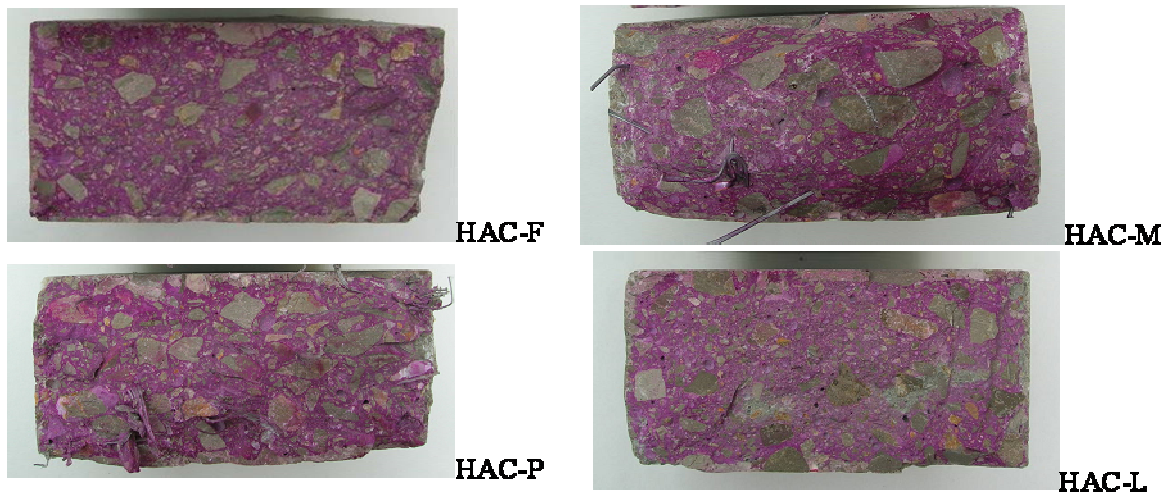


Figura 2. Perfil de carbonatación de los HAC a los 56 días de ensayo (1% CO₂).

Tabla 4. Profundidad de carbonatación a los 56 días de ensayo (1% CO₂).

	<i>HAC-F</i>	<i>HAC - M</i>	<i>HAC - RP</i>	<i>HAC - L</i>
Profundidad media de carbonatación (mm)	1.28 ± 0.36	1.45 ± 0.32	1.49 ± 0.22	1.67 ± 0.42

Tras 56 días de exposición a una atmósfera con un 1% CO₂, el HAC-F sufre un incremento medio de peso de 3 gr (figura 1) observándose a su vez incremento lineal de peso con la raíz cuadrada del tiempo (0.37 gr·d^{-0.5}). Este incremento de peso del HAC está directamente relacionado con el proceso de carbonatación como consecuencia de la interacción entre el CO₂ y la portlandita. Además, tras los 56 días de exposición se midió una penetración del frente de carbonatación de 1.28 ± 0.36 mm. La adición de fibras al HAC no influye de manera significativa en la respuesta frente a la carbonatación, pues los dos tipos de HAC reforzados con fibras sufren un incremento medio en peso de unos 2 gr (valor ligeramente inferior al medido en el HAC-F, sin fibras). Además, la medida de la profundidad de carbonatación tras 56 días al 1% CO₂, confirma una respuesta muy similar independientemente del tipo de fibra empleado (1.45 ± 0.32 mm para el HAC-M y 1.49 ± 0.22 mm para el HAC-P) y ligeramente superior a la medida en el HAC-F. Cabe destacar la mayor susceptibilidad a la carbonatación que muestra el HAC fabricado con lodos de naturaleza caliza, presentando tanto un mayor incremento de peso a lo largo de todo el ensayo como una mayor profundidad de penetración del frente de carbonatación (1.67 ± 0.42 mm).

3.2.2 Transporte de Cloruro en laboratorio en varios tipos de HAC.

En la tabla 5 se muestran los coeficientes de difusión aparentes de ión cloruro obtenidos tras un año de exposición de los hormigones al agresivo (disolución 1 M de NaCl), junto con el valor establecido por algunos autores en la literatura [3,4] como criterio para clasificar un hormigón como “de elevada durabilidad potencial”. La incorporación de fibras, de nuevo, no parece tener un efecto claro en el coeficiente de difusión aparente de ión cloruro, mientras que la adición de filler calizo procedente del residuo del mármol sí parece penalizarlo, si bien los valores obtenidos se encuentran dentro del mismo orden de magnitud.

Dado que los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos se sitúan ligeramente por encima del límite superior del rango de valores establecido como criterio de elevada calidad del hormigón, resultan de suma importancia los resultados obtenidos a partir de la exposición natural de los HAC en un ambiente marino, que se exponen en el apartado 3.3.1.

Tabla 5. Coeficiente Dapp de HAC en presencia de cloruros en laboratorio.

	HAC-F	HAC - M	HAC - P	HAC - L	Elevada durabilidad potencial
$D_{app(dif)}(1año) / 10^{-8} \cdot cm^2 \cdot s^{-1}$	13.4	15.9	14.7	41.4	<5

3.3 Carbonatación y transporte del ión cloruro en atmósferas naturales.

3.3.1 Transporte de cloruros en los HAC evaluados por exposición a un ambiente marino.

El transporte de cloruros en condiciones reales se llevó a cabo en el puerto de Mataró, donde las probetas de HAC fabricadas estuvieron expuestas al ambiente marino durante un período de 12 meses, tras el cual se evaluó la penetración de cloruros en cada uno de los cuatro tipos de HAC evaluados en el presente estudio. La figura 3 incluye el perfil de cloruros, expresados como % de cloruros totales en peso de cemento, obtenido para los cuatro HAC tras 12 meses de exposición al ambiente marino. En la parte de la izquierda se comparan los perfiles de los HAC con fibras con el obtenido para el HAC-F, mientras que en la parte de la derecha se muestra la comparación entre el perfil del HAC-F y el HAC-L.

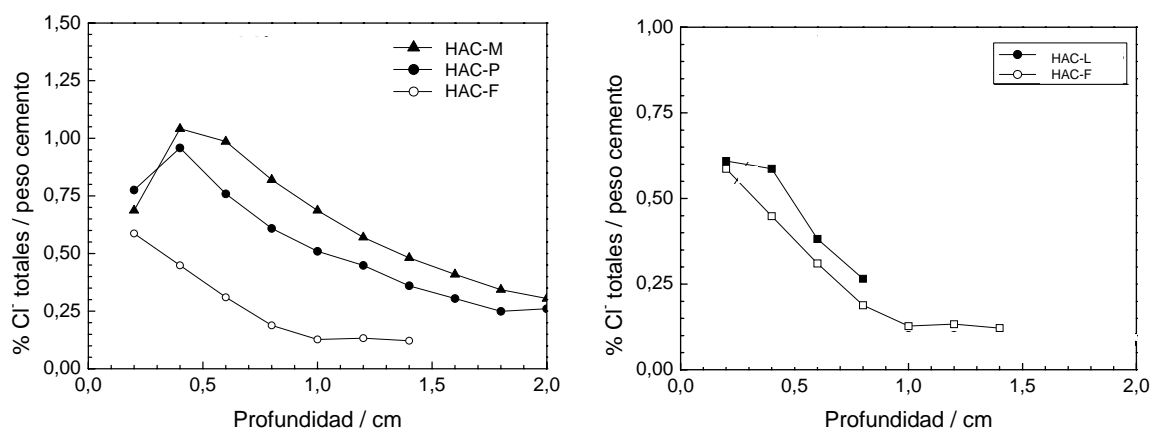


Figura 3. Perfil de cloruros tras 12 meses de exposición de las probetas de HAC al ambiente marino del puerto de Mataró. Izda: HAC-F, HAC-M y HAC-P; dcha: HAC-F y HAC-L.

Los perfiles de cloruros obtenidos y presentados en la figura 3, se ajustaron aplicando la 2ª ley de Fick. Este ajuste permite la obtención de dos parámetros asociados directamente al transporte del cloruro a través del hormigón: C_s (concentración superficial de cloruro) y D_{app} (coeficiente de difusión aparente

del cloruro). Ambos parámetros sirven como variable de entrada de los modelos matemáticos para la predicción de la vida útil. En la tabla 6 se presentan los datos de C_s y de D_{app} estimados para los distintos hormigones estudiados, tras un año de exposición al ambiente marino.

Tabla 6. Valores estimados de concentración superficial (C_s) y coeficiente de difusión aparente (D_{app}) para los HAC expuestos al ambiente marino durante un año.

	<i>HAC-F</i>	<i>HAC - M</i>	<i>HAC - P</i>	<i>HAC - L</i>
$C_s / \% \text{ Cl}^- \text{ Totales}$	1.00 ± 0.10	1.02 ± 0.03	1.02 ± 0.03	1.23 ± 0.05
$D_{app(dif)} (1año) / 10^{-8} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	2.53 ± 0.80	4.58 ± 1.08	4.58 ± 1.08	7.69 ± 1.69

El perfil de cloruros obtenido tras 12 meses de exposición a atmósfera marina de los distintos HAC estudiados, refleja una mayor susceptibilidad a la penetración del ión cloruro cuando se adicionan fibras al hormigón o cuando se emplea filler calizo procedente de lodos de machaqueo de mármol. Sin embargo, los valores obtenidos para el coeficiente de difusión no muestran claras diferencias en el comportamiento de los distintos hormigones, encontrándose todos dentro del mismo orden de magnitud. En este sentido los valores del coeficiente de difusión estarían indicando una “elevada durabilidad potencial” para los distintos HAC estudiados, con y sin adición de fibras, según los criterios establecidos [3,4]. Sin embargo, el HAC-L es algo más susceptible al transporte de cloruros, tal y como cabría esperar por la mayor porosidad presentada.

3.3.1 Carbonatación de HAC en atmósferas reales.

Tras 12 meses de exposición al ambiente en atmósferas naturales, se analizó la carbonatación de las probetas fabricadas con los distintos hormigones a partir del método colorimétrico de la fenofaleína [12]. En la figura 4 se incluyen fotografías de los perfiles de carbonatación obtenidos sobre las distintas probetas en dos ambientes con distinta humedad relativa: Madrid (fotos de la izquierda), ambiente seco, y puerto de Mataró (Barcelona, fotos de la derecha), ambiente húmedo.

Las medidas de profundidad de carbonatación realizadas periódicamente en el HAC-F muestran un notable efecto de la humedad relativa del ambiente de exposición: mientras a los 12 meses de exposición del HAC a una atmósfera con baja humedad relativa (Madrid, 50%) no se ha detectado avance del frente de carbonatación, tras 12 meses de exposición a un ambiente urbano con humedad relativa media (Barcelona, 65%), se detecta una penetración de carbonatación cercana a 2 mm.

Las medidas de profundidad de carbonatación realizadas en los HAC con fibras, también muestra un notable efecto de la HR, pues en un ambiente seco (Madrid, 50%) la profundidad de carbonatación es muy pequeña para el HAC con adición de fibras metálicas (se mide en torno a 1.2 mm) y no se detecta para el HAC con adición de fibras poliméricas. Sin embargo, en un ambiente más húmedo (Barcelona, 65%) se miden mayores profundidades de carbonatación. Comparando los datos obtenidos, con las profundidades de carbonatación medidas en el HAC-F, se puede decir que la adición de fibras al HAC favorece la carbonatación del hormigón cuando éste se encuentra expuesto a un ambiente con humedad relativa media (65%), con independencia del tipo de fibra empleado.

En cuanto a las medidas de profundidad de carbonatación realizadas en el HAC-L, reflejan que la sustitución del filler calizo por el lodo de mármol ha aumentado la susceptibilidad a la carbonatación del HAC. Mientras las probetas de HAC-F expuestas a un ambiente seco (Madrid, 50%) no presentaron perfil de carbonatación incluso después de 12 meses de exposición, para el HAC-L se midió una profundidad de carbonatación de más de 2 mm. Un comportamiento similar se observa cuando el HAC está expuesto a un ambiente más húmedo (Barcelona, 65%), presentando el HAC-L también profundidades de carbonatación superiores a las medidas en el HAC-F.

La profundidad de penetración del frente de carbonatación tras 12 meses de exposición del HAC-L a un ambiente de humedad relativa media (65% HR) está en torno a los 2.5 mm. Si se considera una dependencia de la distancia con la raíz cuadrada del tiempo, como es común en la mayoría de los modelos de predicción propuestos en la literatura, pasados 50 años el frente de carbonatación habrá

alcanzado una profundidad de unos 16 mm. El recubrimiento mínimo exigido por la EHE-08 en su capítulo VII para este tipo de exposición es de 15 mm para una vida útil de 50 años. Sin embargo, la profundidad de carbonatación estaría en torno a los 12 – 13 mm en los otros HAC analizados. De este modo, para garantizar la calidad del hormigón frente a problemas de corrosión será necesario un estudio en profundidad de la interacción del HAC-L con el CO₂, buscando identificar los parámetros críticos asociados con esta mayor susceptibilidad a la carbonatación de este tipo de HAC con el fin de buscar optimizar el diseño para disminuir la acción del CO₂ en este material.

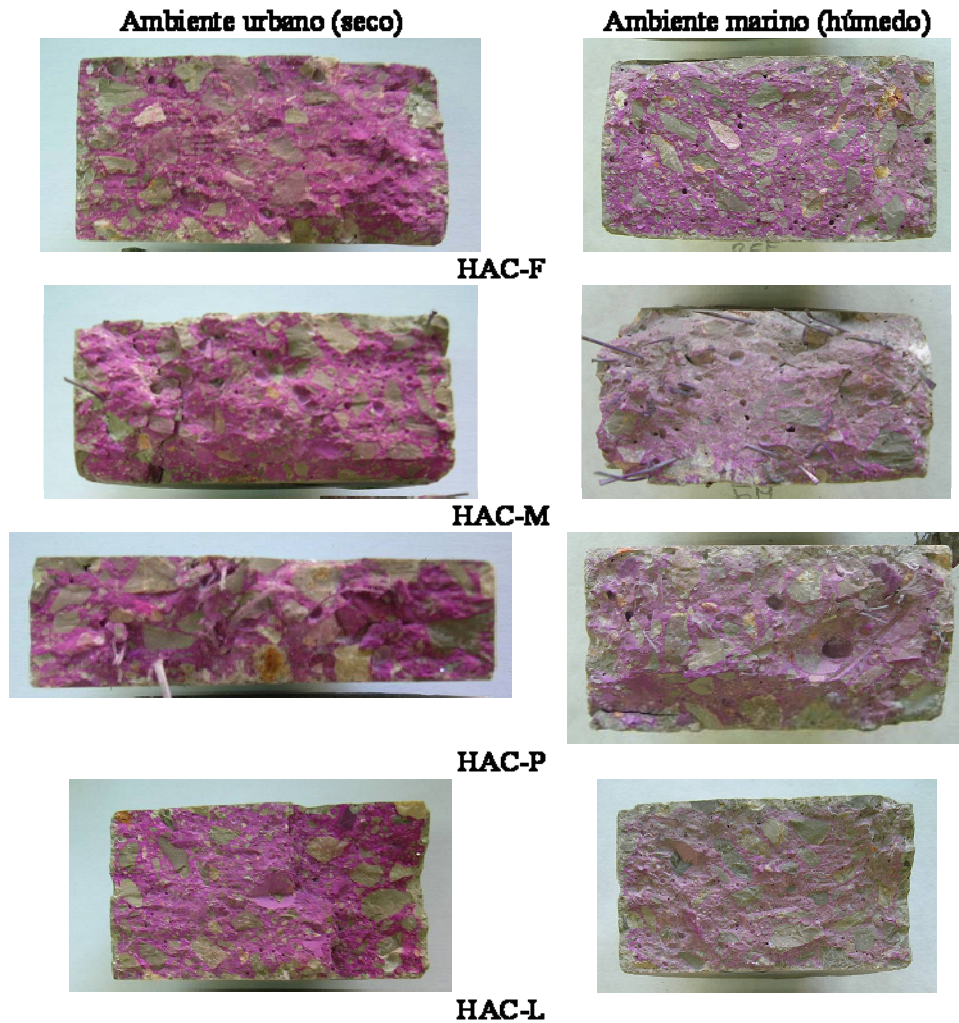


Figura 4. Carbonatación de las probetas expuestas a dos ambientes con distinta humedad: Madrid (izquierda) y Mataró (derecha). 12 meses de exposición al ambiente.

CONCLUSIONES

- El HAC presenta un notable comportamiento frente a agentes causantes de la corrosión de armaduras, ión cloruro y carbonatación. Las conclusiones extraídas de los ensayos realizados en laboratorio y exposición natural y de los cálculos mediante modelos de predicción de vida útil confirman la elevada durabilidad potencial de este material.
- La sustitución del filler calizo por lodos en la fabricación del HAC presenta una mayor porosidad que se refleja en una mayor susceptibilidad a carbonatación y transporte de cloruros.
- La adición de fibras al HAC, tanto metálicas como poliméricas, no provoca efectos negativos en el comportamiento del hormigón frente a durabilidad, particularmente en los aspectos

concretos del riesgo de corrosión de las armaduras. Los estudios realizados mediante modelos de predicción de vida útil confirman la elevada calidad de los HAC reforzados con fibras y ratifican la viabilidad de incorporar fibras, metálicas o poliméricas, a la dosificación del HAC bajo criterios de durabilidad.

AGRADECIMENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación concedida a través del proyecto PSE-380000-2005-11 y 2006-4; HABITAT 2030. Los autores además agradecen a V. Flor-Laguna su importante labor en la parte experimental desarrollada en este estudio.

REFERENCIAS

- [1] DOMONE, P. L. - Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement and Concrete Composites*, 28, pp.197 – 208 (2006)
- [2] DU PREEZ, A. A., ALEXANDER, M. G. - A site study of durability indexes for concrete in marine conditions. *Materiales Structures* 37 (267), pp. 146 – 154 (2004)
- [3] BAROGHEL-BOUNY, V. - Durability indicators: relevant tools for performance-based evaluation and multi-level prediction of RC durability. *Proceedings of the International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, Madrid, España, 2006 pp. 1 – 30.
- [4] BAROGHEL-BOUNY [et al.] - Which toolkit for durability evaluation as regards chloride ingress into concrete? Part I: Comparison between various methods for assessing the chloride diffusion coefficient of concrete in saturated conditions. *Proceedings of 3rd International RILEM Workshop “Testing and modelling chloride ingress into concrete”*, Madrid, Spain. (Ed. by C. Andrade & J. Kropp, RILEM Publ., Bagnex, 2004) PRO 38. pp. 137 – 163.
- [5] ANDRADE, C. - Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. *Proceedings of International RILEM Symposium. “Advances in concrete through science and engineering”*, 22-24 Marzo, 2004, Evanston, USA.
- [6] SÁNCHEZ, M. [et al.] - Durabilidad de hormigones autocompactantes expuestos a atmósferas agresivas naturales, 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante, Valencia, 2008, pp. 543-551 (Ed. B. E. Barragán, A. Pacios, P. Serna). ISBN 978-84-612-2373-2
- [7] PrUNE 83982 “Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido según el Método Fagerlund”.
- [8] PrUNE 83988-1 “Métodos de Ensayo. Durabilidad del hormigón. Determinación de la Resistividad Eléctrica. Parte 1: Método Directo (Método de Referencia)”.
- [9] PAGE, C.L. [et al.] -, *Cement and Concrete Research* 11 (1981) 395.
- [10] PrUNE 83987 “Durabilidad del hormigón. Determinación de la migración de iones cloruro. Método multirégimen”.

Durabilidad de hormigones autocompactantes con prestaciones especiales expuestos en atmosferas marinas y urbanas.

[11] CASTELLOTE, M. ANDRADE, C., *Materials and Structures* 39 (2006) 995.

[12] UNE 112-011-94 Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.