

# ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL HIELO-DESHIELO EN HORMIGONES PARA TABLEROS DE PUENTES

Ghaida AL-ASSADI	Maria Jesús CASATI	Jaime FERNANDEZ	Jaime C. GÁLVEZ
Ingeniero Civil	Ingeniero de Caminos	Ingeniero de Caminos	Ingeniero de Caminos
UPM	UPM	UPM	UPM
Doctoranda	Profesor Titular	Catedrático	Catedrático
ghaida@caminos.upm.es	mariajesus.casati@upm.es	jfernandez@intemac.es	jcgalvez@caminos.upm.es

## Resumen

En este trabajo se presenta el estudio de la influencia de las condiciones del curado en la durabilidad del hormigón para tableros de puente sometido a ciclos hielo-deshielo. Se pretende simular las condiciones de curado de puentes hormigonados *in situ* en la región centro de España. Para ello se ha realizado una campaña experimental estudiando dos tipos de condiciones de curado (buenas y malas) para un hormigón HA-30. Además, se estudian dos tipos de hormigón, sin aireante y con aireante, para analizar la influencia de estos aditivos en la durabilidad del hormigón. Se han realizado ensayos de penetración de agua bajo presión, de permeabilidad al gas, de porosimetría por intrusión de mercurio, ensayos de ATD (para medida del grado de hidratación e identificación de los productos hidratados) y ensayos de difusión de cloruros, así como los de caracterización mecánica del hormigón, antes y después de los ciclos hielo-deshielo. Se presenta la evaluación del deterioro de las probetas de hormigón mediante medidas ultrasónicas, haciendo un estudio comparativo con la pérdida de peso y longitud que proponen la mayoría de las normativas.

**Palabras Clave:** Hormigón, hielo/deshielo, durabilidad, deterioro, curado, permeabilidad.

## 1. Introducción

La durabilidad de las estructuras de hormigón es un tema complejo en el que interviene un número elevado de variables, asociadas a orígenes distintos: proyecto, ejecución, materiales, uso, mantenimiento y medio en el que se encuentra la estructura, entre otras. Por ello, y aunque en los últimos años se ha dedicado un esfuerzo importante al estudio de la durabilidad, queda mucho trabajo por hacer. Particularmente el avance en el estudio de algunos de los procesos químicos del deterioro del hormigón ha sido importante [1, 2]. El estudio de los procesos químicos no ha ido debidamente acompañado, hasta ahora, del estudio de los procesos mecánicos asociados, especialmente el fuerte aumento de volumen que generan algunos de estos procesos y el agrietamiento y pérdida de resistencia que le acompaña. Muestra de que aún hay mucho trabajo por hacer es la abundante patología que muestran las estructuras de hormigón armado y pretensado. Este aspecto es de gran importancia en elementos como las losas de puentes, hormigonadas a veces en condiciones adversas, por ejemplo en verano con altas temperaturas y baja humedad, y sometidas durante el invierno a los efectos de los ciclos hielo/deshielo.

La elaboración de hormigón en condiciones climáticas extremas con altas o bajas temperaturas, condiciona de manera directa las características del hormigón y las propiedades físicas y mecánicas en cualquiera de las fases de la fabricación, durante el amasado, el transporte, la puesta en obra, o el curado. Por ejemplo, en climas cálidos la fabricación del hormigón necesita aumentar el aporte de agua durante el amasado, se produce el aumento de la velocidad en la pérdida de consistencia del hormigón fresco, aumenta la velocidad del fraguado, etc. Por tanto, la alta temperatura puede afectar negativamente a las propiedades mecánicas y a la durabilidad del hormigón endurecido. [3] Las inadecuadas condiciones de curado determinan cambios en la microestructura del material, principalmente en el grado de hidratación que se alcanza.

Los climas extremos, como ocurre en la zona centro de España, con temperaturas muy bajas en invierno, someten al hormigón al efecto del hielo/deshielo, principal fuente de daño, especialmente cuando estas estructuras no están protegidas e impermeabilizadas frente a la penetración de agua. La congelación del agua en los poros capilares más grandes es la causa principal del daño del hielo sobre el hormigón estructural [4], al aumentar la temperatura el agua se deshela y la transición de esta fase es acompañada por un cambio dimensional y un cambio de las tensiones internas. [5]

Con el fin de paliar los efectos de las heladas se desarrolló a mediados de los años 30 un aditivo inclusor de aire, comúnmente denominado *aireante*. Desde entonces se adoptó como un componente del hormigón para mejorar la resistencia a los ciclos de hielo-deshielo. El efecto beneficioso que produce es el siguiente: cuando el hormigón está críticamente saturado y el agua interna comienza a congelarse, se produce una presión en el sistema interno de poros y áridos originado por el aumento del nueve por ciento del agua en la congelación. Si las presiones expansivas son mayores que la resistencia a compresión de la pasta o del árido, el hormigón comenzará a deteriorarse en forma de agrietamiento. Para contrarrestar estas presiones, se añade un aireante. El aireante desarrolla una estructura microscópica de burbujas de aire dentro del hormigón. Estas burbujas de aire proporcionan un embalse para la congelación del agua, aliviando las presiones y previniendo el daño [6].

En este trabajo se presentan los resultados experimentales de una campaña de ensayos encaminados a estudiar la influencia del curado y la adición del aireante en el comportamiento de un hormigón curado con alta temperatura y baja humedad, condiciones climáticas frente a los efectos del hielo/deshielo. Los ensayos se han realizado con probetas normalizadas de hormigón curadas en cámara climática para simular las condiciones *in situ* del curado del hormigón.

El trabajo comienza con la descripción de los materiales empleados en la fabricación del hormigón, la descripción de las probetas y su curado y los ensayos realizados. Junto con el ensayo específico de hielo/deshielo se han realizado ensayos complementarios de penetración de agua bajo presión, permeabilidad al gas, porosimetría por intrusión de mercurio, ensayos de ATD (para medida del grado de de hidratación e identificación de los productos hidratados) y ensayos de difusión de cloruros, así como los de caracterización mecánica del hormigón, antes y después de los ciclos. A continuación se presentan los resultados experimentales y su discusión. Por último se presentan los comentarios finales y las conclusiones del trabajo.

## 2. Procedimiento Experimental

### 2.1 Materiales

Se fabricaron dos tipos de hormigones, cuya diferencia es la adición a uno de ellos de un aireante (Sika Aer 5), en proporción 0,05% en peso del cemento. El cemento empleado ha sido CEM I 42.5 R, cemento Portland sin adiciones de alta resistencia inicial, de origen local producido por Valderrivas, la composición mineralógica, en %, es la siguiente: C<sub>3</sub>S 71.68, C<sub>2</sub>S 7.96, C<sub>4</sub>AF 14.53, C<sub>3</sub>A 1.16. El tiempo de inicio de fraguado 130 min y el tiempo final 223 min. La arena silícea de río (0-5 mm) de módulo granulométrico 2.71. El árido calizo de machaqueo (5-20 mm) de índice granulométrico 6.96. Se ha añadido un superplastificante (Viscocrete 3425) en proporción del 0.6% del peso del cemento. La relación agua/cemento fue 0,5. El contenido de cemento del hormigón es 381 kg/m<sup>3</sup>. El contenido de aire del hormigón en estado fresco varió entre 3.4-3.8 % para el hormigón sin aireante y entre 6.7-7 % para el hormigón con inclusor de aire. La medida del aire ocluido se realizó según la norma ASTM C 231. La dosificación corresponde a un hormigón de resistencia 30 MPa. La dosificación de los hormigones se indican en la Tabla 1. La Tabla 2 muestra las características y propiedades de los hormigones.

Tabla 1 Dosificación de los hormigones

Componentes	H30/00/B	H30/00/M	H30/0.05/B	H30/0.05/M
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	381	381	381	381
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	880	880	880	880
Grava (kg/m <sup>3</sup> )	936	936	936	936
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	190	190	190	190
Superplastificante (kg/m <sup>3</sup> )	2.3	2.3	2.3	2.3
Aireante (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	0.2	0.2

Tabla 2 Características y propiedades de los hormigones

	H30/00/B	H30/00/M	H30/0.05/B	H30/0.05/M
<i>Hormigón fresco</i>				
Cono de Abrams (cm)	3	3	13	15
Aire ocluido (%)	3.4	3.8	7	6.7
<i>Hormigón endurecido</i>				
Resistencia a Compresión (MPa) a la edad de				
7 días	31.59	34.55	26.19	23.45
28 días	34.35	40.84	30.86	27.91

## 2.2 Fabricación de las probetas

Se utilizó un mismo procedimiento de mezcla para todas las amasadas. Se colocaron los áridos en la amasadora y luego se añadió el cemento, la arena, y se mezclaron durante 1 minuto. A continuación se añadió el agua con el superplastificante y, en su caso, el aireante premezclado con aproximadamente 200 ml de agua, seguido de un período de mezcla final de 3 minutos.

Se confeccionaron 15 probetas cilíndricas de 300x150 mm y 2 prismáticas de 100x100x400 mm para cada hormigón. Todas las probetas se curaron en cámara climática durante 28 días a 30 °C de temperatura y con un 37 % de humedad relativa. Estos valores de temperatura y humedad representan las condiciones ambientales medias de verano en la región central de España.

Se realizaron dos tipos de curados en las probetas. El denominado “bien curado” se hizo regando diariamente las probetas, en el interior de la cámara climática, durante la primera semana, según recomienda la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE). El mal curado se hizo suprimiendo el regado diario antes indicado. De este modo de obtuvieron cuatro grupos de probetas:

- Hormigón sin aireante bien curado (H30-00-B).
- Hormigón sin aireante mal curado . (H30-00-M).
- Hormigón con aireante bien curado (H30-0.05-B).
- Hormigón con aireante mal curado (H30-0.05-M).

## 2.3 Ensayos realizados

Se ensayaron seis probetas cilíndricas de cada grupo para determinar la resistencia a compresión, módulo de deformación estático y la resistencia a tracción, según las normas UNE 83-304-84, UNE 83-316-96 y UNE 83-306-85, respectivamente. Dos probetas prismáticas se emplearon para determinar la energía de fractura según la recomendación RILEM 50-FMC.

De cada grupo se emplearon dos probetas cilíndricas en los ensayos de permeabilidad a gas, porosimetría mediante intrusión de mercurio, penetración de agua a presión, difusión de cloruros y determinación potenciométrica de cloruros, según las normas RILEM-TC 116-PCD, ASTM-D4404-04, UNE 83309:90, y ASTM C1543-02 y UNE 80213.

Las seis probetas restantes se emplearon en el ensayo de hielo/deshielo según la norma ASTM C 666 y una se dejó como referencia en cámara a 20°C de temperatura y 45-50% de humedad relativa.

El ensayo de comportamiento del hormigón frente a ciclos hielo/deshielo se realizó del siguiente modo: a la edad de 28 días las probetas se sumergieron en agua durante 4 días, garantizando su saturación. A continuación se introdujeron en la cámara climática y se sometieron a 300 ciclos hielo/deshielo de acuerdo con el diagrama temperatura/tiempo de la Figura 1.

Semanalmente, es decir, cada 42 ciclos, se realizaron las medidas de longitud, peso y velocidad de pulso ultrasónico, hasta completar los 300 ciclos.

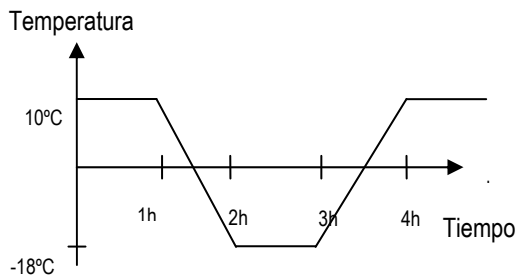


Figura 1: Esquema del ciclo hielo/deshielo

Concluidos los 300 ciclos hielo/deshielo se midió, en las probetas ensayadas, el módulo de elasticidad, la resistencia a tracción y la resistencia a compresión. Además se realizaron los ensayos de permeabilidad a gas, penetración de agua a presión y porosimetría mediante instrusión de mercurio.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1 Resultados de los ensayos mecánicos antes y después de los ciclos hielo/deshielo

La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas antes y después de los ciclos hielo/deshielo.

En general la incorporación de aire aumenta la porosidad del hormigón, lo que disminuye su resistencia (a compresión y tracción).

Las probetas sin aireante muestran un deterioro de sus propiedades mecánicas tras el ensayo de hielo/deshielo. Sin embargo, la inclusión de aire beneficia el comportamiento del hormigón frente a los ciclos hielo/deshielo, de modo que incluso mejoran sus propiedades mecánicas tras el ensayo debido al incremento de la edad (80 días aproximadamente).

Tabla 3 Resultados de los ensayos mecánicos

Tipo de Hormigón	Características Mecánicas		
	Resistencia a Compresión (MPa)	Módulo de Elasticidad (GPa)	Resistencia a Tracción (MPa)
H30-00-B (Antes)	34.35	31.86	3.91
H30-00-B (Después)	21.43	20.85	3.24
H30-0,05-B (Antes)	30.86	28.44	3.01
H30-0,05-B (Después)	36.96	29.68	3.43
H30-00-M (Antes)	40.84	31.75	3.54
H30-00-M (Después)	30.01	26.18	3.42
H30-0,05-M (Antes)	27.91	29.95	2.74
H30-0,05-M (Después)	31.28	32.53	3.52

En la Figura 2 se muestran las probetas H30-00-B y H30/0,05/B dentro de la cámara climática al finalizar el ensayo de hielo/deshielo, observándose claramente el deterioro de alguna de ellas.



Fig. 2 Probetas H30-00-B y H30/0,05/B después del ensayo de hielo/deshielo dentro de la cámara climática

### 3.2 Resultados de durabilidad antes y después de los ciclos Hielo/Deshielo

La Tabla 4 muestra los resultados numéricos de los ensayos de porosidad de mercurio, permeabilidad al gas, penetración de agua y difusión de cloruros sobre las probetas de hormigón antes y después de los ciclos hielo-deshielo.

Tabla 4 Resultados de ensayos de durabilidad

Tipo de Hormigón	Porosimetría de mercurio (%)	Permeabilidad al gas K ( $\times 10^{-18} \text{m}^2$ )	Penetración de agua		Coefficiente efectivo
			Prof. Media (cm)	Coefficiente (m/s)	Valor Medio %Cl <sup>-</sup>
H30-00-B (Antes)	11.94	78.05	2.5	3.92 E-14	3.27
H30-00-B (Después)	12.19	99.5	5.4	1.87 E-13	2.86
H30-0,05-B (Antes)	15.98	114.96	3.0	5.51 E-14	4.52
H30-0,05-B (Después)	14.33	-	3.9	1.15 E-13	3.23
H30-00-M (Antes)	12.91	53.17	2.9	5.71 E-14	3,24
H30-00-M (Después)	11.62	92.40	3.3	6.65 E-14	2.84
H30-0,05-M (Antes)	16.24	66.4	2.5	9.30 E-14	3.38
H30-0,05-M (Después)	14.97	-	4.1	1.32 E-13	3.27

Los resultados de porosimetría por intrusión de mercurio expresan el porcentaje de estructura de poros totales en el hormigón. El volumen, el radio, y la distribución de tamaño de poros determinan el punto de congelación de la solución del poro y la cantidad de hielo formado en los poros [7]. El porcentaje de poros después de los ciclos hielo/deshielo es la media del obtenido en 4 puntos a distintas profundidades de la probeta en sentido radial. Se observa cómo para todas las amasadas, si exceptuamos la H30-00-B, donde la variación es pequeña, el índice de porosidad disminuye en torno a un 10% tras los ciclos hielo/deshielo. Esto se puede explicar por las condiciones de curado, con humedad relativa baja y alta temperatura, que retrasan la hidratación del cemento, la cual continúa en la cámara, durante los ciclos hielo/deshielo, donde la humedad relativa se mantiene al 98%, por lo que el porcentaje de poros disminuye. Este

aspecto debe confirmarse con los ensayos ATD/DTG, actualmente en desarrollo. En la Figura 3 se muestran los valores de la distribución de poros antes y después de los ciclos para una probeta H30-00-M. Se observa cómo el índice de poros (Volumen de intrusión acumulado) después de los ciclos disminuye en todas las muestras, mientras que el tamaño máximo de poro no varía.

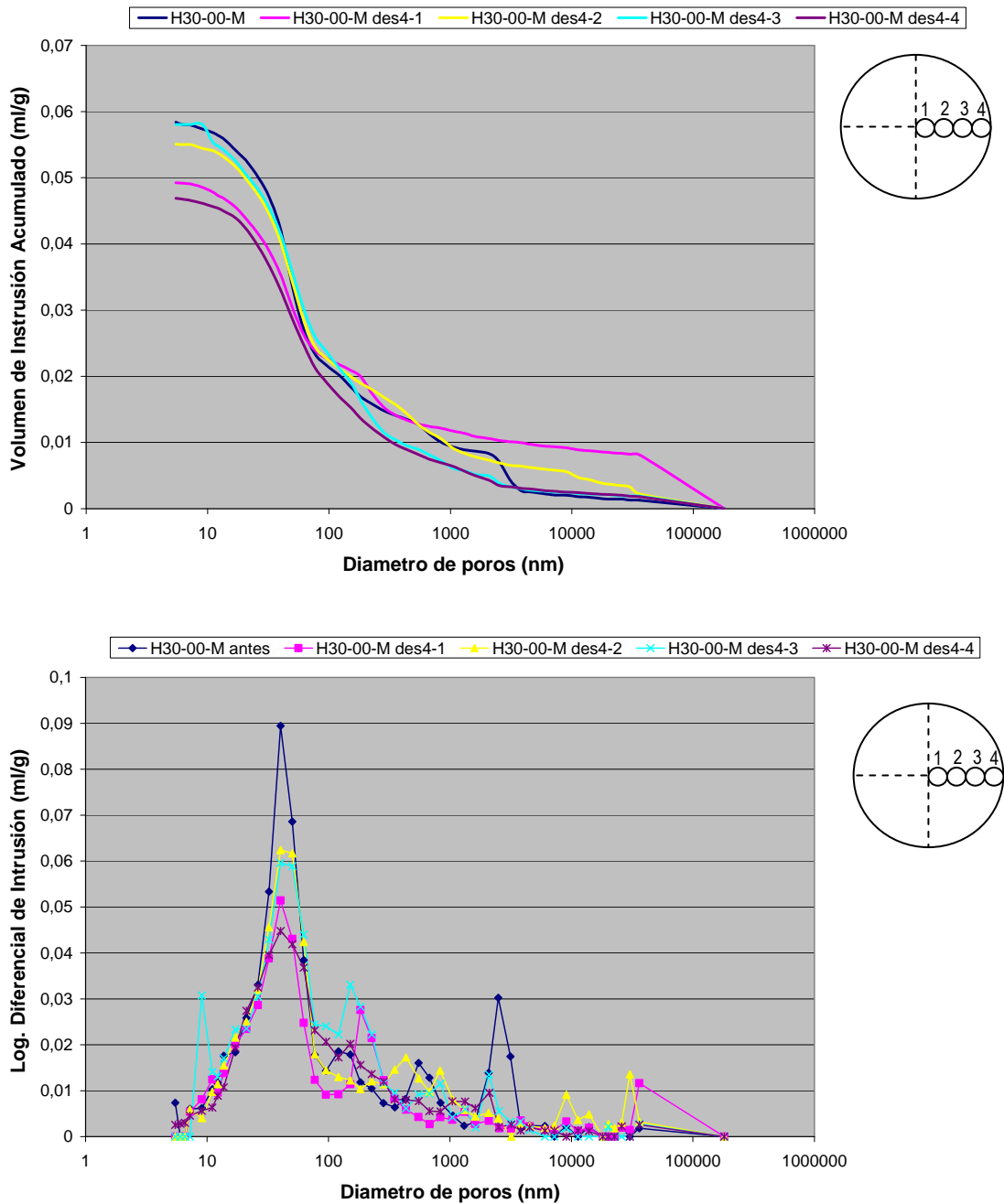


Fig. 3 Distribución de poros antes y después de los ciclos para las probetas H30-00-M

La permeabilidad al gas se ha obtenido como media de dos muestras de 5 cm de la parte superior e inferior de la probeta, antes y después de los ensayos hielo/deshielo, mediante el método del Cembureau, consistente en medir el flujo de oxígeno que atraviesa una rodaja de hormigón de 5 cm de espesor [8]. Se observa como la permeabilidad a gas conduce a valores más altos para las probetas bien curadas que para las mal curadas. Al igual que ocurría con la porosidad de mercurio, la constante de permeabilidad al gas aumenta después de los ensayos hielo/deshielo.

En los ensayos para determinar la profundidad de penetración de agua se protegieron las caras laterales con epoxi para evitar que el agua atravesara toda la probeta debido a la posible microfisuración de la superficie después de los ciclos. Los datos de penetración de agua a presión confirman que el hormigón es más permeable para los dos hormigones después de los ensayos de los ciclos. La Instrucción EHE, en su artículo 37.3.2., establece que un hormigón se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente que la profundidad máxima sea menor o igual que 50 mm y la media menor o igual que 30 mm, realizando el ensayo según la norma UNE 83.309-90. Los resultados antes de los ciclos indican que el hormigón cumple las condiciones exigidas por la EHE para obtener una adecuada impermeabilidad al agua. Los resultados después de los ciclos ofrecen valores más altos [9].

El análisis de la penetración de cloruros se realiza mediante la determinación del perfil de penetración, que se obtiene determinando el contenido de cloruros de muestras de hormigón tomadas a diferentes profundidades. La muestra se ataca con ácido nítrico diluido y se determina potenciométricamente el contenido de iones cloruro en el residuo insoluble. Los resultados obtenidos en los ensayos químicos se muestran en la Figura 4, en la cual se representa la concentración de cloruros totales (expresados en % en peso de cemento) en función de la profundidad (en cm) a la que se toma la muestra. El contenido máximo de cloruros admisible por la EHE es del 0.4% en peso de cemento. Ninguno de los hormigones sobrepasa este límite. En los valores correspondientes a los coeficientes efectivos de transporte del  $Cl^-$  en las probetas ensayadas antes y después los ciclos, se observa una disminución en torno a un 14% para todos los hormigones (Figura 5). Estos resultados son semejantes a los obtenidos en porosidad.

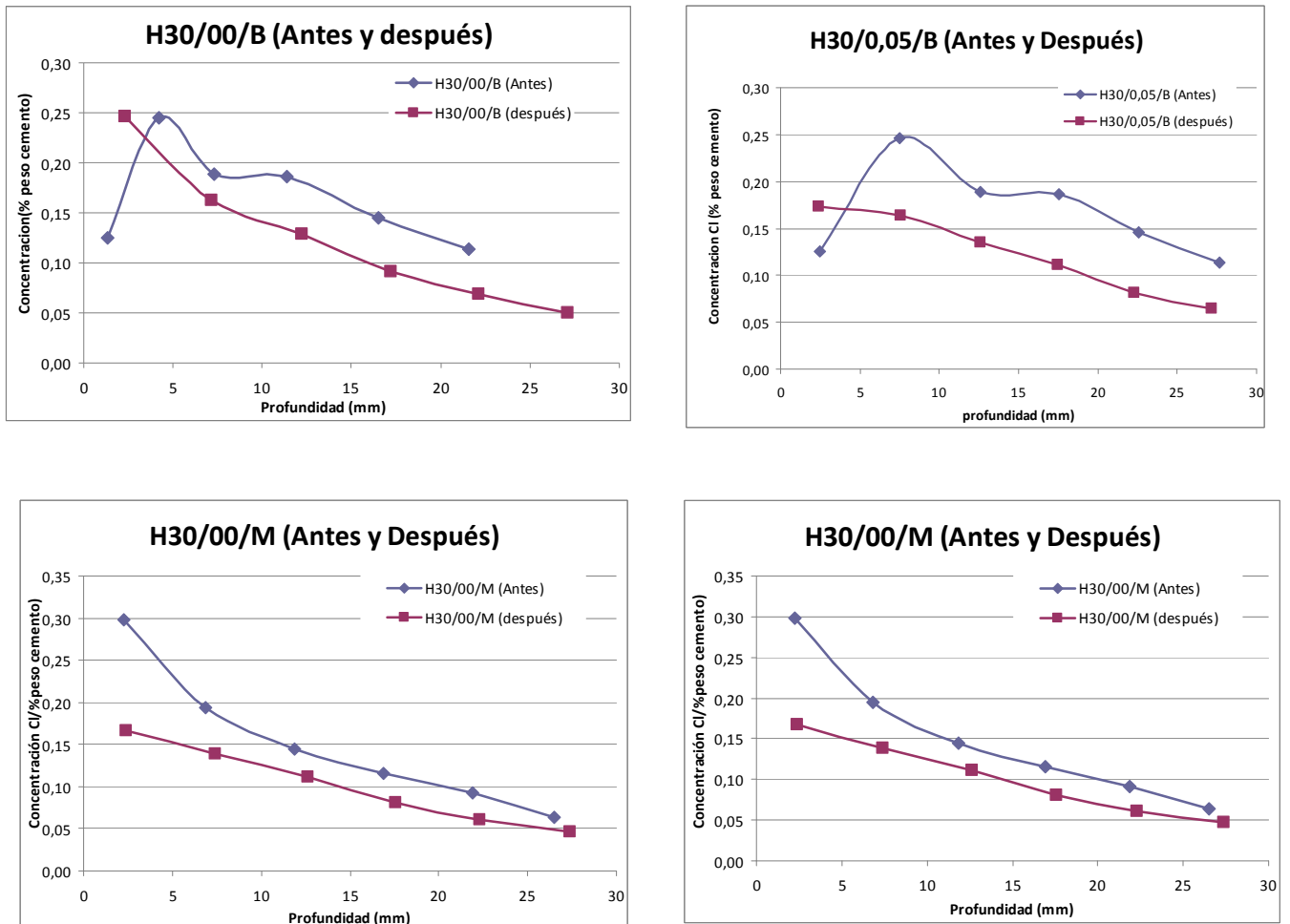


Fig.4 Perfil de penetración de cloruros para los cuatro hormigones antes y después del ensayo de hielo/deshielo

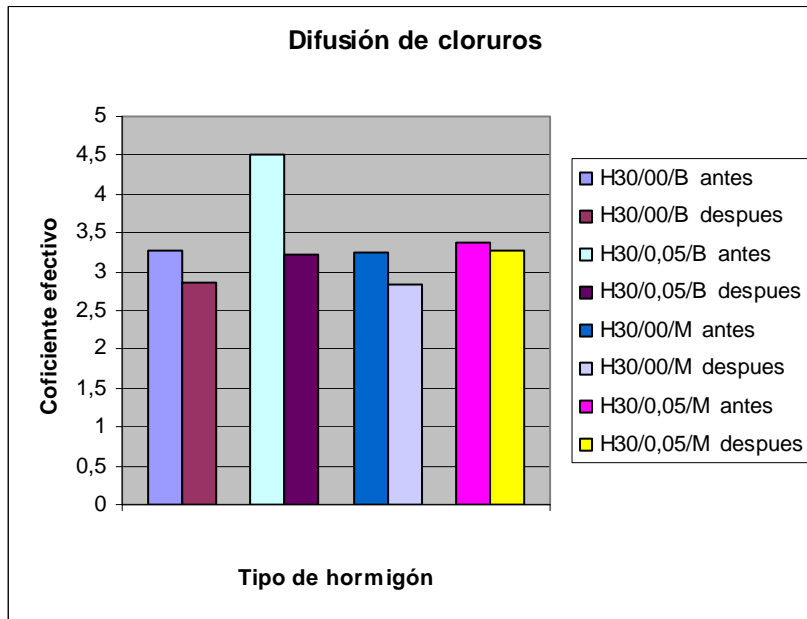
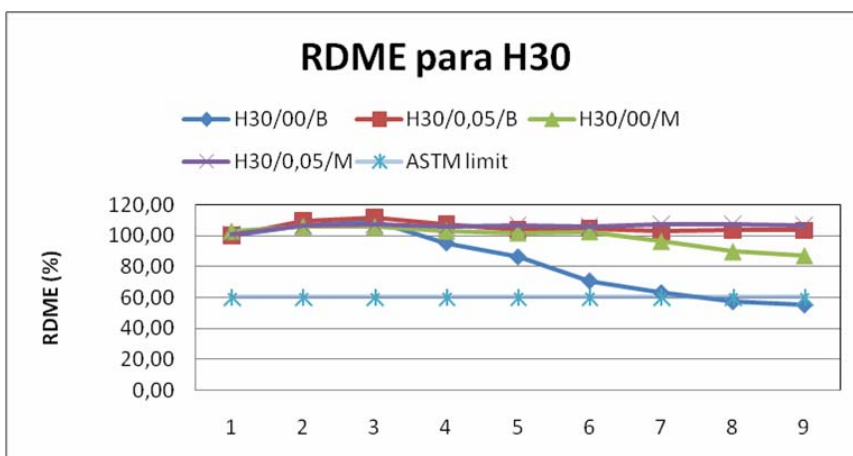


Fig. 5 Difusión de cloruros para todas las probetas antes y despues del ensayo de hielo/deshielo

### 3.3 Medidas de durabilidad, durante los ciclos H-D

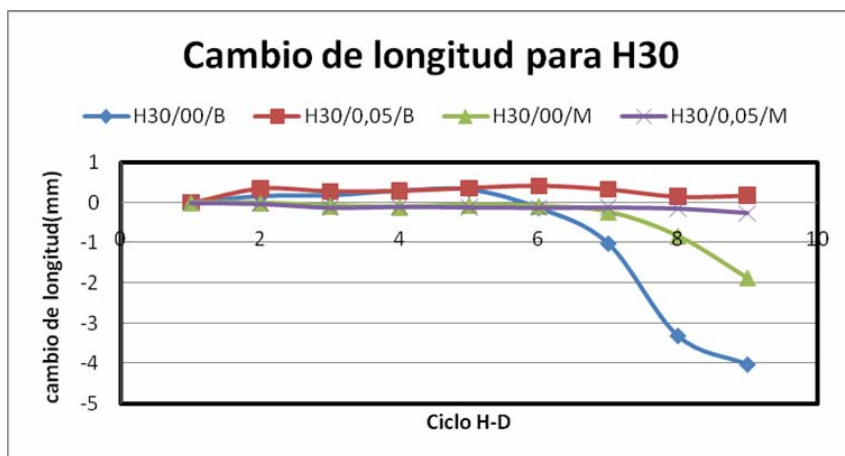
Los ensayos de hielo/deshielo se han realizado según la recomendación ASTM C 666, en la que los criterios para la identificación del deterioro son la medida de la pérdida de peso y de longitud y RDME (valor relativo entre el módulo dinámico de elasticidad después de los ensayos hielo/deshielo y el valor inicial antes de los ciclos) de las probetas. Durante el ensayo se midió la variación de peso y longitud de la probeta y la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas, que es proporcional al módulo dinámico de la elasticidad [4].

Las Figuras 5a, 5b, 5c muestran los resultados de la pérdida de peso, de longitud y el RDME para todos los hormigones. Se observa que las curvas de pérdida de peso y módulo dinámico disminuyen a medida que aumenta el número de ciclos para las amasadas sin aireante. Por otra parte, las amasadas con aireante no mostraron casi ningún cambio evidente en pérdida de peso, RDME y cambio de longitud durante los ciclos H-D. En la Figura 5 se observa cómo el deterioro de la probeta se predice con antelación con el RDME que con las medidas de pérdida de peso y longitud, y esta diferencia es más clara en la amasada sin la adición del aireante, en la que el deterioro es mayor.

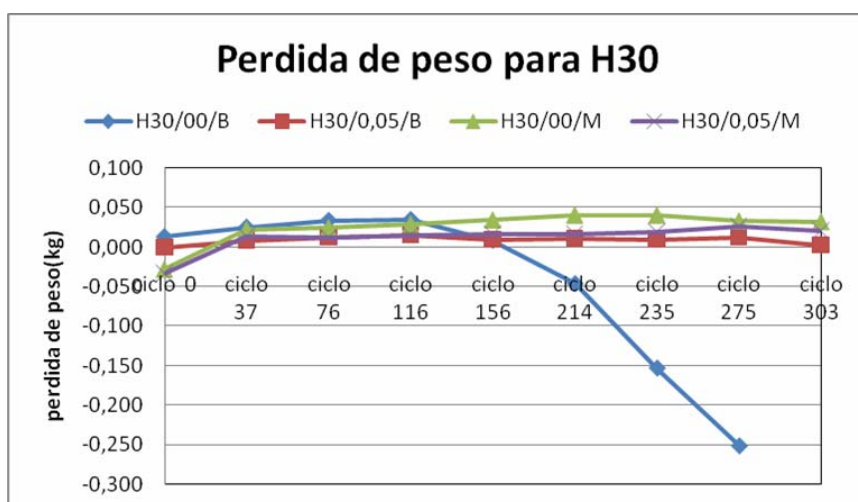


(5a)





(5b)



(5c)

Fig. 5 Medidas del deterioro de las probetas sometidas a los ciclos hielo/deshielo

#### 4. Conclusiones

Aunque hay aspectos por confirmar con los ensayos de hidratación del cemento, ATD/DTG, basándonos en los resultados de este trabajo se puede concluir lo siguiente:

1. Las medidas realizadas con los ultrasonidos (RDME) predicen adecuadamente el deterioro de los probetas de hormigón sometidas a los ciclos hielo/deshielo, anticipándose a los resultados obtenidos con las medidas de pérdida de peso y de variación de longitud, o la inspección visual, que son los criterios que propone la normativa española recientemente publicada UNE-CEN/TS 12390-9:2008.
2. Aparentemente el volumen y tamaño de poros es mayor antes de los ciclos hielo/deshielo que después. Este resultado se achaca a que durante el ensayo de hielo/deshielo se completa la hidratación del cemento, insuficientemente desarrollada al principio por el curado extremo aplicado.
3. Las probetas con adición de aireante se comportan mejor frente a los ciclos hielo/deshielo que las que carecen de aireante, no sufriendo en ningún tipo de caso, ningún daño.
4. El tipo de curado, para las condiciones ambientales impuestas de humedad y temperatura y para un hormigón con una relación a/c de 0,5, no parece tan relevante frente al deterioro por los ciclos hielo/deshielo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la concesión del proyecto BIA 2005-09250-C03-02, al Ministerio de Fomento los proyectos MFOM 2004/9 y MFOM 01/07 y a la Junta de Comunidades de Castilla La Mancha la ayuda concedida a través del proyecto PAI 069-0071-9403

## 5. Referencias

- [1] ULM F.J., BAZANT, Z.P., WITTMANN, F.H., "Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Other Quasi-brittle Materials", *Proc. Sixth Int. Conf. CONCREEP*, Elsevier, 2001, pp. 811.
- [2] MINDESS S., YOUNG J. F., DARWIN D., "Concrete", Prentice Hall, 2003, pp. 645.
- [3] SOUDKI K.A., EL-SALAKAWY E.F., and ELKUM N.B., "Full Factorial Optimization of Concrete Mix Design for Hot Climates", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 6, 2001, pp. 427-433.
- [4] MAO J., AYUTA K., "Freeze-Thaw Resistance of Lightweight Concrete and Aggregate at Different Freezing Rates", *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, JANUARY, 2008, pp. 78-84.
- [5] CAO J., CHUNG D.D.L., "Damage Evolution During Freeze-Thaw Cycling of Cement Mortar, Studied by Electrical Resistivity Measurement", *Cement and Concrete Research*, Vol 32, 2002, pp. 1657-1661.
- [6] CAMPOSAGRADO G.R., "An Investigation on the Cause and Effect of Air-Void Coalescence in Air-Entrained Concrete Mixes", PCA R&D Serial No. 2624, 2006.
- [7] CAI H., LIS X., "Freeze-Thaw Durability of Concrete: Ice Formation Process in Poros", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No.9, 1998, pp. 1281-1287.
- [8] ALAEJOS P.G., BERMUDEZ M.A., GRAN J.I., "Investigación y Recomendaciones para la Construcción de Cajones Portuarios de Hormigón Armado", *Puertos*, No.136, 2006, pp. 45-57.
- [9] ODRIEZOLA M.Á.B., GUTIÉRREZ P.A., "Permeabilidad a los Cloruros del Hormigón Armado Situado en Ambiente Marino Sumergido", *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol 22, N°1, Abril 2007, pp. 15-22.