

## DETERIORO DEL HORMIGÓN SOMETIDO A CICLOS DE HIELO-DESHIELO EN PRESENCIA DE CLORUROS

H. L. Romero<sup>1</sup>, M. J. Casati<sup>2</sup>, J. C. Gálvez<sup>1</sup>, M. Molero<sup>3</sup>, M. G. Hernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. C/ Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid, España.

E-mail: hector.romero@caminos.upm.es

E-mail: jcgálvez@caminos.upm.es

<sup>2</sup> Departamento de Vehículos Aeroespaciales, E.U.I.T Aeronáutica, Universidad Politécnica de Madrid.

Plaza Cardenal Cisneros Nº 3, 28040, Madrid, España.

E-mail: mariajesus.casati@upm.es

<sup>3</sup> Centro de Acústica y Evaluación No Destructiva, CAEND, (CSIC-UPM).

Arganda del Rey. 28500. Madrid, España.

E-mail: molero@caend.upm-csic.es

E-mail: margarita.gonzalez@caend.upm-csic.es

### RESUMEN

El deterioro del hormigón por ciclos hielo/deshielo en presencia de sales fundentes es causa frecuente de problemas en los puentes e infraestructuras en los países europeos. La resistencia del hormigón frente a este ataque se evalúa con la norma UNE-CENT/TS 12390-9. Esta norma emplea una solución de 3% de NaCl como medio de congelación. El deterioro se mide por la pérdida de masa superficial tras 28 ciclos hielo/deshielo. Este procedimiento de medida tiene algunos inconvenientes de orden práctico. Este artículo propone evaluar el deterioro mediante el incremento de deformación, con galgas extensométricas y mediante la modificación de la velocidad de pulsos ultrasónicos. El trabajo presenta los resultados correspondientes al ensayo de dos hormigones, uno con buen comportamiento frente al ensayo y el otro no. En ambos casos se constata experimentalmente la viabilidad y ventajas de las formas de medida propuestas. Los procedimientos propuestos captan el deterioro antes, permiten la medida en continuo y evitan tener que parar el ensayo para realizar las medidas.

### ABSTRACT

The deterioration of concrete due to freeze-thaw cycles in the presence of deicing salts is a frequent cause of problems on bridges and infrastructure in European countries. The resistance of concrete against this attack is evaluated with the standard UNE-CENT/TS 12390-9. This standard uses a solution of 3% NaCl as a freezing medium. Damage is measured by surface mass loss after 28 freeze-thaw cycles. This procedure has some practical drawbacks. This article aims to evaluate the damage by increasing strain, using strain gauges and by changing the velocity of ultrasonic pulses. The paper presents the test results for the two concretes, one with good resistance to freeze-thaw cycles and the other does not. In both cases we can see experimentally the feasibility and advantages of the proposed measure procedures. The proposed procedures capture the deteriorating before, allowing the continuous measurement and avoid having to stop the test for measurement.

**PALABRAS CLAVE:** Hielo-deshielo, hormigón, sales fundentes, descascarillamiento, ultrasonidos, galgas extensométricas.

### 1. INTRODUCCIÓN

En países con clima continental el congelamiento del agua en los poros del hormigón es causa frecuente de deterioro del hormigón. El uso de sales fundentes para evitar el hielo en la superficie de las estructuras de hormigón intensifica el deterioro del material. Aparece un deterioro superficial, manifestado por la generación de fisuras y el desprendimiento de láminas, llegando a exponer los áridos gruesos y produciendo una

disminución considerable del recubrimiento eficaz de la armadura.

El efecto de los ciclos de hielo-deshielo (CHD) es un fenómeno complejo que ha sido estudiado desde hace años, pero que aun no ha sido completamente explicado. El trabajo de algunos investigadores [1-5] ha permitido establecer las principales teorías sobre los mecanismos de congelamiento, referidas a los movimientos de las soluciones contenidas en los poros y su cambio de

estado con los CHD, produciendo la expansión y la contracción del material [6].

La mayoría de los ensayos acelerados que determinan la resistencia del hormigón al hielo-deshielo miden el descascarillamiento del hormigón por medio de la pérdida de masa. Este procedimiento es sencillo y fácil de ejecutar, pero presenta algunos inconvenientes. El ensayo debe detenerse para realizar las mediciones de peso y el deterioro sólo es detectado cuando hay un descascarillamiento apreciable.

Este trabajo propone evaluar el deterioro mediante el incremento de la deformación superficial, con galgas extensométricas y mediante la modificación de la velocidad de pulsos ultrasónicos. Estos procedimientos permiten monitorizar en continuo el deterioro, sin detener el ensayo para realizar las medidas, así como detectarlo antes que con el procedimiento tradicional.

## 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 2.1. Materiales

Se confeccionaron dos mezclas con diferente matriz y estructura porosa para determinar su resistencia frente al hielo-deshielo, utilizando dos tipos de cemento, dos relaciones a/c y el uso de un aditivo aireante en una de ellas, para mejorar su resistencia al hielo-deshielo. Se utilizó cemento portland CEM I 42.5 R, arena silícea de río (0 a 4 mm) y grava silícea rodada (4 a 25 mm) con módulo granulométrico de 2,87 y 7,31 respectivamente. La tabla 1 muestra la dosificación de las mezclas. Los resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones en estado fresco se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Dosificación de las mezclas.

Material	Hormigón con Aditivo Aireante H1	Hormigón sin Aditivo Aireante H2
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	450	360
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	180	162
Árido fino (kg/m <sup>3</sup> )	640,9	710,2
Árido grueso (kg/m <sup>3</sup> )	1159,1	1129,8
A. Plastificante (kg/m <sup>3</sup> )	1,80	1,08
A. Aireante (kg/m <sup>3</sup> )	0,45	-
Relación a/c	0,40	0,45

Tabla 2. Resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones en estado fresco.

Propiedad	Hormigón con Aditivo Aireante H1	Hormigón sin Aditivo Aireante H2
Asiento cono Abrams (cm)	8,0	7,5
Contenido de aire (%)	7,5	2,6

### 2.2. Procedimiento de ensayo

Las probetas de hormigón utilizadas para el ensayo de resistencia frente a ciclos hielo-deshielo corresponden a la mitad de un cubo con área superficial de 150 x 150 mm<sup>2</sup> y de 70 mm de altura. Se confeccionaron cinco probetas de cada mezcla y se ensayaron de acuerdo con la norma UNE-CENT/TS 12390-9 Ensayo CDF (Método alternativo) [7]. Terminada la preparación especial establecida en la norma para las probetas: curado, secado y saturación; a los 35 días de edad, se colocaron en una cámara climática y se sometieron a 28 ciclos de hielo-deshielo, variando la temperatura entre 20°C y -20°C en 12 horas, de acuerdo con la curva de temperatura-tiempo mostrada en la figura 1.

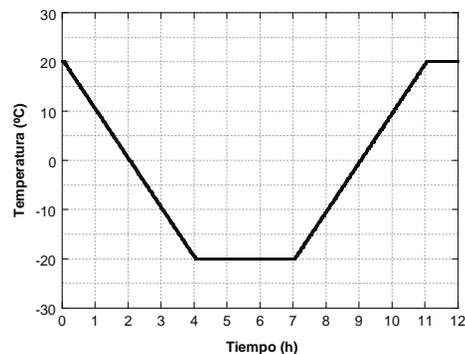


Figura 1. Curva de temperatura para un ciclo H-D.

En la figura 2 se muestran las probetas de hormigón en el interior de la cámara climática. El ensayo de resistencia al hielo-deshielo fue realizado utilizando una solución de NaCl al 3% como medio de congelación. La pérdida de masa de la superficie en contacto con la solución, de cada probeta, fue medida después de 4, 6, 14 y 28 ciclos. Para realizar las mediciones se retiraron las partículas adheridas de las superficies de las probetas mediante tratamiento en baño ultrasónico. Luego se filtró la disolución conteniendo el material desprendido y se secó durante 24 h a 100 °C. El material se pesó después de alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 2. Probetas de hormigón durante el ensayo.

2.3. Medida del deterioro con galgas extensométricas y velocidad ultrasónica

La monitorización de las diferentes variables medidas se realizó por medio de sensores conectados a ordenadores para el registro continuo de los datos durante todos los CHD.

La medición de la humedad y la temperatura en el interior de las probetas de hormigón se realizó con sensores digitales embebidos durante la confección de las probetas. Se utilizaron tres sensores colocados 40 mm hacia el interior del hormigón, a diferentes alturas respecto a la superficie en contacto con el medio de congelación, como se muestra en la figura 3.

La deformación superficial en cada probeta de hormigón se midió usando dos bandas extensométricas comerciales adheridas en el centro (distancia  $h_1$  de la base) y en la parte superior (distancia  $h_2$  de la base) de la superficie lateral de la probeta. La posición de las bandas se muestra en la figura 4.

En cada probeta de hormigón se utilizaron dos transductores (emisor y receptor), que permitieron medir en continuo la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a través del hormigón. El tiempo de propagación de la onda, y por lo tanto la velocidad del pulso ultrasónico, se determinó mediante la aplicación del algoritmo de doble cruce por cero [8]. La posición de los transductores en las probetas se muestra en la figura 5.

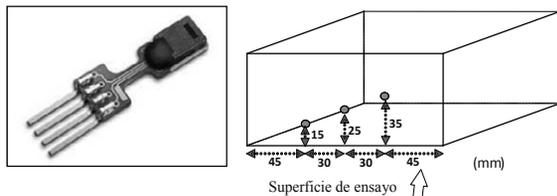


Figura 3. Sensores de humedad y temperatura.

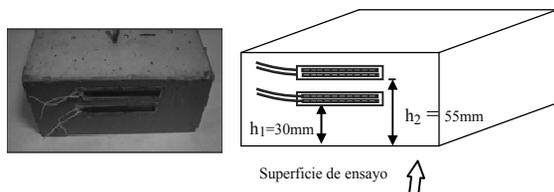


Figura 4. Bandas extensométricas.

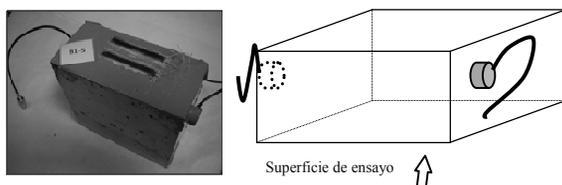


Figura 5. Transductores VPU.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Propiedades mecánicas y físicas

Se realizaron ensayos de caracterización de los dos hormigones antes (28 días de edad) y después de los 28 ciclos de hielo-deshielo, de acuerdo con la normativa. Para ello se utilizaron probetas cilíndricas de 300 x 150 mm que tuvieron las mismas condiciones de preparación que las probetas prismáticas sometidas al ensayo de resistencia al hielo-deshielo. En la tabla 3 se muestran los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, módulo de elasticidad en compresión y resistencia a tracción indirecta. También se presentan los resultados de los ensayos de profundidad de penetración de agua bajo presión y de permeabilidad al oxígeno.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos realizados a 28 días de edad, las propiedades mecánicas de los dos hormigones son similares. Se aprecia el efecto de la inclusión del aditivo aireante en la disminución de la resistencia del hormigón H1. Los dos hormigones tienen distinta estructura porosa, lo que se evidencia por los resultados de los ensayos de permeabilidad. El hormigón H2 es más permeable, ya que tanto la profundidad de penetración de agua bajo presión, como el coeficiente de permeabilidad al oxígeno son mayores que en el hormigón H1.

Después de los ciclos de hielo-deshielo, las propiedades mecánicas no se vieron afectadas; incluso, la resistencia fue ligeramente mayor que la obtenida a 28 días de edad.

La permeabilidad del hormigón sin aditivo aireante aumentó considerablemente después de los CHD, mientras que en el hormigón H1 se mantuvo en los mismos niveles que tenía a los 28 días de edad. Esto es un indicio del daño que sufrieron las probetas del hormigón H2 al ser sometidas a los CHD.

Tabla 3. Resultados de los ensayos de caracterización de los hormigones en estado endurecido.

Propiedad	Hormigón H1		Hormigón H2	
	Antes	Después	Antes	Después
R. compresión (MPa)	32,4	34,0	28,5	29,5
M. elasticidad (GPa)	26,2	27,1	26,2	26,1
R. tracción indirecta (MPa)	3,1	3,7	2,9	2,7
Profund. de penetración de agua (mm)	10,2	12,3	13,8	24,0
Permeabilidad al gas (K) (m <sup>2</sup> x 10 <sup>-18</sup> )	7,7	6,7	24,1	39,6

### 3.2. Descascarillamiento

Los resultados de la pérdida de masa superficial se muestran en la figura 6. Las probetas del hormigón H2 se deterioraron antes de los 28 CHD, con una masa acumulada de material desprendido promedio de 1,5 kg/m<sup>2</sup> (valor máximo recomendado por la norma [7]) en el ciclo 17 y un total de 3,23 kg/m<sup>2</sup> después del ciclo 28. Por el contrario, en las probetas del hormigón H1, el descascarillamiento acumulado después de 28 ciclos fue de solo 0,10 kg/m<sup>2</sup>.

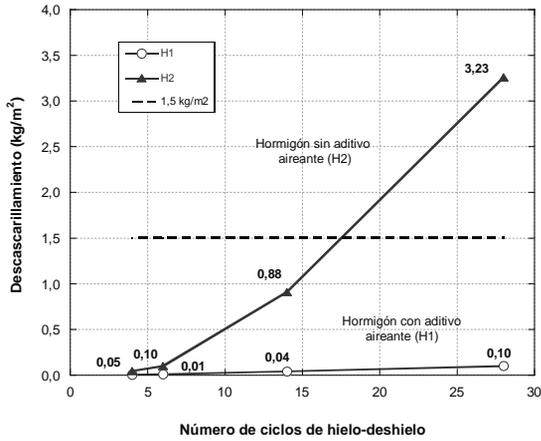


Figura 6. Resultados del ensayo de resistencia al hielo-deshielo (descascarillamiento).

En la figura 7 se muestran las superficies de ensayo en contacto con el medio de congelación de una probeta de cada hormigón antes y después de ser sometidas a los 28 CHD. En la probeta del hormigón H2 se observa un descascarillamiento severo, dejando expuestos los áridos, mientras que en la probeta del hormigón H1, el daño es mínimo.

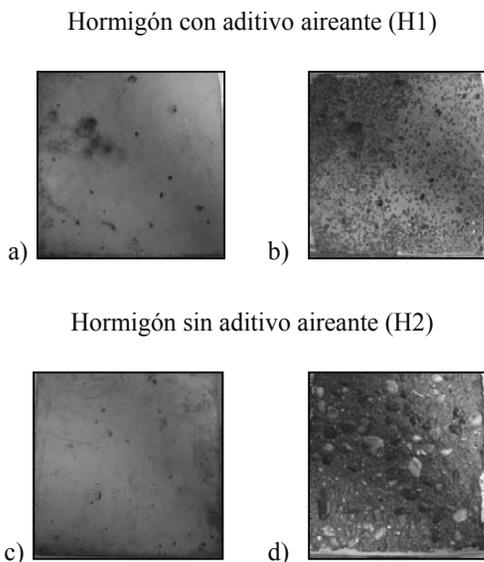


Figura 7. Aspecto de la superficie de los hormigones antes y después de 28 ciclos de hielo-deshielo.

### 3.3. Humedad y temperatura

En la figura 8 se muestra la temperatura medida dentro de la cámara climática y en el interior de las probetas de hormigón para los dos primeros y los dos últimos CHD. La temperatura medida en ambos hormigones fue similar. Además, la variación de la temperatura en las diferentes alturas dentro de las probetas fue despreciable, pero sí se observaron algunas diferencias entre las temperaturas medidas en el interior y la superficie de los hormigones debido a la inercia térmica.

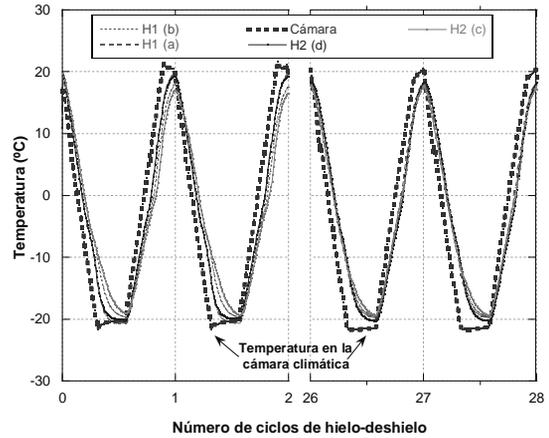


Figura 8. Temperatura medida dentro de la cámara climática y en el interior de las probetas de hormigón.

En la figura 9 se presenta la humedad máxima y mínima medida en el interior de las probetas de los dos hormigones. En el hormigón H2, el rango de variación de la humedad fue mayor que en el hormigón H1, alcanzando la máxima saturación después del ciclo 21. Esto indica que existe una mayor capacidad de movimiento de líquidos en el interior de las probetas del hormigón H2, en comparación con las del hormigón H1; lo cual está relacionado con la mayor permeabilidad y el daño producido en el hormigón H2 durante los CHD.

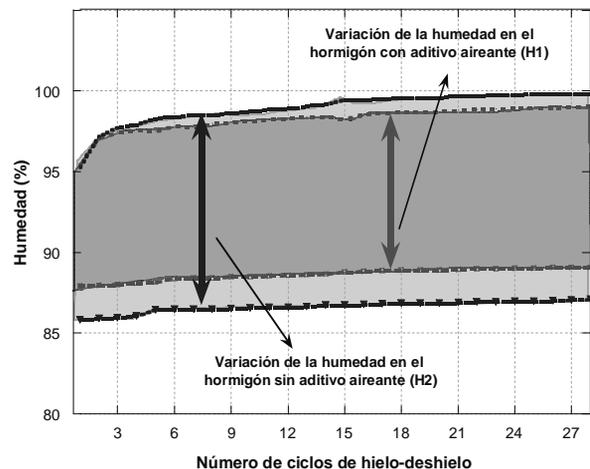


Figura 9. Curva de humedad durante los ciclos (CHD).

### 3.4. Deformación.

En la figura 10 se muestra la deformación medida con las galgas extensométricas. Las mediciones realizadas con las galgas colocadas en la parte media ( $h_1$ ), indicaron que al final de los 28 CHD, la deformación residual del hormigón H2 fue de 1150  $\mu\text{m/m}$ , mientras que en el hormigón H1 fue de sólo 65  $\mu\text{m/m}$ . Las galgas colocadas en la parte superior ( $h_2$ ) mostraron menor deformación, lo cual indica un gradiente decreciente a medida que se aleja de la superficie en contacto con el medio de congelación.

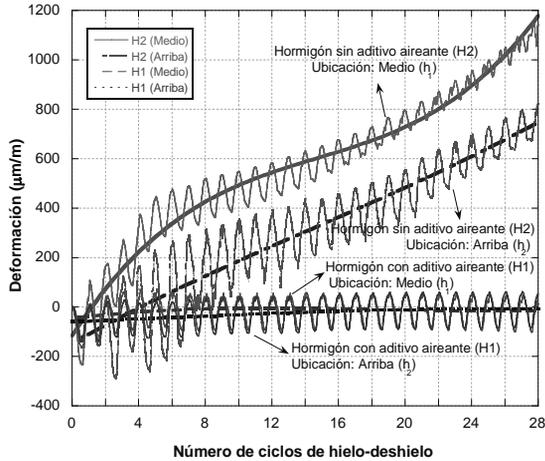


Figura 10. Deformación de la superficie de las probetas de hormigón durante los CHD.

La relación entre la deformación y la temperatura en una probeta del hormigón H2, durante los primeros cuatro CHD, se muestra en la figura 11. En cada ciclo se observa contracción durante el descenso de la temperatura y expansión durante el aumento de la temperatura. Cuando la temperatura es mínima ( $-20^\circ\text{C}$ ) se observa una gran contracción alcanzando su máximo valor que se mantiene constante hasta que la temperatura empieza a aumentar. Una vez llega a  $-15^\circ\text{C}$ ,

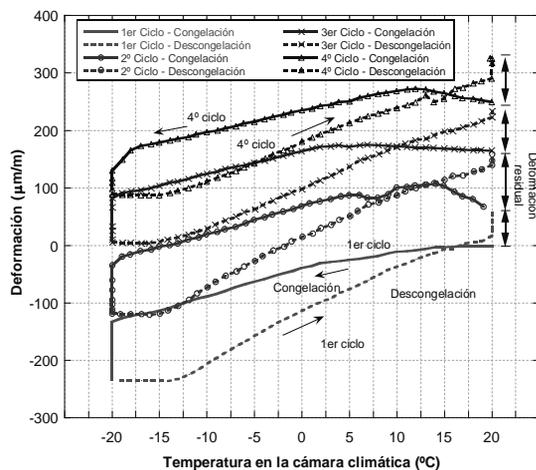


Figura 11. Deformación de la superficie de una probeta del hormigón H2 en función de la temperatura.

la deformación aumenta y el hormigón se expande hasta el final del ciclo. La deformación positiva continúa hasta que la temperatura está por debajo de  $5^\circ\text{C}$  en el siguiente ciclo, en donde se genera nuevamente contracción con el congelamiento.

En el hormigón H2, la deformación de la superficie aumenta progresivamente con el número de ciclos de hielo-deshielo generando una deformación residual. Este comportamiento es congruente con las teorías que explican el fenómeno y con los resultados obtenidos del aumento progresivo de la deformación residual con el deterioro del material [9-11].

### 3.5. Velocidad de pulso ultrasónico.

En la figura 12 se muestra la VPU medida en las probetas de los dos hormigones durante los 28 ciclos en las condiciones de deshielo ( $20^\circ\text{C}$ ) y de congelamiento ( $-20^\circ\text{C}$ ). Bajo las condiciones de deshielo, el deterioro progresivo del hormigón conlleva una disminución de la VPU. Durante la congelación, el hielo formado en las micro-fisuras incrementa la UPV y la pendiente positiva de la curva indica el deterioro progresivo del hormigón.

El módulo dinámico de elasticidad del hormigón ( $R_{UPTT}$ ) se muestra en la figura 13. El valor de  $R_{UPTT}$  disminuye con el paso de los CHD en ambos hormigones, lo cual es indicio del deterioro del material. La pérdida de  $R_{UPTT}$  es mayor en las probetas del hormigón H2 comparadas con las del hormigón H1.

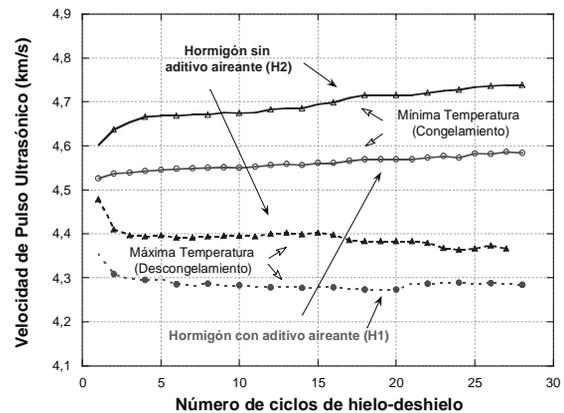


Figura 12. Velocidad de pulso ultrasónico a través de las probetas de hormigón durante los CHD.

## 4. CONCLUSIONES

El deterioro causado por los ciclos de hielo-deshielo en las probetas del hormigón con aditivo aireante (H1) fue insignificante, comparado con el deterioro de las probetas del hormigón sin aditivo aireante (H2), como era de esperarse de acuerdo con la dosificación y características de las mezclas. Este resultado fue confirmado por el ensayo de resistencia al hielo-deshielo y por la medición continua de la deformación superficial y de la velocidad de pulso ultrasónico.

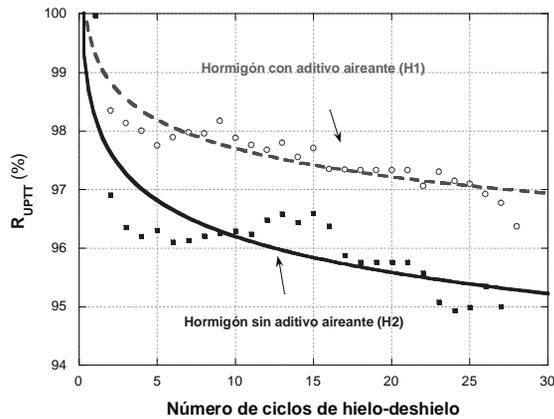


Figura 13. Módulo dinámico de elasticidad del hormigón durante los ciclos de hielo-deshielo.

La deformación superficial como medida de los cambios de longitud es un buen indicador del deterioro superficial del hormigón debido a los ciclos de hielo-deshielo en este tipo de ensayos. Las bandas extensométricas comerciales pueden reemplazar las mediciones de descascarillamiento convencionales (medida de la masa superficial desprendida). Permite, además, evaluar la profundidad del deterioro al establecer un gradiente de deformaciones en la cara de medida de las deformaciones. Tiene la ventaja añadida de poder realizar una monitorización en continuo sin necesidad de parar el ensayo para realizar las medidas.

Las diferencias entre las medidas de la velocidad de pulso ultrasónico a través de las probetas de los dos hormigones antes y después de los 28 ciclos de hielo-deshielo fueron pequeñas. Esto se debe a que la medida de la velocidad se realiza en dirección paralela a la cara sumergida, por lo que el pulso ultrasónico puede viajar por material no deteriorado. No obstante, la medida realizada con la probeta congelada en la parte más fría del ciclo ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) sí que pone de manifiesto un progresivo deterioro del hormigón.

La evaluación del deterioro del hormigón mediante la variación de la velocidad del pulso ultrasónico parece más adecuada para ensayos en los que se induce el deterioro interno del hormigón mediante un gran número de ciclos hielo-deshielo rápidos, como es el caso del ensayo ASTM C666 / C666M.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión de los proyectos BIA-2008-03523, BIA 2009-14395-C04-01 e IPT-42000-2010-31. Héctor L. Romero también agradece a la Fundación Agustín de Betancourt la beca concedida para realizar su tesis doctoral. M. Moleró está apoyado por el Departamento de Educación de la Comunidad de

Madrid, el Fondo Social Europeo y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

#### REFERENCIAS

- [1] Powers T. The air requirement of frost-resistance concrete. *Proceedings of Highway Research Board* 29:184, 1949.
- [2] Powers T. Helmut R. Theory of volume changes in hardened portland cement pastes during freezing. *Proceedings of Highway Research Board* 32:285, 1953.
- [3] Litvan C. Phase transitions of absorbates: IV. mechanism of frost action in hardened cement paste. *Journal of the American Ceramic Society* 55:38, 1971.
- [4] Fagerlund G. The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. *Materials and Structures* 10(4): 231, 1977
- [5] Setzer MJ. Micro-ice-lens formation in porous solid. *J Colloid Interface Sci* 11/1;243(1):193-201, 2001.
- [6] Pigeon M, Pleu R. *Durability of concrete in cold climates*. First Edition ed. Great Britain, 1995.
- [7] UNE-CEN/TS 12390-9 EX. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 9. Resistencia al hielo-deshielo, pérdida de masa superficial*. AENOR. Madrid, 2008.
- [8] Hernández MG, Anaya JJ, Sanchez T, Segura I. Porosity estimation of aged mortar using a micromechanical model. *Ultrasonics* 12/22;44 (Supplement 1):e1007-11, 2006.
- [9] Bishnoi S, Uomoto T. Strain-temperature hysteresis in concrete under cyclic freeze-thaw conditions. *Cement and Concrete Composites* 5;30(5):374-80, 2008.
- [10] Penttala V. Freezing-induced strains and pressures in wet porous materials and especially in concrete mortar. *Advanced Cement Based Materials* 7:8-19, 1998.
- [11] Penttala V, Al-Neshawy F. Ice formation and pore water redistribution during 2-cycle freezing and thawing of concrete mortars. In: D. J. Janssen, M. J. Setzer, M. B. Snyder, editor. *Proceedings of the international RILEM workshop on frost damage in concrete*. PRO 25 ed. Minneapolis, 2002.