

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE CURADO EN EL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN SOMETIDO A CICLOS HIELO-DESHIELO

Ghaida Al-Assadi¹, María Jesús Casati², Jaime Fernández¹, Jaime C. Gálvez¹

¹ 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: ghaida@caminos.upm.es; jfernandez@intemac.es; jcgálvez@caminos.upm.es

² Departamento de Vehículos Aeroespaciales, E.U.I.T. Aeronáutica, Pl. Cardenal Cisneros s/n, 28040 Madrid, España.
E-mail: mariajesus.casati@upm.es

RESUMEN

Este trabajo presenta el estudio de la influencia de las condiciones del curado en la durabilidad del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo. Dos hormigones HA-30 se han sometido a buenas y malas condiciones de curado y se ha estudiado cómo influyen éstas en su durabilidad. Además, se ha estudiado cómo afecta en su comportamiento frente a los ciclos hielo/deshielo la incorporación o no de un aditivo inclusor de aire (aireante). Se han realizado ensayos de penetración de agua bajo presión, de permeabilidad de gas, de porosimetría por intrusión de mercurio, así como los de caracterización mecánica del hormigón antes y después de los ciclos hielo/deshielo. Además, se ha evaluado el deterioro del hormigón al ser sometido a los ciclos hielo/deshielo a través de la pérdida de peso y modificación de la longitud de las probetas, como se propone en la normativa vigente. Complementariamente se han realizado medidas de la velocidad de transmisión de ondas ultrasónicas y se ha evaluado el Módulo Dinámico de Elasticidad Relativo (RDME), estableciendo una comparación entre la evolución de la pérdida de peso y modificación de la longitud (método clásico) con la evolución de estos parámetros ultrasónicos. Se concluye que la medida del RDME predice con anterioridad el deterioro del material.

ABSTRACT

This paper shows an experimental study of the influence of concrete curing conditions on the durability under frost-thaw cycles. Two HA-30 concretes have respectively been well and bad cured and underwent to frost-thaw cycles. The influence of air-entraining agents has also been studied. Water penetration under pressure, gas permeability, mercury porosity and mechanical tests were performed before and after frost-thaw cycles. According to standards, weight loss and length variation have been measured. Complementary measurements of the transmission velocity of ultrasonic waves have been done; the RDME was evaluated. Comparison between weight loss and length variation with the ultrasonic measurement was done. RDME early predicts the concrete deterioration than classical measures (weight loss and length variation).

PALABRAS CLAVE: Hormigón, hielo/deshielo, durabilidad, deterioro, curado, permeabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón empleado en obras *in situ* es un material muy sensible a las condiciones medioambientales afectando a su durabilidad [1]. Cuando se hormigona en los meses calurosos, con temperatura alta y humedad relativa baja, es necesario un buen curado, lo que no siempre está garantizado. Los potenciales problemas al hormigonar en épocas calurosas son: el aumento de la demanda de agua durante el amasado, el aumento de la velocidad de pérdida de consistencia del material, aumento de la velocidad de fraguado, etc. [2]. Un mal

curado se traduce, entre otros problemas, en una fisuración superficial y por tanto en una más fácil entrada de agua y sustancias nocivas hacia el interior del hormigón, una mayor permeabilidad del hormigón y mayor dificultad para controlar el contenido de poros. Por otro lado, las condiciones de invierno, con temperaturas muy bajas, provocan heladas y someten al hormigón a ciclos hielo/deshielo. Con el fin paliar los efectos de las heladas y dificultar la entrada de agua por capilaridad se añade un aditivo inclusor de aire, comúnmente llamado *aireante*, a la masa de hormigón [3, 4]. Por ello hay dos aspectos fundamentales del

comportamiento del hormigón frente a los ciclos hielo/deshielo: a) el tiempo y calidad del curado, y b) la incorporación o no de un *aireante*.

En este trabajo se presentan los resultados de la campaña experimental realizada para estudiar la influencia del curado y la adición del aireante en el comportamiento del hormigón frente a los ciclos hielo/deshielo. Los ensayos se han realizado con probetas normalizadas de hormigón introducidas en una cámara climática para simular las condiciones *in situ* del curado del hormigón.

El trabajo comienza con la descripción del material, las probetas y los ensayos realizados. A continuación se presentan los resultados experimentales y su discusión. Por último se presentan los comentarios finales y las conclusiones.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1 Materiales y probetas

Se han confeccionado dos hormigones con la dosificación indicada en la Tabla 1. La diferencia entre los dos hormigones es la adición a uno de ellos de un aireante (0,05% del peso de cemento) para obtener mayor porcentaje de aire ocluido en la mezcla. La dosificación corresponde a un hormigón de resistencia característica 30 MPa. La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos de hormigón fresco.

Tabla 1: Dosificación de los hormigones

| | Sin aireante | Con aireante |
|---|--------------|--------------|
| Cemento (kg/m ³) | 381 | 381 |
| Arena (kg/m ³) | 880 | 880 |
| Árido (kg/m ³) | 381 | 381 |
| Agua (kg/m ³) | 190 | 190 |
| Superplastificante (kg/m ³) | 2,3 | 2,3 |
| Aireante (kg/m ³) | 0 | 0,2 |

Tabla 2: Ensayos de hormigón fresco

| | Sin aireante | Con aireante |
|---------------------|--------------|--------------|
| Cono de Abrams (cm) | 3 | 13 |
| Aire ocluido(%) | 3,4 | 7 |

El cemento empleado ha sido CEM I 42,5 R, que es un cemento Pórtland sin adiciones de alta resistencia inicial. La arena silíceas de río (0-5 mm) de módulo granulométrico 2,7 y el árido calizo de machaqueo (5-20 mm) de índice granulométrico 6,9. La relación a/c fue de 0,5.

2.2 Programa de ensayos

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 37 % de humedad relativa. Estos valores de temperatura y humedad representan las condiciones ambientales medias de verano en la región central de España.

El *buen curado* de las probetas 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* de las probetas se hizo suprimiendo el regado diario antes indicado. De este modo de obtuvieron cuatro grupos de probetas:

- Hormigón **con** aireante **bien** curado.
- Hormigón **con** aireante **mal** curado.
- Hormigón **sin** aireante **bien** curado.
- Hormigón **sin** aireante **mal** curado.

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 y penetración de agua a presión, según las normas RILEM-TC 116-PCD, ASTM-D4404-04 y UNE-EN 12390-8.

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 al diagrama temperatura/tiempo de Figura 1.

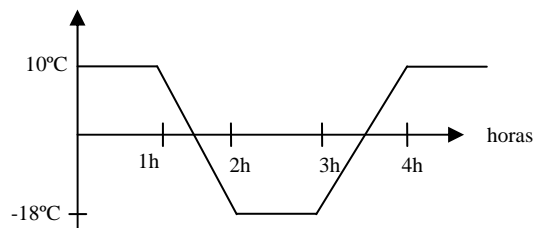


Figura 1: Esquema del ciclo hielo/deshielo.

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

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 y penetración de agua a presión.

La nomenclatura empleada para identificar las probetas fue: Designación del hormigón--Contenido de aireante (%)--Tipo de curado (*bueno o malo*). Así la designación H30-00-B se refiere a una probeta de hormigón H30, sin aireante y bien curada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de porosimetría y permeabilidad antes/después de los ciclos hielo/deshielo

La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos de porosimetría mediante intrusión de mercurio, permeabilidad a gas y penetración de agua bajo presión en las probetas de hormigón antes y después de los ciclos hielo-deshielo.

Los resultados de porosimetría por intrusión de mercurio expresan el porcentaje de poros totales en el hormigón. El porcentaje de poros después de los ciclos hielo/deshielo es la media del obtenido en 4 puntos a distintas profundidades de la probeta. Se observa como 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, que 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.

La permeabilidad a gas presentada corresponde a la media de dos muestras extraídas a una distancia de 5 cm de la parte superior e inferior de la probeta, antes del ensayo de hielo/deshielo. El ensayo no se realizó tras los ciclos hielo/deshielo porque la microfisuración induce errores en los resultados del ensayo.

Los resultados de penetración de agua bajo presión muestran cómo el hormigón es más permeable tras el ensayo hielo/deshielo. La Tabla 4 muestra los incrementos relativos en la profundidad de penetración de agua para los cuatro grupos de probetas. En el caso de las probetas con aireante se aprecia un mayor deterioro tras el ensayo hielo/deshielo en las probetas mal curadas. En el caso de las probetas sin aireante se

aprecia un anómalo peor comportamiento en las bien curadas. A falta de más datos este comportamiento se puede explicar porque las probetas sin aireante y mal curadas muestran una microfisuración inicial que induce un deterioro relativo menor durante el ensayo hielo/deshielo, entendiéndose que la microfisuración inicial puede facilitar una expansión del agua al helarse sin aumentar el deterioro del hormigón ya por sí deteriorado.

Tabla 3: Resultados de ensayos de durabilidad

| Tipo de Hormigón | Porosidad de mercurio | Permeabilidad al gas | Penetración de agua |
|----------------------|-----------------------|-------------------------------------|---------------------|
| | (%) | K ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$) | Prof. Media (cm) |
| H30-00-B (Antes) | 11,94 | 118,46 | 2,5 |
| H30-00-B (Después) | 12,19 | - | 5,4 |
| H30-0,05-B (Antes) | 15,98 | 114,96 | 3,0 |
| H30-0,05-B (Después) | 14,33 | - | 3,9 |
| H30-00-M (Antes) | 12,91 | 53,17 | 2,9 |
| H30-00-M (Después) | 11,62 | - | 3,3 |
| H30-0,05-M (Antes) | 16,24 | 66,4 | 2,5 |
| H30-0,05-M (Después) | 14,97 | - | 4,1 |



Figura 2: Probetas H30-0,05-B y H30-00-B después del ensayo de hielo/deshielo.

Tabla 4: Incremento relativo de la profundidad de penetración de agua tras el ensayo hielo/deshielo

| Tipo de probeta | Incremento relativo (%) |
|--------------------------|-------------------------|
| Con aireante bien curada | 30 |
| Con aireante mal curada | 64 |
| Sin aireante bien curada | 116 |
| Sin aireante mal curada | 13,8 |

La Figura 2 muestra dos probetas, con y sin aireante, al finalizar los 300 ciclos de ensayo. Se observa el fuerte deterioro producido en la probeta sin aireante (H30-00-B).

3.2 Resultados de los ensayos mecánicos antes/después de los ciclos hielo/deshielo

Tabla 5: Resultados de 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 |

La Tabla 5 muestra los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas antes y después de los ciclos hielo/deshielo.

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.

3.3 Evaluación del deterioro durante los ciclos hielo/deshielo

Los ensayos de hielo/deshielo se realizaron según la recomendación ASTM C 666, en la que los criterios para la identificación del deterioro son la medida de la pérdida de peso, de longitud y RDME 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.

La Figura 3 muestra, para la amasada H30-00-B, los valores medios de los porcentajes relativos de las variaciones de peso, longitud y RDME en las probetas, cada semana (aproximadamente 42 ciclos).

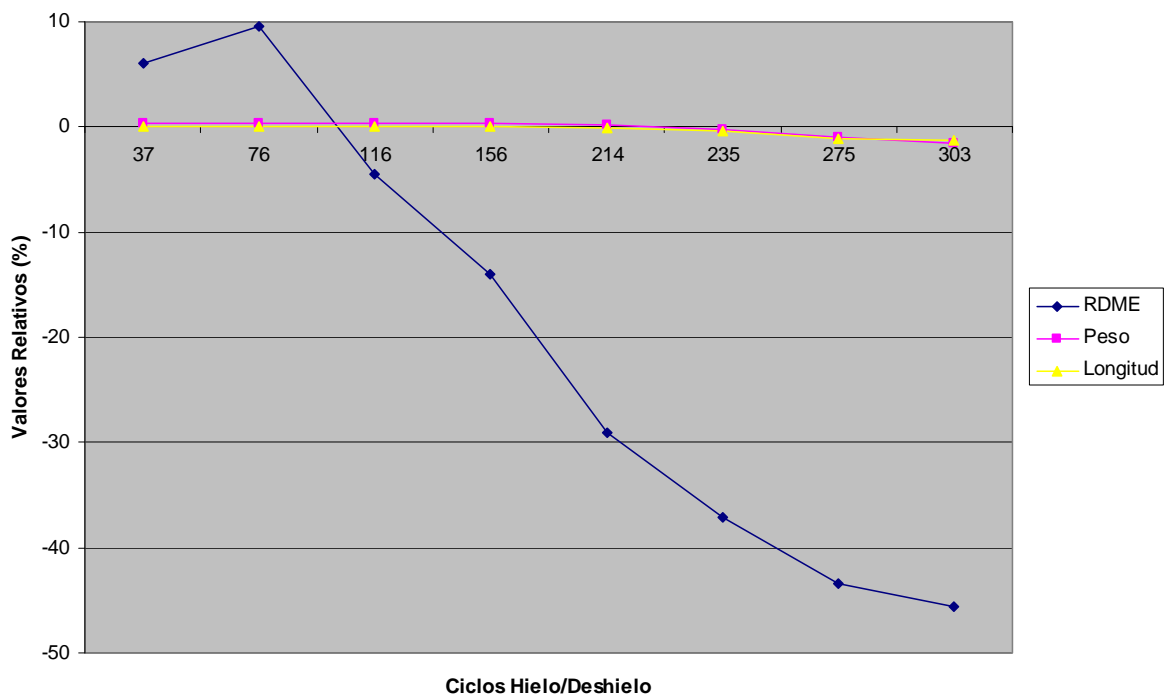


Figura 3: Deterioro de las probetas sometidas a los ciclos hielo/deshielo.

Se observa que el RDME, que es la relación entre el valor de la medida del módulo dinámico de elasticidad después de los ensayos hielo/deshielo y el valor inicial antes de los ciclos, predice el deterioro de la probeta

con antelación a las medidas de pérdida de peso y longitud,

Comparación RDME para H30 (sin y con) (B y M)

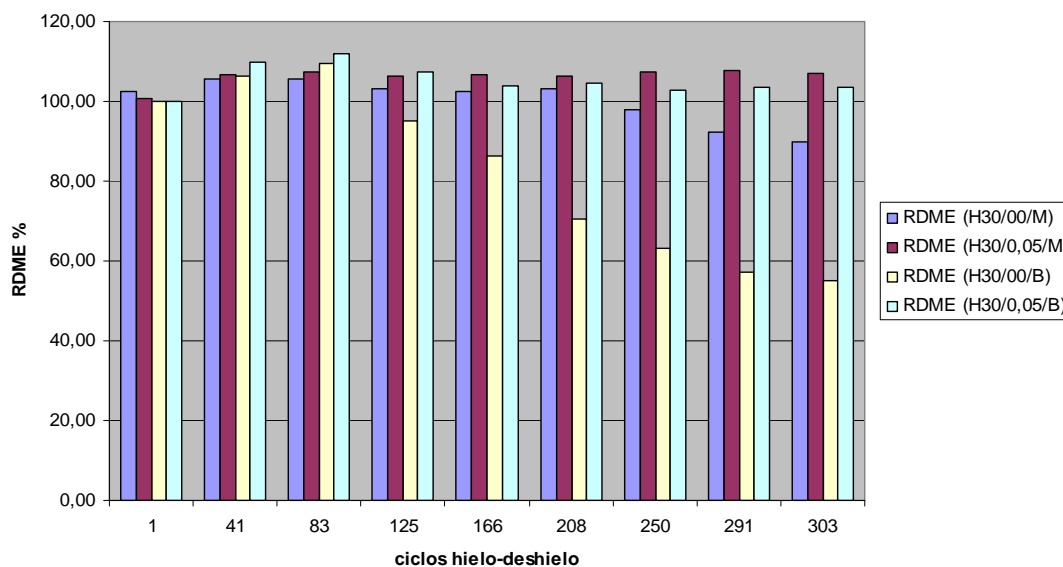


Figura 4: RDME para los cuatro hormigones (con y sin aireante, bien y mal curados).

La Figura 4 compara el RDME para los cuatro hormigones ensayados. Se aprecia cómo el tipo de curado no es tan relevante como cabría esperar en el comportamiento frente a los ciclos hielo/deshielo cuando se mide el RDME.

Las Figuras 5 y 6 corroboran los datos de la medida del RDME. Se observa cómo la porosidad y el tamaño de poro antes de los ensayos hielo/deshielo es ligeramente mayor que después. Este comportamiento anómalo se explica porque el proceso de hidratación del cemento continua durante los ensayos hielo/deshielo, cerrando la red porosa. Este aspecto está pendiente de confirmar con los ensayos de ATD/DTG, actualmente en desarrollo.

Comparación de porosimetría para H30 bien y mal curado (después los ciclos)

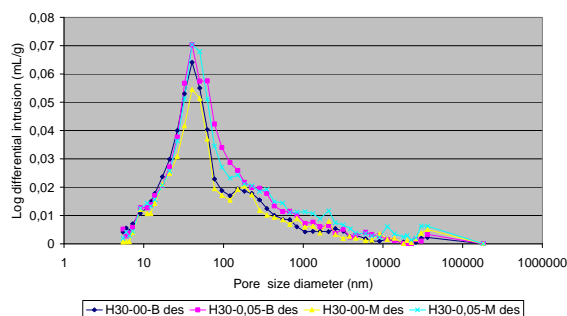


Figura 6: Resultados de porosimetría por intrusión de mercurio en los cuatro hormigones después de los ciclos hielo/deshielo.

Comparación de porosimetría para H30 bien y mal curado (antes los ciclos)

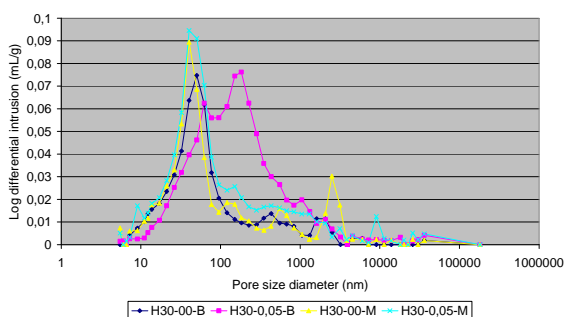


Figura 5: Resultados de porosimetría por intrusión de mercurio en los cuatro hormigones antes de los ciclos hielo/deshielo.

Permeabilidad al agua (H30 bien y mal)

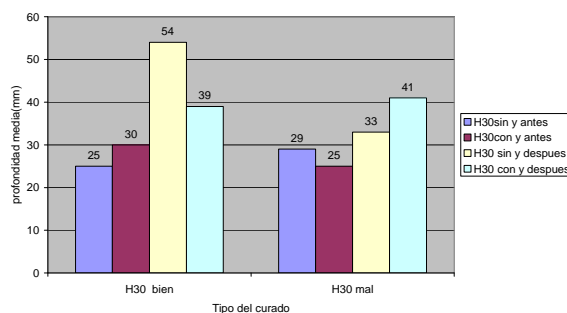


Figura 7: Penetración de agua para las amasadas H30-00 y 0,05-B y M

La Figura 7 muestra los ensayos de permeabilidad al agua bajo presión para los cuatro hormigones antes y después de los ciclos hielo/deshielo. Estos resultados

corroboran los obtenidos en los otros ensayos de permeabilidad: a gases e intrusión de mercurio.

4. CONCLUSIONES

Aunque hay aspectos a 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 de la normativa española.
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 la baja humedad y alta temperatura.
3. Las probetas con adición de aireante se comportan mejor frente a los ciclos hielo/deshielo que las que carecen de aireante.
4. El tipo de curado, para las condiciones ambientales impuestas de humedad y temperatura y 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.

REFERENCIAS

- [1] Mather, B., "Concrete durability", *Cement and Concrete Composites*, 26, pag 3-4, 2004.
- [2] Palomo, A.; Blanco-Varela, M.T.; Vázquez, T.; Puertas, F.; Puig, J; "Modificaciones microestructurales del cemento hidratado por curado del hormigón en periodos estivales", *Cemento-Hormigón*, nº 814, pag. 1004-1018, 2000.

[3] Gokce, A.; Nagataki, S.; Saeki, T.; Hisada, M.; "Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: The role of air content in demolished concrete", *Cement and Concrete Research* 34, pag. 799-806, 2004.

[4] Sahin, R.; Ali Tasdemir, M.; Gúl, R.; Çelik, C.; "Optimization study and damage evaluation in concrete mixtures exposed to slow freeze-thaw cycles", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pag. 609-615, 2007.