

## DURABILIDAD DEL HORMIGÓN FRENTE A LOS CICLOS HIELO-DESHIELO. EVALUACIÓN DE DOS TIPOS DE HORMIGÓN

A. Enfedaque, G. Al-Assadi, H. L. Romero, J. C. Gálvez y W. Zhe

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: jaime.galvez@upm.es

### RESUMEN

El presente trabajo estudia el comportamiento de dos hormigones frente al ensayo de resistencia al hielo-deshielo de hormigones endurecidos. La incorporación de un aditivo aireante mejora de forma sensible el comportamiento del hormigón frente a este ensayo. Sin embargo, en hormigón pretensado con cordón adherente está prohibido el uso de aditivos aireantes. Una estrategia adecuada es emplear humo de sílice para mejorar la impermeabilidad del hormigón. En este trabajo se compara el comportamiento de un hormigón con aditivo aireante y otro con humo de sílice frente al ensayo de resistencia al hielo-deshielo. Además, estudia la viabilidad de emplear técnicas alternativas de medida del deterioro superficial: modificación de la velocidad de pulso ultrasónico y medida de la deformación superficial con galgas extensométricas. Ambas técnicas se muestran viables y aportan ventajas frente al peso de la masa superficial desprendida por descascarillamiento.

### ABSTRACT

This work presents the behaviour of two concretes against the freeze-thaw resistance of hardened concrete test. The use of air-entraining additives improves the behaviour of concrete against freezing-thawing. However, on prestressed concrete with bond wires or strands the use of air-entraining additives is not allowed. An appropriate strategy is incorporate silica fume to improve the impermeability of concrete. This paper compares the performance of a concrete with air-entraining additive and other with silica fume against freeze-thaw resistance test. Furthermore, studies the feasibility of using alternative techniques for measuring surface damage: changes in the ultrasonic pulse velocity and measurement of concrete surface deformation with strain gauges. Both techniques are demonstrated viable and provide advantages over the weight of the mass released by peeling surface.

**PALABRAS CLAVE:** Hormigón, ciclos hielo-deshielo, aireante, humo de sílice, ultrasonidos, galga extensométrica.

### 1. INTRODUCCIÓN

La actual Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 ha extendido la vida útil de la mayoría de las estructuras de hormigón a cien años. Este aspecto hace que el diseño de los hormigones basado en la durabilidad pase a tener un papel protagonista en el proyecto y la construcción [1]. En los países de clima continental el deterioro por ciclos repetidos de hielo-deshielo es causa frecuente del deterioro del hormigón [2]. Este problema se ve incrementado por el uso de las sales fundentes empleadas en los pavimentos [3].

Tradicionalmente se emplean aditivos inclusores de aire para mejorar el comportamiento del hormigón frente a los ciclos hielo-deshielo [4-5]. Sin embargo, en elementos de hormigón pretensado con armadura adherente, la normativa vigente prohíbe el uso de estos aditivos porque disminuye la adherencia entre el cordón

y el hormigón. Además, la presencia de aire ocluido disminuye la resistencia del hormigón en aproximadamente un 15 % [6]. Por estas razones se han buscado formas alternativas de mejorar el comportamiento del hormigón frente a ciclos hielo-deshielo. La incorporación de humo de sílice permite obtener un hormigón con estructura porosa más cerrada a la vez que mejora las propiedades mecánicas [7-9]. Ambos aspectos mejoran su comportamiento frente a ciclos hielo-deshielo. No obstante hay dudas acerca del grado de eficacia de esta solución [10-14].

Se han desarrollado diferentes métodos de ensayo para evaluar la resistencia del hormigón frente a ciclos hielo-deshielo. Ningún método en particular puede reproducir completamente las condiciones de campo en todos los casos individuales. Si el hormigón tiene una resistencia inadecuada, el ataque de hielo-deshielo puede conducir a dos tipos de deterioro, al descascarillado (desgaste

superficial por la acción ambiental) y al daño microestructural interno. La normativa española ha optado por el ensayo de resistencia al descascarillado, norma UNE-CEN/TS 12390-9 [15].

En este trabajo se compara el comportamiento de un hormigón con aditivo aireante y otro con humo de sílice frente al ensayo de resistencia al hielo-deshielo. Además, estudia la viabilidad de emplear técnicas alternativas de medida del deterioro superficial: modificación de la velocidad de pulso ultrasónico y medida de la deformación superficial con galgas extensométricas. Ambas técnicas se muestran viables y aportan ventajas frente al peso de la masa superficial desprendida por descascarillamiento.

## 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

El cemento empleado fue CEM I 42.5 R. Los áridos empleados eran silíceos de río. La arena de módulo granulométrico 2,87. La grava (5/25mm) de módulo granulométrico 7,31.

Se empleó un aditivo superplastificante (Sika Visco-Crete 20-HE), un aditivo aireante (Sika Aer 5) y adición de humo de sílice, con una superficie específica de 20 m<sup>2</sup>/g y densidad relativa 2. La medida del aire ocluido se realizó según la norma ASTM C 231.

### 2.2 Dosificación de hormigones

Se fabricaron dos tipos de hormigón, uno aditivo aireante (AEC) y otro con adición de humo de sílice (SFC). La Tabla 1 muestra la dosificación por metro cúbico de cada hormigón. La Tabla 2 muestra las propiedades en estado fresco.

Tabla 1. Dosificación por m<sup>3</sup> de cada hormigón

Componente (kg/m <sup>3</sup> )	SFC	AEC
Cemento	360	450
Arena	553	530
Grava	1239	1200
Agua	166	180
Superplastificante	1,8	--
Humo de sílice	40	--
Aireante	--	0,675
Relación a/c	0,38	0,40

Tabla 2. Propiedades del hormigón en estado fresco

Propiedad	SFC	AEC
Asiento cono (cm)	8	5
Contenido aire ocluido	2,8 %	7,5 %

### 2.3 Preparación de la probetas

De cada tipo de hormigón, se confeccionaron siete probetas cilíndricas de 30cm de altura y 15cm de diámetro, y ocho probetas prismáticas de 150x150mm<sup>2</sup> y 70mm de espesor. Todas las probetas fueron hormigonadas en moldes metálicos con las caras interiores rectificadas.

El hormigón se fabricó con una hormigonera de eje vertical de 100 litros de capacidad. Las probetas fueron hormigonadas a temperatura de laboratorio. Las primeras 24 horas se mantuvieron en los moldes a temperatura de laboratorio cubiertas con tela de arpillera húmeda. Una vez desmoldadas, las probetas prismáticas se introdujeron en un baño de agua a 20 ± 2°C durante 7 días, tras lo cual se guardaron en una cámara climática (20°C y 65% HR) durante 21 días. Las probetas cilíndricas, una vez desmoldadas, se introdujeron en una cámara climática (20°C y 95% RH) durante 28 días.

### 2.4 Ensayos del hormigón endurecido

De las siete probetas cilíndricas de cada hormigón, una se ensayó a compresión a los siete días, dos se emplearon para el ensayo de tracción indirecta a los 28 días, y las cuatro restantes para el ensayo de compresión y medida del módulo de elasticidad a 28 días.

Además se realizó el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP), según la norma ASTM 444-04 [16], para conocer la distribución y tamaño de poros de cada hormigón. La Figura 1 muestra el esquema de obtención de las muestras.

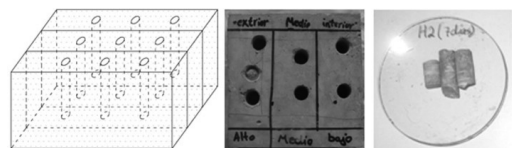


Figura 1. Esquema de extracción de muestras para MIP.

La caracterización de los productos hidratados se hizo mediante análisis térmico diferencial (ATD/DTG). Se emplearon muestras con tamaño de grano inferior a 0,2 mm, procedentes de secciones completas. Se llevó a cabo la interrupción del proceso de hidratación a 7 y 28 días, así como después de los ciclos hielo-deshielo.

### 2.5 Ensayos de ciclos hielo-deshielo

Las probetas prismáticas de cada tipo de hormigón fueron sometidas a ciclos hielo-deshielo según la norma UNE-CEN/TS 12390-9: “Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial” [15]. Los ciclos se iniciaron cuando las probetas tenían 35 días de edad. Cada ciclo tenía una duración de 12 horas, con un rango de variación de temperatura de 20°C a -20°C, como indica la Figura 2. Durante los ciclos, las probetas

estaban parcialmente sumergidas (10mm) en una solución de agua desionizada al 3% de NaCl.

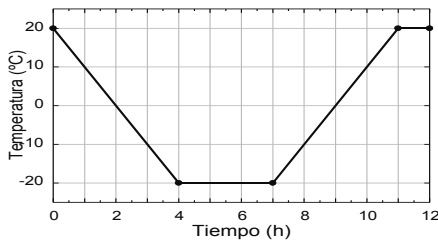


Figura 2. Esquema del ciclo hielo-deshielo.

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 24h a 100°C. El material se pesó después de alcanzar la temperatura ambiente. El resultado se expresó de acuerdo a:

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \quad (1)$$

Donde  $m_n$  es la masa acumulada del material desprendido por unidad de superficie de ensayo después de  $n$  ciclos expresada en  $kg/m^2$ .  $\mu_s$  es la masa acumulada del material seco desprendido después de  $n$  ciclos en kg.  $A$  es el área total de la superficie de ensayo en  $m^2$ .

En cada probeta de hormigón se utilizaron dos transductores (emisor y receptor) para medir la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) a través del hormigón. La medida se realizó manualmente en la dirección paralela a la cara sumergida. La disminución del módulo de elasticidad debido a los daños internos se obtuvo mediante la medición de la velocidad de pulso ultrasónico, según la siguiente fórmula:

$$RDME(\%) = \left[ \frac{n_c^2}{n_o^2} \right] * 100 \quad (2)$$

Donde  $n_c$  es la velocidad transversal de pulso ultrasónico después de  $c$  ciclos en (m/s).  $n_o$  es la velocidad inicial transversal de pulso ultrasónico en el ciclo cero en (m/s).

El cambio de longitud de las probetas se midió manualmente de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Cambio(\%) = \frac{(L_c - L_0)}{L_0} * 100 \quad (3)$$

Donde  $L_c$  es la longitud en el ciclo  $c$  (en mm).  $L_0$  es la longitud inicial en el ciclo cero (en mm).

La deformación superficial en cada probeta de hormigón se midió usando dos galgas 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 galgas se muestra en la Figura 3.

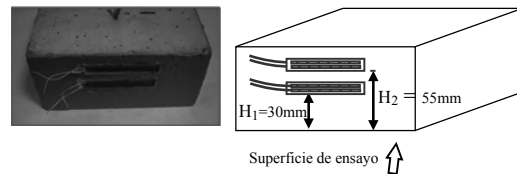


Figura 3. Bandas extensométricas.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Propiedades mecánicas y físicas

La Tabla 3 muestra los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas a 28 días para los dos hormigones.

Tabla 3. Ensayos mecánicos de los dos hormigones

Propiedad	SFC	AEC
R. Compresión 7días (MPa)	38,5	30,5
R. Compresión 28días (MPa)	41,5	31,9
M. Elasticidad 28días (GPa)	29,0	28,0
R. Tracción 28días (MPa)	3,9	3,1

Las Figuras 4 y 5 muestran los resultados del ensayo MIP para cada hormigón antes de los ciclos hielo deshielo (7 y 28 días) y después de 42 ciclos hielo deshielo.

Como era de esperar, el hormigón SFC muestra un volumen de poros mucho menor que el hormigón AEC. El humo de sílice tiene un tamaño de partícula medio inferior a una micra (100 veces más fino que el cemento). Estas partículas finas llenan los vacíos entre los granos de cemento y reaccionan con la cal libre liberada durante la hidratación del cemento, dando lugar a un hormigón con menos poros que un hormigón ordinario.

Tras los 42 ciclos hielo deshielo, en el hormigón SFC (Figura 4) se observa un desplazamiento hacia la izquierda de la curva, que indica un refinamiento del poro. También se observa un incremento de la cantidad de poros de tamaños mayores (parte derecha de la curva), que indica la aparición de grietas.

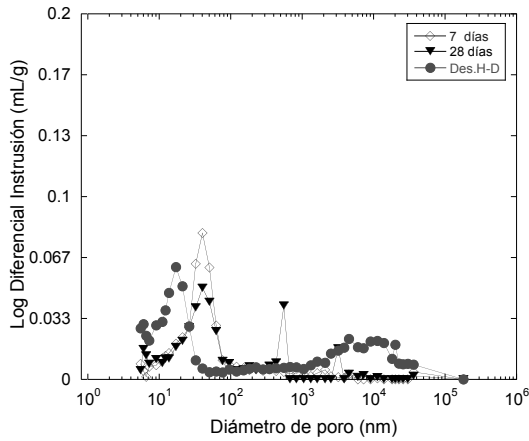


Figura 4. Distribución de tamaño de poro en el hormigón con humo de sílice SFC.

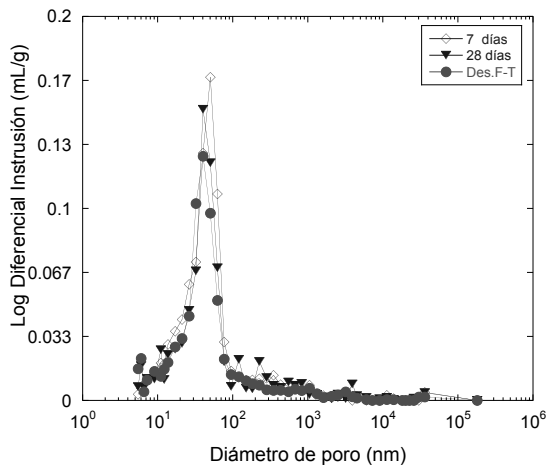


Figura 5. Distribución de tamaño de poro en el hormigón aditivo inclusor de aire (AEC)..

Por el contrario, en el hormigón AEC (Figura 5) no se aprecian apenas diferencias antes y después de los ciclos, lo que indica un buen comportamiento frente a los ciclos hielo deshielo.

El análisis ATD/TG cuantifica el contenido de productos hidratados. Las Figuras 6 y 7 muestran los contenidos de portlandita y el agua de gel para los dos hormigones. Se muestran los valores antes de los ciclos hielo deshielo (7 y 28 días) y después (42 ciclos hielo deshielo). En ambos casos, dado que el deterioro por ciclos hielo deshielo es superficial, ambos hormigones evolucionan desde los 28 días hasta el final de los ciclos incrementando el contenido de portlandita (Figura 6) y de geles CSH (Figura 7).

### 3.2. Daño por ciclos hielo-deshielo

La Figura 8 muestra los resultados de pérdida de masa superficial para los dos hormigones. En el caso del hormigón EAC no se aprecia daño significativo.

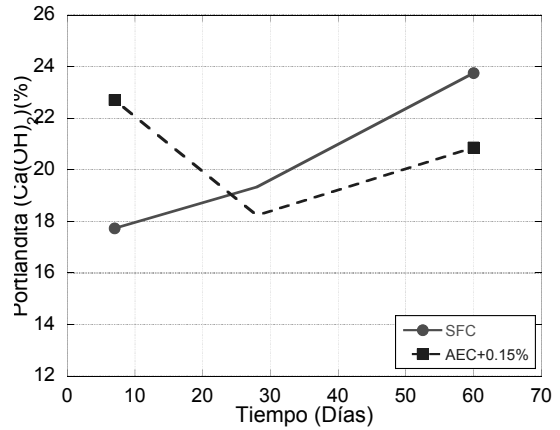


Figura 6. Contenido de portlandita de los hormigones.

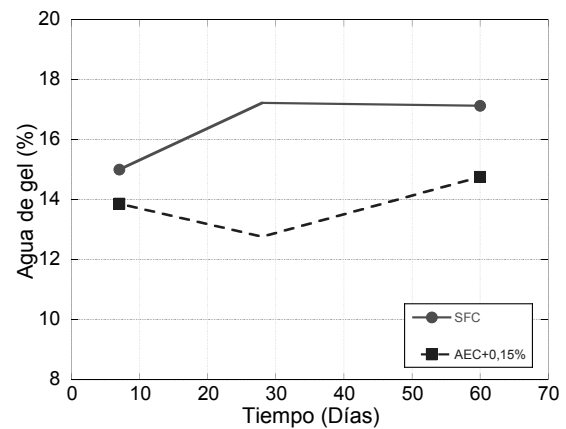


Figure 7. Contenido de agua de gel C-S-H de los hormigones.

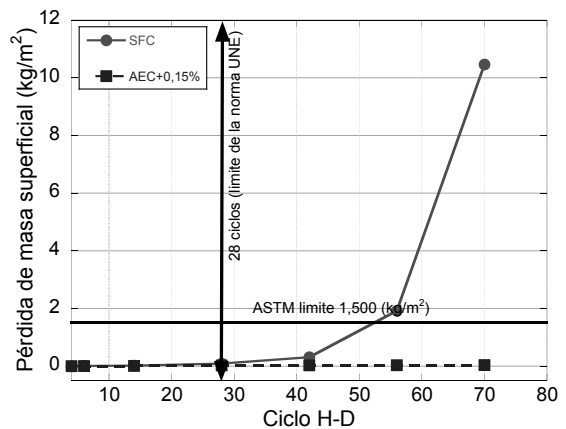


Figura 8. Pérdida de masa superficial para cada hormigón.

El hormigón SFC resiste sin problema los 28 ciclos estipulados por la norma, pero se deteriora significativamente a partir del ciclo 55.

La Figura 9 muestra los resultados RDME para las mismas probetas. Se observa que el RDME aumenta a medida que aumenta el número de ciclos para las dos

tipos de hormigones hasta el límite de la norma (28 ciclos). Esto se debe a que el pulso ultrasónico viaja por el interior del hormigón, viéndose poco afectado por el deterioro superficial.

Al aumentar el número de ciclos hielo deshielo hasta 70, el RDME para el hormigón SFC disminuye rápidamente, mientras que lo hace más lentamente en el hormigón AEC, lo que indica su mejor comportamiento frente al deterioro.

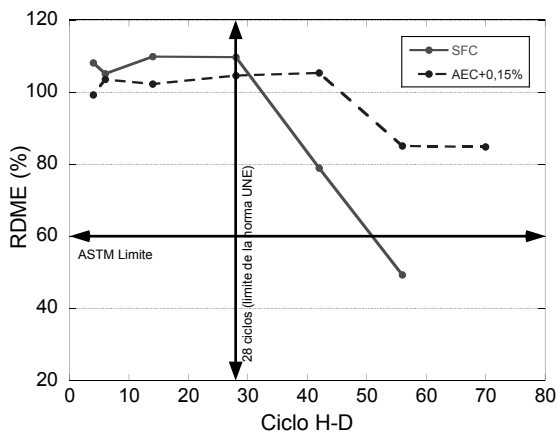


Figura 9. Medida de RDME para cada tipo de hormigón.

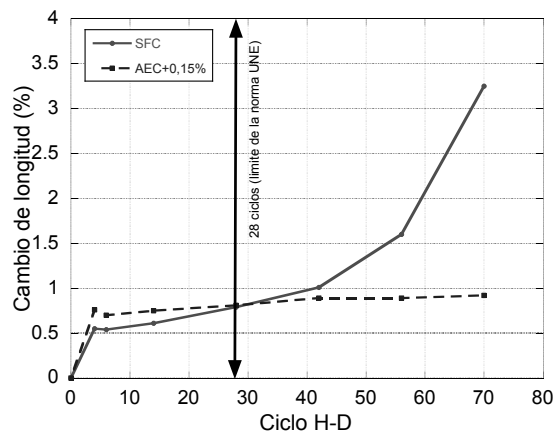


Figura 10. Medida del cambio de longitud para cada tipo de hormigón.

La Figura 10 muestra los resultados de cambio de longitud para las mismas probetas de cada tipo de hormigón. Se observa que el cambio de longitud tiene la misma tendencia del RDME para las dos tipos de hormigones hasta el límite de la norma (28 ciclos). Al aumentar el número de ciclos hielo deshielo hasta 70 ciclos, el hormigón SFC disminuye su cambio de longitud por generar fisuras en cada ciclo de H-D. Por otra parte, el hormigón AEC apenas muestra cambios durante los ciclos hielo deshielo.

La Figura 11 muestra la deformación medida con las galgas extensométricas en los dos hormigones tras los ensayos hielo deshielo. Ambos hormigones muestran un buen comportamiento hasta el ciclo 28. A partir de ese ciclo el hormigón SFC muestra un importante deterioro superficial manifestado por el aumento de deformación. Además, 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.

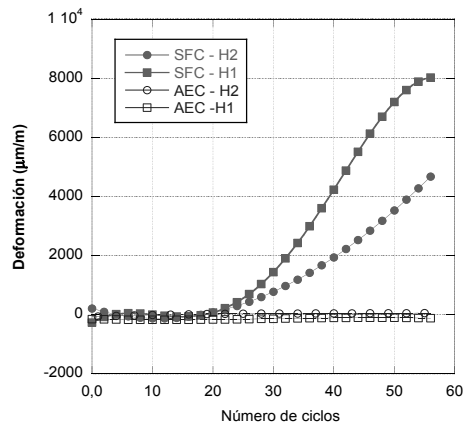


Figura 11. Medida de la deformación para cada hormigón con las galgas extensométricas.

#### 4. CONCLUSIONES

Los dos hormigones superaron sin problemas el ensayo de resistencia al hielo deshielo UNE-CEN/TS 12390-9, que estipula 28 ciclos. Completado este número de ciclos el ensayo se extendió hasta 70 ciclos. Entre los ciclos 28 y 70 el hormigón aditivo aireante (AEC) apenas sufrió deterioro en comparación con el hormigón con humo de sílice (SFC). Este resultado fue confirmado por la medida de la deformación superficial, el cambio de longitud de las probetas y la modificación de la velocidad del pulso ultrasónico.

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.

Análogo razonamiento se puede hacer de la medida de la disminución del módulo de elasticidad, evaluado mediante la velocidad del pulso ultrasónico, RDME. Sin embargo, el deterioro apreciado mediante RDME tras

los 28 ciclos es menor que con las otras técnicas de medida. 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. 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.

### REFERENCIAS

- [1] E. Ho & W. A. Gough, "Freeze thaw in Toronto, Canada in a changing climate", *Theoretical and Applied Climatology*, 83, pp. 203-210, 2006.
- [2] E. F. Irassar, *Durabilidad del hormigón estructural*, Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Argentina, 2001.
- [3] G. Mays, *Durability of Concrete Structures, Investigation, repair, protection*, Taylor & Francis, London, 2003.
- [4] G. Lomboy & K. Wang, "Effects of Strength, Permeability, and Air void Parameters on Freezing-Thawing Resistance of Concrete with and without Air Entrainment", *Journal of ASTM International*, Vol.6, No.10, 2009.
- [5] B.B. Sabir & K. Kouyiali, "Freeze-Thaw Durability of Air Entrained CSF Concrete", *Cement & Concrete composites*, 13, pp. 203-208, 1991.
- [6] M.F. Cánovas, *Hormigón*, Colegio Ingenieros Caminos, 666 pág., 2007.
- [7] H. Toutanji et al, "Effect of supplementary cementitious materials on the compressive strength and durability of short-term cured concrete", *Cement & Concrete Research*, 34, pp. 311-319, 2004.
- [8] G. Appa Rao, "Influence of silica fume on long-term strength of mortars containing different aggregate fractions", *Cement and Concrete Research* 31, 7-12, 2001.
- [9] H. Yacizi, "The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze-thaw resistance of self-compacting concrete", *Construction and Building Materials* 22, 456-462, 2008.
- [10] S. Jacobsen et al, "Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates", *Materials & Structures*, 30, pp. 33-42, 1997.
- [11] B. Persson, "Internal frost resistance and salt frost scaling of self-compacting concrete", *Cement & Concrete Research*, 33, pp.373-379, 2003.
- [12] Roxanne Kriesel et al, *Freeze-Thaw Durability of high-Strength Concrete*, Technical final report, Dept. of Civil Engineering, University of Minnesota. 1998.
- [13] Al-Assadi, G., Casati, M.J., Fernández, J. Gálvez, J.C. "Effect of the curing conditions of concrete on the behaviour under freeze-thaw cycles", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, in press, 2010.
- [14] John J. Valenza II & George W. Scherer, "A review of salt scaling: I. Phenomenology", *Cement and Concrete Research*, 37 1007-1021, 2007.
- [15] UNE-CEN/TS 12390-09, *Ensayos de hormigón endurecido, Parte9: Resistencia al hielo-deshielo, Pérdida de masa superficial*, Madrid-España: AENOR, Mayo, 2008.
- [16] ASTM-D4404-04, *Standard Test Method for Determination Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion porosimetry*. ASTM, 2004.