

EVALUACIÓN DEL DETERIORO 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

Una de las causas principales de la degradación del hormigón en regiones frías es el efecto provocado por los ciclos hielo-deshielo. La transición del hielo al deshielo está acompañada por cambios dimensionales y cambio de la tensión interna y pudiendo causar la pérdida de la capacidad resistente del hormigón. El objetivo de este trabajo es relacionar la dosificación y las condiciones de curado del hormigón con los daños producidos por los ciclos de hielo-deshielo. El trabajo presenta la evaluación del deterioro de las probetas de hormigón mediante medidas de velocidad ultrasónicas, haciendo un estudio comparativo con la pérdida de peso, la variación de longitud y la evaluación de las propiedades mecánicas (resultados antes y después los ciclos). De los resultados obtenidos se concluye que las medidas ultrasónicas predicen adecuadamente el deterioro de los hormigones debido al efecto de los ciclos hielo-deshielo, anticipándose a las medidas obtenidas de pérdida de peso y cambios de longitud.

ABSTRACT

One of the main causes of the degradation of concrete in cold regions is the effect caused by the freezing-thawing cycles. The transition from the freezing to thawing is accompanied by dimensional changes and change of the internal stress and this can diminish the strength of concrete. The objective of this work is to relate the dosage and the curing of concrete on the damage caused by freezing-thawing cycles. The work provides an assessment of the deterioration of the concrete samples through ultrasonic speed, making a statistical comparison with the loss of weight variation in length and evaluation of mechanical properties (results before and after cycling). From the results it is concluded that the ultrasonic adequately predicts the deterioration of the concrete by the effects of the freezing-thawing cycles, anticipating the loss of weight and length changes.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, ciclos hielo-deshielo, deterioro, ultrasonidos, curado.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón empleado en obras *in situ* es muy sensible a las condiciones medioambientales afectando a su durabilidad [1]. Este deterioro en una estructura de hormigón es de naturaleza compleja y cada fenómeno se podrá atribuir a la acción simultánea de una serie de factores. Estos podrán estar relacionados con las condiciones medioambientales (humedad y temperatura) o con las características propias del hormigón [2]. Los ciclos hielo-deshielo son una de las causas principales de la degradación del hormigón en regiones frías, según muestran algunos estudios [3, 4].

La transición del hielo al deshielo esta acompañada por cambios dimensionales y cambio de la tensión interna y pudiendo causar la pérdida de la capacidad resistente del hormigón [2]. Si el hormigón no es adecuado para sufrir el ataque del hielo-deshielo se originan dos tipos de deterioro: descascarillado exterior y daño microestructural interior. Estas microfisuras interiores conducen a una alteración de las propiedades mecánicas, detectable en la disminución del módulo dinámico de elasticidad (RDME) [5].

El método no destructivo normalizado más usado para medir el daño interno del hormigón durante los ciclos de hielo-deshielo es el método de resonancia [6]. Son numerosos los trabajos publicados [2, 7] en donde a

partir de la medida de la velocidad se calcula el módulo de elasticidad dinámico, evaluando de esta forma el factor de durabilidad y por consiguiente el daño producido a medida que aumentan los ciclos H-D.

En este trabajo se presentan los resultados de la campaña experimental realizada con probetas de distintos tipos de hormigón para estudiar el proceso de deterioro del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo.

El trabajo comienza con la descripción del material empleado, los hormigones confeccionados y la campaña de ensayos. A continuación se presentan las medidas realizadas sobre las probetas, y por último se presentan unos comentarios finales.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

2.1 Materiales

Se fabricaron cuatro tipos de hormigones, de dos resistencias características: 30 MPa y 45 MPa. De cada hormigón se confeccionaron dos tipos, uno con la adición de un aireante (Sika Aer 5), en proporción 0,05% en peso del cemento, y el otro sin aireante. El cemento empleado ha sido CEM I 42,5 R, cemento Pórtland sin adiciones de alta resistencia inicial. La arena silíceas 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 para en hormigón H30 y 0,4 para el hormigón H45. El contenido de cemento del hormigón varió entre 381 y 400 Kg /m³.

Las proporciones de la dosificación se indican en la Tabla 1.

Tabla 1 Dosificaciones de los hormigones (por m³ de hormigón).

Componentes	Hormigón H30		Hormigón H45	
	Sin aireante	Con aireante	Sin aireante	Con aireante
Cemento (kg/m ³)	381	381	400	400
Arena (kg/m ³)	880	880	769	769
Grava (kg/m ³)	936	936	1167	1167
Agua (kg/m ³)	190	190	160	160
Superplastificante (kg/m ³)	2.3	2.3	5.0	5.0
Aireante (kg/m ³)	0	0.2	0	0.2

El contenido de aire del hormigón en estado fresco varió entre 3,4% y 4,0 % para el hormigón sin aireante y entre 6,7% y 10,2% para el hormigón con inclusión de

aire. La medida del aire ocluido se realizó según la norma ASTM C 231.

2.2 Preparación de las probetas y curado

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 “B = curado húmedo” 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 “M = curado seco” se hizo suprimiendo el riego diario antes indicado. De este modo de obtuvieron ocho grupos de probetas:

- Hormigón sin aireante curado húmedo (H30-00-B) y (H45-00-B), amasadas nº 1 y 5.
- Hormigón con aireante curado húmedo (H30-0,05-B) y (H45-0,05-B), amasadas nº 2 y 6.
- Hormigón sin aireante curado seco (H30-00-M) y (H45-00-M), amasadas nº 3 y 7.
- Hormigón con aireante curado seco (H30-0,05-M) y (H45-0,05-M), amasadas nº 4 y 8.

2.3 Campaña de Ensayos

Propiedades mecánicas: Se ensayaron seis probetas cilíndricas de cada grupo para determinar la resistencia a compresión, el módulo de deformación estático y la resistencia a tracción, según las normas UNE-EN-12390-3, UNE 83-316-96 y UNE-EN-12390-6, respectivamente.

Ciclo hielo-deshielo: Se ensayaron seis probetas cilíndricas de cada grupo para el ensayo de hielo/deshielo según la norma ASTM C 666 [6], y una se dejó como referencia en la cámara a 20°C de temperatura y 45-50% de humedad relativa.

La norma ASTM C 666 “Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing”, es un método de ensayo en el laboratorio de resistencia del hormigón mediante ciclos cortos y repetidos de hielo-deshielo.

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.

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.

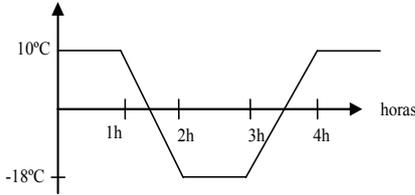


Figura 1: Esquema del ciclo hielo/deshielo

Las medidas se tomaron a intervalos según las exigencias de la ASTM C666 para controlar el empeoramiento de las probetas causado por los ciclos de hielo-deshielo. Las medidas incluyeron la pérdida de peso, el cambio de longitud y la velocidad de las ondas ultrasónicas. Las probetas se extraían de la cámara climática cuando estaban descongeladas y a una temperatura de aproximadamente 10°C. Las medidas se realizaron del siguiente modo:

Módulo Dinámico de Elasticidad

La velocidad de las ondas ultrasónicas de las probetas se midió de acuerdo a la norma ASTM C215 en la dirección axial de las probetas. Ésta se emplea para calcular el Módulo Dinámico de la Elasticidad según la siguiente fórmula [8]:

$$E_d = V_1^2 \frac{\gamma}{g} \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad (1)$$

donde:

- E_d (N/m²) Módulo dinámico de elasticidad del hormigón
- V_1 (m/s) Velocidad transversal del pulso ultrasónico
- γ (N/m³) Peso específico del hormigón
- g (m/s²) Aceleración de la gravedad
- ν Coeficiente de Poisson (0,2)

Módulo Dinámico de Elasticidad Relativo

Se determinó el módulo dinámico (RDME), expresado en porcentaje es el valor relativo entre el módulo dinámico de elasticidad después de los ensayos hielo-deshielo y el valor inicial antes de los ciclos, según la siguiente fórmula [6, 9]:

$$RDME(\%) = \left(\frac{n_c^2}{n_0^2} \right) * 100 \quad (2)$$

donde:

- n_c (m/s) Velocidad transversal de pulso ultrasónico después de c ciclos
- n_0 (m/s) Velocidad inicial transversal de pulso ultrasónico (en ciclo 0)

Las medidas terminan cuando el módulo dinámico relativo baja al 50-60% de su valor inicial.

Factor de Durabilidad

Se obtuvo el Factor de Durabilidad, que mide la capacidad resistente del hormigón frente a los ciclos hielo-deshielo y se expresa como [5]:

$$DF = (RDME)_n * \frac{n}{M} \quad (3)$$

donde:

- $RDME$ Módulo dinámico de elasticidad relativo (%)
- n Número de ciclos completados
- M Numero total de ciclos (por lo general 300 ciclos)

Cambio de longitud:

Se midió la longitud de las probetas según ASTM C490 utilizando un calibre digital. Se realizaron las medidas sobre tres alturas diferentes y se obtuvo la media. El cambio de la longitud se calcula según la siguiente fórmula [6, 9]:

$$Cambio(\%) = \frac{(L_c - L_0)}{L_0} * 100 \quad (4)$$

donde:

- L_c (mm) Longitud en el ciclo c
- L_0 (mm) Longitud inicial en el ciclo 0

Pérdida de peso:

Se pesaron las probetas cuando estaban descongeladas, es decir en el ciclo del deshielo, utilizando una balanza con precisión de 0,1 gramo. La pérdida de peso se obtiene según la siguiente fórmula [9]:

$$Pérdida(\%) = \frac{(W_c - W_0)}{W_0} * 100 \quad (5)$$

donde:

- W_c Peso en el ciclo c .
- W_0 Peso inicial en ciclo 0.

La Figura 2 muestra las probetas H30/00/B y H30/0,05/B al finalizar el ensayo de hielo-deshielo, observándose claramente el deterioro de alguna de ellas.



Figura 2: Probetas H30/00/B y H30/0,05/B al finalizar el ensayo de hielo-deshielo

3. RESULTADOS

La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos mecánicos de las probetas antes y después de los ciclos hielo/deshielo.

Tabla 2 Resultados de los ensayos mecánicos

Tipo de Hormigón	Resistencia Compresión	Módulo Elasticidad	R. Tracción
	(MPa)	(GPa)	(MPa)
(1) H30-00-B (Antes)	34,35	31,86	3,91
(Después)	21,43	20,85	3,24
(2) H30-0,05-B (Antes)	30,86	28,44	3,01
(Después)	36,96	29,68	3,43
(3) H30-00-M (Antes)	40,84	31,75	3,54
(Después)	30,01	26,18	3,42
(4) H30-0,05-M (Antes)	27,91	29,95	2,74
(Después)	31,28	32,53	3,52
(5) H45-00-B (Antes)	59,13	37,25	4,29
(Después)	50,63	37,70	4,93
(6) H45-0,05-B (Antes)	35,11	33,31	3,13
(Después)	39,38	32,18	4,44
(7) H45-00-M (Antes)	56,99	37,53	4,27
(Después)	63,39	40,68	4,61
(8) H45-0,05-M (Antes)	36,34	28,70	3,02
(Después)	40,64	33,16	4,25

Las probetas sin aireante muestran un deterioro de sus propiedades mecánicas tras el ensayo de hielo/deshielo en el hormigón H30, mientras no se observa esa tendencia en el H45. 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 (90 días aproximadamente) y a su mejor comportamiento frente al ataque del efecto hielo/deshielo.

El hecho de que la resistencia del hormigón se incremente con la hidratación del cemento, y que la velocidad de hidratación de éste aumente con la humedad [10], conduce a un incremento de las resistencias en los hormigones con curado seco frente al mismo hormigón con curado húmedo, como se observa en la Figura 3.

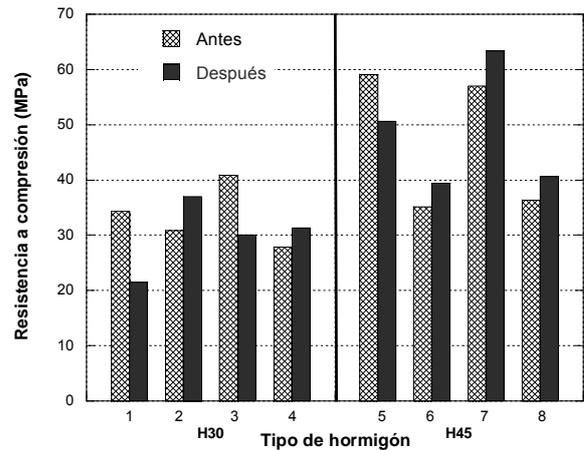


Figura 3: Resistencia a compresión de los hormigones H30 y H45 antes y después de los ciclos hielo-deshielo

Las Figuras 4a, 4b, 4c muestran los resultados del RDME, del cambio de longitud y de la pérdida de peso para todos los hormigones. Se observa que las curvas de cambio de longitud 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 apenas pérdida de peso, ni cambios en el RDME y ni en la longitud durante los ciclos H-D [11].

Si el hormigón no contiene suficiente aireante se generan fisuras en cada ciclo hielo-deshielo. Estas fisuras reducen la velocidad de las ondas ultrasónicas ya que necesitan un camino más largo cuando el hormigón está dañado y los ondas sufren una alta atenuación, puede que incluso no logren atravesar el hormigón [12], reduciendo por tanto el RDME.

La norma ASTM C666 no utiliza el cambio de peso como un criterio de fallo, pero la observación del cambio de peso durante el ensayo de H-D, indica el descascarillado del hormigón [9]. Se observa como el H30 sin aireante sufre al final de los ciclos la pérdida de masa.

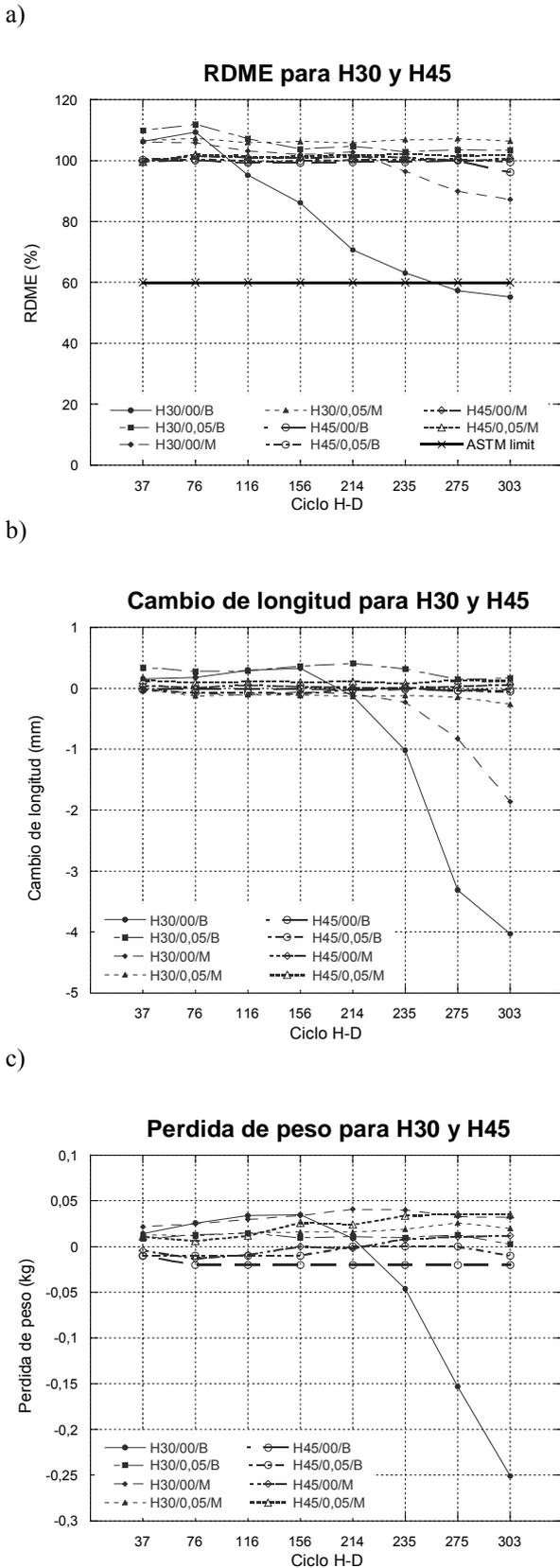


Figura 4: Medidas del deterioro de las amasadas sometidas a los ciclos hielo-deshielo: a) RDME; b) Cambio de longitud y c) Pérdida de peso, para H30 y H45

Se observa en estos resultados cómo el valor del RDME disminuye a partir del ciclo 76 para aquellas probetas que luego mostraron pérdida de peso.

La Figura 5 muestra los valores del factor de durabilidad al final del ensayo de H-D (después de 304 ciclos) para todos los hormigones. Se observa como la media de este factor para H30 es 96% y también se observa que el factor aumenta en torno al 20% para los hormigones con aireante. Mientras la media para el hormigón H45 es 102%, y no se aprecia diferencia entre los distintos tipos de hormigón.

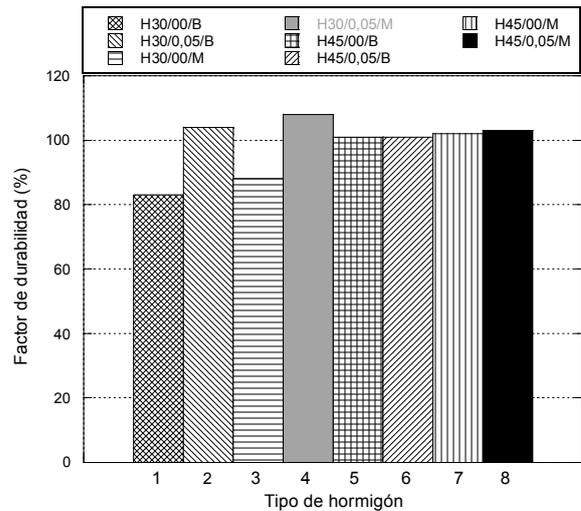


Figura 5: Factor de durabilidad después de 304 ciclos para todos los hormigones.

La Figura 6 muestra la medida no destructiva de la velocidad ultrasónica, que se realiza antes, durante y al finalizar los ciclos.



Figura 6: Medida de la velocidad ultrasónica.

4. CONCLUSIONES

1. Las medidas realizadas con los ultrasonidos (RDME) predicen adecuadamente el deterioro de las 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. La adición de aireante mejora la resistencia del hormigón a los ciclos hielo-deshielo, proporcionando espacio de expansión en la pasta de cemento para la congelación del agua. El aireante también modifica la zona de transición en todo el conjunto con el fin de permitir la expulsión del agua de los poros.
3. El hormigón H30, con las condiciones de curado impuestas (30°C y 37% HR) tiene un peor comportamiento que el H45 frente a los ciclos hielo-deshielo.
4. El curado húmedo no presentó mejor comportamiento que el curado seco frente a la resistencia a las heladas. En general, ambos curados permitieron que continuara la hidratación del hormigón y el fortalecimiento de la zona de transición entre el árido y la pasta de cemento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión del proyecto BIA2008-03523 y al Ministerio de Fomento del proyecto MFOM 01/07.

REFERENCIAS

- [1] Mather, B., "Concrete durability", *Cement and Concrete Composites* 26, 2004, pp. 3-4.
- [2] Penttala, V., "Surface and internal deterioration of concrete due to saline and non-saline freeze-thaw loads", *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 2006, pp.921-929.
- [3] Pigeon, M., Marchand, J., Pleau, R., "Frost resistant concrete", *Construction and Building Materials* 10 (5), 1996, pp. 339-348.
- [4] Erlin, B., Mather, "A new process by which cyclic freezing can damage concrete- the Erlin/Mather effect, a concept", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No.7, 2005, pp1407-1411.
- [5] UNE-CEN/TS12390-9 Ex, "Ensayos de hormigón anduracido", Parte 9: Resistencia al hielo-deshielo, Pérdida de masa superficial, Mayo 2008.
- [6] ASTM C666 / C666M - 03(2003). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.

- [7] Jize M., Koichi A., "Freeze-Thaw Resistance of Lightweight Concrete and Aggregate at Different Freezing rates", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 2008, pp.78-84.
- [8] Cánovas, M., Hormigón, Colegio de C, C y P., Madrid, 2007, pp.364-375.
- [9] Roxanne K., Mark S., Catherine E., "Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concrete", University of Minnesota, December 1998-2001.
- [10] Patricio C., Edgardo B., "Influencia del tipo de cemento en la resistencia mecánica de hormigones curados bajo distintas condiciones", www.lomanegra.com.ar/pdf/trabajos/T-19.pdf, 2007.
- [11] Remzi Ş., Mehmet T., Rüstem G., Cafer Ç., "Optimization Study and Damage Evaluation in Concrete Mixtures Exposed to Slow Freeze-Thaw Cycles", *Journal of Materials in Civil Engineering* ASCE, July 2007, pp 609-615.
- [12] Jussara T., Richard M., "Freeze-Thaw Resistance of Concrete with Marginal Air Content", FHWA Office of Infrastructure Research and Development, 2006.