

EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE CURADO DEL HORMIGÓN EN SU COMPORTAMIENTO FRENTE A LOS CICLOS HIELO-DESHELO

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

El objetivo de este trabajo es relacionar las condiciones de curado del hormigón y la adición de un inclusor de aire, con los daños producidos por los ciclos hielo-deshielo en hormigones curados con baja humedad y alta temperatura. Para ello se ha realizado una campaña experimental sobre probetas de hormigón curadas en condiciones extremas reales “in situ” de humedad y temperatura con y sin aire ocluido sometida a ciclo de hielo deshielo. El trabajo presenta la correlación de la evaluación del comportamiento mecánico del hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo frente al grado de hidratación del hormigón y el volumen y tamaños de los poros. De los resultados obtenidos se concluye que 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. Este comportamiento anómalo se explica porque el proceso de hidratación del cemento continúa durante los ensayos hielo-deshielo, cerrando la red porosa. Este aspecto se ha podido confirmar con los ensayos de ATD y TG realizados.

ABSTRACT

The main objective of this is to analyze the simultaneous potential damage of concrete specimens exposed to different curing conditions (high temperature and low relative humidity) and freeze-thaw cycles. This experimental campaign was realized on concrete specimen cured in real extreme conditions of humidity and temperature of 30°C and 37 % relative humidity, and with and without air-entraining admixtures subjected to freeze-thaw cycles. Concretes with characteristics strength of 30 y 45MPa, with and without air- entraining admixtures (AEA), were subjected to two different curing conditions: wet and air dried conditions. In addition to the freezing- thawing test, additional durability tests were performed including: mercury intrusion porosimetry, the differential thermal analysis (ATD), termogravimetric analysis (TG). From the obtained results, it can be concluded that the specimens without air-entraining experienced deterioration in their mechanical properties as a result of the freeze-thaw test. The inclusion of air benefited the behaviour of concrete against the freeze-thaw cycles, to the extent that some of the specimens experienced an improvement in their mechanical properties after the freeze-thaw testing. The pore volume and size seems to be higher in the specimens before exposure to the freeze-thaw cycles. These results are attributed to the fact that the hydration process of the cement continued during the freeze-thaw cycles.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, ciclos hielo-deshielo, hidratación, porosidad, curado.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón y los compuestos del cemento son materiales tolerantes y con una larga vida en servicio a temperatura ambiental extrema. Las temperaturas extremas en climas calientes y fríos no constituyen una amenaza, porque el hormigón seco tiene un coeficiente de expansión térmica suficientemente bajo y los

movimientos moderados pueden considerarse en el diseño.

Sin embargo, surgen problemas de durabilidad cuando el hormigón húmedo en climas fríos está expuesto a los ciclos repetidos de temperatura que causan el hielo y el deshielo del agua de los poros. La expansión del hormigón húmedo puede ser alta y las tensiones inducidas dentro del hormigón pueden ser inaceptables.

En estos casos las inadecuadas condiciones de curado determinan cambios en la microestructura del materia, principalmente en el grado de hidratación que se alcanza y este hecho lleva asociado cambios importantes en la estructura porosa con un debilitamiento importante de su función protectora frente a la entrada de agentes agresivos. Un buen curado permitiría conseguir una consistencia de fraguado tal que nos permita obtener un grado de dureza capaz de garantizar la máxima resistencia física y química en obra.

Entre los estudios sobre el efecto del curado a temperatura elevada en la resistencia al hielo-deshielo del hormigón, Klieger 1958 [1] demostró que la resistencia al hielo-deshielo del hormigón con aireante curado a temperatura elevada no disminuyó. En otro estudio Khurana & Torresan (1997) [2] obtuvieron que la resistencia al hielo-deshielo del hormigón sin aireante mejoró cuando la temperatura de curado pasaba de 20 a 60°C. También Jacobsen (1997) [3] obtuvo valores de la resistencia al descascarillamiento del hormigón sin aireante generalmente bajas cuando la temperatura de curado aumentó de 20 a 60°C. Jonsson & Olek (2004) [4] demostraron que la resistencia al hielo-deshielo de probetas de hormigón curadas hasta los 69°C se comportaron mejor que las curadas a 28°C.

El objetivo de este trabajo es relacionar las condiciones de curado del hormigón y la adición de un inclusor de aire, con los daños producidos por los ciclos hielo-deshielo en hormigones curados con baja humedad y alta temperatura. El trabajo presenta la correlación de la evaluación del comportamiento mecánico de hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo frente al grado de hidratación del hormigón. Para realizar este estudio se ha realizado una campaña experimental en la que se ha estudiado la porosimetría por intrusión de mercurio, el análisis térmico diferencial (ATD) y el análisis termogravimétrico (TG) a tres edades diferentes 28, 90 y 365 días, en hormigones con distintos curados y con y sin adición de aire.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1 Preparación de las probetas y curado

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. La relación agua/cemento fue 0,5 para en hormigón H30 y 0,4 para el hormigón H45. Las proporciones de la dosificación se recogen en la siguiente referencia de los autores [5].

Se realizaron dos variantes al tipo de curado en las probetas de hormigón curadas en condiciones extremas reales “in situ” de humedad y temperatura a 30°C de temperatura y a 37% de humedad relativa y con y sin

aire ocluido sometidas a ciclo de hielo deshielo. 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.

2.2 Tipos de Ensayos

Propiedades mecánicas:

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.

Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP):

En este trabajo se empleó un equipo de la casa Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que opera hasta una presión de 33,000 psi (228 MPa) cubriendo un rango de diámetro de poro desde 0,006 a 175 μm . La metodología empleada para los análisis es similar a las directrices de la norma ASTM D4404, que tiene como objetivo el análisis de rocas y suelos.

La obtención de la muestra siguió un proceso en el que se extrae un fragmento de hormigón del interior de la probeta, a 5 cm de los extremos para las muestras antes de los ciclos. Para las muestras después de la aplicación de los ciclos hielo-deshielo se consideró la media de los valores obtenidos en 4 puntos a distintas profundidades de la probeta en sentido radial. Mediante tenazas de corte se extrajeron los áridos gruesos más visibles y se separaron con aire a presión los restos de árido fino y polvo superficial que se desprende de la matriz. El resultado es una masa redondeada de “mortero” de aproximadamente entre 2 y 4 g.

La técnica de porosimetría por intrusión de mercurio ha sido desarrollada para determinar el volumen y distribución del tamaño del poro de sólidos en el rango de los macroporos. Esta técnica se basa en la propiedad del mercurio de ser líquido que no moja las superficies debido a la alta tensión superficial, el ángulo de contacto con la superficie sólida es mayor de 90°, por lo que requiere elevar la presión para forzarlo a entrar en los poros. La ecuación (1) que relaciona la presión ejercida por el sistema con el radio del poro penetrado, es según [Washburn, 1921], para poros cilíndricos:

$$p = \frac{-4\gamma \cos \theta}{d} \quad (1)$$

donde:

- γ Tensión superficial (N/nm);
- θ Ángulo de contacto;
- d Diámetro de poro (nm);
- p Presión necesaria para que el mercurio penetre en un poro de diámetro d (N/nm²).

ATD/TG:

La caracterización de los productos hidratados se llevó a cabo mediante la realización de análisis térmicos. El tipo de muestra que se emplea es en polvo, con un tamaño de partícula inferior a 0,2 mm. Se analizaron muestras en polvo procedente de secciones completas de muestra. Se llevó a cabo la interrupción del proceso de curado de las probetas a 28, 90 y 365 días, para todas las amasadas. La finalidad de este proceso era evaluar el estado de hidratación de cada una de las muestras a las distintas edades.

En el análisis térmico diferencial (ATD), la información viene dada por los cambios térmicos producidos en la muestra calentada paralelamente a una muestra inerte de referencia. La señal obtenida en un ATD muestra la diferencia de temperatura que se establece entre la muestra objeto de estudio y el material de referencia, cuando ambos se someten al mismo programa de calentamiento. Habitualmente se presentan los datos en forma de curvas, % incremento de masa frente a la temperatura o la derivada de ésta con la temperatura, frente a la temperatura.

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 cámara a 20°C de temperatura y 45-50% de humedad relativa. Los 300 ciclos hielo-deshielo de acuerdo con el diagrama temperatura/tiempo de la Figura 1. Los detalles de este método se recogen en la siguiente referencia de los autores [5].

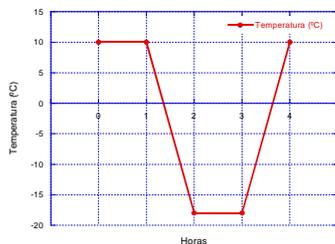


Figura 1. Esquema del ciclo hielo-deshielo.

3. RESULTADOS

La tabla 1 muestra los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y porosidad 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 en los hormigones H30, mientras no se observa esa tendencia tan clara 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.

Tabla 1. Resultados de los ensayos

Tipo de Hormigón	R. compresión	Porosidad de mercurio	Diámetro Crítico
	(Mpa)	(%)	(nm)
H30-00-B (Antes)	34.35	11,94	50,3635
H30-00-B (Después)	21.43	12,19	40,2834
H30-0,05-B (Antes)	30.86	15,98	62,5151
H30-0,05-B (Después)	36.96	14,33	40,2850
H30-00-M (Antes)	40.84	12,91	40,2908
H30-00-M (Después)	30.01	11,62	40,2821
H30-0,05-M (Antes)	27.91	16,24	40,2951
H30-0,05-M (Después)	31.28	14,97	40,2851
H45-00-B (Antes)	59.13	13,18	32,3730
H45-00-B (Después)	50.63	11,51	32,3710
H45-0,05-B (Antes)	35.11	19,23	40,2796
H45-0,05-B (Después)	39.38	19,00	40,2830
H45-00-M (Antes)	56.99	12,16	62,5305
H45-00-M (Después)	63.39	9,65	32,3770
H45-0,05-M (Antes)	36.34	18,31	62,5212
H45-0,05-M (Después)	40.64	15,30	40,2809

Con respecto a la porosidad, parecen detectarse en casi todos los casos, valores más bajos después de los ciclos hielo-deshielo que antes de los ciclos, sin que se vea una influencia notable de la incorporación del aireante. En casi todos los casos los curados húmedos parecen tener una porosidad mayor después de los ciclos que los correspondientes secos, como se observa en la Figura 2.

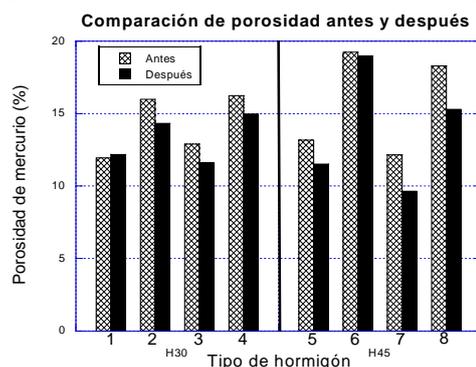


Figura 2. Comparación de la Porosimetría entre los ocho tipos de hormigón.

Con respecto al diámetro crítico que es el tamaño de poro interconectado que más se repite de forma continua, y se corresponde con la pendiente máxima de la curva de porosidad acumulada, parece ser mayor con el curado seco especialmente con el hormigón H45, como se muestra en la Figura 3, tendiendo a igualarse estos valores después de los ensayos hielo/deshielo.

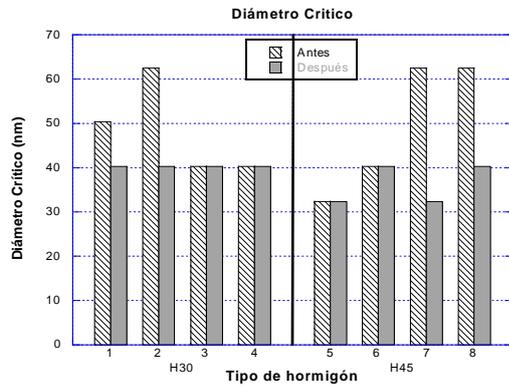


Figura 3. Comparación del diámetro crítico entre los ocho tipos de hormigón.

Si el proceso de deterioro causado por la exposición a los ciclos hielo-deshielo fuera la única razón de las variaciones microestructurales, la distribución de tamaño de poro observado después de los ciclos cambiaría de modo que el pico que representa la variedad dominante de los poros, en la curva de distribución diferencial, debería desplazarse hacia los diámetros más grandes. Se observa en las Figuras 4 a 11 para el hormigón H45 y H30 que este pico no se mueve en alguno de los casos y se desplaza hacia la izquierda (poros más pequeños) en los hormigones H30 curado húmedo y H45 curado seco, mostrándose un aumento significativo de pequeños poros después de los ciclos hielo-deshielo. Esto puede deberse a que se detuvo el proceso de hidratación, y al suministrar agua a la muestra durante los ciclos hielo-deshielo, se reanudó. Esto significaría que el contenido inicial de agua del hormigón no era suficiente para evitar el efecto de auto-dsecación, y el proceso de rehidratación en algunas muestras ha sido relevante.

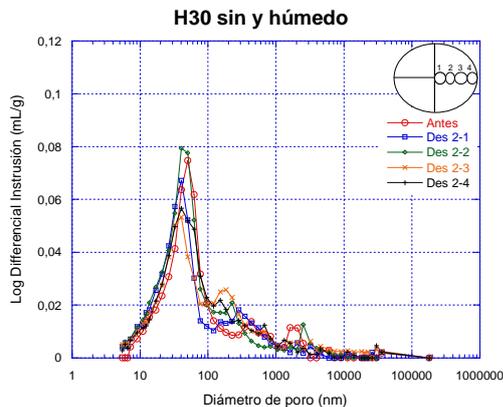


Figura 4. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H30 sin aireante curado húmedo antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

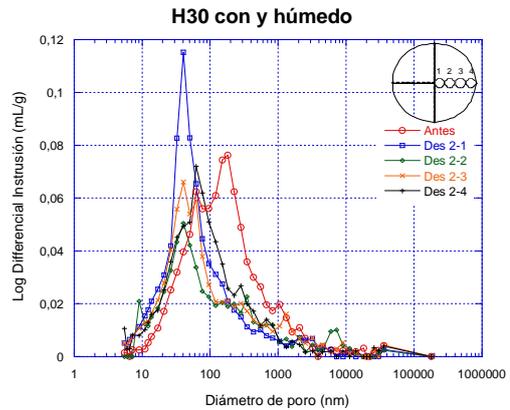


Figura 5. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H30 con aireante curado húmedo antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

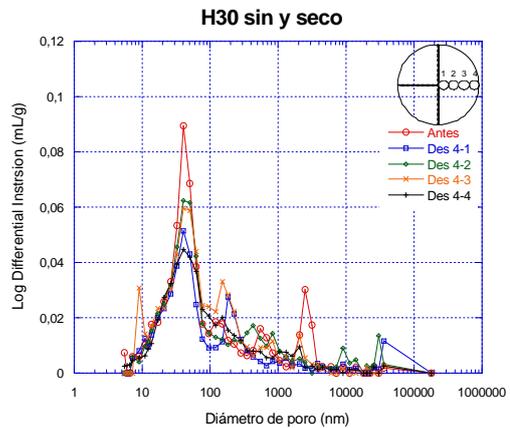


Figura 6. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H30 sin aireante curado seco antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

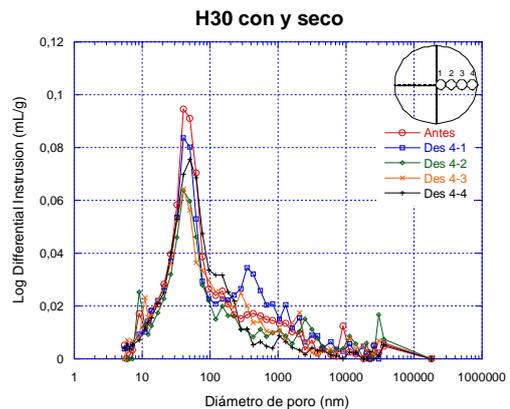


Figura 7. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H30 con aireante curado seco antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

Y también se observa a través la Tabla 1 que el volumen total de poros antes de los ciclos es mayor en todos los hormigones, mostrando valores más altos los

que contienen aireante. También se observan valores más altos para el hormigón H45

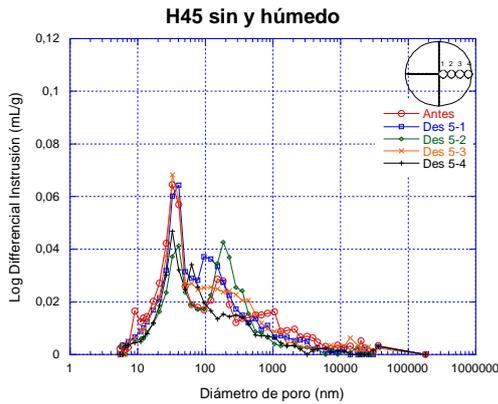


Figura 8. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H45 sin aireante curado húmedo antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

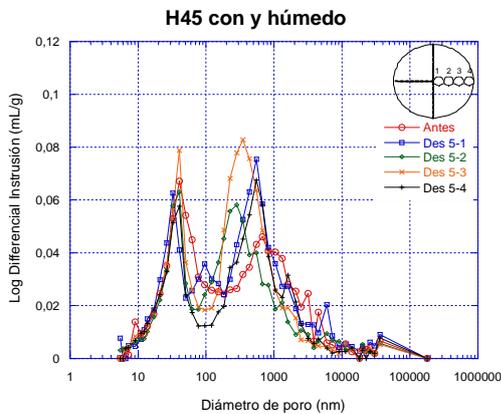


Figura 9. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H45 con aireante curado húmedo antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

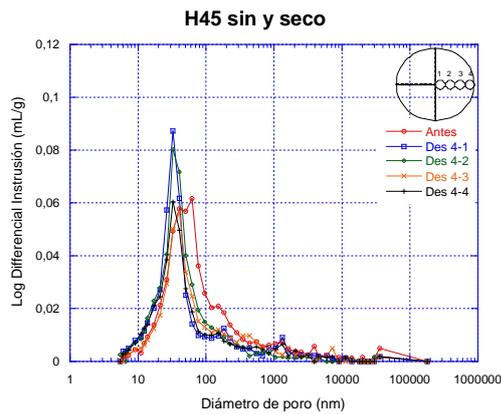


Figura 10. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H45 sin aireante curado seco antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

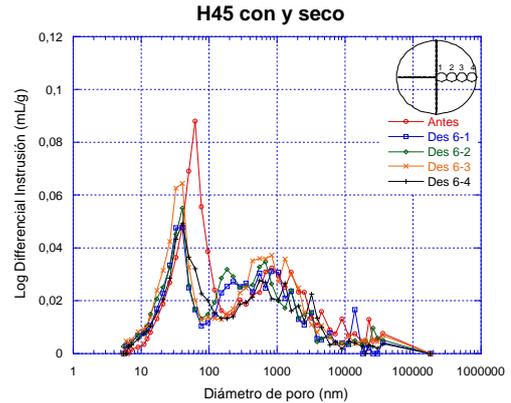
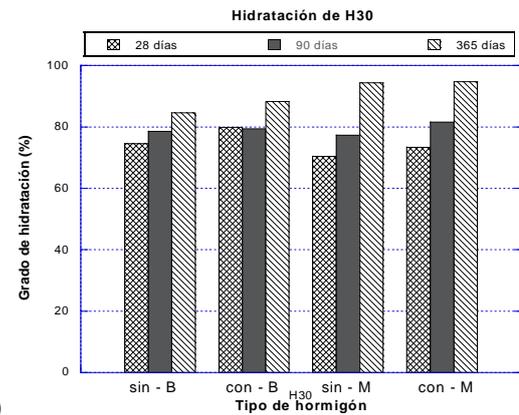
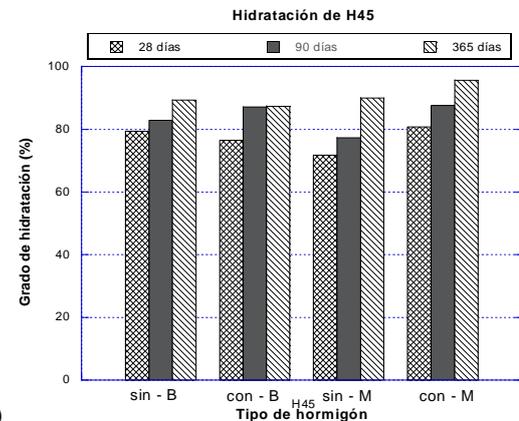


Figura 11. Logaritmo de la intrusión diferencial del hormigón H45 con aireante curado seco antes y después del ensayo de hielo-deshielo.

El grado de hidratación influye en la resistencia a la helada del hormigón, ya que un alto grado de hidratación reduce la porosidad capilar de la pasta de cemento y por tanto la cantidad de agua susceptible de congelación. Además, aumenta la resistencia de la pasta de cemento y por consiguiente, aumenta su resistencia contra la presión hidráulica provocada por la congelación del agua.



(a)



(b)

Figura 12. Grado de hidratación para los cuatro tipos de hormigón H30 a) para los cuatro tipos de hormigón H45 b)

En la Figura 12 (a y b) se han representado el grado de hidratación del hormigón a las edades de 28, 90 y 365. Se observa como todos los hormigones aumentan su grado de hidratación a los 365 días. El grado de hidratación que alcanza el hormigón H45 es mayor que el del H30, ya que tiene algo más de cemento 400 kg/m^3 , frente a 380 kg/m^3 del H45.

También se observa, a 28 días, en todos los hormigones con curado seco, un grado de hidratación más bajo que en los hormigones con curado húmedo, como cabría de esperar, siendo esta diferencia más acusada en el hormigón H45. A la vista de estos resultados se puede concluir que los hormigones de curado húmedo tienen una velocidad de hidratación más rápida que los de curado seco. Los hormigones de curado seco retrasan la hidratación, dejando más grano accesible a la humedad exterior, con lo que mejoran sus propiedades para resistir los ciclos de hielo/deshielo, este dato concuerda con el mayor porcentaje de poros determinado en los hormigones con curado seco, sobre todo para el H30. A 90 días se mantiene esa tendencia con diferencias menos acusadas para todos los hormigones. A los 365 días, tiempo en que las probetas han seguido en la cámara de curado, en las probetas curadas en las condiciones más extremas, todos los hormigones alcanzan grados de hidratación más altos que en las que recibieron los riegos la primera semana de curados.

3. CONCLUSIONES

1. Las probetas sin aireante muestran de forma bastante generalizada un deterioro de sus propiedades mecánicas tras el ensayo de ciclos hielo-deshielo. Las probetas con adición de aireante se comportan mejor frente a los ciclos hielo-deshielo que las que carecen de aireante.
2. Las propiedades de durabilidad del hormigón sometido a los ciclos hielo-deshielo están muy relacionadas con su estructura porosa. El volumen, el radio y la distribución del tamaño de poros deciden el punto de congelación de la solución del poro y la cantidad de hielo formado en los poros. 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. El grado de hidratación alcanzado en las probetas al inicio del ensayo hielo/deshielo es entorno a un 10% más bajo en las de curado húmedo y un 24% también más bajo para las de curado seco, concuerda con los resultados obtenidos en los resultados del volumen y tamaño de poros mayor antes de los ciclos hielo/deshielo que después. Al finalizar los ciclos se completa la hidratación del cemento, insuficientemente desarrollada al principio por la baja humedad y la alta temperatura de curado.
4. 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 durante los ciclos hielo-deshielo. Con riegos se hidrata más el exterior de las probetas, alcanzando una estructura porosa externa más cerrada. Por el contrario sin riegos la estructura porosa externa es más abierta permitiendo mayor accesibilidad entre los poros conectados, lo que beneficia el comportamiento al hielo-deshielo.
5. El tipo de curado con o sin riegos diarios durante la primera semana, para las condiciones ambientales impuestas de humedad (37%) y temperatura (30°C) y para un hormigón con una relación a/c de 0,5, no parece tan relevante frente al deterioro por los ciclos hielo-deshielo, que el resto de las variables estudiadas. Parece detectarse incluso, y en algunos casos, un mejor comportamiento del curado seco.

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] Klieger P., "Effect of mixing and curing temperatures on concrete strength", *J. Amer. Conc. Inst.*, 29, 12, 1063–1081, 1958.
- [2] Khurana & Torresan, "New Admixtures for Eliminating Steam Curing and its Negative Effects on Durability", ACI SP-173, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, pp.83-103, 1997.
- [3] S. Jacobsen, D.H. Saether, E.J. Sellevold, "Frost testing of high strength concrete: frost/salt scaling at different cooling rates", *Materials & Structures*, Vol.30, pp.33-42, 1997.
- [4] J.A. Jonsson & J. Olek, "Effect of Temperature-Match-Curing on Freeze-Thaw and Scaling Resistance of High-Strength Concrete", *Cement, Concrete and Aggregates*, ASTM International, Vol.26, No.1, pp.21-25, 2004.
- [5] Al-Assadi, G., Casati, M.J., Fernández, J., Gálvez, J.C., "Evaluación del deterioro del hormigón sometido a ciclos Hielo-Deshielo", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26 (2), 2009, pp. 472-477
- [6] [ASTM 666, 2003], ASTM C666/C666M-03, *Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing*, American Society for Testing and Materials.