

ESTUDIO NUMERICO Y EXPERIMENTAL DE SECADO Y RETRACCION DE PROBETAS DE HORMIGON

Mario Guilleron^{*}, Martín Guilleron^{*},
Pablo Sanchez^{*†}, Victorio Sonzogni^{*†}

^{*} GIMNI

Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería
Universidad Tecnológica Nacional, F.R Santa Fe.
Lavaise 610, 3000 Santa Fe.
mguilleron@latinmail.com , cfregue@frsf.utn.edu.ar ,
mguilleron@hotmail.com

[†]CIMEC-INTEC, UNL, CONICET

Guemes 3450 3000 Santa Fe
psanchez@intec.unl.edu.ar , sonzogni@intec.unl.edu.ar

Palabras claves: retracción por secado, hormigón, fisuración.

Resumen. *En este trabajo se realiza un estudio numérico del problema de secado del hormigón y se validan los resultados obtenidos con ensayos realizados sobre probetas. El estudio numérico sigue los lineamientos de una comunicación presentada en el ENIEF 2004. En primer lugar se realiza el planteo teórico del problema de difusión del agua entre los poros del hormigón que se produce durante el secado. Este estudio conduce a un problema en derivadas parciales transitorio no lineal, el cual se resuelve discretizando espacialmente por elementos finitos y temporalmente con un esquema implícito, con un software propio especialmente desarrollado para tal propósito. La información obtenida del problema de difusión se traduce a una retracción volumétrica para cada instante considerado, a partir de relaciones empíricas entre humedad y deformación. Una última etapa del procedimiento corresponde al análisis estático lineal del cual se obtiene el estado tensional correspondiente. Se han implementado elementos en dos y tres dimensiones. Se comparan los resultados obtenidos con ensayos realizados para probetas de distintas formas y tamaños.*

1 INTRODUCCION

En este trabajo se realiza un estudio numérico del problema de secado del hormigón y se validan los resultados obtenidos con ensayos realizados sobre probetas. El estudio numérico sigue los lineamientos de un trabajo previo¹. Al secarse el hormigón luego de colado, se produce una retracción debido a la pérdida de agua que experimenta. La pérdida se produce por la superficie en contacto con aire más seco que la mezcla y depende de varios factores: climáticos, etarios, dimensionales y materiales.

En primer lugar se resume el planteo teórico del proceso de difusión del agua entre los poros del hormigón que se produce durante el secado y el problema transitorio de valores de contorno al que se arriba. Este es un problema transitorio, en derivadas parciales espaciales y temporales, común a otros problemas de campo escalar, tales como problemas de propagación del calor; problemas de flujos potenciales; etc. Se muestran, finalmente, ejemplos de aplicación del programa realizado, comparándose los resultados numéricos con valores experimentales.

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE SECADO

La formulación teórica del problema de secado del hormigón corresponde a la de problemas de difusión, en la que hay un transporte de masa a lo largo del medio considerado. El agua evaporable, del total de agua con que se construye la mezcla, ocupa inicialmente todos los poros de la masa del hormigón y se va perdiendo por evaporación desde la superficie. Las hipótesis usuales son que la velocidad de transporte de sustancias a través de una sección unitaria es proporcional al gradiente de la concentración de esa sustancia. En este caso la variable que mide la concentración de agua es el contenido de agua w (en kg/m³, por ejemplo) y el flujo de humedad q que pasa por unidad de área, en la unidad de tiempo, puede escribirse:

$$\bar{q} = -D_h \text{grad } h = -D_h \left(\frac{\partial h}{\partial x} \bar{e}_1 + \frac{\partial h}{\partial y} \bar{e}_2 + \frac{\partial h}{\partial z} \bar{e}_3 \right) = -D_h \nabla h \quad (1)$$

siendo \bar{e}_1 , \bar{e}_2 y \bar{e}_3 los versores unitarios en dirección de los ejes coordenados (x,y,z). La variable h es la humedad relativa de poros, el coeficiente D_h es la permeabilidad o difusividad de humedad relativa, y el signo negativo indica que el flujo se da en el sentido opuesto al gradiente, es decir desde allí donde la humedad es mayor hacia donde ésta es menor.

Teniendo en cuenta esta ecuación y la conservación de masa, se llega a la formulación del siguiente problema¹:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (D \nabla h) = \frac{\partial h}{\partial t} & \text{en } \Omega \quad \forall t \\ h|_{\Gamma_1} = \bar{h} & \text{en } \Gamma_1 \quad \forall t \\ -D_h \frac{\partial h}{\partial n}|_{\Gamma_2} = \bar{q}_n & \text{en } \Gamma_2 \quad \forall t \\ h|_{t=0} = h_0 & \text{en } \Omega \quad t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

La primera ecuación de (2) es la ecuación diferencial válida en todo el dominio Ω . La segunda es una condición de borde en la parte del contorno Γ_1 donde hay humedades conocidas \bar{h} . La tercera es una condición de flujo normal a la superficie en la parte del contorno Γ_2 , donde \bar{q}_n es el valor conocido del flujo.

Generalmente la humedad en el contorno Γ_1 no es conocida, sino en su lugar la humedad ambiente h_a . En estos casos la condición de contorno se expresa como una de tipo convectivo:

$$-D_h \frac{\partial h}{\partial n}|_{\Gamma_1} = H_F (h_r - h_a) \quad \text{en } \Gamma_1 \quad \forall t \quad (3)$$

donde H_F es el coeficiente de transferencia higríca de superficie, o coeficiente de película. h_r es la humedad relativa en la superficie y h_a la humedad relativa del ambiente.

La cuarta ecuación de (2) es la condición inicial, necesaria para integrar en el tiempo la ecuación diferencial.

2.1 Relación entre el contenido de agua y la humedad relativa

La relación entre w y h , para una temperatura constante y un determinado grado de hidratación de la mezcla puede ser expresada por las isotermas de adsorción o desorción.

El agua adsorbida en los poros, o liberada, durante el secado puede relacionarse con el tenor de humedad relativa y depende de la conformación de estos poros que está influenciada por diversos factores, entre ellos: la relación agua/cemento; el tipo de cemento; el tiempo de curado; la temperatura y método de curado; los ingredientes eventualmente agregados a la mezcla; las relaciones de agregado grueso/cemento; etc. También es importante la edad del hormigón cuando comienza el secado.

En la figura 1 se muestran curvas obtenidas por Hundt y Kantelberg³ para diferentes relaciones agua/cemento.

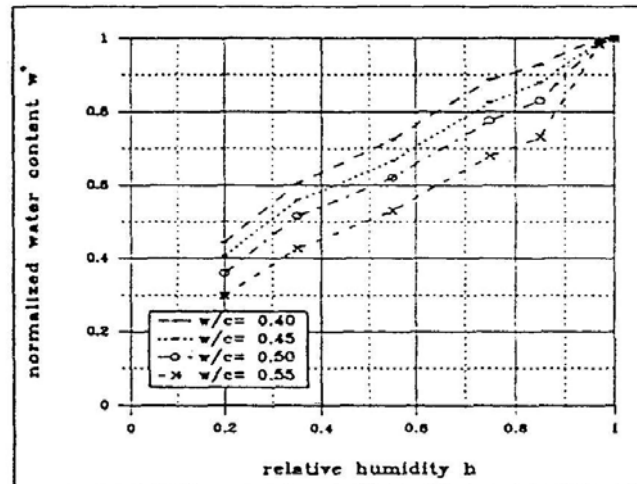


Figura 1. Isotermas de "desorción" para pastas de cemento endurecidas con diferentes relaciones agua/cemento³

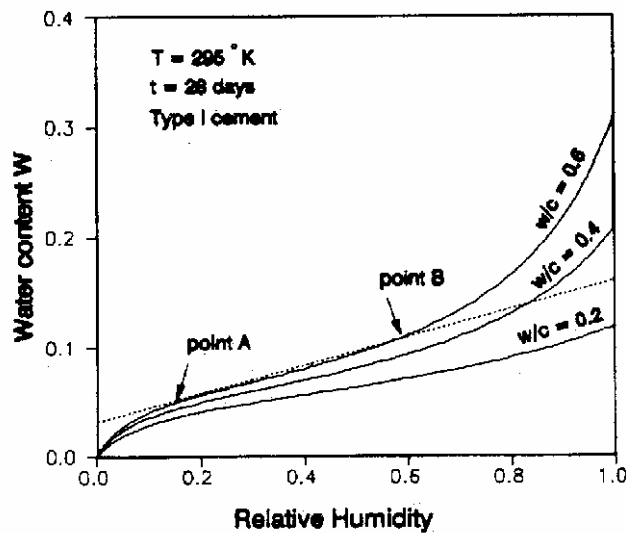


Figura 2. Isotermas de adsorción/desorción²

Xi, Bazant y Jennings² proponen un modelo para estas curvas en morteros de cemento Portland (figura 2):

$$w = \frac{VCkh}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad (4)$$

donde V es un coeficiente que mide la capacidad monocapa de adsorción y depende de la relación agua cemento (w/c), de la edad (t) y del tipo de cemento; C depende de la temperatura de curado (T); k un coeficiente que tiene en cuenta el número de capas adsorbidas y depende también de t, w/c y el tipo de cemento

En algunos casos se utiliza una aproximación a esta curva en la región de interés práctico. Así una curva que acompaña el secado desde $h=1$ hasta $h=0.5$ aproximadamente es⁷

$$h(w) = 1 - 0.5 \left(\frac{w - w_0}{w_0 - w_{eq}} \right)^2 \quad (5)$$

donde w_0 es el contenido de agua correspondiente al estado saturado y w_{eq} el que corresponde a $h=0.5$.

2.2 Capacidad Hígrica

La capacidad hígrica es la pendiente de la curva $w-h$. Si se utiliza la ecuación de Xi, Bazant y Jennings para esta curva, la derivada es:

$$\kappa = \frac{\partial w}{\partial h} = \frac{VCk + wk[1 + (C - 1)kh] - wk(1 - kh)(C - 1)}{(1 - kh)[1 + (C - 1)kh]} \quad (6)$$

y está graficada en la figura 3.

Una aproximación que se realiza en el presente trabajo, siguiendo lo realizado por otros autores^{5,7,8,9} es que si bien κ varía con la humedad, para el rango de humedades en estudio puede tomarse aproximadamente constante. Esta hipótesis, que simplifica el tramiento numérico, ha mostrado conducir a resultados aceptables.

2.3 Difusividad

La difusividad D_h depende de los diversos mecanismos de difusión que a su vez están influenciados por la estructura de poros. Hay tres mecanismos de difusión: molecular; de Knudsen y superficial. La difusión molecular es la que se produce en los macroporos y en este

caso la resistencia al paso de agua está dada por la adsorción de moléculas sobre las paredes, en caso de baja humedad relativa; o por la condensación/evaporación en los meniscos capilares, cuando la humedad es elevada. La difusión de Knudsen se da en los microporos y la principal fuente de resistencia al paso del agua es la colisión entre moléculas y con las paredes. Finalmente la difusión superficial es la que se produce entre moléculas adsorbidas que sin despegarse de las paredes van “saltando” unas sobre otras.

Xi et al.⁶ proporcionan una expresión empírica para la difusividad que engloba todos los mecanismos indicados (figura 4):

$$D_h = \alpha_h + \beta_h \left[1 - 2^{-10^{\gamma_h(h-1)}} \right] \quad (7)$$

Los coeficientes α_h , β_h y γ_h son calibrados empíricamente y resultan ser función principalmente de la relación agua/cemento y no dependen mucho de los otros factores señalados (edad, temperatura, etc.).

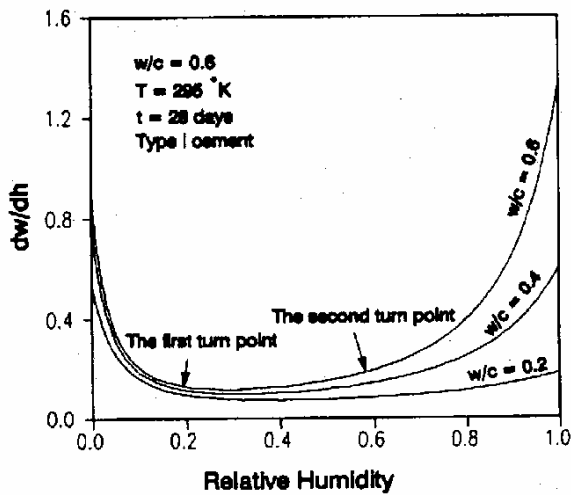


Figura 3. Variación de la capacidad hídrica con la humedad⁶

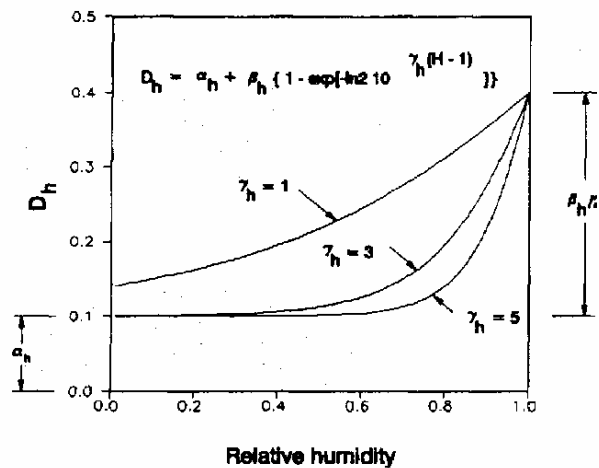


Figura 4. Variación de la difusividad con la humedad

Para una determinada mezcla de hormigón, la relación entre el coeficiente de difusión D_w y el contenido de agua w , determinada experimentalmente, por A. Alvaredo⁵ es:

$$D_w(w^*) = 0.24 \exp(4.9w^*) \quad (8)$$

donde w^* es el contenido de humedad referido al valor de saturación.

Combinando la expresión (8) con la relación w^*-h dada en figura 1, para la isoterma correspondiente a una relación agua cemento 0.55, se obtiene la relación $D-h$ graficada en la figura 5.

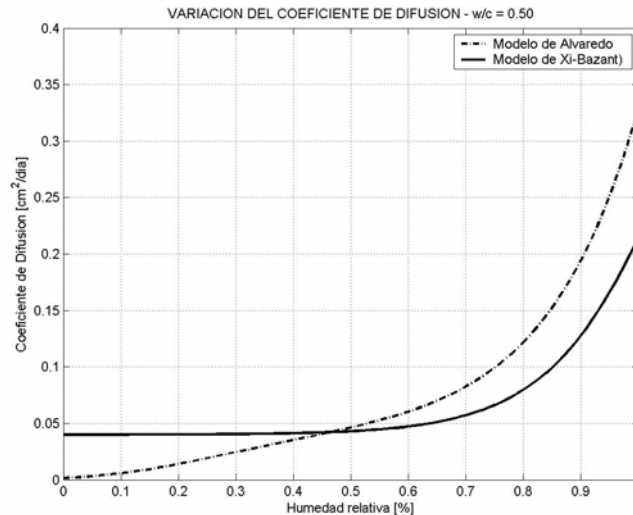


Figura 5. Relación $D-h$ entre el coeficiente de difusión y la humedad relativa, para una mezcla particular

En este caso particular, en que se ha supuesto capacidad hídrica constante, este modelo de Alvaredo resulta ser exponencial. También en esa figura 5 se grafica el modelo correspondiente a la ecuación (7) para el tipo de hormigón en estudio.

3 SOLUCIÓN NUMÉRICA

El problema, planteado en la ecuación (2) es transitorio y no lineal, debido a la fuerte dependencia del coeficiente D con la incógnita h y se resolvió por el método de los elementos finitos^{1,12}.

Una vez que el contenido de humedad, para un tiempo determinado, es conocido, puede evaluarse los cambios de volumen (retracción) debido a la pérdida de agua. Experimentos hechos por diversos autores muestran que la retracción puede verse como aproximadamente lineal en función de la humedad, para un rango de humedades $0.4 \leq h \leq 1$.

De esta manera se puede usar la expresión aproximada:

$$\Delta \varepsilon_s = \alpha_{sh} \Delta h \quad (9)$$

donde $\Delta \varepsilon_s$ es el cambio en la deformación específica debido al secado; Δh es el cambio

de humedad relativa; y α_{sh} , un coeficiente de retracción.

Determinando el coeficiente de retracción como

$$\alpha_{sh} = \frac{\Delta l|_{t \rightarrow \infty}}{l \Delta h} \quad (10)$$

a partir de resultados experimentales, en referencia 5 se indican valores entre 2×10^{-3} y 3.5×10^{-3} para α_{sh} .

A partir del mapa de valores de humedad se estimarán los valores de retracción con la ec. (9). El problema de elasticidad se resuelve por el procedimiento habitual de elementos finitos, con elementos triangulares y tetrahedros de interpolación lineal. Se impone el estado de deformación inicial correspondiente a la retracción.

4 EJEMPLOS

4.1 Secado de una probeta cilíndrica de hormigón

En este ejemplo se estudió un caso presentado en referencia 5. El mismo consiste en un cilindro de 74 mm de diámetro, con un hormigón con las siguientes características: relación agua/cemento: 0.55; contenido de cemento: 400 kg/m³; contenido de grava: 1180 kg/m³; contenido de arena: 500 kg/m³; relación agregado/cemento: 4.2; tamaño máximo del agregado: 32 mm; cantidad total de agregado por unidad de vol. de hormigón: 0.63; densidad saturada: 2.38 kg/dm³; densidad seca: 2.19 kg/dm³. El cilindro está sellado en sus extremos y se deja secar a una humedad ambiente $h=0.44$. El problema ha sido estudiado en dos dimensiones, representando una sección genérica del cilindro.

En la figura 6 se muestran los resultados de A.Alvaredo⁵, y en la figura 7 los resultados obtenidos con el código desarrollado en el presente trabajo. Se puede ver una buena concordancia.

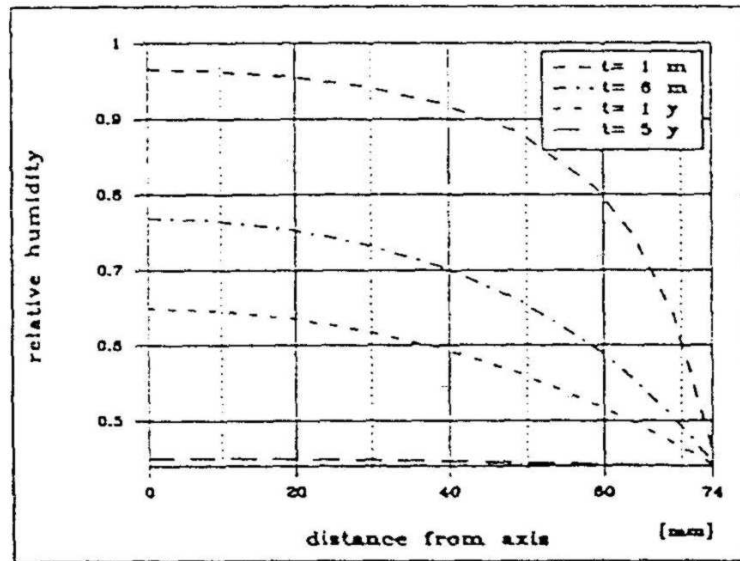


Figura 6. Curvas de variación de la humedad relativa con el radio del cilindro para un distintos tiempos de secado⁵.

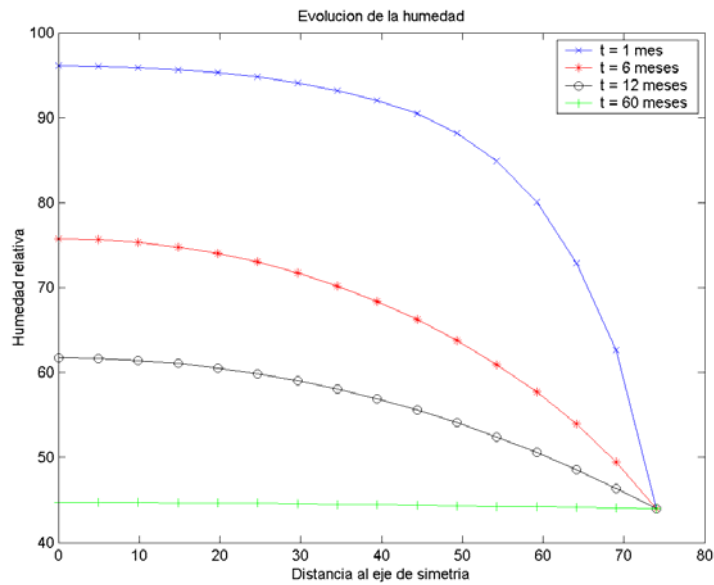


Figura 7. Resultados numéricos no lineales: variación de la humedad relativa con el radio del cilindro para un tiempo de secado de un mes.

4.2 Fisuración de probetas anulares

Se estudió el caso de probetas anulares. Estas son moldeadas alrededor de un núcleo de acero que restringe la contracción provocando el desarrollo de tensiones de tracción y posterior fisuración (figura 8). Estas probetas han sido ensayadas en la Facultad de Ingeniería de Olavarría (U.N.Centro) ^{10,11}. La relación agua/cemento es 0.45 y se encuentra inicialmente 100% de humedad relativa, imponiéndose una humedad relativa de 50%. El análisis se realizó para un tiempo de 120 días. El módulo de elasticidad es variable con la edad del hormigón.

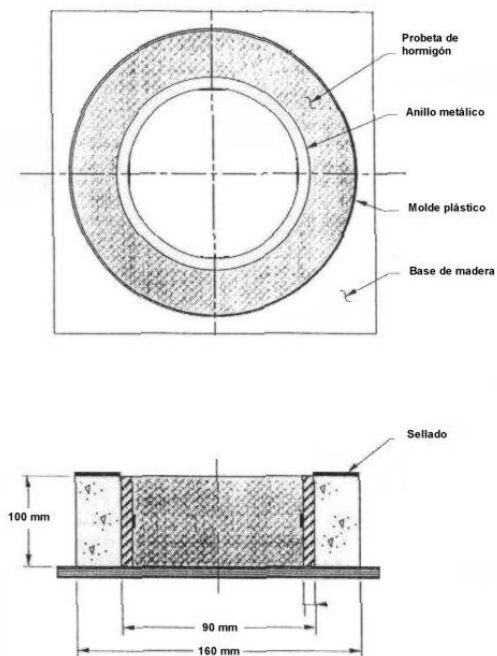


Figura 8. Probetas anulares de hormigón

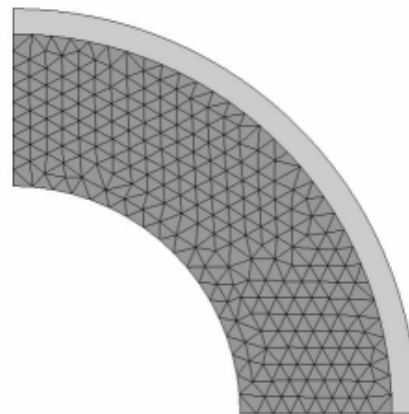


Figura 9. Probetas anulares de hormigón: deformada a los 120 días

En la figura 9 se muestra la deformada calculada a los 120 días y en la figura 10 los mapas de humedades a los 3 y 60 días. En la figura 11 se ha graficado la pérdida de peso de las probetas, contrastándola con resultados experimentales obtenidos por M.F. Carrasco ¹¹. Se observa una buena concordancia entre los resultados numéricos y experimentales.

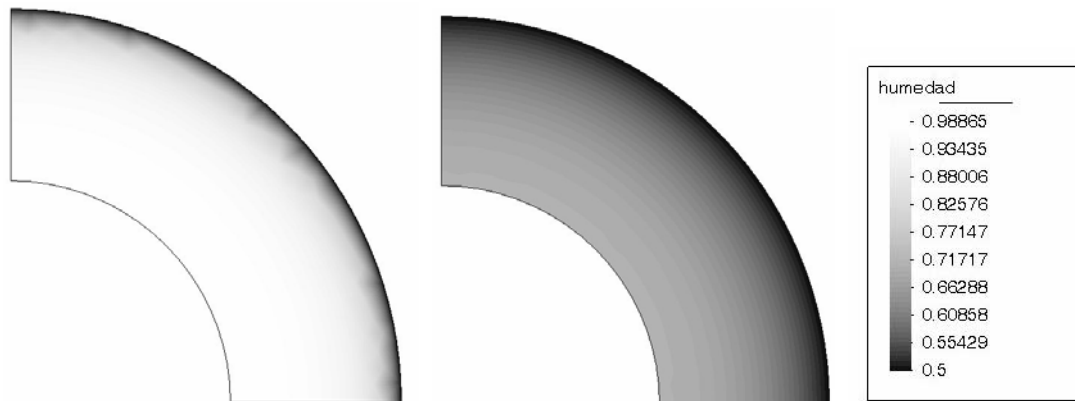


Figura 10. Probetas anulares de hormigón: mapa de humedad a los 3 días (izq.) y a los 60 días (der.)

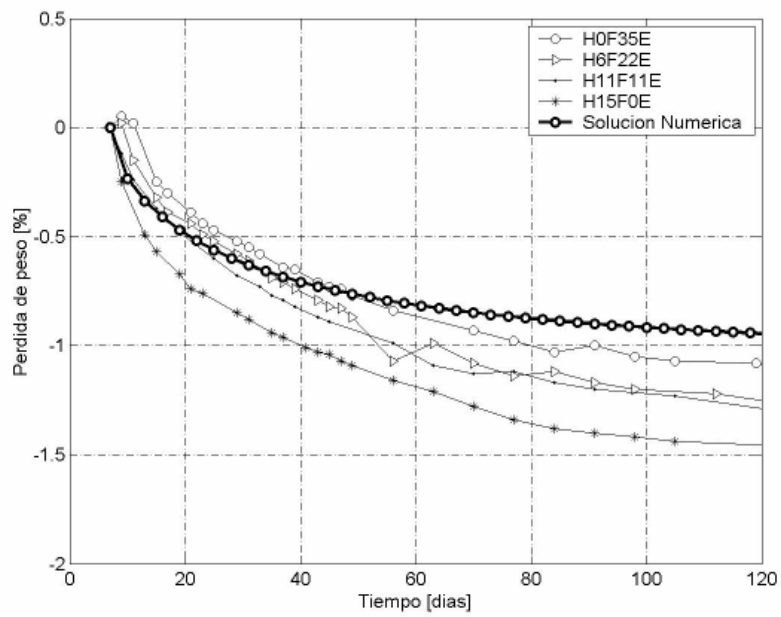


Figura 11. Probetas anulares de hormigón: Pérdida de peso por secado: resultados numéricos del presente trabajo y resultados experimentales ¹¹.

4.3 Contracción Por Secado En Probetas Prismáticas De Hormigón

El estudio se realizó sobre probetas prismáticas de 100 x 100 x 400 mm. Los ensayos experimentales llevados a cabo por M.F. Carrasco¹¹ se efectuaron mediante la siguiente modalidad:

Las probetas se mantuvieron en los moldes durante las primeras 24 horas posteriores al moldeo cubiertas con un film plástico. Luego se curaron hasta los 7 días en una solución de agua saturada con cal a 20 ± 2 °C. Una vez transcurrido este período, se estacionaron en una cámara seca cuyo ambiente se mantuvo a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa de 50 ± 5 %. De esta experiencia se obtuvieron datos referentes a la pérdida de agua y mediciones de contracciones volumétricas.

El análisis numérico se realizó mediante modelos 2D y 3D empleando mallas de elementos finitos de distinto tamaño característico (h_c) para cada uno de ellos, imponiendo en esta ocasión condiciones de contorno de tipo convectivo (Ec. 3) y de tipo Dirichlet (Ec. 2). Además en dicho estudio se compararon resultados con distintos modelos no lineales de difusividad (Xi, Bazant y Alvaredo). Los resultados obtenidos para las variantes enunciadas precedentemente, como así también la malla de elementos finitos y la geometría de las probetas se presentan a continuación. Las figuras 12 y 13 muestran mapas de humedades a los 60 días de secado, para distintos tamaños de elemento y para los modelos 2D y 3D. Dichos tamaños de elemento serán referenciados como *malla gruesa* y *malla fina*, en adelante.

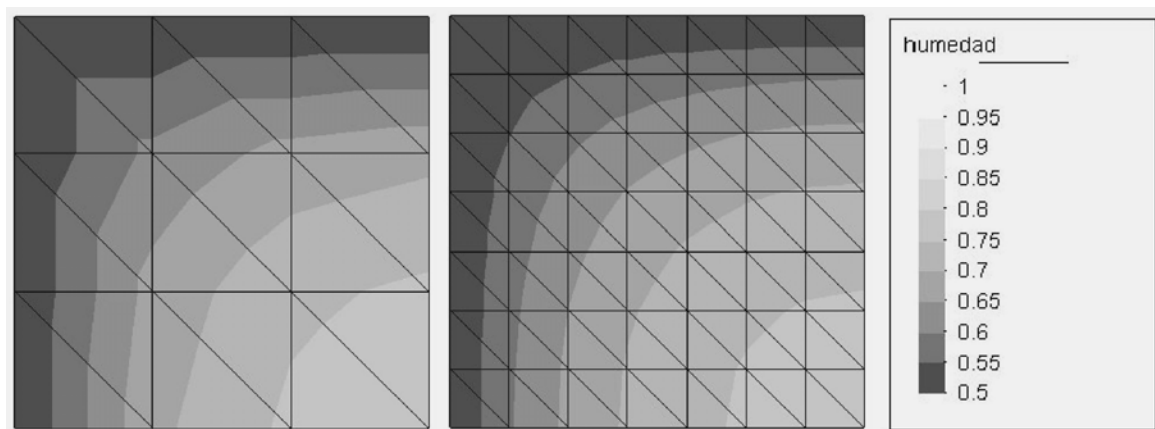


Figura 12. Probetas prismáticas de hormigón: Mapa de humedad a los 60 días. Modelo 2D

En la figura 14 se muestran resultados experimentales y numéricos de pérdida de agua de la probeta. Estos últimos obtenidos con el modelo $D-h$ tomado de Alvaredo, con la malla

gruesa de elementos 3D. Se comparan allí distintas condiciones de contorno. La curva rotulada *Cond. Humedad* corresponde a la imposición de condiciones de Dirichlet, en tanto que las otras, a condiciones de convección. En la figura 15 se muestran resultados numéricos con el modelo de Xi-Bazant, con la malla fina y condiciones de contorno de tipo Dirichlet. Se comparan allí resultados para los modelos 2D y 3D.

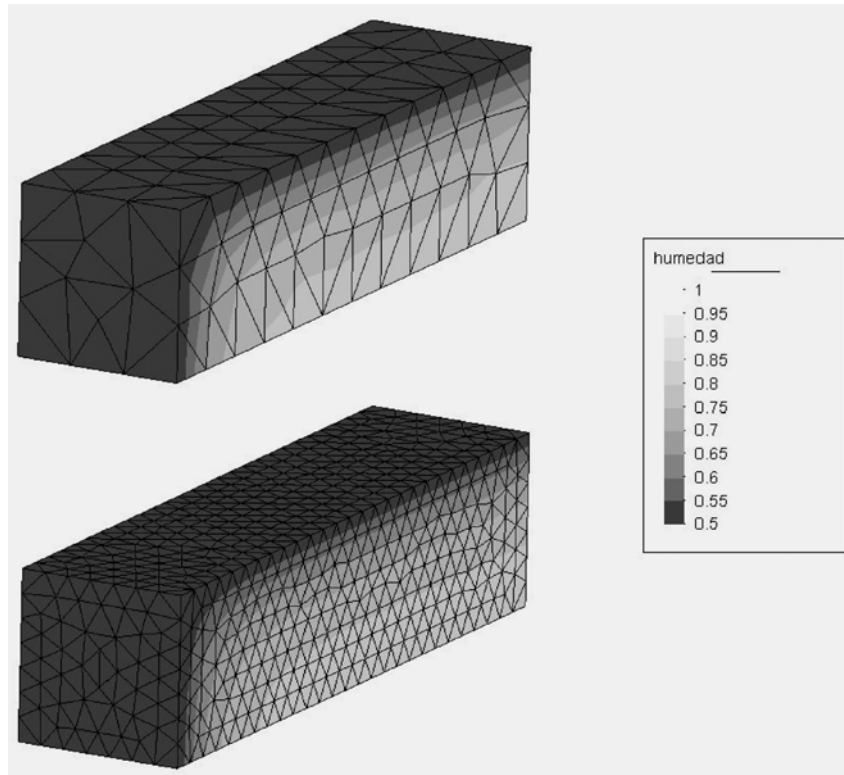


Figura 13. Probetas prismáticas de hormigón: Mapa de humedad a los 60 días. Modelo 3D

En la figura 16 se muestran en forma comparativa, los resultados para ambos modelos $D-h$ y para distintos tamaños de malla.

Finalmente, la figura 17 contiene resultados de contracción de las probetas. Allí están tanto los resultados numéricos como la envolvente de las mediciones experimentales.

5 CONCLUSIONES

Se ha elaborado un programa de elementos finitos para analizar el problema transitorio no lineal de secado del hormigón, acoplado a un estudio de deformaciones y tensiones elásticas. En este trabajo se muestran algunos resultados y se comparan con mediciones experimentales.

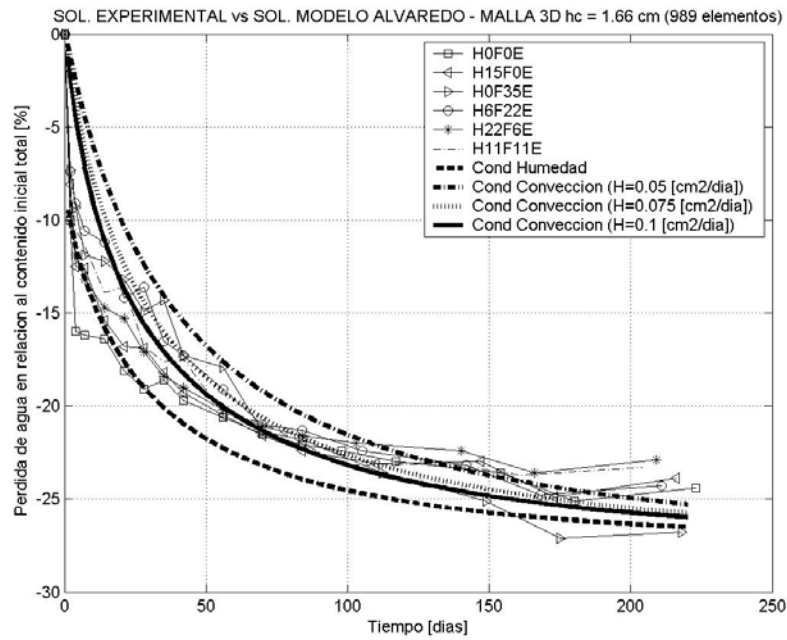


Figura 14. Resultados de pérdida de agua experimentales y numéricos, con el modelo de Alvaredo, para distintas condiciones de contorno.

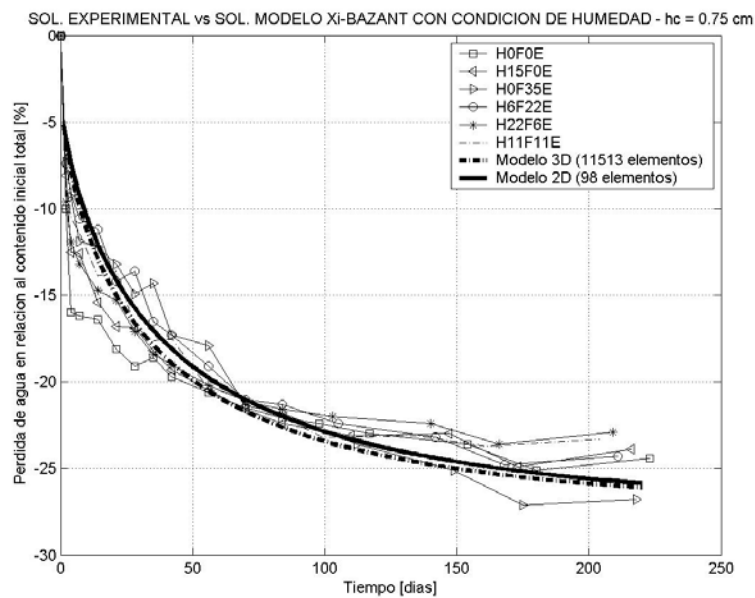


Figura 15. Resultados de pérdida de agua experimentales y numéricos, con el modelo de Xi-Bazant, para modelos 2D y 3D.

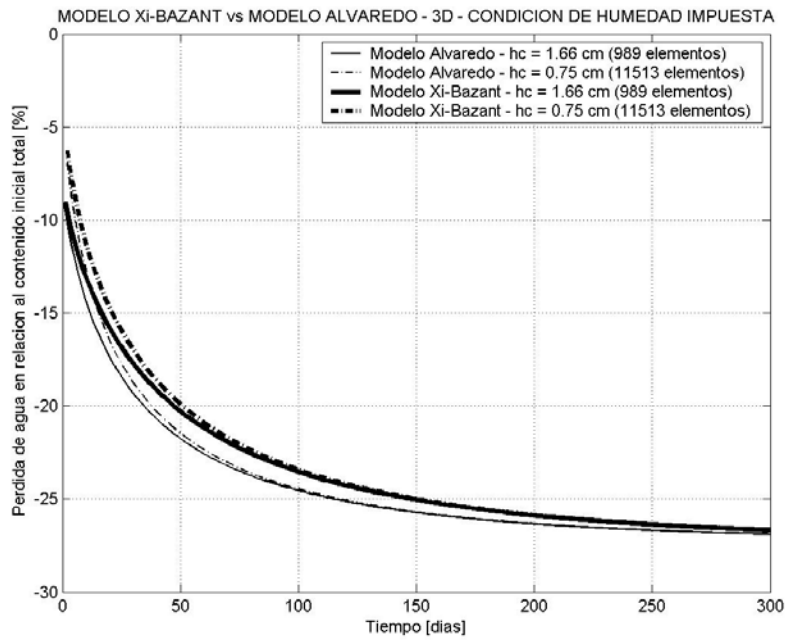


Figura 16. Resultados de pérdida de agua: comparación de distintos modelos y mallas.

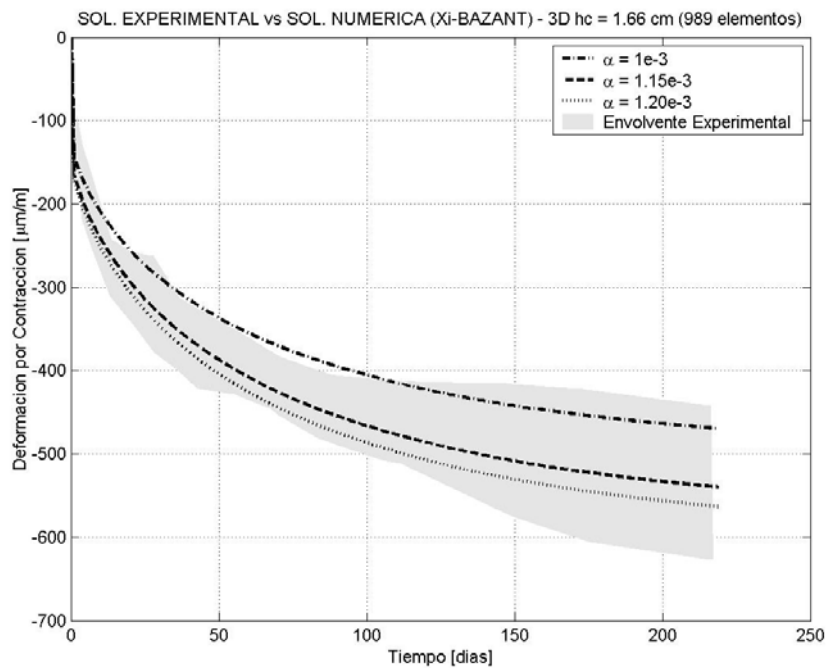


Figura 17. Resultados de deformación por contracción de la probeta. Comparación de resultados experimentales y numéricos.

De los resultados obtenidos se observa que no existen diferencias sustanciales en los valores del mapa de humedad en los dos modelos reproducidos (2D y 3D), cabe destacar que la discretización se hizo con elementos de distinto tamaño característico ($h_c = 0.75$ y $h_c = 1.66$) para ambos casos.

Con respecto a los resultados calculados con el modelo de Alvaredo⁵ puede notarse que los valores que más se aproximaron a los experimentales fueron obtenidos utilizando como condición de contorno la de tipo convectivo, tomando para el análisis distintos valores para el coeficiente de convección.

En cuanto al modelo de Xi-Bazant⁶ se puede decir que no se observan diferencias significativas en cuanto a los resultados obtenidos mediante los modelos realizados en 2D y 3D.

De la comparación de los modelos de difusividad se verifica que el que más se acerca a los resultados experimentales es el de Xi-Bazant, ya que las pérdidas de agua en relación al contenido inicial son menores a las calculadas con el de Alvaredo, esto se debe a que el coeficiente de difusión toma valores menores para el de Xi-Bazant en el rango de humedades relativas de estudio (50% a 100%) y para una relación agua-cemento de 0.50 como muestra la figura 5.

En la figura 17 se exponen los resultados logrados respecto a la contracción volumétrica originada por la pérdida de agua en la probeta mencionada anteriormente, dichos valores fueron obtenidos mediante la utilización del modelo difusivo de Xi-Bazant para geometría en 3D y empleando distintos valores para el coeficiente de retracción (α_{sh}).

Si bien se observa que los resultados del estudio numérico varían de acuerdo al tipo de geometría, modelo de difusividad y condiciones de contorno utilizadas, en todos los casos se puede decir que éstos tienen una buena concordancia con los experimentales.

6 REFERENCIAS

- [1] Guilleron M., Guilleron M., Sanchez P., Sonzogni V., “Análisis numérico de las tensiones producidas por el secado del hormigón”, Anales del ENIEF 2004, Bariloche, 8-11 noviembre, (2004).
- [2] Xi, Y., Bazant, Z.P. and Jennings, H.M., “Moisture diffusion in cementitious materials – adsorption isotherms”, Advanced Cemented Based Materials, No. 1, pp. 248-257 (1994).
- [3] Hundt, J. und Kantelberg, H., “Sorptionsuntersuchungen am Zementstein, Zementmörtel und Beton” (1978).
- [4] Bazant, Z.P. and Baweja S., “Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures”, Materials and Structures, V. 28, pp. 357-365 (1995).

- [5] Alvaredo, A.M., “Drying shrinkage and crack formation”, Building Material Reports, No.5, Aedificatio Publishers, December 1994.(1994).
- [6] Xi, Y., Bazant, Z.P. and Jennings, H.M., “Moisture diffusion in cementitious materials – moisture capacity and diffusivity”, Advanced Cemented Based Materials, No. 1, pp. 258-266 (1994).
- [7] Torrenti, J.M., Granger, L., Diruy, M. and Genin, P., “Modeling concrete shrinkage under variable ambient conditions”, ACI Materials Journal, Vol. 96 (1999).
- [8] Granger, L. “Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires: analyse et modélisation, ENPC thesis, Paris, (1994).
- [9] Roncero, J. Gettu, R. Y Carol, I. “Effect of superplasticizers on the shrinkage weight loss of cement mortars subjected to drying”, Creep Shrinkage of Concrete Structures, CONCREEP 6, pp. 101-107, Editado por F.-J. Ulm, Z.P. Bazant and F.H. Wittman.
- [10] Carrasco,M.F., Bonavetti, V.L., Irassar, E.F., “Retracción por secado en morteros de cemento con filler calcáreo y escoria granulada de alto horno”, Revista de Materiales de Construcción, Vol. 53, Nro. 271, Inst. Ciencias de la Construcción E. Torroja, Madrid España, (2003).
- [11] Irassar, E.F., Bonavetti, V.L., Carrasco,M.F., “Contracción por secado de hormigones elaborados con cementos binarios y ternarios”, Actas de la 15ª Reunión Técnica de la AATH, Santa Fe, 21-24 octubre, (2003).
- [12] Sonzogni V., Sanchez P., Guilleron M., Regue C., Guilleron M., “Fisuración de piezas premoldeadas de hormigón”, Anales de la Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, B.Aires, 15-17 setiembre, (2004).