

## ANÁLISIS MESOESTRUCTURAL DEL ACOPLAMIENTO HIGRO-MECÁNICO EN EL ESTUDIO DE LA RETRACCIÓN POR SECADO DEL HORMIGÓN

Andrés E. Idiart, Carlos M. López, Ignacio Carol

Escuela de Ingeniería Civil (ETSECCPB) -Universidad Politécnica de Cataluña (UPC),  
C/ Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Módulo D2, CP 08034, Barcelona, España.

<http://www-camins.upc.es/ccT>

e\_mail: [andres.idiart@upc.edu](mailto:andres.idiart@upc.edu), [carlos.maria.lopez@upc.edu](mailto:carlos.maria.lopez@upc.edu), [ignacio.carol@upc.edu](mailto:ignacio.carol@upc.edu)

**Palabras Clave:** Retracción por secado, Fisuración, Hormigón, Modelo mesomecánico con juntas.

**Resumen.** En este trabajo se presenta una extensión del modelo mecánico a nivel meso-estructural para materiales heterogéneos al estudio de problemas higro-mecánicos acoplados, que se ha venido desarrollando durante los últimos años dentro del grupo de investigación de la ETSECCPB, UPC. La modelización representa explícitamente los principales componentes del material a nivel mesoescala, de modo que en el caso del hormigón se discretizan los áridos de mayor tamaño rodeados de una matriz que caracteriza conjuntamente al mortero y a los áridos de menor tamaño. Dentro de la malla de elementos finitos se incluyen *a priori* elementos junta sin espesor, con el fin de representar las principales trayectorias potenciales de fisuración. En este artículo se presenta la aplicación del modelo al análisis de la retracción por secado en el hormigón. Se realiza un análisis acoplado higro-mecánico del problema de difusión no lineal de humedad en el mortero. El acoplamiento se ha implementado mediante una estrategia en “staggered”, que relaciona dos códigos independientes que actúan sobre la misma malla de elementos finitos. En primer lugar se muestra un ejemplo de verificación que incluye resultados de diferentes aspectos de la difusión de humedad y el estado de fisuración para distintas edades. Posteriormente, se analiza de forma preliminar el efecto del tamaño y el porcentaje en volumen de los áridos de mayor tamaño, sobre las deformaciones de retracción y la difusión de humedad. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la potencialidad del modelo, que permite considerar un análisis conjunto mesomecánico – acoplado. Se han introducido mejoras en el generador de mallas 2D con el fin de simular casos más complejos, recientemente obtenidos experimentalmente por el grupo de investigación de van Mier (J. Bisschop y J. G. M. van Mier, *Mat. & Struct.*, 35: 453-461 (2002)), en los que se pone en evidencia la influencia tanto del tamaño de áridos como de su porcentaje en volumen en la retracción por secado y la microfisuración.

## 1 INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos de mayor relevancia en lo que respecta a la durabilidad de estructuras de hormigón, es el fenómeno de la retracción por secado del hormigón. Si bien la seguridad frente a una posible falla de una estructura no es generalmente afectada por este fenómeno, sí lo son la durabilidad y la serviciabilidad de la misma. A menudo la principal razón por la cual las estructuras no completan su vida útil proyectada es un diseño inadecuado en cuanto a la cuantificación de las deformaciones inducidas por el secado (Bazant, 1988). La causa directa del daño es típicamente la fisuración, que puede provocar la creación de fisuras mayores y puede representar un camino preferencial de entrada para agentes nocivos externos, como pueden ser sulfatos u otros agentes químicos. El conocimiento de la humedad relativa interna de las estructuras de hormigón es también un tema de gran importancia, ya que muchos de los factores que afectan su durabilidad necesitan condiciones de humedad relativa específicas para desarrollarse, como es el caso de la reacción álcali-sílice, los ciclos de congelación y deshielo, el fenómeno de carbonatación o la corrosión de armaduras (Andrade *et al.* 1999).

La fisuración inducida por secado se produce, inicialmente, de forma perpendicular a la superficie de secado. Pero también se han identificado microfisuras internas que se producen tanto radial como tangencialmente a los áridos de mayor tamaño en el hormigón (Chatterji, 1982; Shiotani *et al.*, 2003) lo cual está en concordancia con lo que indica la teoría (Goltermann, 1995; Hearn, 1999). Estos trabajos ponen en evidencia la importancia del efecto que tienen tanto el tamaño como el porcentaje en volumen de los áridos, en la microfisuración inducida por secado en el hormigón.

Diversos aspectos involucrados en esta problemática despiertan un creciente interés en investigaciones recientes, tales como la relación local de las deformaciones de retracción con la difusión de humedad y la pérdida de peso (Bazant y Xi, 1994; Alvaredo, 1995), la influencia de la microfisuración en el proceso de secado y retracción (Gérard y Marchand, 2000; Carmeliet *et al.*, 2004), la influencia del tamaño y el porcentaje de áridos (Bisschop y van Mier, 2002a), o la interacción con la fluencia con secado (Benboudjema *et al.*, 2005).

Tradicionalmente, en lo que respecta a la modelización, los estudios en este campo se han realizado de un modo fenomenológico, en el cual el hormigón se considera como un material homogéneo. Un planteo más completo y potente puede conseguirse con modelos microestructurales del material, en los que se representa explícitamente la estructura interna de primer nivel (meso-estructura), caracterizada por la geometría y propiedades específicas de sus principales componentes. Durante los últimos años se ha venido desarrollando dentro del grupo de investigación de la ETSECCPB (UPC) un modelo mesomecánico para materiales heterogéneos en 2D (Carol *et al.*, 2001; López, 1999), y más recientemente extendido a 3D (Caballero, 2005), basado en elementos junta de espesor nulo.

En este trabajo se presenta una extensión del modelo mesomecánico al estudio de problemas higo-mecánicos acoplados (HM), en este caso aplicado al análisis de la retracción por secado en el hormigón. El acoplamiento se lleva a cabo mediante una estrategia en *staggered*, con la que se vinculan dos códigos, en principio independientes (como son el código DRAC para el análisis mecánico y el código DRACFLOW para el análisis de difusión de humedad), empleando la misma malla de elementos finitos para ambos problemas. También se presentan resultados preliminares de la verificación del modelo y de su aplicación al estudio de la influencia del tamaño y porcentaje en volumen de los áridos, y las mejoras introducidas en el generador de mallas 2D con el fin de simular casos más complejos, como los recientemente obtenidos experimentalmente por Bisschop y van Mier (2002a).

## 2 MODELO MESOESTRUCTURAL

Hasta hace pocos años, los grupos de investigación que utilizaban modelos meso-estructurales para simular el comportamiento del hormigón eran relativamente escasos. Pero actualmente, con la creciente mejora de varios aspectos computacionales, que permiten tratar problemas cada vez mayores, estos modelos están cobrando especial interés en la comunidad científica.

El modelo utilizado en este trabajo se enmarca dentro de los modelos de fisuración discreta (*discrete crack approach*), en los que cada fisura es modelada explícitamente e incorpora una discontinuidad en la malla. Se representan probetas de hormigón en una malla de elementos finitos en 2D que tiene en cuenta la heterogeneidad del material. De esta manera, se consideran dos fases bien diferenciadas. Por un lado los áridos de mayor tamaño (aproximadamente el tercio mayor de la granulometría), cuya distribución y forma se genera de forma aleatoria mediante un procedimiento basado en la teoría de Voronoi-Delaunay. Por otro lado, rodeando la fase granular se discretiza una matriz homogénea, que representa el mortero (pasta de cemento más arena) más los áridos pequeños (figura 1a y b). Ambas fases se discretizan mediante elementos finitos triangulares. Adicionalmente, se incluye en la malla una retícula de elementos junta sin espesor, distribuidos a lo largo de todos los contactos entre elementos de árido y mortero (interfase) y entre algunos contactos de la matriz. Estos elementos junta se insertan *a priori* entre los elementos estándar del medio continuo, de modo que puedan quedar representadas las principales potenciales trayectorias de fisuración (figura 1c).

### 2.1 Descripción del modelo mecánico

Mientras que a los áridos se les asigna un comportamiento elástico lineal, para la matriz se considera una ley constitutiva visco-elástica con envejecimiento mediante el modelo de la “cadena de Maxwell”. Este modelo resulta equivalente al desarrollo en serie de Dirichlet (que consiste en una serie de exponenciales reales) de la función de relajación  $R(t, t')$ , de relación “dual” respecto a la habitual función de fluencia  $J(t, t')$ , siendo  $t'$  el instante de aplicación de la carga y  $t$  el instante en el que se miden las deformaciones. Se trata de un modelo incremental (*rate-type model*), que tiene ventajas fundamentales para el análisis numérico, ya que no es necesario almacenar la historia de las deformaciones en cada punto de integración (Carol y Bazant, 1993). Nótese que tanto  $J(t, t')$  como  $R(t, t')$  son función de dos variables:  $t$  y  $t'$ , y no solo del tiempo transcurrido ( $t - t'$ ), lo cual se debe al efecto del envejecimiento del material (Bazant, 1988).

Para los elementos junta se utiliza una ley constitutiva no lineal basada en la teoría de la elastoplasticidad y en conceptos de la mecánica de fractura (Carol *et al.*, 1997; Carol *et al.*, 2001). El comportamiento está formulado en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano de la junta, y los desplazamientos relativos correspondientes (figura 1d). La superficie de fractura se define como una hipérbola dada por la expresión (1) en el espacio de las tensiones ( $\sigma_N, \sigma_T$ ), y puede ser considerada como una transición suave entre los criterios de rotura de Rankine (tracción pura) y Mohr-Coulomb.

$$F = \sigma_T^2 - (c - \sigma_N \cdot \tan \phi)^2 + (c - \chi \cdot \tan \phi)^2 \quad (1)$$

En (1),  $\chi$  representa la resistencia a tracción del material,  $c$  la cohesión aparente y  $\tan \phi$  la tangente del ángulo de fricción interna.

Posteriores modificaciones y mejoras han incorporado el envejecimiento (Ciancio *et al.*, 2003; López *et al.*, 2005a), de modo que la formulación permite tener en cuenta dos aspectos diferenciados del comportamiento del material: el reblandecimiento debido al trabajo disipado en procesos de fractura, y el incremento de resistencia con el paso del tiempo. La evolución con el tiempo de los parámetros mecánicos de las juntas del mortero debe caracterizar al aumento de resistencia producto del envejecimiento de la matriz. También se espera que las propiedades mecánicas de las interfaces árido-mortero mejoren con el tiempo, como ha sido sugerido en la bibliografía (Neville, 2002).

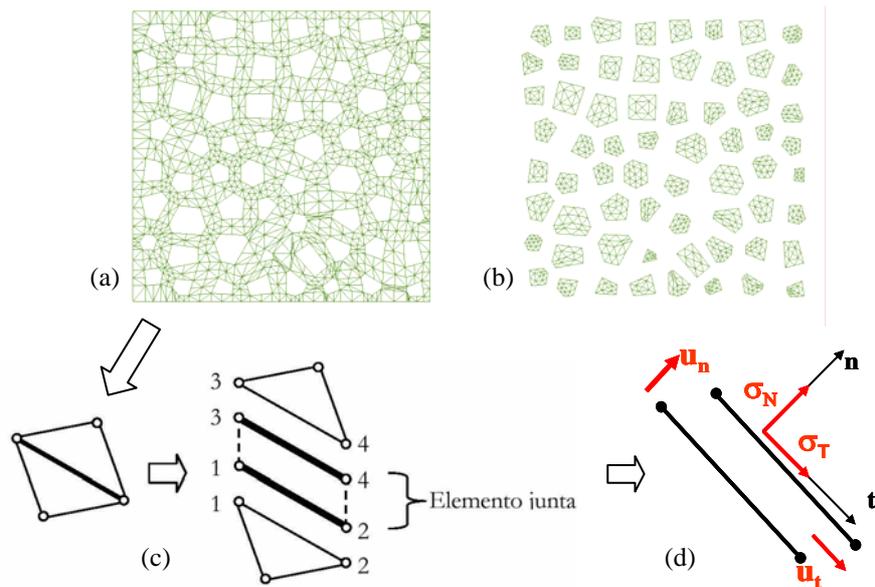


Figura 1: Malla mesoestructural para el estudio de propagación de fisuras. (a) Discretización de la matriz, (b) discretización de los áridos, (c) esquema de un elemento junta entre dos elementos continuos, y (d) formulación de la ley en función de las tensiones normal y tangencial y sus correspondientes desplazamientos relativos.

## 2.2 Descripción del modelo de difusión

El análisis del proceso de secado parte de la hipótesis, como es común en la bibliografía, de que se trata de un proceso gobernado por la difusión de humedad a través del hormigón. Este se realiza utilizando la misma malla de elementos finitos que para el análisis mecánico, es decir considerando también la heterogeneidad del material. Esto ha sido posible gracias a la utilización de elementos interfase de doble nodo (*double-noded interfaces*) también en el análisis de difusión (Segura y Carol, 2004). El análisis se basa en la ya conocida ecuación diferencial en función de la humedad relativa (Bazant y Najjar, 1972), que en este trabajo se utiliza tanto para la difusión a través del medio continuo como de los elementos junta, con alguna consideración adicional, y está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ D_H \frac{\partial H}{\partial x_i} \right] = \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2)$$

donde  $H$  representa la humedad relativa,  $t$  el tiempo transcurrido y  $D_H$  es el coeficiente de difusividad, que depende de la humedad relativa mediante la siguiente relación (Roncero, 1999):

$$D_H = D_0 + (D_1 - D_0) \cdot f(\beta, H) ; \quad f(\beta, H) = \frac{e^{-\beta} \cdot H}{1 + (e^{-\beta} - 1) \cdot H} \quad (3)$$

en la que  $D_0$  y  $D_1$  son parámetros de entrada del modelo,  $f(\beta, H)$  es una función hiperbólica y  $\beta$  es un factor de forma (ver figura 2, izquierda).

El contenido de agua evaporable (para diferenciarla del agua *no evaporable*, que es la que se consume en el proceso de hidratación) en los poros por unidad de volumen de hormigón,  $w_e$  [kg/m<sup>3</sup>], en cada punto del dominio, se obtiene *a posteriori* de la resolución de la ecuación de difusión mediante la utilización de la curva isoterma de sorción/desorción, que relaciona  $w_e$  con la humedad relativa. En este trabajo se utiliza la expresión propuesta por Norling (Norling, 1997) y viene dada por:

$$w_e / c(H) = x \cdot (1 - e^{(-z \cdot H)}) + y \cdot (e^{(z \cdot H)} - 1) \quad (4)$$

en la que  $x$ ,  $y$  y  $z$  son funciones del grado de hidratación ( $\alpha$ ) y de la relación inicial agua/cemento ( $w_0/c$ ). En la figura 2 (derecha) se muestra la curva de desorción empleada en este trabajo.

Finalmente, se deben relacionar a nivel local las pérdidas de peso (o de agua evaporable) con la contracción volumétrica,  $\varepsilon_{vol}$ , para lo que se ha adoptado una relación constante tomada de la bibliografía. Este criterio, si bien representa una simplificación, suele utilizarse en la bibliografía debido a la incertidumbre existente sobre este tema. A los fines del análisis numérico aquí realizado, es suficientemente aproximado, sobre todo en el rango usual del 50 al 90% de humedad relativa. Cabe mencionar que estas deformaciones volumétricas representan la influencia del análisis de difusión de humedad en el análisis mecánico.

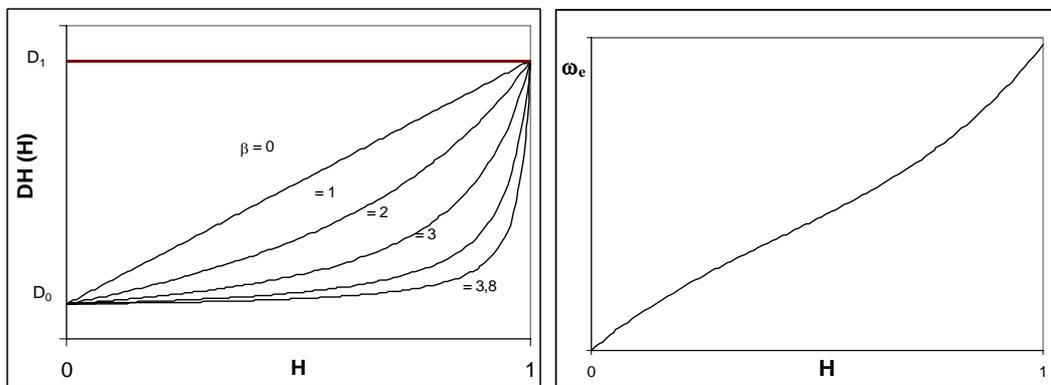


Figura 2: Coeficiente de difusividad en función de la humedad relativa para varios factores de forma (izquierda) y curva de desorción empleada en este estudio (derecha).

Como fue mencionado, la difusión de humedad a través de las juntas es adicionalmente considerada en el análisis de forma equivalente al medio continuo, es decir mediante la ecuación (2), en la que el coeficiente de difusividad es modificado ligeramente. Para considerar el aumento de la difusividad con la apertura de fisura se utiliza la conocida ley cúbica o de Poiseuille (Snow, 1965; Bazant y Raftshol, 1982), que relaciona la difusividad de una fisura con el cubo de su apertura de la siguiente manera:

$$K_L = K_0 + (K_1 - K_0) \cdot f(\beta_K, H) ; K_0 = \alpha \cdot K_1 ; K_1 = \frac{g}{12 \cdot \nu} \cdot w^3 \quad (5)$$

En (5),  $f(\beta_K, H)$  es la función dada en la ecuación (3),  $w$  es la apertura de fisura [m],  $\alpha$ ,  $\beta_K$  y  $\eta = g/(12 \cdot \nu)$  son parámetros del modelo, siendo  $g$  [m/s<sup>2</sup>] la aceleración de la gravedad y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua [m<sup>2</sup>/s]. De esta forma, si la retracción inducida por secado provoca microfisuras, éstas modificarán las propiedades difusivas del medio, representando la influencia del análisis mecánico sobre el de difusión de humedad.

Por último, en este estudio se ha supuesto que la difusión a través de los áridos es nula, ya que su difusividad es usualmente mucho menor que la del mortero (con la excepción de agregados livianos, que tienen una elevada porosidad).

### 2.3 Acoplamiento

En el modelo propuesto, el análisis se aborda mediante el uso de dos códigos independientes que, para cada incremento de tiempo, realizan un análisis higo-mecánico (HM) acoplado mediante una estrategia “*staggered*”. Un código (DRACFLOW) realiza el análisis de difusión no-lineal de humedad y sus resultados, en términos de deformaciones volumétricas en puntos de *Gauss*, se utilizan como entrada en el segundo código (DRAC) para el análisis mecánico. Este último obtiene un campo de desplazamientos actualizado del que derivan nuevas aperturas de fisuras que servirán de entrada al primer código, repitiéndose sucesivamente este proceso hasta alcanzar una tolerancia prefijada en términos de las pérdidas de agua evaporable, y pasar entonces al siguiente intervalo de tiempo. Se emplea la misma malla de elementos finitos para ambos análisis, con elementos junta y nodos duplicados (*double noded*) también para el análisis de difusión, cuya formulación puede consultarse en Segura y Carol (2004). La integración en el tiempo se realiza mediante el método de las diferencias finitas, con un esquema *backward*-Euler.

## 3 RETRACCIÓN POR SECADO

Cuando se somete una pieza de hormigón a una humedad relativa ( $H$ ) ambiente más baja que la que existe en el interior del material, se produce el secado de la misma, que comienza por la superficie en contacto con el aire. El frente de secado avanza de acuerdo a una ley de difusión, que podemos expresar mediante la segunda ley de Fick (Bazant y Najjar, 1972), que expresa el flujo debido a un gradiente de concentraciones de humedad y que en su forma final, conveniente para nuestro análisis (esto es, despreciando las pérdidas de humedad por desecación autógena, lo cual es aproximadamente cierto en hormigones ordinarios), está dada por la ecuación (2). La característica más saliente consiste en que el coeficiente de difusividad es altamente dependiente de  $H$ , lo que torna la ecuación no lineal (ver figura 2). No hay que olvidar que esta relación es empírica, ya que la difusión global es función de hasta tres procesos de difusión distintos (difusión molecular, difusión de Knudsen y difusión superficial), que actúan en diferentes rangos de la distribución de poros y son de difícil cuantificación (Xi *et al.*, 1994), por lo que lo que realmente se utiliza es un *coeficiente de difusividad efectiva* del medio. La formulación de la ecuación de difusión en términos de  $H$  (Bazant y Najjar, 1972) no es la única posibilidad. Hay también diversos autores que proponen utilizar la pérdida de peso (Granger *et al.*, 1997; Benboudjema *et al.*, 2005). En cualquier caso, ambos planteamientos hacen uso de la conocida curva de sorción/desorción a temperatura constante y grado de hidratación fijo (ver figura 2), que relaciona la humedad relativa,  $H$ , con la pérdida de agua evaporable,  $w_e$ , ya que en ambos planteamientos es necesario relacionar las dos variables en determinado momento del análisis.

El proceso de secado provoca que el material cercano a la superficie esté sometido a tensiones de tracción y el interior a tensiones de compresión (por razones de equilibrio de

fuerzas y compatibilidad de deformaciones), como puede apreciarse en la [figura 3](#) (Bazant, 1988), en la cual se esquematiza el secado de una pared de hormigón. Si la tensión a la que está sometido el material supera la resistencia a tracción, se producen microfisuras perpendiculares a la superficie de secado (entendiendo por microfisuras aquellas cuyo espesor no supera los 50 micrones, aproximadamente). Estas microfisuras a su vez podrán producir un aumento en la difusividad efectiva del medio, acelerando entonces el proceso de secado y en consecuencia la microfisuración, lo cual indica que se trata de un problema acoplado. La influencia de la microfisuración sobre la difusividad del medio es aún un tema abierto a discusión, si bien hay indicios de que, como cabría esperar, las microfisuras producen un aumento de la difusividad (Bazant *et al.*, 1987; Gérard y Marchand, 2000; Carmeliet *et al.*, 2004).

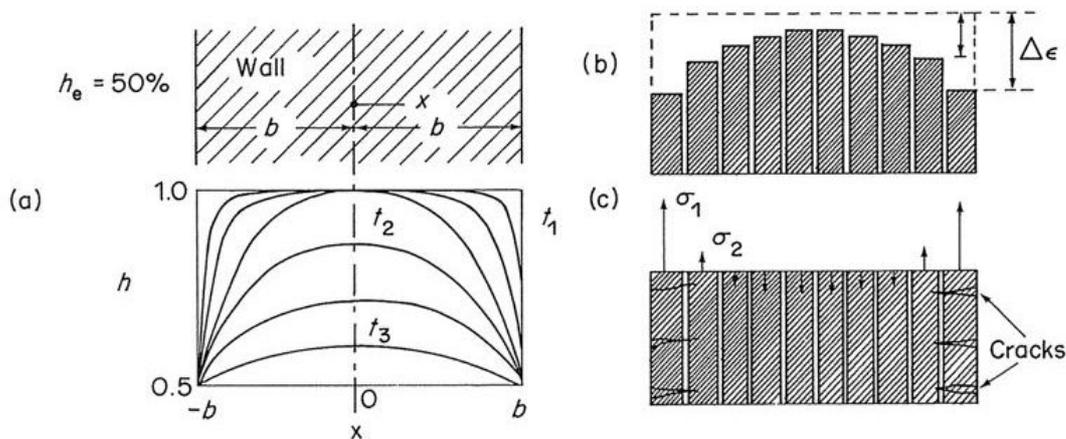


Figura 3: Pared sometida a secado: (a) distribuciones de humedad a diferentes tiempos, (b) retracciones correspondientes para varias capas considerándolas individualmente como sin restricción, y (c) tensiones inducidas y fisuración provocadas por la restauración de la compatibilidad (Bazant, 1988).

Como ya fue mencionado, la fisuración inducida por secado también se extiende al interior de la pieza, en dirección tanto radial como tangencial a los áridos de mayor tamaño, como ha sido verificado en ensayos experimentales recientes (Shiotani *et al.*, 2003).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Verificación del comportamiento acoplado

En primer lugar, se ha simulado la retracción por secado de una muestra de hormigón de 14x14cm, con un arreglo de 6x6 áridos (que corresponde a un 28% en volumen). Para el problema de difusión se establece una condición inicial de  $H = 1$  en toda la malla, y a la edad de 28 días se imponen unas condiciones de borde de  $H = 0,5$  en los lados izquierdo y derecho, mientras que no se permite el flujo de humedad en las caras superior e inferior. A fin de verificar la respuesta del modelo, se han llevado a cabo diversas simulaciones numéricas (López *et al.*, 2005b y 2005c) en régimen acoplado y desacoplado para diferentes comportamientos constitutivos de los elementos de medio continuo de mortero (elástico y visco-elástico) y de las juntas (ley con y sin envejecimiento). En este trabajo se presentan resultados correspondientes a los casos acoplado y desacoplado con visco-elasticidad para la matriz y ley no lineal con envejecimiento para las juntas. En la [figura 4](#) se muestran las distribuciones de humedad relativa para las edades de 20, 200 y 10.000 días, así como las pérdidas de peso para los dos casos. El frente de secado avanza hacia el interior de manera no

uniforme, debido a la presencia de los áridos y a la influencia de la fisuración. Puede apreciarse que el análisis acoplado redonda en un secado leve mayor al desacoplado, debido a la influencia de las fisuras en el proceso. Asimismo, los perfiles de humedad para el caso desacoplado, en la sección media de la malla, obtenidos para diferentes tiempos, se presentan en la figura 5. La influencia de las fisuras en el secado, en el caso acoplado, puede apreciarse en la figura 6, donde se grafican las curvas de humedad relativa en función del tiempo para puntos fijos de la malla con distintas distancias a la superficie de secado. Se observa que para dos puntos situados a la misma distancia del borde, la humedad relativa del punto que está situado sobre la fisura decae más rápidamente que la de un punto en el medio continuo.

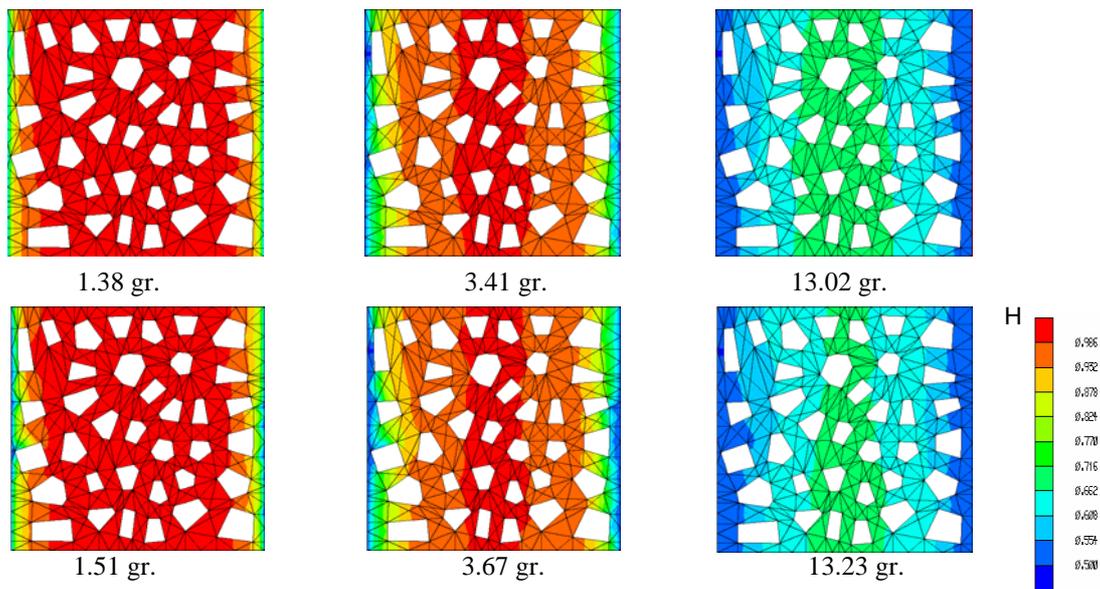


Figura 4: Distribuciones de HR y pérdidas de peso para las edades de 20, 200 y 10.000 días (de izquierda a derecha). Casos desacoplado (arriba) y acoplado (abajo).

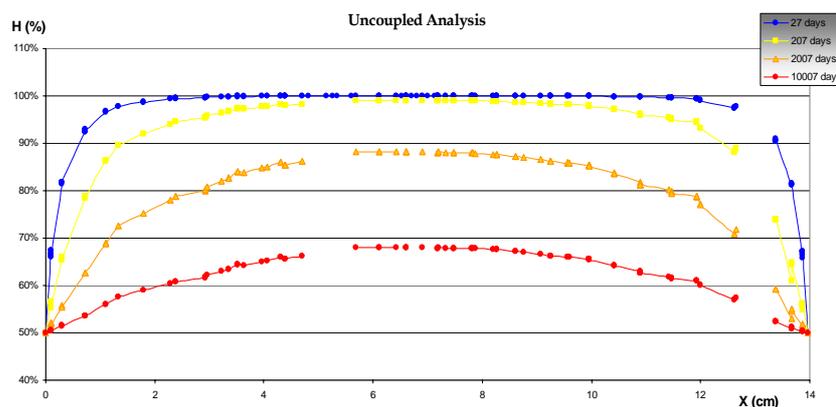


Figura 5: Perfiles de humedad en la sección media, calculados para el caso desacoplado (las discontinuidades en cada perfil corresponden a la presencia de áridos en la sección media analizada).

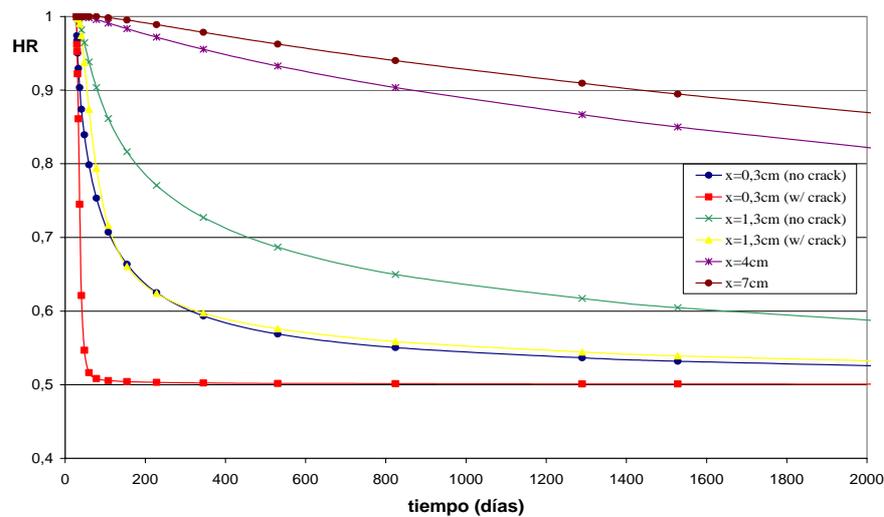


Figura 6: Variación de humedad relativa interna con tiempo de exposición a diferentes distancias de la superficie de secado (caso acoplado).

En la [figura 7](#) se presentan los resultados del análisis mecánico para el caso acoplado, donde se muestra la evolución del estado de fisuración en las juntas para las mismas tres edades, en las cuales el espesor de línea representa la energía disipada en las interfases en procesos de fractura. Inicialmente, como cabía esperar, se producen microfisuras perpendiculares a cada uno de los laterales sometidos a secado. A medida que este frente penetra en la muestra (en rojo), las fisuras que van quedando atrás se descargan (en azul). También se aprecia que a medida que progresa el secado se generan fisuras en el interior de la muestra, por un lado en las interfases árido-mortero, y sobre todo en el mortero siguiendo una dirección radial a los áridos.

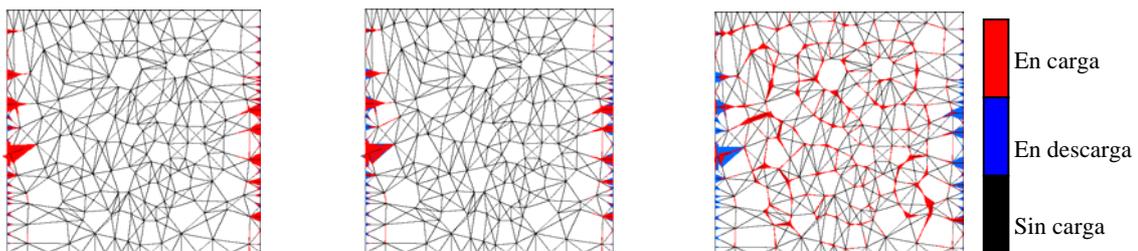


Figura 7: Energía de fractura disipada en las juntas para 20, 200 y 10.000 días.

#### 4.2 Análisis preliminar de la influencia del tamaño y porcentaje de los áridos

Este efecto, debido a la presencia de partículas embebidas en un medio visco-elástico, concuerda cualitativamente con los resultados obtenidos experimentalmente por Bisschop y van Mier (2002a y 2002b), como puede apreciarse en la [figura 8](#), en los que se concluyó que cuanto mayor es el tamaño de las partículas o mayor su porcentaje en volumen, la microfisuración radial generada resulta mayor, y las pérdidas de peso menores (en su caso emplearon esferas de vidrio con un módulo de elasticidad similar al de áridos usualmente utilizados). A fin de contrastar la capacidad del modelo para capturar la influencia conjunta del tamaño de los áridos y de la relación árido/matriz de una muestra, se presentan resultados preliminares obtenidos sobre tres mallas con igual número y arreglo de los áridos, en las que

la diferencia está en el porcentaje en volumen de áridos (y consecuentemente en el tamaño máximo). Esto se ha efectuado simplemente encogiendo en mayor o menor medida un arreglo fijo de áridos de 6x12 en una malla de 15x30cm. Se ha simulado numéricamente una retracción por secado de las mismas características que en el ejemplo anterior en cuanto a los parámetros de las leyes constitutivas empleadas, las condiciones iniciales y las de borde (Idiart *et al.*, 2006). En la [figura 9](#) se muestran estas mallas, que presentan un volumen de áridos de 22%, 28% y 32% (16.8, 18.7 y 20.0 mm, respectivamente, de tamaño promedio de las partículas discretizadas), la distribución de  $H$  correspondiente a los 10.000 días para los 3 casos y las respectivas pérdidas de peso. Puede apreciarse que, si bien la influencia no resulta significativa, el frente de secado avanza en mayor grado en la medida en que es menor el tamaño y el porcentaje de la fase de áridos. La pérdida de peso es mayor cuanto menor es el porcentaje de áridos debido fundamentalmente a que hay mayor volumen de mortero. La [figura 10](#) presenta la evolución de las deformaciones longitudinales promedio, medidas en los laterales de la muestra con una base de medida igual a la altura total de la malla, en función del tiempo. Como cabría esperar, se aprecia claramente que cuanto mayor es el porcentaje en volumen de los áridos, menor es la deformación longitudinal. Asimismo, si bien el efecto no ha resultado demasiado notorio en las muestras simuladas, se ha observado que cuanto mayor es el porcentaje en volumen de áridos, se produce un mayor grado de fisuración (Idiart *et al.*, 2006).

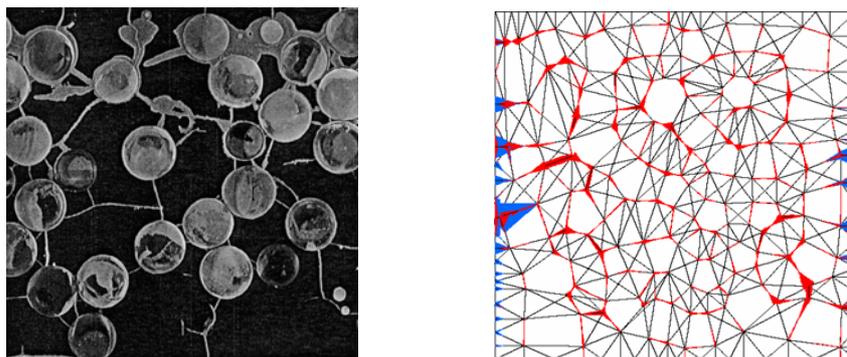


Figura 8: Micrografía (40x40mm) de una sección de material cementoso con esferas de vidrio como áridos (Bisschop y van Mier, 2002b) (izquierda), y energía disipada en procesos de fractura a 10.000 días obtenida con el modelo higro-mecánico (derecha).

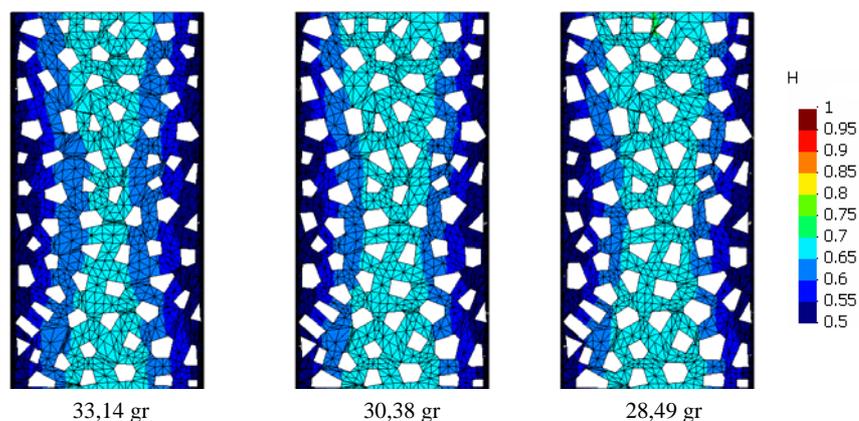


Figura 9: Distribuciones de  $H$  y pérdidas de peso a la edad de 10.000 días para los 3 casos analizados (22%, 28% y 32% en volumen de áridos, de izquierda a derecha).

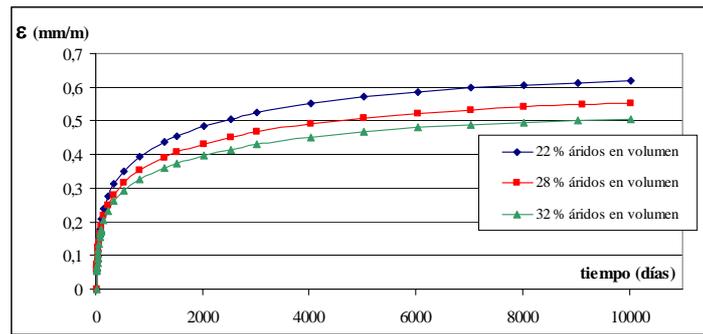


Figura 10: Evolución de las deformaciones longitudinales promedio de los laterales de las muestras (base de medida = 30 cm), para los 3 casos analizados.

En los ensayos experimentales realizados por Bisschop y van Mier (2002a), se aislaron los efectos que el tamaño de áridos y su porcentaje en volumen tienen sobre la microfisuración y las pérdidas de peso. Para esto utilizaron seis series de probetas con esferas de vidrio de igual tamaño en cada serie, considerando tres porcentajes en volumen diferentes (10, 21 y 35%). En este trabajo, con el fin de poner de manifiesto la capacidad del modelo para analizar estos efectos, preliminarmente se han utilizado mallas en donde se los ha analizado en conjunto (figura 9 y figura 10). Seguidamente, con la finalidad de obtener muestras adecuadas para reproducir estos resultados experimentales, se ha trabajado en la mejora de las prestaciones del generador de mallas 2D. Con esta nueva herramienta, se han generado 4 series de mallas de 10x30cm con áridos circunscritos en circunferencias de igual tamaño en cada serie (5, 10, 15 y 20mm) y con 3 diferentes porcentajes en volumen (20, 30 y 40%). En la figura 11 se presentan 3 de las 4 series generadas, correspondientes a tamaños de árido de 5, 10 y 15mm, que actualmente están siendo utilizadas en los cálculos de retracción

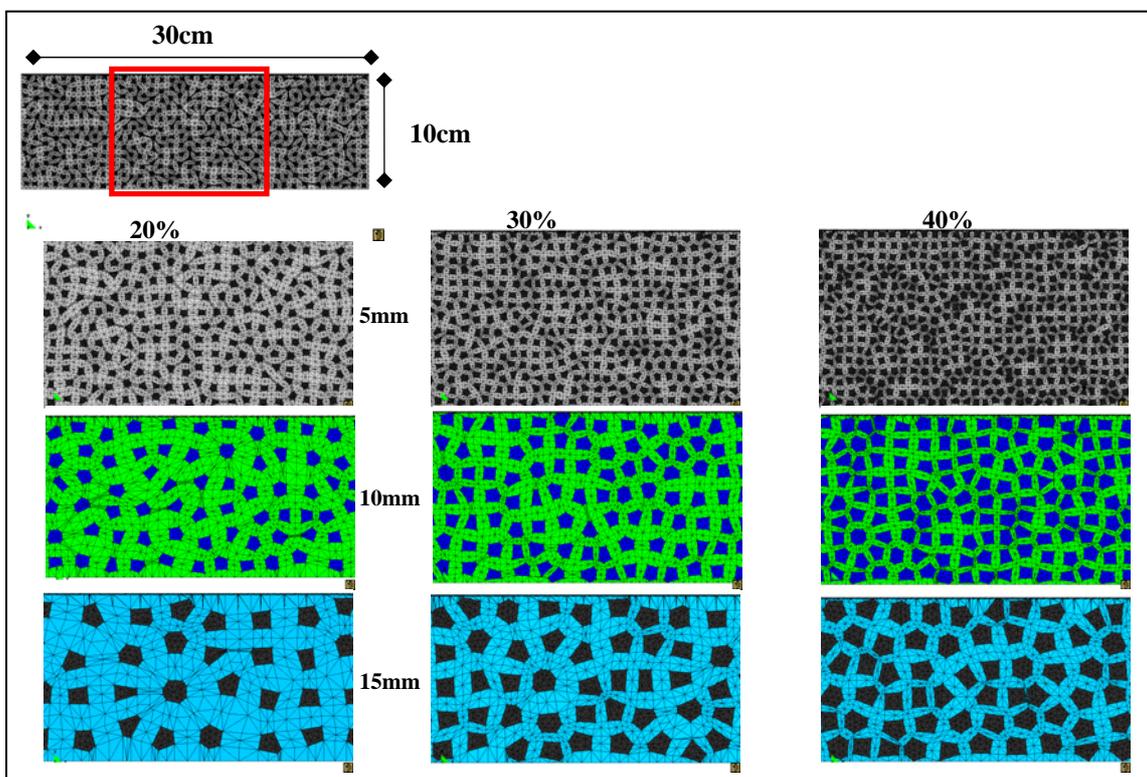


Figura 11: Ampliación del tercio medio de 3 series de mallas utilizadas en cálculos de retracción: 5mm (arriba), 10mm (centro) y 15mm (abajo) para 20, 30 y 40% de áridos en volumen.

## 5 CONCLUSIONES

Se ha presentado la extensión de un modelo meso-mecánico, desarrollado dentro del grupo UPC, al estudio de problemas higo-mecánicos acoplados, aplicado en este caso al estudio de la retracción por secado en el hormigón. Los resultados preliminares de las simulaciones meso-estructurales realizadas, en cuanto al efecto que la fisuración tiene sobre la difusividad del medio y sobre las deformaciones, ponen de manifiesto la potencialidad del modelo para analizar efectos propios de la heterogeneidad de primer orden (meso-escala) en la retracción por secado. La combinación del análisis acoplado con una geometría meso-estructural y la utilización de juntas sin espesor para representar la fisuración, constituyen un planteamiento novedoso y muy potente para la simulación de procesos complejos del comportamiento conjunto mecánico/difusión de materiales cuasifrágiles. Actualmente se está profundizando el análisis de la influencia del tamaño y la proporción de los áridos en el fenómeno, a fin de simular resultados experimentales recientes, obtenidos por Bisschop y van Mier (2002a).

Los trabajos actuales y futuros en esta línea se centran también en la consideración del comportamiento integrado de la fluencia básica (*basic creep*) junto con la retracción y la fluencia con secado (*drying creep*), así como otros procesos de difusión que inciden en la durabilidad del hormigón, como es por ejemplo el ataque externo de sulfatos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MEC (Madrid, España) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación MAT2003-02481 y al Ministerio de Fomento (Madrid, España) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación 80015/A04. El primer y el segundo autor desean agradecer también al MEC por la beca doctoral FPI y la incorporación al “Programa Ramón y Cajal”, respectivamente.

## REFERENCIAS

- A. M. Alvaredo. Crack formation under hygral or thermal gradients. *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proc. 2<sup>nd</sup> Int. Conf., FRAMCoS 2*, Zurich, Switzerland, ed. F. H. Wittmann, vol. 2: 1423-1441, 1995.
- C. Andrade, J. Sarría, M. Cruz Alonso. Influence of natural weathering on the relative humidity of concrete. *Construction materials, Theory and application*. Hans-Wolf Reinhardt, Herausgegeben von R. Eligehausen, 1999.
- Z. P. Bazant. *Mathematical model of creep and shrinkage of concrete*, Ed. Z. P. Bazant, John Wiley & Sons Ltd., 1988.
- Z. P. Bazant y L. J. Najjar. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete. *Materials and Structures*, 1: 461-473, 1972.
- Z. P. Bazant y W. J. Raftshol. Effect of cracking in drying and shrinkage specimens. *Cement and Concrete Research*, 12: 209-226, 1982.
- Z. P. Bazant, S. Sener y J. K. Kim. Effect of cracking on drying permeability and diffusivity of concrete. *ACI Materials Journal*, 84: 351-357, 1987.
- Z. P. Bazant y Y. Xi. Drying creep of concrete: constitutive model and new experiments separating its mechanisms. *Materials and Structures*, 27: 3-14, 1994.
- F. Benboudjema, F. Meftah, J. M. Torrenti. Interaction between drying, shrinkage, creep, and cracking phenomena in concrete. *Engineering Structures*, 27: 239-250, 2005.
- J. Bisschop y J. G. M. van Mier. Effect of aggregates on drying shrinkage microcracking in cement-based composites. *Materials and Structures*, 35: 453-461, 2002a.

- J. Bisschop y J. G. M. van Mier. How to study drying shrinkage microcracking in cement-based materials using optical and scanning electron microscopy? *Cement and Concrete Research*, 32: 279-287, 2002b.
- A. Caballero. 3D meso-mechanical numerical analysis of concrete fracture using interface elements. PhD thesis, UPC, Barcelona, España, 2005.
- J. Carmeliet, J. F. Delerue, K. Vandersteven y S. Roels. Three-dimensional liquid transport in concrete cracks. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28: 671-687, 2004.
- I. Carol y Z. P. Bazant. Viscoelasticity with aging caused by solidification of non-aging constituent. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 119(11): 2252-2269, 1993.
- I. Carol, C. M. López y O. Roa. Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 52: 193-215, 2001.
- I. Carol, P. Prat y C. M. López. A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 123(8): 765-773, 1997.
- S. Chatterji. Probable mechanisms of crack formation at early ages of concrete. *Int. Conf. Concrete at Early Ages*, École Nationale de Ponts et Chaussées, Paris, pp. 34-38, 1982.
- D. Ciancio, C. M. López, I. Carol y M. Cuomo. New results in meso-mechanical modeling of concrete using fracture-based zero-thickness interface elements. *Computational Modelling of Concrete Structures (EURO C)*, Balkema, 171-177, 2003.
- B. Gérard y J. Marchand. Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials. Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime. *Cement and Concrete Research*, 30: 37-43, 2000.
- P. Goltermann. Mechanical predictions of concrete deterioration-Part 2: Classification of crack patterns. *ACI Materials Journal*, 92(1): 58-63, 1995.
- L. Granger, J. M. Torrenti y P. Acker. Thoughts about drying shrinkage: Experimental results and quantification of structural drying creep. *Materials and Structures*, 30: 588-598, 1997.
- N. Hearn. Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete. *ACI Materials Journal*, 96(2): 234-241, 1999.
- A. E. Idiart, C. M. López e I. Carol, "Análisis meso-estructural de la retracción por secado del hormigón", *Anales de la mecánica de fractura*, 23(1): 135-140, 2006.
- C. M. López. Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones. PhD thesis, UPC, Barcelona, España, 1999.
- C. M. López, I. Carol y A. E. Idiart. Formulación de una ley constitutiva de junta con envejecimiento. Aplicación al comportamiento meso-estructural del hormigón. *VIII Congreso Argentino de Mecánica Computacional*, Buenos Aires, Argentina, 2005a.
- C.M. López, A. E. Idiart e I. Carol. Meso-mechanical Analysis of Concrete Deterioration Including Time Dependence. *Computational Plasticity VIII*, D.J. Owen, E. Oñate y B. Suárez, eds. Barcelona, España, 1059-1062, 2005b.
- C.M. López, J.M. Segura, A. E. Idiart e I. Carol. Mesomechanical Modeling of Drying Shrinkage Using Interface Elements. *Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures*. Concreep 7, G. Pijaudier-Cabot, B. Gérard y P. Acker, eds. Nantes, France, 107-112, 2005c.
- A. M. Neville. *Properties of concrete*, Pearson Prentice Hall, 4<sup>th</sup> edition, 2002.
- K. Norling. Moisture Conditions in High Performance Concrete. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1997.
- J. Roncero. Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened

- states: implications for high performance concretes. PhD Thesis, ETSECCP, UPC, Barcelona, España, 1999.
- J.M. Segura y I. Carol. On zero-Thickness Interface Elements for Diffusion Problems. *Intern. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 28(9): 947-962, 2004.
- T. Shiotani, J. Bisschop, y J.G.M. van Mier. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. *Engineering fracture mechanics*, 70: 1509-1525, 2003.
- D. Snow. A parallel plate model of fractured permeable media. PhD Dissertation, University of California, Berkeley, 1965.
- Y. Xi, Z. P. Bazant, L. Molina y H. M. Jennings. Moisture Diffusion in Cementitious Materials: Moisture Capacity and Diffusivity. *Advanced Cement Based Materials*, 1: 258-266, 1994.