

ANÁLISIS MESO-MECÁNICO DEL HORMIGÓN BAJO LA ACCIÓN DE PROCESOS EXPANSIVOS INTERNOS

A. Campos¹, C.M. López², A. Aguado¹

¹ Departamento de Ingeniería de la Construcción

² Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica

ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona. España

E-mail: andre.campos@upc.edu, carlos.maria.lopez@upc.edu, antonio.aguado@upc.edu

RESUMEN

Es conocido que la existencia de procesos expansivos en el hormigón inducidos por reacciones químicas, puede provocar una considerable degradación de sus propiedades mecánicas. Este comportamiento puede ser la respuesta a diferentes causas como la reacción álcali-árido, las reacciones de oxidación de sulfuros, el ataque sulfático (externo o interno), etc. Los procesos reactivos, en general, provocan cambios de volumen diferencial en la estructura interna del material, aspecto que viene a acentuar la importancia de realizar análisis mediante modelos mesomecánicos, en los que se representa explícitamente la estructura interna de primer nivel (meso-estructura). En este trabajo se presentan resultados de simulaciones numéricas meso-mecánicas de un hormigón sometido a acciones expansivas internas. Se han obtenido curvas de la degradación del módulo de elasticidad y de la resistencia a tracción en función del grado de expansión, que se comparan con resultados experimentales [1]. También se muestran aspectos de la fisuración y de la energía disipada, que se correlacionan con el nivel de expansión y la evolución de los parámetros mecánicos.

ABSTRACT

It is known that the existence of expansive processes in concrete induced by chemical reactions can cause considerable degradation of its mechanical properties. This phenomenon may have several causes such as alkali-aggregate reaction, sulphides oxidation reaction, the sulfate attack (internal or external), among others. The reactive processes, in general, cause differential volume changes in the internal structure of the material, aspect that accentuates the importance of analysis by meso-mechanical models that take into account the explicit representation of the first level internal structure (meso-structure). This paper presents results of meso-mechanical simulations of a concrete subjected to internal expansion actions. Curves have been obtained for the degradation of the elastic modulus and tensile strength in function of the degree of expansion and compared with experimental results [1]. Furthermore, this work shows aspects of the evolution of cracking and energy dissipation, both of which can be correlated with the degree of expansion and the variation of the mechanical parameters.

PALABRAS CLAVE: Análisis mesomecánico, Elemento junta, Expansiones internas.

1. INTRODUCCIÓN

Algunas deformaciones expansivas detectadas en el hormigón pueden ser causadas por procesos reactivos en que los productos generados, tales como el gel de las reacciones álcali-árido, la etringita secundaria en ataques sulfáticos, entre otros, provocan cambios de volumen diferencial en la estructura interna del material, lo cual da lugar a un estado de tensiones internas que puede ser causa de microfisuración, degradación de las propiedades mecánicas macroscópicas, e incluso en estados avanzados del proceso puede generar un grado de fisuración considerable.

La formación de etringita a edades muy tempranas (comúnmente llamada etringita primaria), con el hormigón en estado plástico, no produce degradación y

daño. Sin embargo cuando se forma con posterioridad, a partir de días, meses o años (denominada etringita secundaria), la expansión no uniforme asociada puede producir la degradación del material y una fisuración de tipo enramada característica de los procesos reactivos. Existen varios procesos que pueden causar la formación de etringita secundaria, como el ataque sulfático externo (ASE) en que los iones sulfato provienen de una fuente externa, o el ataque sulfático interno (ASI) donde la fuente de sulfatos se encuentra en el interior de la masa de hormigón. Una forma de ASI puede ocurrir en hormigones fabricados con áridos que presentan contenidos de sulfuros de hierro (en forma de pirita o pirrotina) que al oxidarse (reacción primaria) causan una primera expansión y liberan sulfatos que reaccionan con los aluminatos del cemento (reacción secundaria), dando lugar a la formación de etringita asociada a una

segunda expansión de mayor magnitud que la reacción primaria. Este tipo de reacción expansiva ha sido detectado en algunas presas del Pirineo español como Graus, Tavascán y Rumedo, cuya problemática viene estudiándose desde hace años dentro del grupo de trabajo de la UPC [2,3]. En el marco de esta temática, se ha empleado un modelo numérico mesoestructural para estudiar la influencia de una expansión diferencial actuando en los áridos, junto con diferentes niveles de confinamiento [2-4]. Los resultados obtenidos han permitido explicar el comportamiento y tipo de fisuración observado en distintas zonas de las presas afectadas, tales como elementos auxiliares en los que la acción expansiva actúa libre y zonas visibles del cuerpo de presa con función resistente. Sin embargo, dada la ausencia de ensayos de laboratorio en este tipo de ASI (poco frecuente y de lento desarrollo en el tiempo), el modelo no se pudo contrastar cuantitativamente con resultados experimentales que registren por ejemplo la degradación de parámetros mecánicos con el nivel de expansión, datos que sí se disponen para expansiones debidas a otro tipo de reacciones químicas. Estudios experimentales de hormigones afectados por formación tardía de etringita han constatado reducciones de hasta el 60% en el módulo de Young [1,5,6]. Un grado similar de reducción del módulo también ha sido detectado en hormigones afectados por la reacción álcali-sílice [7-9] y por ASE [10]. En estas referencias también se han constatado reducciones apreciables de las resistencias a tracción y compresión. En general, se asocia la degradación de dichas propiedades a la microfisuración del hormigón provocada por la expansión.

Otro tipo de ASI es causado por un elevado contenido de sulfatos en el cemento y la acción de una alta temperatura que puede provenir de una fuente externa (como sucede durante un curado en caliente), o una fuente interna (calor de hidratación en un hormigón masivo). La etringita primaria (“early ettringite formation”) no es estable a altas temperaturas, y durante el curado en caliente se descompone en monosulfato y yeso, pero se recompone y con efectos expansivos al bajar la temperatura en el hormigón endurecido, dando lugar a la denominada en este caso formación tardía de etringita (“delayed ettringite formation”, DEF), [5,11]. En Rocco et al. [1] se ha ensayado experimentalmente un hormigón afectado de DEF, y se han determinado propiedades mecánicas como el módulo de Young, la resistencia a tracción y la energía de fractura para diferentes niveles de expansión.

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas meso-mecánicas de un hormigón sometido a acciones expansivas internas, cuyos resultados obtenidos en términos de la degradación del módulo de elasticidad y de la resistencia a tracción se comparan con los obtenidos experimentalmente en [1]. También se muestran aspectos de la fisuración y de la energía de fractura disipada, que se correlacionan con el grado de expansión y la evolución de los parámetros mecánicos.

2. MODELIZACIÓN MESOESTRUCTURAL

Un planteamiento bastante completo y potente de abordar el estudio de materiales heterogéneos como el hormigón consiste en representar explícitamente la estructura interna de primer nivel (meso-estructura), y reproducir el comportamiento “macro” del material como resultado del análisis mecánico a nivel “meso”. Desde hace aproximadamente unos 15 años, dentro del grupo de investigación del Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSECCPB-UPC, se viene desarrollando una metodología inicialmente en 2D y más recientemente en 3D, para el análisis mesomecánico de materiales heterogéneos, en especial para hormigón. El modelo consiste en la representación explícita en una discretización por el método de los elementos finitos (FEM), de las tres fases componentes principales de la estructura interna del hormigón a un nivel de observación a mesoescala. 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. Rodeando a la fase granular se discretiza una matriz homogénea, que representa al mortero más los áridos de menor tamaño. Finalmente, se incluye en la malla una retícula de elementos junta sin espesor, distribuidos a lo largo de todos los contactos entre elementos de áridos 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. En la figura 1 se presenta una malla de elementos finitos 2D, a la izquierda los áridos de mayor tamaño en color azul y la matriz en color gris, y a la derecha la retícula de elementos junta.

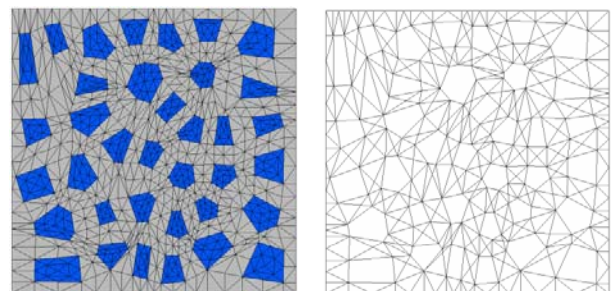


Figura 1. Malla de elementos finitos (izquierda) y retícula de elementos junta (derecha).

Para el comportamiento de 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, formulada en términos de la componente normal y tangencial de las tensiones en el plano medio de la junta y los desplazamientos relativos correspondientes. El criterio de fractura F se define mediante una hipérbola de tres parámetros (la resistencia a tracción, χ , y los parámetros $\tan\phi$ y c de la asíntota que representan el ángulo de fricción entre las caras de la fisura y la cohesión aparente,

respectivamente). Una vez iniciada la fisuración, la superficie de fractura se contrae mediante el decrecimiento de los parámetros de la hipérbola en función de unas leyes basadas en el trabajo consumido en el proceso de fractura. Para controlar este proceso, el modelo posee dos parámetros que representan la energía de fractura clásica en modo I, G_F^I (tracción pura) y un segundo modo denominado Modo IIa definido bajo corte y alta compresión sin dilatación, G_F^{IIa} . La regla de flujo es no asociada, con una ley de dilatación que disminuye progresivamente con el nivel de compresión $\sigma \rightarrow \sigma^{dil}$ y con la degradación de la junta $c \rightarrow 0$. Se dispone de parámetros adicionales α_χ , α_ϕ y α_c que controlan la forma de evolución de las curvas de reblandecimiento. Una descripción más detallada se ha presentado en anteriores Congresos del Grupo Español de Fractura, así como en diversas publicaciones [4,12,13]. Resultados del modelo mesomecánico tanto a nivel 2D como 3D para distintas situaciones de carga pueden consultarse en [13-15].

3. RESULTADOS

Se analiza una muestra de 10x10 cm, con un arreglo de 6x6 áridos de 20 mm de tamaño máximo y que representan un 27% en volumen (figura 1). Los parámetros del hormigón para los elementos de medio continuo son: $E=60000$ MPa (áridos), $E=27000$ MPa (mortero) y $\nu=0.2$ (ambos); para las juntas de interfase: $K_N=K_T=100000$ MPa/mm, $\tan\phi_0=0.70$, $\chi_0=2$ MPa, $c_0=7$ MPa, $G_F^I=0.12$ N/mm, $G_F^{IIa}=10 G_F^I$, $\sigma^{dil}=40$ MPa; para las juntas de mortero-mortero, los mismos parámetros excepto para $\chi_0=4$ MPa, $c_0=14$ MPa, $G_F^I=0.24$ N/mm, $\alpha_d=-2$, $\alpha_\phi=2$ y demás parámetros igual a cero. Los principales parámetros se han adoptado de modo de ajustar adecuadamente las propiedades del hormigón sin expansión ensayado en [1]. El cálculo, en condiciones de tensión plana, se realizó aplicando primero de forma progresiva unas deformaciones impuestas hasta un determinado nivel de expansión, y luego una tracción uniaxial en control de desplazamientos. Para cada ensayo numérico correspondiente a un nivel de expansión seguido de una tracción uniaxial, se ha obtenido su curva completa tensión-deformación, y en particular el módulo de Young y la resistencia a tracción (valor de pico).

Dado el tipo de ASI considerado, se han impuesto deformaciones sólo en la fase de la matriz. La acción expansiva se ha aplicado mediante deformaciones impuestas en cada nodo de la matriz, de manera equivalente al caso de incrementos de temperatura. En nuestra modelización mesoestructural la matriz representa una fase en realidad heterogénea constituida por la pasta de cemento (donde se producirían las expansiones), arena y los áridos de menor tamaño, distribuidos de forma aleatoria, por lo cual cabría esperar una distribución no uniforme de la expansión en un medio homogéneo equivalente. En primer término se efectuaron cálculos con una evolución de deformaciones

constantes en la matriz, y posteriormente se ha obtenido una distribución no uniforme mediante una variación aleatoria en cada nodo, a partir de un rango establecido de distorsión alrededor del valor uniforme.

En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados numéricos de la variación del módulo de elasticidad y la resistencia a tracción para el caso de deformaciones variables en la matriz. También se incluyen los resultados experimentales de Rocco et al. [1], que han utilizado 5 cementos distintos con diferentes contenidos de sulfatos a fin de obtener los distintos niveles de expansión. Si bien los ensayos experimentales y los numéricos se han realizado de distinta manera, los resultados son comparables (en los experimentos la resistencia a tracción se obtuvo mediante el ensayo brasileño y el módulo de Young a partir de una viga de tres puntos). Como se puede apreciar en ambas figuras, los resultados del modelo concuerdan en un alto grado con los experimentales. Se puede observar que en los resultados numéricos la reducción del módulo de Young presenta una caída brusca en los primeros niveles de expansión, seguida de una evolución más atenuada, aspecto que no puede constatare en los experimentos dada la ausencia de datos en ese rango de expansiones.

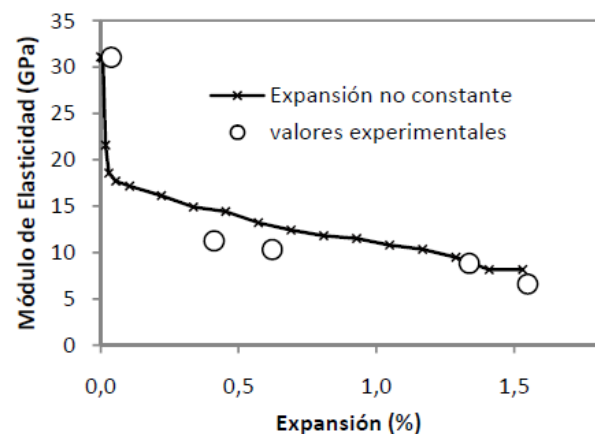


Figura 2. Variación del módulo de elasticidad con la expansión.

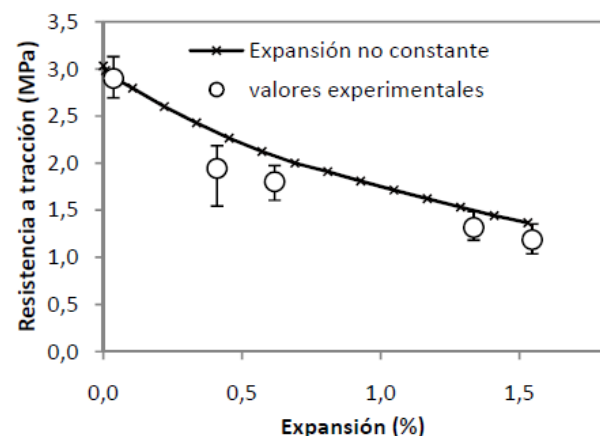


Figura 3. Variación de la resistencia a tracción con la expansión.

La figura 4 muestra el estado de fisuración de la malla con 1,53% de expansión (no uniforme), en términos de la energía disipada en el proceso de fractura, representada por el espesor de línea en cada punto de las juntas, en color rojo si la fisura está activa y en azul si se encuentra en descarga elástica. Se puede observar en la figura de la izquierda que la degradación se localiza principalmente en las juntas de interfase, y en menor medida en la matriz cuya distribución se muestra a una escala mayor en la figura de la derecha.

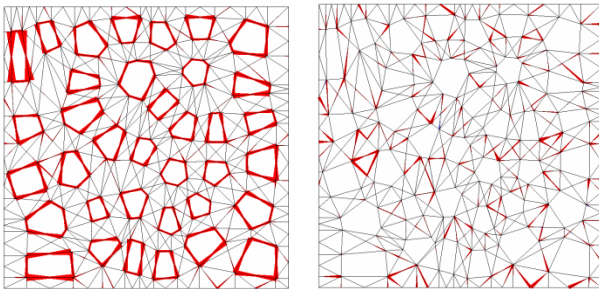


Figura 4. Estado de fisuración al 1,53% de expansión (izq) y sólo para la matriz a una escala mayor (der).

La figura 5 muestra las curvas tensión-desplazamiento en tracción uniaxial para distintos niveles de expansión no uniforme. Se puede apreciar que con el aumento de la expansión disminuyen progresivamente el módulo de Young y el valor máximo de tensión (con aumento de la deformación de pico), si bien no se aprecian diferencias significativas en las ramas de reblandecimiento (“softening”), que resultan bastante similares en todas las curvas. Esto es indicativo de un similar gasto de energía en el proceso de nucleación y localización de la fractura en cada uno de los casos, tal como puede observarse en la figura 6. En los gráficos de la izquierda se aprecia que la energía disipada en la macrofisura para el caso sin expansión, se mantiene aunque superpuesta con un aumento creciente de la degradación en las interfases (que mayoritariamente entran en descarga con la localización), a medida que aumenta el nivel de expansión. Como en los gráficos en términos de la energía disipada influye considerablemente el modo de fractura actuante (diferentes valores de G_F^I y G_F^{IIa}), el efecto de localización se puede apreciar más claramente en los gráficos de la malla deformada (fig. 6 derecha). Este aspecto concuerda cualitativamente con los resultados de [1], que han registrado similares valores de la energía de fractura con la variación de expansión.

Desde el punto de vista de los resultados del modelo numérico, resulta interesante reflejar la influencia diferenciada de la degradación de las juntas de interfase y las de la matriz. Una deformación uniforme impuesta en la matriz sólo afecta a las juntas de interfase árido-matriz. En las figuras 7 y 8 se presenta la variación en función del nivel de expansión, del módulo de elasticidad y la resistencia a tracción en valores normalizados con respecto al caso sin expansión, para los dos ejemplos numéricos (expansión uniforme y no uniforme), junto con los resultados experimentales.

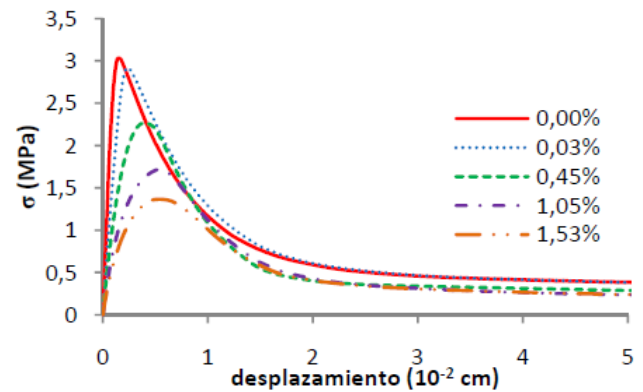


Figura 5. Curvas de tensión-desplazamiento en tracción pura para diferentes niveles de expansión.

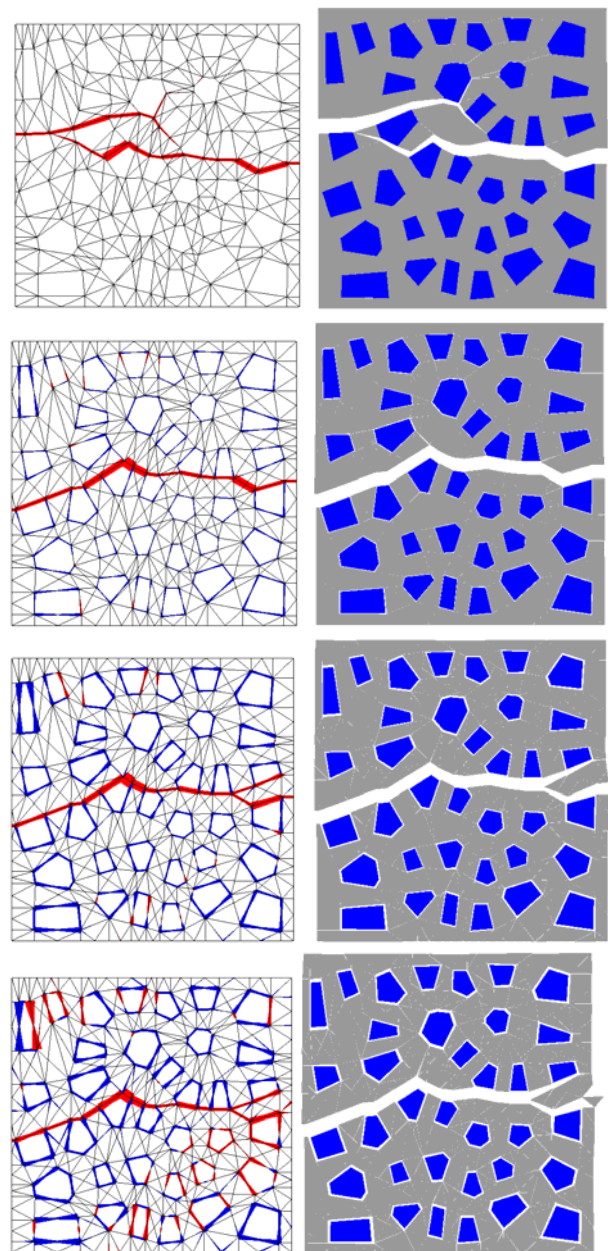


Figura 6. Estado de fisuración (izquierda) y malla deformada (derecha) en el estado final para una expansión de 0, 0.45, 1.05 y 1.53%, de arriba a abajo.

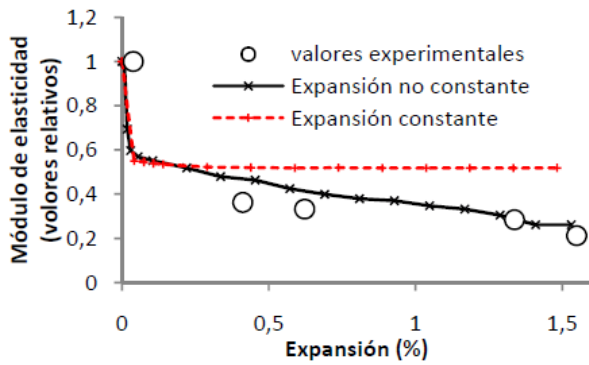


Figura 7. Variación del módulo de elasticidad normalizado con la expansión.

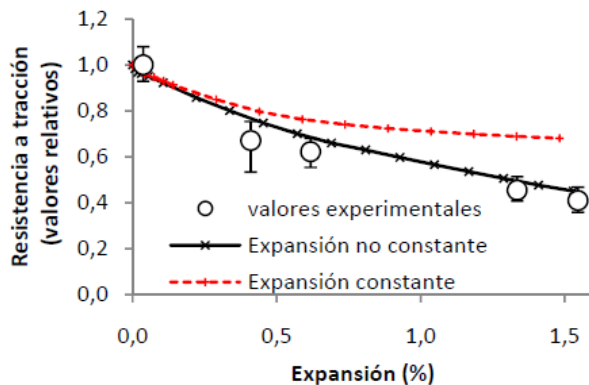


Figura 8. Variación de la resistencia a tracción normalizada con la expansión.

En la figura 7 se puede apreciar que los dos casos numéricos prácticamente coinciden hasta una expansión de aproximadamente el 0,03%, en que ambas tendencias cambian, y mientras el caso no uniforme sigue una degradación más atenuada, en el caso uniforme el módulo permanece constante con el aumento de la expansión, incluso para valores muy elevados. Por su parte, en la figura 8 se observa que en los dos casos numéricos hay una degradación progresiva de la resistencia a tracción con la expansión, lógicamente de mayor magnitud para la deformación impuesta variable. Los resultados parecen indicar que la evolución del módulo de elasticidad depende de la extensión de la degradación, mientras que la reducción de resistencia se ve afectada también por la intensidad del deterioro. A fin de evaluar estos factores, para cada nivel de expansión se ha calculado la longitud total de fisuración, obtenida como la suma de la longitud de todas las juntas abiertas en la malla, y el total de energía disipada, resultado de integrar la energía a lo largo de las juntas abiertas (expresada en: energía disipada [N/mm] x longitud [mm]). En la figura 9 se presenta la relación entre el grado de expansión y la longitud total de fisuración. Se observa que inicialmente se activan las juntas de interfase hasta completar toda su longitud en un rango relativamente bajo de expansión. Luego, en el caso no uniforme se van abriendo progresivamente juntas de la matriz de una forma mucho más atenuada con respecto al aumento del nivel de expansión.

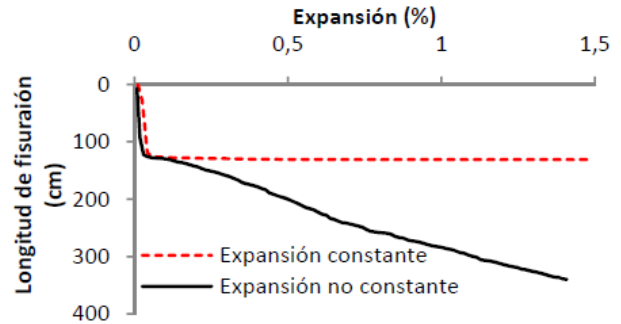


Figura 9. Variación de la longitud total de fisuración con la expansión

En la figura 10 se presenta la relación entre el nivel de la expansión y la energía disipada total. Para cada caso, se incluye también la energía disipada sólo por las juntas de interfase. Se puede apreciar en el gráfico una relación aproximadamente proporcional entre la energía disipada total del caso no uniforme y la expansión. También se observa que prácticamente coincide la evolución de la energía total disipada en las juntas de interfase para ambos casos de expansión.

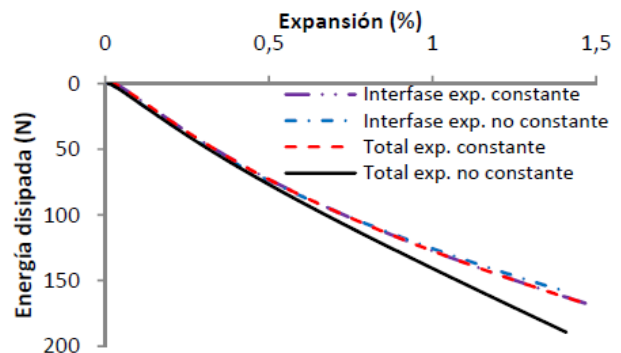


Figura 10. Variación de la energía disipada con la expansión.

Las figuras 9 y 10 muestran que el comportamiento de las juntas de interfase es muy similar en ambos casos, deformaciones uniformes y variables en la matriz, y por lo tanto su diferencia corresponde a la degradación de las juntas de mortero en el caso no uniforme. En el modelo numérico, en primer lugar se abren todas las juntas de interfase, debido a las propiedades resistentes más débiles que las de mortero que se han adoptado (a fin de reflejar las características de un hormigón convencional) y al efecto diferenciado de unas deformaciones impuestas sólo en la matriz. El caso de deformaciones uniformes pone de manifiesto que una vez abiertas todas las interfases, al continuar el deterioro (disminución de resistencia al aumentar la energía disipada en estas juntas) con el aumento del nivel de expansión, se afecta lógicamente la resistencia a tracción de la muestra, pero no el módulo de Young. Las similares características entre las figuras 7 y 9 indican una relación directa entre la degradación del módulo de elasticidad y el aumento de la longitud total de fisuración, tal como se refleja en la figura 11. Se

puede apreciar en la figura una tendencia aproximadamente lineal, con una reducción de la pendiente al comenzar la degradación de las juntas de mortero. De manera similar, las figuras 8 y 10 permiten relacionar la resistencia a tracción y la energía disipada total, cuya evolución se muestra en la figura 12.

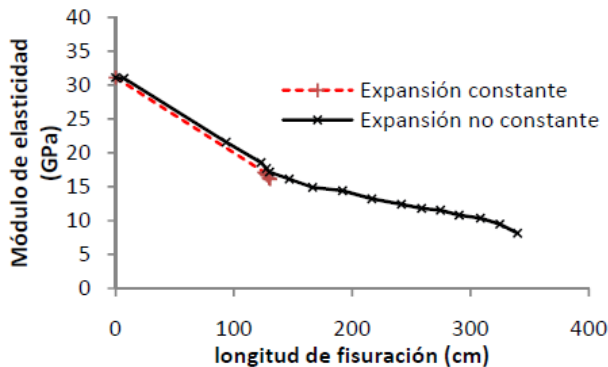


Figura 11. Variación del módulo de elasticidad con la longitud de fisuración.

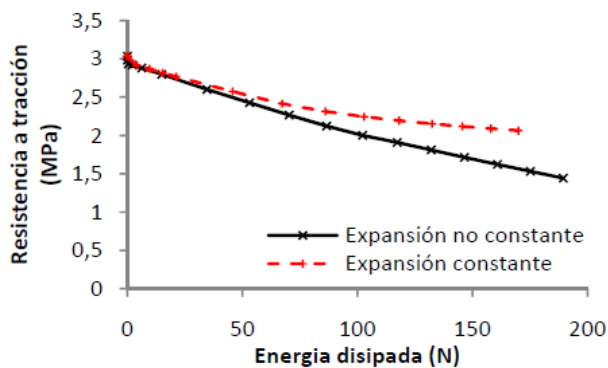


Figura 12. Variación de la resistencia a tracción con la energía disipada.

4. CONSIDERACIONES FINALES

Se ha empleado un modelo mesoestructural con elementos junta para estudiar la degradación de algunas propiedades mecánicas de un hormigón sometido a acciones expansivas internas. Los resultados numéricos obtenidos concuerdan en un alto grado con resultados experimentales realizados en un hormigón afectado por la formación tardía de etringita. Un aporte interesante de la modelización es que ha permitido relacionar el nivel de expansión con el grado de deterioro y microfisuración de la muestra, definido en términos de la longitud total de fisuración en las juntas que se ha visto que incide de forma determinante en la degradación del módulo de Young, y la energía disipada a lo largo de las juntas activadas que influye de manera directa sobre la disminución de la resistencia a tracción. Los trabajos en curso se orientan a profundizar estudios previos sobre expansiones del hormigón debidas al ataque sulfático interno originado por la oxidación de sulfuros de hierro contenidos en los áridos utilizados en algunas presas ubicadas en el Pirineo español.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo se ha desarrollado en el marco de los convenios entre UPC y las empresas Endesa Generación S.A. e Iberdrola S.A (Proyecto Horex). Se hace constar la beca FPU (MEC) concedida al primer autor. El segundo autor agradece la ayuda recibida a través del proyecto BIA2009-10491 (MICINN).

REFERENCIAS

- [1] Rocco, C., Giandrasso, F., Bergol, L., Di Pace, G., Planas, J., "Fracture properties of concrete exposure to delayed ettringite formation", *Proceedings of the 5th Int. Conference on fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Vail, pag. 623-630, 2004.
- [2] Aguado, A., Agulló, L., Casanova, I., López, C. M., "Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura." *Comité Español de Grandes Presas. Premio Torán*, 103 p, 1998.
- [3] Casanova, I., López, C.M., Aguado, A., Agulló, L., "Micro and mesoscale modeling of expansion in concrete dams". In Berga, L (Ed.), *Dam Safety*, Balkema, Rotterdam, pag. 661-667, 1998.
- [4] López, C. M., "Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones", *Tesis Doctoral, ETSECCPB, UPC*, Barcelona, 1999.
- [5] Brunetaud, X., Divet, L., Damidot, D., "Impact of unrestrained delayed ettringite formation-induced expansion on concrete mechanical proprieties", *Cement and Concrete Research*, 38, pag. 1343-1348, 2008.
- [6] Zhang, Z., Olek, J., Diamond, S., "Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars I. Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity, and weight gains", *Cement and concrete Research*, 32, pag. 1729-1736, 2002.
- [7] Larive, C., "Apport combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et ses effets mécaniques", *PhD, LCPC*, Paris, 1997.
- [8] Capra, B., Sellier, A., "Orthotropic modeling of alkali-aggregate reaction in concrete structures: numerical simulations", *Mech. of Materials*, 35, pag 817-830, 2003.
- [9] Jones A. E. K., Clark, L. A., "The effect of AS Ron the properties of concrete and implications for assessment", *Engineering Structures*, 20, pag. 785-791, 1998.
- [10] Piasta, W. G., Schneider, U., "Deformations and elastic modulus of concrete under sustained compression and sulphate attack", *Cement and Concrete Research*, 22, pag. 149-158, 1991.
- [11] Glasser, F. P., "The stability of ettringite", *Int. RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation*, Villars, pag. 43-64, 2002.
- [12] Carol, I., Prat, P. C., López, C.M. "A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis", *J. Engng. Mech. ASCE*, 123, pag. 765-773, 1997.
- [13] López, C. M., "Meso-structural study of concrete fracture using interface element. I: numerical model and tensile behavior". *Materials and Structures*, 41, nº3, pag. 583-599, 2008.
- [14] López, C. M., Carol, I., Aguado, A., "Meso-structural study of concrete fracture using interface element II: compression, biaxial and Brazilian test". *Materials and Structures*, 41, nº3, pag. 601-620, 2008.
- [15] Caballero, A., López, C.M., Carol, I., "3D meso-structural analysis of concrete specimens under uniaxial tension". *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195, pag. 7182-7195, 2006.