

ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL DE LA FLUENCIA BÁSICA DEL HORMIGÓN MEDIANTE ELEMENTOS JUNTA.

C.M. López^{*}, D. Ciancio^{**}, I. Carol^{*}, J. Murcia^{***} y M. Cuomo^{**}

^{*}ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona

^{**}Università degli Studi di Catania, Italia

^{***}ICMAB-CSIC, Bellaterra (Barcelona)

Resumen. Durante los últimos años se ha venido desarrollando un modelo microestructural para materiales heterogéneos basado en elementos junta de espesor nulo. En este trabajo se presenta la aplicación del modelo en la simulación del comportamiento de la fluencia básica del hormigón (sin cambios de humedad). Para ello, el comportamiento de los áridos se mantiene elástico lineal, mientras que para la matriz de mortero se considera un comportamiento visco-elástico lineal mediante el modelo de la "cadena de Maxwell". Se ha reformulado la ley constitutiva de junta a fin de incorporar el tiempo como variable, y poder definir las leyes de evolución de los parámetros de la superficie de carga, no sólo en función del trabajo de fractura, sino también en función del tiempo. Esto ha permitido tener en cuenta la variación de resistencia de la muestra con el aumento de la edad de carga. Se ha simulado satisfactoriamente la fluencia básica para distintas edades de la puesta en carga y diferentes niveles de carga aplicada. El modelo es capaz de reproducir aspectos importantes observados en los ensayos experimentales, tales como la pérdida de proporcionalidad entre tensiones y deformaciones con el aumento de la carga aplicada, y la rotura diferida. También se puede visualizar un proceso de redistribución interna de tensiones para una carga constante, lo cual da lugar a un proceso de evolución de la fisuración a lo largo del tiempo.

Abstract. In recent years a micro structural model for heterogeneous materials, based on zero-thickness interface elements, has been developed. In this work, the model has been used in the simulation of basic creep concrete behavior (without taking into account humidity changes). The material has been discretized through linear elastic aggregates and linear viscoelastic matrix whose behavior is represented by aging Maxwell chain. The new formulation of the interface constitutive law introduces time variables in order to make the parameters' evolution depend not only on the fracture dissipative work, but also on time. With such improvement, different compressive strengths according to different ages of the specimens can be simulated. Satisfactory results have been obtained for basic creep in different ages and load rates. The model is able to reproduce important features of experimental concrete tests, such as loss of proportionality between stress and strain as load increases, and delayed failure. The results also show the internal stress redistribution under constant load and increasing time that generates fracture evolution as time passes.

1. INTRODUCCIÓN

En el análisis tradicional de estructuras constituidas por materiales cuasifrágiles como el hormigón, el material suele considerarse como un medio continuo homogéneo, si bien es sabido que su comportamiento viene claramente influenciado por la geometría y las propiedades mecánicas de los componentes de la estructura heterogénea del material. Desde hace algunos años, coincidiendo con el creciente aumento de la capacidad de cálculo de los ordenadores, se vienen proponiendo modelos que discretizan la estructura interna de primer nivel del hormigón (a veces también llamada mesoestructura) [1-3].

El grupo de investigación sobre comportamiento mecánico de materiales del Departamento de Ingeniería del Terreno de la ETSECCPB-UPC ha desarrollado un modelo mesoestructural en dos dimensiones (2D) para materiales heterogéneos, basado en elementos junta de espesor nulo. En este

modelo, la estructura interna del material se representa explícitamente y las interfases se insertan a priori entre los elementos estándar del medio continuo, a lo largo de las principales potenciales trayectorias de fisuración. Los resultados obtenidos para hormigón han permitido reproducir el comportamiento experimental observado en distintas situaciones de carga instantánea, tales como tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc. [4-6]. En este trabajo se presenta la aplicación del modelo a la simulación del comportamiento diferido básico del hormigón (sin cambios de humedad). Para ello, una probeta de hormigón de 14x14 cm de lado se representa mediante piezas irregulares correspondientes a los áridos de mayor tamaño rodeadas por una matriz representativa del comportamiento del mortero y los áridos de menor tamaño (Fig. 1). Los áridos y la matriz se discretizan mediante elementos finitos triangulares, pero mientras que a los áridos se les asigna un comportamiento elástico lineal, para la matriz de mortero se considera

una ley constitutiva visco-elástica lineal mediante el modelo de la “cadena de Maxwell”. A fin de posibilitar la no linealidad de comportamiento, mecanismos de rotura y fisuración, etc., la malla de elementos finitos (EF) incluye elementos junta sin espesor que se distribuyen a lo largo de todos los contactos entre elementos árido-mortero (interfase) y entre algunos de los contactos de la matriz, con el fin de representar las principales direcciones potenciales de fisuración. Con el fin de simular unas condiciones de análisis más aproximadas a las reales (en las cuales se prescribe la tensión promedio sobre el lado superior de la probeta pero al mismo tiempo los desplazamientos verticales son prácticamente uniformes debido a la rigidez del plato de carga), también se ha discretizado el plato de carga superior, así como la interfase hormigón-plato (Fig. 1).

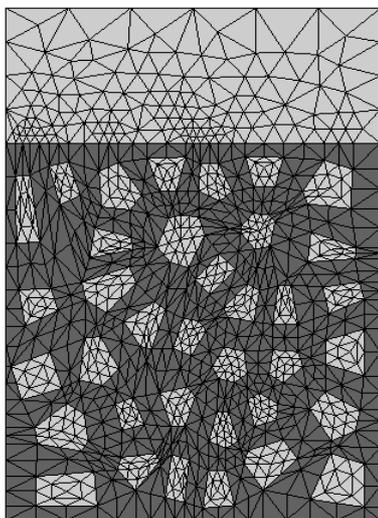


Fig. 1. Malla de EF de una muestra de hormigón de 14x14 cm de lado que incluye el plato de carga superior.

2. MODELO VISCO-ELÁSTICO PARA LA MATRIZ DE MORTERO

Para el estudio de la fluencia del hormigón, el comportamiento de los áridos se mantiene elástico lineal, mientras que para la matriz de mortero se considera un comportamiento visco-elástico lineal con envejecimiento mediante el modelo de la “cadena de Maxwell” (Fig. 2). Este modelo resulta equivalente al desarrollo en serie de Dirichlet de la función de relajación $R(t, t_0)$, función de relación “dual” respecto a la habitualmente conocida función de fluencia $J(t, t_0)$, siendo t_0 la edad de aplicación de la carga y t el instante en el que se desea conocer el valor de la función. Los modelos reológicos de formulaciones diferenciales tienen ventajas fundamentales para el análisis numérico frente a formulaciones integrales, ya que no requieren conservar en todo momento la historia completa de deformaciones en cada punto de integración [7]. Si bien sólo el mortero presenta un

comportamiento dependiente del tiempo, por lo general, la función de fluencia se determina globalmente para el hormigón mediante expresiones que ajustan resultados obtenidos experimentalmente. Como en nuestra simulación mesoestructural las principales fases del material se representan explícitamente, entonces los parámetros de la Cadena de Maxwell para la matriz tienen que ser ajustados de modo de obtener el comportamiento visco-elástico global deseado. En nuestro caso, el ajuste se ha hecho con respecto a la función de fluencia $J(t, t_0)$ dada en el código español [8], según se muestra en los trabajos iniciales sobre el tema presentados en [9].

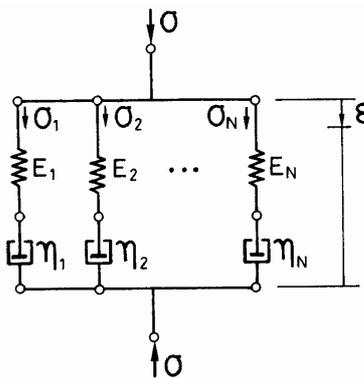


Fig. 2. Modelo reológico “Cadena de Maxwell”.

3. LEY CONSTITUTIVA DE JUNTA

La ley constitutiva de junta con envejecimiento tiene como punto de partida la formulación propuesta originalmente en el modelo denominado “multicrack” [10], posteriormente modificada y mejorada en [11,5,6]. El comportamiento está formulado en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano de la junta, $\sigma = [\sigma_N, \sigma_T]^t$ y los desplazamientos relativos correspondientes $u = [u_N, u_T]^t$ (t = transpuesta). El modelo, basado en la teoría de la elasto-plasticidad, utiliza conceptos de la Mecánica de Fractura a fin de establecer el reblandecimiento debido al trabajo disipado en fractura, e incorpora el tiempo como variable para tener en cuenta el endurecimiento con el paso del tiempo. La superficie de rotura $F = 0$ se define mediante una hipérbola de tres parámetros que se muestran en la figura 3 (la resistencia a tracción χ y los parámetros c y $\tan\phi$ de la asíntota, que representan la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna, respectivamente). En la versión original del modelo los valores iniciales de las variables de estado, χ_0, c_0 y $\tan\phi_0$, son constantes que determinan una configuración inicial de la superficie de rotura representada por la curva “0” en la figura 4. Para tener en cuenta el aumento de resistencia del material con el paso del tiempo detectado en los ensayos experimentales, se establece una evolución de χ_0 y c_0 en función del tiempo según una ley exponencial cuya variación unitaria se muestra en la figura 5. Mediante dos parámetros se puede controlar

la forma de la curva (Fig. 5), y la relación entre el valor de las variables a 28 días (edad a la que habitualmente se refieren las características mecánicas del hormigón) y el valor final a un tiempo suficientemente prolongado (p.e. 10000 días). De esta manera, la superficie de rotura para una determinada edad inicial de carga se expande con el tiempo como se muestra por ejemplo en la curva "1" de la figura 4.

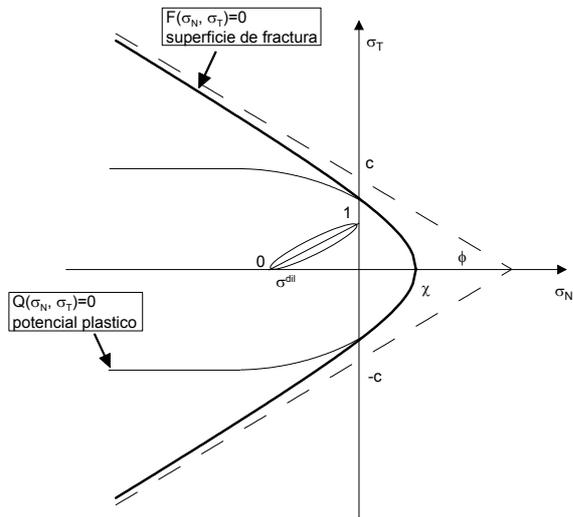


Fig.3. Modelo de junta: superficie de rotura y potencial plástico.

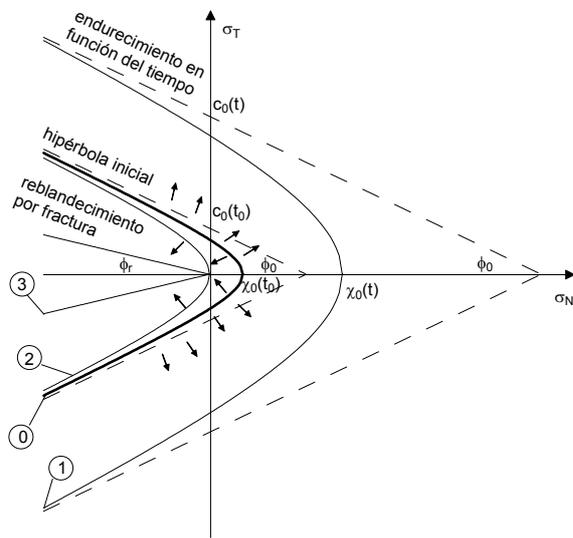


Fig.4. Evolución de la superficie de rotura: reblandecimiento por trabajo de fractura y endurecimiento debido al tiempo.

Por otra parte, conjuntamente con la evolución de la hipérbola en función del tiempo, y siguiendo el planteo original del modelo, una vez iniciada la fisuración, la superficie de rotura se contrae mediante el decrecimiento de los parámetros de la hipérbola en función de unas leyes basadas en el trabajo consumido

en procesos de fractura, W^{cf} . Para controlar el proceso de evolución de F , el modelo también 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} , que también evolucionan con el tiempo en función de una ley exponencial como la presentada en la figura 5. Para tracción pura la superficie de rotura final viene dada por una hipérbola con vértice en el origen (curva "2" en la Fig. 4). En el estado de evolución final para el cual $c = 0$ y $\tan\phi = \tan\phi_r$ la superficie de rotura queda definida por un par de líneas rectas que representan una fricción pura residual (curva "3" en la Fig. 4). Por lo tanto, dentro del proceso mecánico en que puede encontrarse una junta determinada, la evolución de la superficie de rotura puede ser una expansión o una contracción dependiendo de la combinación resultante de la evolución del estado de cargas y el paso del tiempo. El modelo es asociado en tracción $F = Q$, aunque no en compresión, donde se define una ley de dilatación para que ésta disminuya progresivamente con el nivel de compresión $\sigma \rightarrow \sigma^{dil}$ (figura 3) y con la degradación de la junta $c \rightarrow 0$.

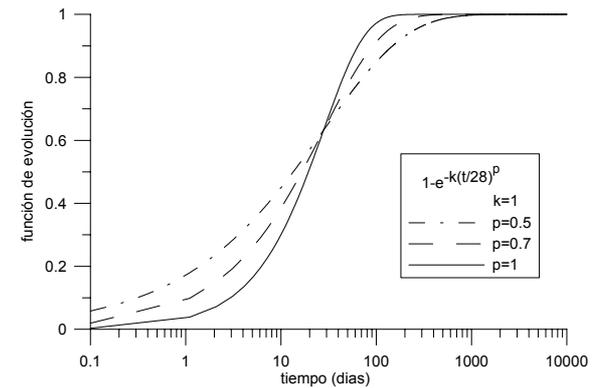


Fig.5. Ley unitaria de evolución de los parámetros de la superficie de rotura y de las energías de fractura en función del tiempo.

En la figura 6 se presentan los resultados en términos de las tensiones y los desplazamientos relativos de corte, correspondientes a la verificación del comportamiento constitutivo de junta en un ensayo de corte/compresión. En primer término se aplica un valor constante de la tensión de compresión (-1 MPa) a las edades de carga de 28 y 280 días y, posteriormente, se incrementa progresivamente el desplazamiento relativo de corte manteniendo constante la compresión. Para las curvas de carga instantánea se puede apreciar el comportamiento esperado, con un mayor valor de pico con el aumento de la edad t_0 , y un posterior reblandecimiento que presenta un punto de cambio en la tendencia de evolución, que se vuelve más atenuada debido a que χ se anula y a partir de allí la superficie hiperbólica se contrae con vértice en el origen. Finalmente, la curva de reblandecimiento tiende a una

tensión de corte residual que corresponde al efecto friccional puro. Para la edad de inicio de carga $t_0 = 28$ días, en tres puntos distintos de su curva de reblandecimiento, se suspende el incremento de carga y se deja transcurrir el tiempo hasta los 280 días, para finalmente retomar el proceso de carga hasta sus valores residuales. Se puede apreciar en la figura 6 que en el transcurso del tiempo sin incremento de carga se produce un aumento de resistencia (endurecimiento elástico) debido a la madurez de los parámetros $\chi_0(t)$ y $c_0(t)$, hasta un segundo valor de pico, en cada caso inferior a los valores de reblandecimiento de la curva instantánea de $t_0 = 280$ días, en una relación mayor en la medida que se avanza en la curva de reblandecimiento. Esto se debe a la característica tipo “daño” (irreversible) de la variable interna del proceso, que depende del trabajo disipado en el proceso de fractura y del estado actual (función del tiempo) del parámetro de energía de fractura involucrado. Lógicamente, todos los procesos de carga graficados en la figura 6 tienden al mismo valor residual. En el sector superior derecho de dicha figura, se muestra las superficies de fractura correspondientes a los puntos señalados en las curvas.

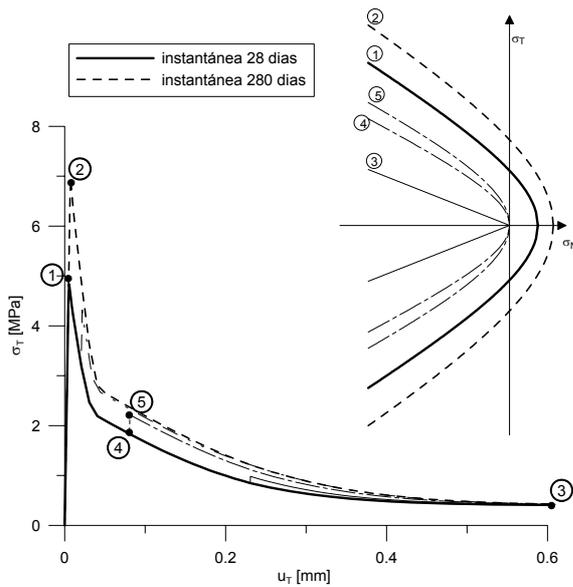


Fig.6. Comportamiento constitutivo de la junta en función del tiempo en un ensayo de corte con compresión constante.

4. MODELIZACIÓN MICROESTRUCTURAL DEL COMPORTAMIENTO DIFERIDO BÁSICO

4.1 Madurez

Para verificar el comportamiento de madurez del modelo microestructural se ha llevado a cabo un ensayo de compresión uniaxial con carga instantánea impuesta a diferentes edades. Para ello, se imponen desplazamientos uniformes verticales de valor

creciente en los nodos de la cara superior del plato de carga (los nodos del lado inferior de la probeta permanecen fijos en dicha dirección), mientras que los desplazamientos transversales se dejan libres. Los ensayos se realizan en tensión plana y las tensiones medias (nominales) en los bordes superior e inferior de la malla se obtienen sumando las correspondientes reacciones nodales y dividiéndolas por el tamaño de la muestra. En la figura 7 se presentan las curvas tensión-deformación promedio para varias edades de carga t_0 , graficadas hasta el valor de su carga máxima. Se puede apreciar en la figura que con el incremento de la edad de carga se producen dos efectos. Por un lado, el aumento del módulo de elasticidad de las curvas debido al envejecimiento de la ley visco-elástica de los elementos continuos del mortero. Por otro lado, también se genera un aumento de la resistencia (valor de pico) propiciado por la nueva formulación de la ley constitutiva de junta que permite un endurecimiento de los parámetros χ y c de la superficie de rotura con el paso del tiempo. En el ejemplo mostrado se han adoptado unos valores de los parámetros de la función exponencial de la figura 5, que ajustan con una buena concordancia la fórmula de resistencia en el tiempo dada en la normativa española [8].

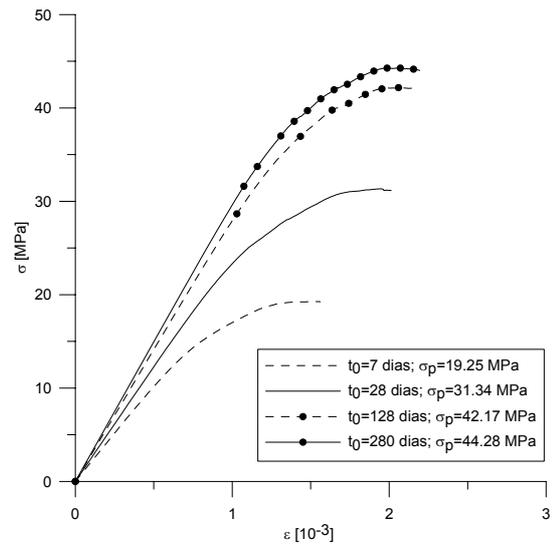


Fig.7. Curvas tensión-deformación nominal instantánea para distintas edades de carga t_0 .

4.2 Fluencia básica del hormigón

Se analiza la fluencia básica correspondiente a dos distintas edades iniciales de la puesta en carga: 7 y 28 días. El cálculo se repite para varios niveles de tensión que se aplica a la edad t_0 correspondiente y se mantiene constante a lo largo del tiempo. En la figura 8 se muestra para ambos casos la evolución de la tensión nominal y la deformación, representada en la forma tradicional de “curvas isocronas”. La curva envolvente situada más a la izquierda corresponde al diagrama tensión-deformación “instantáneo” (obtenido hasta el

valor de su carga máxima). Cada uno de los cálculos de fluencia sigue esa curva hasta el nivel de tensión deseado, y a partir de allí se mueven horizontalmente, con deformación creciente mientras que la tensión permanece constante. Las “curvas isocronas” se obtienen trazando las líneas que conectan los puntos correspondientes a tiempos iguales en los distintos cálculos.

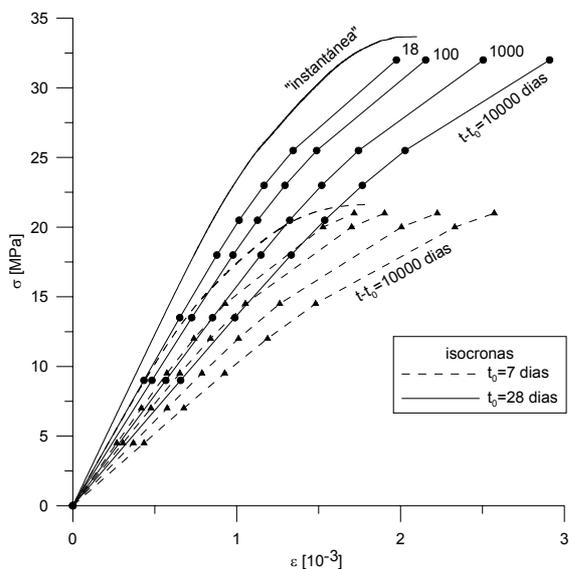


Fig.8. Diagramas de fluencia (“curvas isocronas”) para cargas aplicadas a 7 y 28 días con diferentes niveles de tensión.

De los resultados presentados en la figura 8 pueden destacarse los siguientes aspectos: a) ambas familias de curvas de fluencia reproducen cualitativamente algunos de los aspectos principales del comportamiento observado experimentalmente; b) para niveles bajos de tensión (inferiores a 0.3-0.5 de la resistencia), la respuesta resulta proporcional (líneas isocronas rectas); c) para valores superiores de la carga aplicada se produce un comportamiento no lineal progresivamente creciente; d) para tensiones cercanas al valor máximo, las simulaciones realizadas hasta el momento no alcanzan la rotura al cabo de un cierto tiempo de aplicada la tensión (rotura diferida), que sí se obtenía en los estudios iniciales con el modelo de junta sin envejecimiento [9].

En las figuras 9 y 10 se muestra la evolución de la fisuración correspondiente a los casos con t_0 de 28 y 7 días, bajo una carga constante que se mantiene mientras $t-t_0$ varía desde 0 hasta 10000 días. En estas figuras el espesor de las líneas es representativo del trabajo disipado durante el proceso de fractura en cada punto de la junta. Puede apreciarse que para $t_0 = 28$ días, bajo carga sostenida, la microfisuración se va incrementando en el tiempo (Fig. 9), mientras que para $t_0 = 7$ días se produce la descarga de varias juntas (de tonalidad más clara en Fig. 10). La evolución de la fisuración depende de dos procesos superpuestos. Por

un lado, con el paso del tiempo se produce un endurecimiento debido al efecto de madurez de los parámetros de la superficie de rotura de las interfases. Por otro lado, durante el proceso de fluencia, debido al comportamiento visco-elástico de la matriz, se genera una redistribución interna de tensiones (no mostrada), que se transfieren progresivamente desde la matriz de mortero a los áridos. Esta redistribución de tensiones produce un aumento de carga sobre las juntas, lo cual puede dar lugar a un proceso de evolución de la fisuración a lo largo del tiempo aunque la carga exterior permanezca constante.

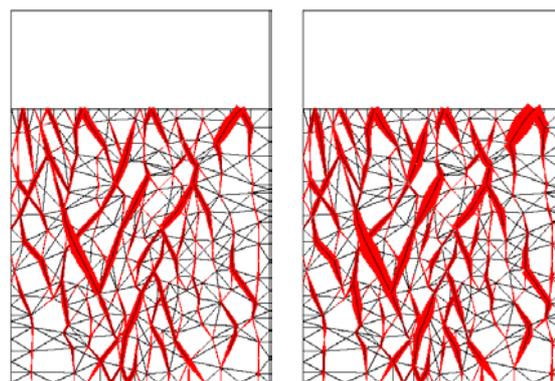


Fig.9. Evolución de la fisuración para $t_0 = 28$ días bajo carga constante: $t-t_0 = 0$ (izquierda) y $t-t_0 = 10000$ días (derecha).

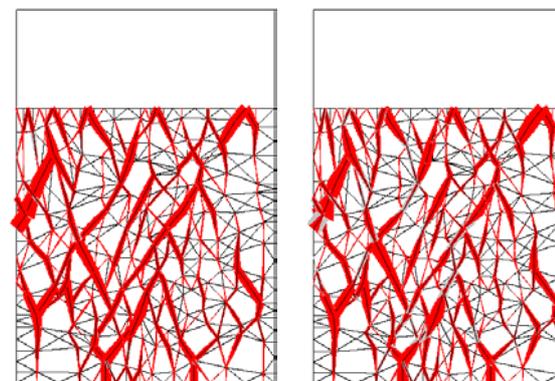


Fig.10. Evolución de la fisuración para $t_0 = 7$ días bajo carga constante: $t-t_0 = 0$ (izquierda) y $t-t_0 = 10000$ días (derecha).

La evolución que finalmente siga la fisuración a lo largo del tiempo depende de la combinación de estos dos procesos, y del papel que en cada uno de ellos jueguen los parámetros de resistencia y envejecimiento de las juntas y la función de fluencia para la matriz de mortero que se adopten. En el ejemplo presentado en este trabajo se puede apreciar que para $t_0 = 7$ días resulta predominante el efecto del endurecimiento de los parámetros de la junta y por lo tanto la tendencia de fisuración general entra en descarga, mientras que para $t_0 = 28$ días el proceso de fisuración se va

incrementando debido al predominio del efecto de redistribución interna de tensiones. En los resultados iniciales de fluencia con $t_0 = 28$ días presentados en [9], llevados a cabo con los mismos parámetros pero con una ley de junta sin envejecimiento, el proceso de evolución de la fisuración en el tiempo ha resultado entonces más acentuado, lo cual parece justificar que en esas condiciones se haya arribado a la rotura diferida para un valor de tensión constante cercano al valor máximo instantáneo.

5. CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo se ha presentado la aplicación de un modelo microestructural para materiales heterogéneos (desarrollado dentro del propio grupo de investigación de los autores) en la simulación de algunos aspectos del comportamiento diferido del hormigón: el envejecimiento (madurez) y la fluencia básica (sin cambios de humedad). Para ello, previamente, se ha desarrollado y verificado una ley constitutiva de junta que permite tener en cuenta, además de un reblandecimiento por trabajo de fractura (versión original del modelo), también el endurecimiento (madurez) del material con el paso del tiempo. Esto ha permitido tener en cuenta la variación de resistencia con el aumento de la edad de carga, t_0 y permite simular otro de los fenómenos típicos del comportamiento diferido del hormigón: la disminución de resistencia por fluencia (cansancio) actualmente en estudio. El modelo es capaz de reproducir aspectos importantes de la fluencia básica a distintas edades de la puesta en carga observados en los ensayos experimentales, como la pérdida de proporcionalidad entre tensiones y deformaciones con el aumento de la carga aplicada. También se ha podido visualizar una redistribución interna de tensiones, transferidas progresivamente desde la matriz a los áridos, que da lugar a un proceso de fisuración a lo largo del tiempo para una carga constante. Dado que con las modificaciones incorporadas, en el proceso también interviene la madurez del material, se requiere un mejor ajuste de los parámetros con ensayos experimentales adecuados, a fin de evaluar el comportamiento de fluencia básica para cargas de un valor más alto, cercanas al valor de resistencia instantánea, y analizar en mayor profundidad el fenómeno de rotura diferida. Estos estudios forman parte de un programa de investigación más amplio que incluyen procesos de difusión de humedad, y que mediante un análisis acoplado mecánico-difusión, integran los comportamientos de fluencia básica, retracción, fluencia por secado, así como otros procesos de difusión que inciden en la durabilidad del hormigón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MCYT (Madrid) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación

MAT2000-1007. El primer autor quiere agradecer al MCYT la incorporación al sistema español de ciencia y tecnología mediante el "Programa Ramón y Cajal". Finalmente, se agradece a la ETSECCPB-UPC la bolsa de viaje concedida para asistir al XX Encuentro del Grupo Español de Fractura.

7. REFERENCIAS

- [1] Roelfstra P.E., Sadouki, H. and F.H. Wittmann F.H., "Le béton numerique". *Materials and Structures*, 18:309-317 (1985).
- [2] Stankowski, T., "Numerical simulation of progressive failure in particle composites". PhD thesis, Dept. CEAE, University of Colorado, Boulder, CO 80309-0428, USA (1990).
- [3] Vonk, R., "Softening of concrete loaded in compression". PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, Netherlands (1992).
- [4] López, C., Carol, I., Aguado, A., "Modelización microestructural de la fractura del hormigón. I: tracción y compresión uniaxial y ensayo brasileño", XIX Encuentro del Grupo Español de Fractura, Gerona, 13-15 de marzo (2002).
- [5] López, C. M., "Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones". Tesis Doctoral. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España (1999).
- [6] Carol, I., López C. M. y Roa, O., "Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements", *Int. J. Numer. Meth. in Engrg.* Vol 52, 193-215 (2001).
- [7] Carol I. and Bažant Z.P., 1993. Viscoelasticity with aging caused by solidification of a non-aging constituent. *ASCE J. Engrg. Mech.* (1993) **119**: 2252-2269.
- [8] EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, (1991).
- [9] López, C., Carol, I., Murcia, J. y Ciano, D., "Modelización microestructural de la fractura del hormigón. II: influencia de la variación de la altura de la probeta y estudios de fluencia básica", XIX Encuentro del Grupo Español de Fractura, Gerona, 13-15 de marzo (2002).
- [10] Carol, I. y Prat, P.C., "A statically constrained microplane for the smeared analysis of concrete cracking". En Bicanic and Mang, editors, *Computer aided analysis and design of concrete structures*, 919-930 (1990).
- [11] Carol, I., Prat, P. C. y López, C. M., "A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis", *J. of Engineering Mechanics*, 123, No 8 (1997).