

FORMULACIÓN DE UNA LEY CONSTITUTIVA DE JUNTA CON ENVEJECIMIENTO. APLICACIÓN AL COMPORTAMIENTO MESO-ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN

Carlos López*, Ignacio Carol* y Andrés Idiart*

* ETSECCPB-Universidad Politécnica de Cataluña
Jordi Girona 1-3, Campus Nord, Módulo D2, CP 08034, Barcelona, España
e_mail: carlos.maria.lopez@upc.edu, ignacio.carol@upc.edu, andres.idiart@upc.edu

Palabras Clave: ley constitutiva de elementos junta, elastoplasticidad y fractura, meso-estructura, madurez y retracción del hormigón.

Resumen. *Una forma consistente de analizar el problema de la fractura en materiales cuasifrágiles es mediante los llamados elementos junta de espesor nulo, pues permiten integrar de un modo natural el “Fictitious Crack Model” (modelo de la fisura ficticia) de Hillerborg¹ en un análisis numérico mediante el método de los elementos finitos. El comportamiento de estos elementos especiales se formula en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano medio de la junta y los desplazamientos relativos correspondientes. Por otra parte, los ensayos experimentales sobre probetas de hormigón ponen de manifiesto un aumento de resistencia con el paso del tiempo, fenómeno conocido como madurez. Para tener en cuenta estos aspectos se ha desarrollado un modelo constitutivo de junta basado en la teoría de la elasto-plasticidad, que utiliza conceptos de la Mecánica de Fractura a fin de establecer el reblandecimiento debido al trabajo disipado en procesos de fractura, e incorpora el tiempo como variable para simular el comportamiento de endurecimiento (madurez). En este artículo se incluye, en primer lugar, una detallada descripción de la formulación del modelo, y algunos ejemplos de verificación del comportamiento constitutivo (a nivel punto de Gauss). Luego, se presentan dos aplicaciones a nivel mesoestructural en 2D para hormigón. Por un lado, se muestran resultados de compresión uniaxial en condiciones cuasi-estáticas a distinta edad de carga, y finalmente, se presenta un análisis de la retracción por secado del hormigón mediante un análisis acoplado higo-mecánico (HM). Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la potencialidad del modelo constitutivo de junta, sobre todo en la simulación de procesos complejos del comportamiento mecánico de materiales cuasifrágiles a un nivel de análisis mesoestructural.*

1 INTRODUCCIÓN

En el análisis numérico de problemas ingenieriles mediante el método de los elementos finitos (MEF), con frecuencia resulta conveniente el empleo de elementos junta sin espesor a fin de representar adecuadamente las discontinuidades y la fisuración. Las estructuras de hormigón fisuradas conservan aún una capacidad resistente considerable a causa de algunos fenómenos localizados en las discontinuidades, tales como el comportamiento de reblandecimiento, deslizamientos friccionales o entrelazamientos de áridos. Debido a la heterogeneidad del material, la tendencia de fisuración no resulta plana sino que presenta irregularidades, puentes y ramificaciones con caras de fisura rugosas. En un principio, diversos modelos analíticos o numéricos han considerado algunos aspectos parciales de la problemática. Más recientemente, la bibliografía recoge algunos ejemplos de leyes de interfases con acoplamiento de los efectos normal/corte y que incorporan conceptos de fractura ²⁻⁵.

Dentro del grupo de investigación de la UPC se ha trabajado intensamente desde hace años en el desarrollo de leyes constitutivas de interfase. En este trabajo la atención se centra en la incorporación en el modelo de los efectos del envejecimiento y su aplicación en el análisis meso-mecánico de algunos aspectos del comportamiento diferido del hormigón.

En la sección 2 se presenta en detalle la formulación de la ley constitutiva de junta, cuya verificación y comportamiento básico se muestra en los ejemplos de la sección 3.

A continuación, la ley constitutiva se emplea en los elementos junta que se incluyen en estudios específicos a nivel meso-estructural 2D del hormigón mediante el MEF. En este nivel de análisis la estructura interna heterogénea del material se representa explícitamente mediante piezas irregulares correspondientes a los áridos de mayor tamaño, rodeadas por una matriz representativa del mortero y áridos más pequeños. Las interfases se insertan a priori entre los elementos estándar del medio continuo, a lo largo de todos los contactos entre elementos árido-mortero (interfase) y entre algunos de los contactos de elementos de la matriz, con el objeto de representar las principales direcciones potenciales de fisuración.

En la sección 4.1 se muestran resultados de ensayos de compresión uniaxial en condiciones cuasi-estáticas a distinta edad de carga, y en la sección 4.2 se presentan resultados de la retracción por secado del hormigón mediante un análisis acoplado higo-mecánico (HM) del problema de difusión no lineal de humedad en el mortero. El acoplamiento HM se ha implementado mediante una estrategia en "staggered", en la que se emplea una misma malla de EF para ambos problemas.

2 LEY CONSTITUTIVA DE JUNTA

La ley constitutiva de junta con envejecimiento tiene como punto de partida la formulación propuesta originalmente en ⁶, posteriormente modificada y mejorada en ⁷⁻⁹. El comportamiento está formulado en términos de las componentes normal y tangencial de las tensiones en el plano medio de la junta, $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_N, \sigma_T]^t$ y los desplazamientos relativos correspondientes $\mathbf{u} = [u_N, u_T]^t$ (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 se define mediante una hipérbola de tres parámetros en el espacio de las tensiones (figura 1a), expresada de la siguiente forma:

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

donde χ es la resistencia a tracción y los parámetros c y $\tan \phi$ de la asíntota representan la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna, respectivamente. Los valores iniciales de las variables de estado, $\chi_0(t_0)$, $c_0(t_0)$ y $\tan \phi_0$, son constantes que determinan una configuración inicial de la superficie de rotura representada por la curva “0” en la figura 1c. 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} (Fig. 1b). Para tracción pura la superficie de rotura final viene dada por una hipérbola con vértice en el origen (curva “2” en la Fig. 1c). En el estado de evolución final para el cual $c = 0$ y $\tan \phi = \tan \phi_r$ la superficie de fractura queda definida por un par de líneas rectas que representan un estado de fricción pura residual (curva “3” en la Fig. 1c). Tres parámetros adicionales permiten diferentes formas de las leyes de reblandecimiento (α_χ , α_c , α_ϕ).

Para tener en cuenta la madurez del hormigón (el endurecimiento con el paso del tiempo detectado en ensayos experimentales), se introduce el tiempo como variable de evolución de los parámetros χ , c , y G_F^I del modelo (G_F^{IIa} se adopta proporcional a G_F^I) mediante una función exponencial (Fig. 2), expresada por:

$$f(t) = f(t_0) \left[1 - e^{-k \left(\frac{t}{28} \right)^p} \right] \quad (2)$$

en la cual p y k son dos coeficientes que permiten controlar la forma de la curva y la relación entre el valor de las variables a $t_0 = 28$ 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 en la curva “1” de la figura 1c. Por lo tanto, la posición actualizada de la superficie de rotura dependerá de la combinación resultante de la evolución del estado de cargas y el paso del tiempo.

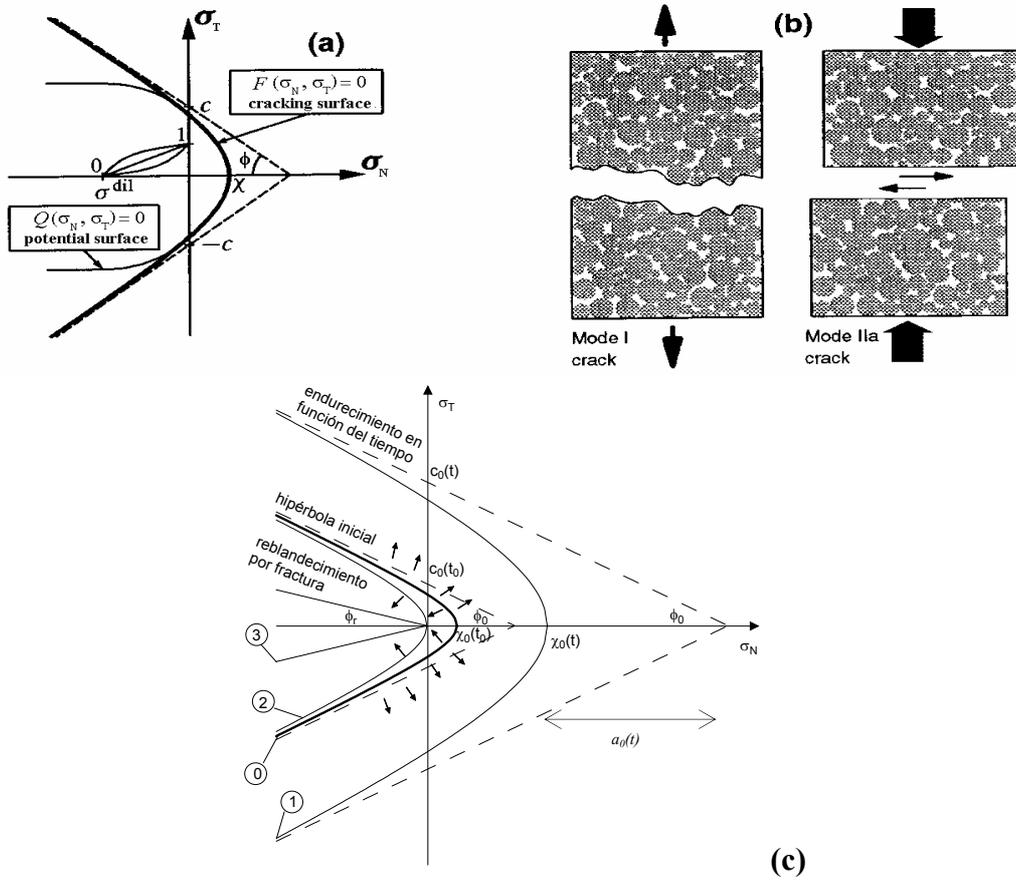


Figura 1. Modelo de junta: (a) Superficie de fractura y potencial plástico, (b) Modos de fractura básicos, (c) Evolución de la superficie de fractura gobernada por la disipación de energía (reblandecimiento) y por el efecto de envejecimiento (endurecimiento).

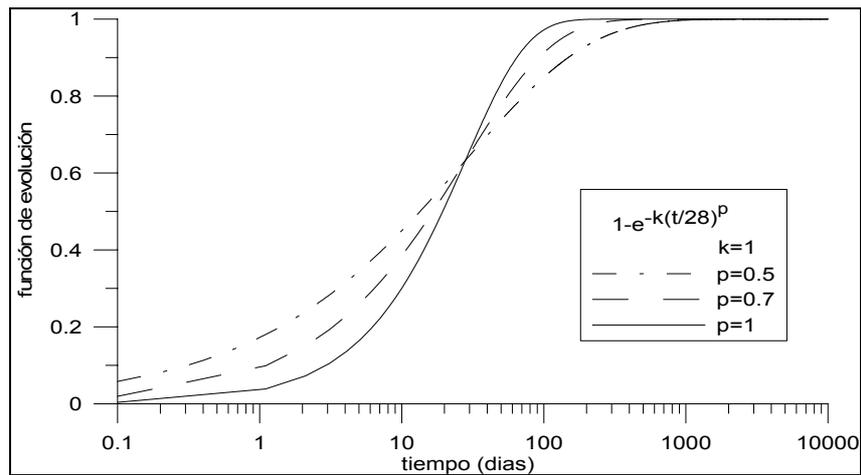


Figura 2. Ley de evolución normalizada de los principales parámetros del modelo, en función del tiempo (escala logarítmica).

2.1 Variable interna basada en el trabajo disipado en el proceso de fractura

El siguiente criterio para el cálculo del trabajo gastado en procesos de fractura (W^{cr}), que gobierna las leyes de reblandecimiento de los parámetros de $F = 0$, ha sido adoptado:

$$dW^{cr} = \sigma_N \cdot \delta u_N^{cr} + \sigma_T \cdot \delta u_T^{cr} \quad , \text{ si } \sigma_N \geq 0 \quad (3)$$

$$dW^{cr} = \sigma_T \cdot \delta u_T^{cr} \cdot \left(1 - \left| \frac{\sigma_N \cdot \tan \phi}{\sigma_T} \right| \right) \quad , \text{ si } \sigma_N < 0 \quad (4)$$

en las cuales δu_N^{cr} y δu_T^{cr} representan incrementos de desplazamientos relativos de la apertura de fisura en las direcciones normal y tangencial, respectivamente. Estas expresiones implican que en la zona de tracción/corte todo el trabajo disipado en la junta proviene de procesos de fractura, mientras que en la zona de compresión/corte la contribución a W^{cr} viene dada por el trabajo de corte al que se le resta el de fricción pura.

En la versión original del modelo, la variable de historia considerada es directamente W^{cr} , de modo que:

$$\xi_l = \xi_0 + dW^{cr} \quad (5)$$

En esta nueva versión, como los parámetros de energía dependen del tiempo, la variable interna se expresa más adecuadamente de la siguiente forma, de tipo *daño*:

$$\xi_l = \xi_0 + \frac{dW^{cr}}{G_F^I(t)} \quad , \text{ con } 0 \leq \frac{dW^{cr}}{G_F^I(t)} \leq 1 \quad (6)$$

Para la evolución de los parámetros que dependen de $\frac{dW^{cr}}{G_F^{IIa}(t)}$, se puede emplear la misma variable interna ya que se ha adoptado por simplicidad una relación constante entre $G_F^{IIa}(t)$ y $G_F^I(t)$ dada por la relación entre los parámetros G_F^{IIa} / G_F^I (lo cual equivale a asumir iguales valores de los coeficientes de la expresión (2)).

2.2 Regla de flujo (dilatancia)

En materiales heterogéneos como el hormigón, las trayectorias de fisuración presentan, generalmente, irregularidades debido a una tendencia de propagación a través de las zonas más débiles (p.e. interfases árido-matriz). Por ello, las tensiones de corte además de generar el deslizamiento entre los bordes de la fisura, también inducen una apertura de estas superficies, fenómeno conocido como *dilatancia*.

Para determinar la dirección de la dilatancia se emplea una superficie potencial Q (Fig. 1a) definida en función de la superficie de rotura F , cuya relación viene dada de la siguiente manera:

$$\mathbf{m} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{n} \quad , \quad \text{con} \quad \mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad , \quad \mathbf{m} = \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (7)$$

con:

$$A = \begin{bmatrix} 1 - \frac{W^{cr}}{G_F^{IIa}(t)} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{si } \sigma_N \geq 0 \quad (8)$$

$$A = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{W^{cr}}{G_F^{IIa}(t)}\right) \cdot f_{\sigma}^{dil} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{si } \sigma_N < 0 \quad (9)$$

La formulación es no asociada y la dilatación disminuye progresivamente con el nivel de compresión $\sigma \rightarrow \sigma^{dil}$ (Fig. 1a) y con la degradación de la junta, efectos que son tenidos en cuenta mediante una reducción de la componente normal como se aprecia en las expresiones (8) y (9). El coeficiente f_{σ}^{dil} varía entre 0 y 1 en términos de una función de escala S que se define en el siguiente apartado (Fig. 1a). Por su parte, el efecto de la degradación de la junta se incluye mediante el término $\left(1 - \frac{W^{cr}}{G_F^{IIa}(t)}\right)$.

2.3 Evolución de los parámetros

La evolución de χ y de c se define en función del trabajo disipado en procesos de fractura y el paso del tiempo, mientras que $\tan\phi$ se considera independiente del tiempo. La evolución de χ se expresa de la siguiente forma:

$$\chi = \chi_0(t) \cdot (1 - S(\zeta_{\chi})) \quad (10)$$

con:

$$\chi_0(t) = A \cdot \chi_0(t_0) \cdot \left[1 - e^{-k_{\chi} \cdot (t/t_0)^{p_{\chi}}}\right] \quad ; \quad A = (1 - e^{-k})^{-1} \quad (11)$$

$$S(\zeta_{\chi}) = \frac{e^{-\alpha_{\chi}} \cdot \zeta_{\chi}}{1 + (e^{-\alpha_{\chi}} - 1) \cdot \zeta_{\chi}} \quad ; \quad \zeta_{\chi} = \frac{dW^{cr}}{G_F^I(t)} \quad G_F^I(t) = A \cdot G_F^I(t_0) \cdot \left[1 - e^{-k_G \cdot (t/t_0)^{p_G}}\right] \quad (12)$$

La función S provee una familia de curvas de diferente evolución según el valor del coeficiente α que se adopte.

Para obtener una adecuada evolución de c resulta conveniente definirlo indirectamente a

través de χ , $\tan\phi$, y el parámetro a que representa la distancia horizontal entre el vértice de la hipérbola actualizada y sus asíntotas (Fig. 1c), cuya relación viene dada por la expresión:

$$c = (\chi + a) \cdot \tan\phi \quad (13)$$

Por lo tanto, la evolución de c puede expresarse como:

$$c = [\chi_0(t) \cdot (1 - S(\zeta_\chi)) + a_0(t) \cdot (1 - S(\zeta_a))] \cdot \tan\phi \quad (14)$$

en la cual:

$$a_0(t) = A \cdot a_0(t_0) \cdot \left[1 - e^{-k_a \cdot (t/t_0)^{p_a}} \right] \quad (15)$$

En este trabajo se considera un $t_0 = 28$ días (tiempo en el que generalmente se establecen las propiedades mecánicas del hormigón), que es por lo tanto, la edad de referencia de los parámetros de entrada del modelo.

Por su parte, el ángulo de fricción interna se define sin dependencia del paso del tiempo, de la siguiente forma:

$$\tan\phi = \tan\phi_0 - (\tan\phi_0 - \tan\phi_r) \cdot S(\zeta_\phi) \quad ; \quad \zeta_\phi = dW^{cr} / G_F^{IIa} \quad (16)$$

2.4 Formulación

Empleando la habitual hipótesis de descomposición aditiva, en nuestro caso correspondiente a los desplazamientos relativos totales de la junta, u_i , en una componente reversible (elástica), u_i^{el} , y otra irreversible, u_i^{cr} :

$$u_i = u_i^{el} + u_i^{cr} \quad (17)$$

la relación constitutiva de la junta viene dada por la expresión:

$$\sigma_i = K_{ij}^0 \cdot u_j^{el} = K_{ij}^0 \cdot (u_j - u_j^{cr}) \quad (18)$$

en la cual K_{ij}^0 representa la matriz de rigidez elástica de la junta (matriz diagonal), en la que para elementos de interfase sin espesor, generalmente sus módulos normal y tangencial se interpretan como coeficientes de penalización con unos valores muy elevados.

La componente irreversible de los desplazamientos relativos puede escribirse como:

$$\delta u_j^{cr} = \delta\lambda \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_j} \quad (19)$$

en la cual el multiplicador plástico, $\delta\lambda$, puede ser determinado a partir del estado de carga actuante, mediante las condiciones de Kuhn-Tucker:

$$\delta\lambda \geq 0 \quad ; \quad \delta F \leq 0 \quad ; \quad \delta F \delta\lambda = 0 \quad (20)$$

Cuando $\delta\lambda > 0$ (incremento de carga elasto-plástico), la condición de consistencia de Prager nos permite establecer que:

$$\delta F = \left. \frac{\partial F}{\partial \sigma_i} \right|_{\lambda, t=ct.} \cdot \delta \sigma_i - H \Big|_{\sigma, t=ct.} \cdot \delta \lambda + \left. \frac{\partial F}{\partial t} \right|_{\sigma, \lambda=ct.} \cdot \delta t = 0 \quad (21)$$

en la cual:

$$H = - \left. \frac{\partial F}{\partial \lambda} \right|_{\sigma=constant} = - \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial \xi_q} \cdot \frac{\partial \xi_q}{\partial u_j^{cr}} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_j} \quad (22)$$

es el parámetro de reblandecimiento (softening) plástico, y p_i se refiere a los parámetros de la superficie de rotura. Nótese que la ecuación (22) siempre es un valor negativo que provoca una contracción de la superficie F , conducida por la variación de los parámetros de la hipérbola en función de la variable interna. Por su parte, el término:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial t} \quad (23)$$

genera un endurecimiento elástico como consecuencia del efecto de envejecimiento de los parámetros χ y c de la hipérbola.

Combinando las ecuaciones (18), (19) y (21), podemos expresar el multiplicador plástico como:

$$\delta\lambda = \frac{n_k \cdot K_{kj}^0 \cdot \delta u_j + \frac{\partial F}{\partial p_i} \cdot \frac{\partial p_i}{\partial t} \cdot \delta t}{H + n_p \cdot K_{pq}^0 \cdot m_q} \quad (24)$$

Finalmente, la ecuación constitutiva que establece la relación entre las tensiones y los desplazamientos relativos de la junta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\delta\sigma_i = \left[K_{ij}^0 - \frac{K_{ik}^0 \cdot m_k \cdot n_l \cdot K_{lj}^0}{H + n_p \cdot K_{pq}^0 \cdot m_q} \right] \cdot \delta u_j - \frac{K_{ij}^0 \cdot m_j \cdot \frac{\partial F}{\partial p_r} \cdot \frac{\partial p_r}{\partial t} \cdot \delta t}{(H + n_p \cdot K_{pq}^0 \cdot m_q)} \quad (25)$$

3 VERIFICACIÓN CONSTITUTIVA

Se presentan dos ejemplos básicos, a nivel punto de Gauss, que ilustran las características de la ley constitutiva en cuanto al efecto combinado de la degradación por fractura y el endurecimiento por el paso del tiempo.

3.1 Ensayo de corte/compresión

En este ensayo se aplica en primer término 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. En la figura 3 se presentan los resultados en términos de las tensiones y los desplazamientos relativos de corte. Para las curvas de carga instantánea se puede apreciar el comportamiento obtenido, con un mayor valor de pico para la edad t_0 de 280 días como cabía esperar. Luego del valor máximo se produce una rama de reblandecimiento que tiende a una tensión de corte residual que corresponde al efecto friccional puro. Por otro lado, para la edad $t_0 = 28$ 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 3 que en el transcurso del tiempo sin incremento de carga se produce un aumento de resistencia (endurecimiento elástico, que se aprecia por ejemplo entre los puntos 4 y 5) 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 mayor relación en la medida que se avanza en la curva de reblandecimiento. Esto es debido 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 actualizado (función del tiempo) del parámetro de energía de fractura involucrado. En el sector superior derecho de la figura se muestran las superficies de rotura correspondientes a cada uno de los puntos señalados en las curvas.

3.2 Ensayo de tracción pura

Se impone sólo un incremento positivo del desplazamiento relativo normal. Análogamente al caso anterior se han simulado dos ensayos instantáneos a las edades t_0 de 28 y 280 días, y para el caso de 28 días en un punto de la curva de reblandecimiento se deja transcurrir el tiempo sin carga hasta 280 días. En la figura 4 puede observarse un comportamiento de características similares al ejemplo anterior. Se ha podido observar que para obtener el efecto deseado, se requiere adoptar un valor del parámetro p_χ menor que p_G .

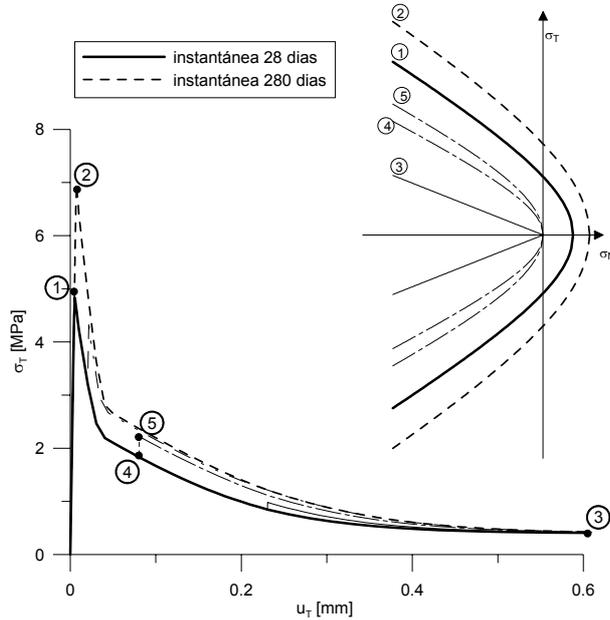


Figura 3. Comportamiento constitutivo de la junta en función del tiempo en un ensayo de corte bajo compresión constante.

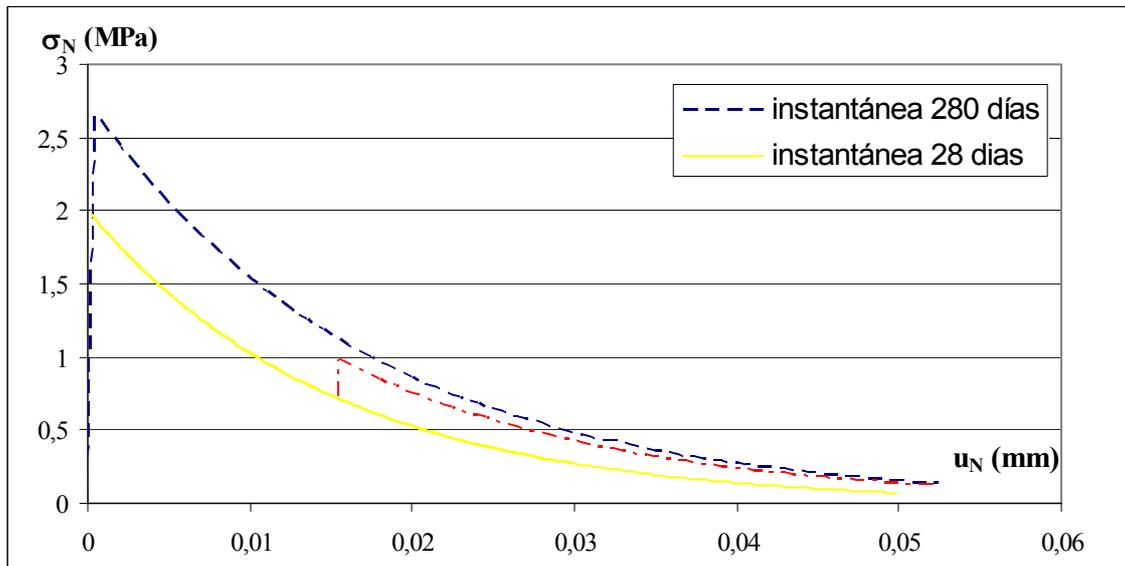


Figura 4. Resultados del ensayo constitutivo de tracción pura.

4 APLICACIONES A NIVEL MESO-ESTRUCTURAL

En este tipo de modelización, la estructura interna heterogénea 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. Una probeta de

hormigón se representa en 2D 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. 5). Los áridos y la matriz se discretizan mediante elementos finitos triangulares como se muestra de forma diferenciada en las figuras 5a y 5b, 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 con envejecimiento 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 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 (Fig. 5c). En la figura 5d puede apreciarse de manera esquemática la disposición de nodos y elementos en una zona de la malla. A los elementos junta se les asigna la ley constitutiva con envejecimiento presentada en el apartado 2 (a fines comparativos también se incluye más adelante un ejemplo del comportamiento de junta sin envejecimiento).

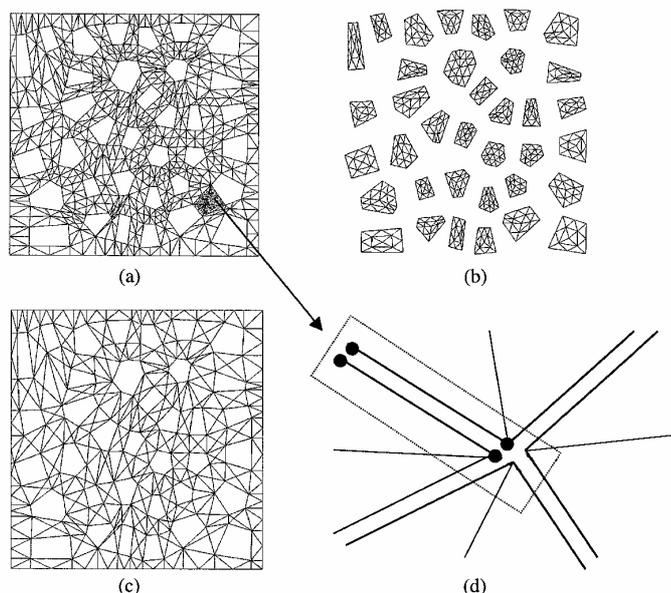


Figura 5. Malla de EF de la discretización mesomecánica del hormigón: (a) elementos de la matriz, (b) elementos de áridos, (c) disposición de las interfases, (d) detalle de discretización.

4.1 Simulación del efecto de envejecimiento (madurez)

Para contrastar la respuesta del modelo mesomecánico en cuanto a los efectos del envejecimiento, se han llevado a cabo ensayos numéricos de compresión uniaxial con carga instantánea impuesta a diferentes edades. El procedimiento consiste en imponer desplazamientos uniformes verticales de valor creciente en los nodos de la cara superior de la muestra (los nodos del lado inferior permanecen fijos en dicha dirección), mientras que los desplazamientos transversales se dejan libres. Los ensayos se llevaron a cabo 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 6 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 2, que ajustan con una buena concordancia la fórmula de resistencia en el tiempo dada en la normativa española ¹⁰. También se ha simulado satisfactoriamente la fluencia básica del hormigón (sin cambios de humedad) para distintas edades de la puesta en carga y diferentes niveles de carga aplicada ¹¹.

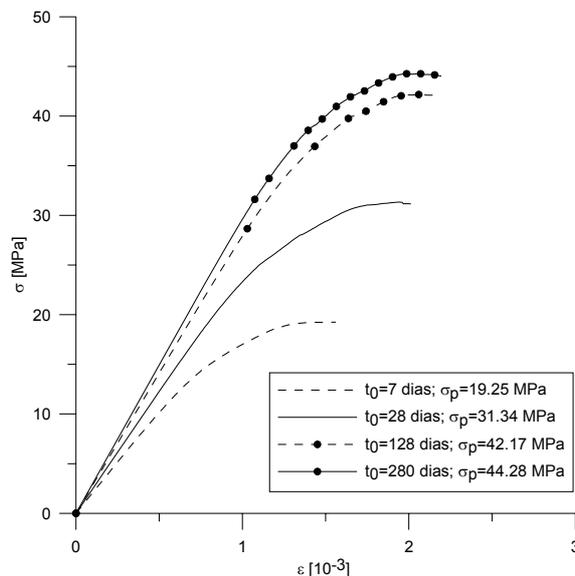


Figura 6. Curvas tensión-deformación nominal instantánea para distintas edades de carga t_0 .

4.2 Simulación de la retracción por secado del hormigón

De manera preliminar, la retracción por secado en el hormigón se estudió de forma desacoplada, de manera que los resultados del problema de difusión de humedad relativa (deformaciones volumétricas) se utilizaban como datos de entrada para el análisis mecánico. A pesar de las simplificaciones inherentes se obtuvieron resultados razonables ¹². Posteriormente, se ha implementado el acoplamiento higo-mecánico (HM) mediante una estrategia en “*staggered*”, que relaciona dos códigos independientes, de manera que sucesivamente el resultado del problema de difusión se utiliza como entrada en el análisis mecánico y el de este último, como entrada en el primero, hasta alcanzar una tolerancia

prefijada. En ambos análisis se emplea una misma malla de EF con elementos junta sin espesor y nudos dobles, cuya formulación para el caso de difusión puede consultarse en ¹³.

Una presentación más detallada de la formulación, así como de los diversos resultados obtenidos para análisis acoplados y desacoplados, y diversos comportamientos constitutivos de los elementos continuos de mortero y de junta puede verse en ^{14,15}. En este trabajo se presentan a modo de ejemplo algunos de estos resultados.

Para el problema de difusión se imponen unas condiciones de borde de $H = 0.5$ sobre los nodos de los bordes laterales, y no se permite el flujo de humedad en las superficies inferior y superior. La condición inicial ($t_0 = 7$ días) prescribe que $H(t_0) = 1$ en todos los nodos.

En la figura 7 se presentan resultados de la difusión de humedad para tres edades distintas del problema acoplado y comportamiento constitutivo de las interfases con y sin envejecimiento. También se incluye el análisis desacoplado para contrastar con los nuevos resultados. Para cada uno de los casos, se observa que el frente de secado avanza hacia el centro de la muestra a medida que pasa el tiempo, de una forma más acentuada en los análisis acoplados especialmente en el caso de junta sin envejecimiento, en el que cabe esperar una mayor fisuración.

En las figuras 8 y 9 se presentan resultados del análisis mecánico. En la figura 8 se muestra la evolución de la fisuración en las juntas, en las cuales el espesor de línea representa la energía disipada en el proceso de fractura, correspondiente al análisis acoplado y junta con envejecimiento para los tiempos de 20, 200, 2000 y 10000 días. Se puede observar, como cabía esperar, un frente de fisuración perpendicular a cada uno de los bordes laterales que progresa hacia el interior de la muestra. También se aprecia que a medida que progresa el secado, se generan fisuras en el interior siguiendo una dirección radial a los áridos, tal como se ha observado recientemente en ensayos experimentales ¹⁶. En la figura 9 se presentan las mallas deformadas a 10000 días de los tres casos analizados. Se pueden apreciar dos efectos contrapuestos: por un lado, el acoplamiento difusión-mecánico tiende a acelerar el proceso de secado, y por lo tanto a acentuar el grado de fisuración; y por otro lado, la ley de junta con envejecimiento genera un endurecimiento con el paso del tiempo, que da lugar a una reducción del estado de fisuración general de la muestra con respecto al comportamiento obtenido con el empleo de la ley constitutiva sin envejecimiento.

5 CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado la formulación y verificación de una ley constitutiva de junta que permite tener en cuenta, además de un reblandecimiento por trabajo de fractura (versión original del modelo), también el envejecimiento (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 , detectada en las curvas experimentales tensión-deformación del hormigón. El modelo también se ha empleado exitosamente como ley constitutiva de los elementos junta que se incluyen en la representación a nivel meso-estructural 2D del material. Se han obtenido interesantes resultados del problema de la retracción por secado del hormigón mediante un análisis acoplado higo-mecánico.

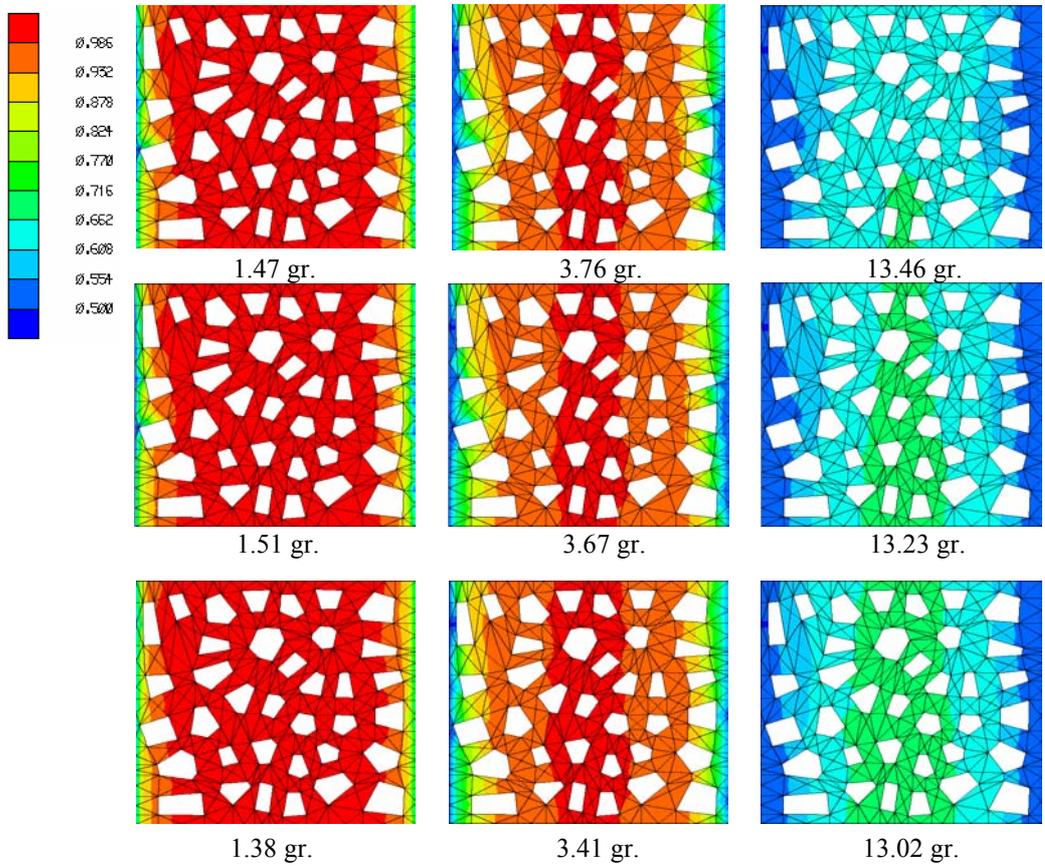


Figura 7. Distribuciones de HR y pérdida total en peso para 20, 200 y 10000 días (de izquierda a derecha); análisis acoplado con juntas sin envejecimiento (arriba), acoplado con juntas con envejecimiento (medio) y desacoplado (abajo).

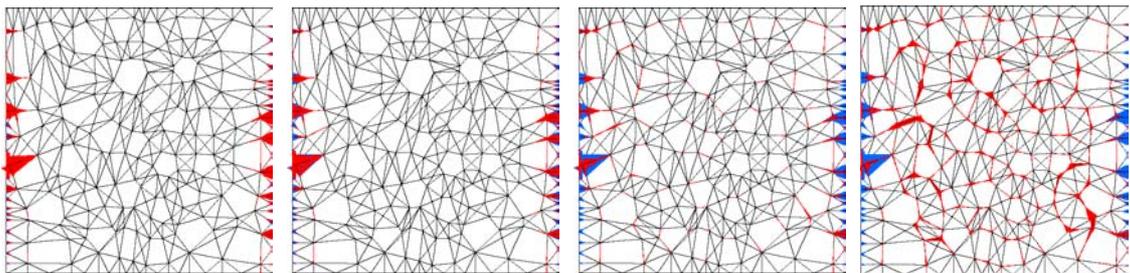


Figura 8. Análisis acoplado con juntas con envejecimiento: energía de fractura disipada en las interfases para 20, 200, 2000 y 10000 días (de izquierda a derecha).

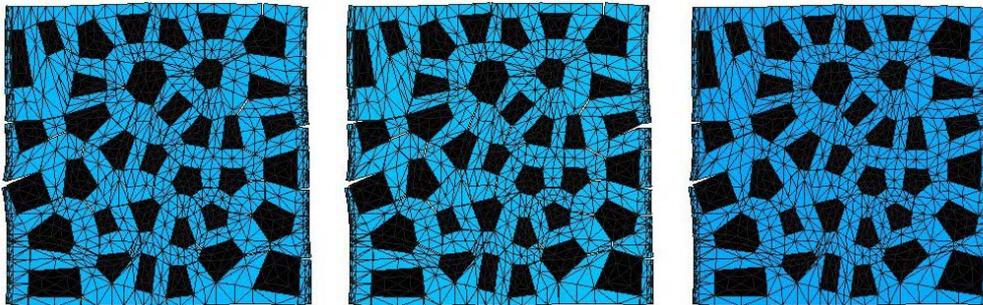


Figura 9. Mallas deformadas a 10000 días: análisis desacoplado con juntas sin envejecimiento (izquierda), acoplado con juntas sin envejecimiento (centro), y acoplado con juntas con envejecimiento (derecha). Factor de magnificación de 150.

Los trabajos actuales y futuros en esta línea se centran en el comportamiento integrado de la fluencia básica junto con la retracción y fluencia por secado, así como otros procesos de difusión que inciden en la durabilidad del hormigón. 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.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MEC (España) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación MAT2003-02481. El primer autor quiere agradecer al MEC la incorporación al sistema español de ciencia y tecnología mediante el “Programa Ramón y Cajal”, y a la ETSECCPB-UPC la bolsa de viaje concedida. Finalmente, el tercer autor agradece la beca FPI concedida por el MEC.

7 REFERENCIAS

- [1] A. Hillerborg, M. Modéer y P.E. Petersson, “Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements”, *Cement and Concrete Research*, 6 (6): 773-781, 1976.
- [2] J. Hohberg, “Multimechanism plasticity with coupled damage in tension and shear. En *Computational Plasticity (COMPLAS III)*, D. R. J. Owen, E. Oñate y E. Hinton, (Eds.), volumen 2, pp. 1503-1514. Pineridge Press, 1992.
- [3] H. R. Lotfi, “Finite element analysis of fracture of concrete and masonry structures”. PhD thesis, University of Colorado, Boulder, USA, 1992.
- [4] T. Stankowski, K. Runesson y S. Sture, “Fracture and slip of interfaces in cementitious composites. I: Characteristics; II: Implementation”. *J. Engng. Mech. ASCE*, 119, pp. 292-327, 1993.
- [5] S. Weihe, M. König y B. Kröplin, “A treatment of mixed mode fracture in debonding”. *Comp. Mat. Sci.*, 3, pp. 254-262, 1994.

- [6] I. Carol y P.C. Prat, "A Statically Constrained Microplane for the Smeared Analysis of Concrete Cracking", *Computer Aided Analysis and design of Concrete Structures*. En Bicanic y Mang, editors, pp.919-930,1990.
- [7] I. Carol, P.C. Prat y C.M. López, "A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis", *Journal of Engineering Mechanics*, 123, No 8, 1997.
- [8] C.M. López, "Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones". *Tesis doctoral*. ETSECCPB, UPC, Barcelona, España, 1999.
- [9] I. Carol, C.M. López y O. Roa, "Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements", *International Journal of Numerical Methods in engineering*, Vol 52,193-215, 2001.
- [10] EH-91. Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado, Ministerio de Obras Públicas y Transporte, Madrid, 1991.
- [11] C.M. López, D. Ciancio, I. Carol, J. Murcia y M. Cuomo, "Análisis microestructural de la fluencia básica del hormigón mediante elementos juntas". *Anales de Mecánica de la Fractura*, 20, pp. 95-100, 2003.
- [12] C.M. López e I. Carol, "Análisis Mesoestructural de Materiales Cuasifrágiles: Nuevos Desarrollos y Aplicaciones", *Mecánica Computacional Vol. XXII*. En M.B. Rosales, V.H. Cortínez y D.V. Bambill, editores. Bahía Blanca, Argentina, 2003.
- [13] J.M. Segura e I. Carol. "On zero-Thickness Interface Elements for Diffusion Problems", *Int. Journal for Num. and Analytical Meth. in Geomech.*, 28(9), 947-962, 2004.
- [14] 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. En G. Pijaudier-Cabot, B. Gérard y P. Acker, editors. Nantes, France, pp. 107-112, 2005.
- [15] C.M. López, A.E. Idiart e I. Carol, "Meso-mechanical Analysis of Concrete Deterioration Including Time Dependence", *Computational Plasticity VIII*. En D.R.J. Owen, E. Oñate y B. Suárez, editors. Barcelona, Spain, pp. 1059-1062, 2005.
- [16] J.G.M. van Mier, J. Bisschop y T. Shiotani, "Experimental and Numerical Analysis of Drying Shrinkage at the Meso-Level: Preliminaries to Numerical Modelling and Analyses". En *NSF Advanced Workshop on 'Model-Based Simulation of Durability of Materials and Structures'*, Czech Tech. Univ., Prague, p.45, 2002.