

ANÁLISIS DEL HORMIGÓN EN MODO MIXTO DE FRACTURA UTILIZANDO UN MODELO MESO-ESTRUCTURAL CON ELEMENTOS JUNTA

C.M. López¹, M. Rodríguez¹, I. Carol¹

¹ Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona. España
E-mail: carlos.maria.lopez@upc.edu, mariana.rodriguez@upc.edu, ignacio.carol@upc.edu

RESUMEN

En este trabajo se presentan resultados de la simulación numérica de algunos ensayos experimentales sobre muestras de hormigón sometidas a carga biaxial que combina tracción y corte [1]. Para ello se emplea una modelización en la que se representan explícitamente los principales componentes de la estructura interna del hormigón a nivel mesoescala. Los ensayos experimentales se realizaron mayoritariamente en muestras de 200 mm de lado, si bien en algunos casos de carga también se emplearon muestras de 100 y 50 mm. En un trabajo anterior presentado en el Congreso del Grupo Español de Fractura del año 2009 se ha estudiado una muestra de 200 mm con tamaño máximo de árido de 16 mm. En este artículo se analiza ahora la muestra de 50 mm de lado con un tamaño máximo de árido similar al de las probetas empleadas en los experimentos (2mm). Los resultados obtenidos en uno de los estados de carga han permitido reproducir satisfactoriamente el comportamiento carga-desplazamiento (tensión-desplazamiento), así como la formación y evolución de la tendencia de fisuración detectada en los ensayos llevados a cabo en [1] y similares en [2].

ABSTRACT

This paper presents the results of the numerical simulation of some of the experimental tests on concrete samples subjected to different biaxial loading paths combining tension and shear [1]. The study uses a meso-structural model which explicitly represents the main components of the internal structure of concrete at meso-scale level. The experimental tests were conducted mostly in samples of 200 mm side, although in some load cases were also used samples of 100 and 50mm side. In a previous work presented in the Congress of the Spanish Group of Fracture (2009) a sample of 200 mm side with maximum aggregate size 16mm has been studied. This paper now examines the sample of 50 mm side with a maximum aggregate size similar to the used in the experimental test (2mm). The numerical results obtained in one of the loading conditions have allowed satisfactorily reproduce the load-displacement behaviour (tension-displacements) and the cracking patterns detected in the experimental tests conducted in [1] and similarly in [2].

PALABRAS CLAVE: Modo mixto de fractura en hormigón, Análisis mesomecánico, Elemento junta.

1. INTRODUCCIÓN

En ensayos experimentales en modo mixto de fractura, llevados a cabo en diferentes tipos y tamaños de probetas de hormigón, se ha puesto de manifiesto la importante influencia de la componente de corte [1,2]. Por ejemplo, al imponer un estado combinado de desplazamientos de apertura (normal) y de corte en una proporción fija, se detecta una variada relación entre las fuerzas normales y tangenciales, que puede incluso dar lugar a estados de carga en compresión-corte, a pesar de estar imponiéndose un desplazamiento normal de separación. Este comportamiento resulta más acentuado en la medida en que el desplazamiento de corte que se impone resulta mayor.

En un artículo del anterior Congreso del Grupo Español de Fractura [3], se han presentado simulaciones

numéricas de algunos ensayos experimentales llevados a cabo en [1] sobre muestras de 200 mm de lado. Se han analizado allí dos de las trayectorias de carga, correspondientes a los casos 4 y 6 de los ensayos experimentales, los cuales han sido utilizados con frecuencia para contrastar la capacidad de diversos modelos [4-7].

En este trabajo se analiza ahora la muestra de 50 mm de lado con un tamaño máximo de árido similar al de las probetas empleadas en los ensayos experimentales (2mm). En este caso, los ensayos se realizaron en muestras prismáticas de hormigón de 50 mm de lado y 50 mm de espesor, que contienen dos entallas de 6.25 mm de largo y 5mm de altura ubicadas de forma simétrica en el centro de la altura (en la figura 1 izquierda se muestra un esquema de la configuración del ensayo experimental).

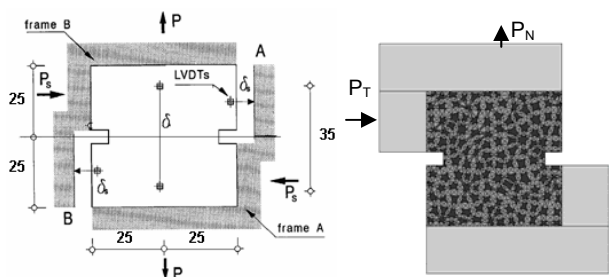


Figura 1: Representación esquemática del ensayo experimental (izquierda) y malla de EF utilizada en la modelización (derecha) para la muestra de 50 mm.

2. MODELIZACIÓN MESOESTRUCTURAL

El modelo consiste en discretizar la estructura interna del material mediante piezas irregulares que representan a los áridos de mayor tamaño, rodeadas por una matriz representativa del comportamiento del mortero y los áridos de menor tamaño. A fin de posibilitar la no linealidad de comportamiento, mecanismos de rotura y fisuración, etc., la malla de elementos finitos incluye elementos junta sin espesor. Estos elementos se distribuyen a lo largo de todos los contactos entre elementos de 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. 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, formulada en términos 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 trabajo de fractura. Para controlar el proceso de fractura, el modelo posee dos parámetros que representan la energía de fractura clásica en modo I, G_F^I , y un denominado Modo IIa definido para corte con 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 α_χ , α_ϕ y α_c que controlan la forma de evolución del reblandecimiento, y α_d que controla la evolución de la dilatación en compresión. Una descripción más detallada se ha presentado en anteriores Congresos del GEF, así como en diversas publicaciones [8,9]. Resultados del modelo mesomecánico en 2D y 3D para ensayos de tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc. pueden consultarse en [9-12]. En la figura 1 derecha se presenta la malla para el hormigón, junto con las placas de carga, empleada en este trabajo.

3. RESULTADOS

Se analiza la trayectoria de carga denominada 6 en los ensayos experimentales [1], en la cual se aplica una evolución en control de desplazamientos de manera que la relación δ_N/δ_T se mantiene constante. Se adoptaron tres valores de δ_N/δ_T iguales a 1, 2 y 3, denominados tendencias de carga 6a, 6b y 6c, respectivamente. Los parámetros del hormigón para los elementos de medio continuo son: $E = 73000$ MPa (áridos), $E = 27000$ MPa (mortero) y $\nu = 0.2$ (ambos); para las juntas de interfase: $K_N = K_T = 500000$ MPa/mm, $\tan\phi_0 = 0.80$, $\chi_0 = 1.5$ MPa, $c_0 = 7$ MPa, $G_F^I = 0.05$ N·mm, $G_F^{IIa} = 10$ G_F^I , $\sigma^{dil} = 40$ MPa, $\alpha_d = -2$, y demás parámetros igual a cero; para las juntas de mortero-mortero, los mismos parámetros excepto para $\chi_0 = 3$ MPa, $c_0 = 14$ MPa, $G_F^I = 0.1$ N·mm. Los ensayos se han realizado en tensión plana.

3.1. Influencia de una relación impuesta de los desplazamientos en la muestra de 50 mm de lado

En [1] se ha analizado el efecto tamaño ensayando muestras de 200, 100 y 50 mm de lado. En nuestra modelización, a partir de la muestra de 200 mm se ha obtenido por reducción la correspondiente de 50 mm, con lo cual se tiene un tamaño de árido mucho más aproximado al de los experimentos (figura 1 derecha). En la adaptación de la malla sólo ha debido corregirse la altura de las entallas para mantenerla en 5mm. En la figura 3 se muestran los resultados numéricos obtenidos junto con los experimentales para el caso de carga 6, caso 6a en la parte superior, caso 6b en el centro y caso 6c abajo. En la columna izquierda de esta figura se muestran los diagramas en términos de la carga vertical normalizada con respecto a la carga máxima de tracción de cada caso y el desplazamiento vertical. La columna de la derecha corresponde a las curvas de la fuerza de corte en función de los desplazamientos correspondientes. Para el caso de carga 6a, se puede apreciar en la figura la incidencia del desplazamiento lateral en el comportamiento de la fuerza vertical, que luego del pico en tracción pasa a la zona de compresión, como ocurre en la muestra de 200 mm [3]. Sin embargo, dentro del rango de desplazamientos considerados, en la muestra de 50 mm se produce un pico de compresión seguido de una reducción que tiende asintóticamente a anularse. En correspondencia con el pico de compresión y su decrecimiento, el diagrama de fuerza-desplazamiento lateral alcanza un máximo seguido del reblandecimiento. A pesar de la diferencia en la máxima carga horizontal obtenida, la simulación numérica captura satisfactoriamente el comportamiento detectado experimentalmente (gráficos superiores de la figura 3 en los que, a título ilustrativo, se incluyen también los resultados de la malla sin corregir la altura de las entallas). Esto se puede apreciar más claramente en la figura 4, en la que también se ha normalizado la carga horizontal, y ambos desplazamientos se presentan en términos relativos al desplazamiento normal en el pico de compresión. En la figura 3, parte central e inferior, se muestran las curvas correspondientes a los casos de

carga 6b y 6c, respectivamente. Se puede apreciar que los resultados numéricos, si bien de forma más reducida a medida que aumenta la proporción δ_N/δ_T , mantienen la tendencia en la carga vertical con un máximo en la zona de compresión, que se corresponde con un pico en las curvas de carga horizontal. En los experimentos, las curvas de carga normal tienden a anularse del lado de tracción, y la carga lateral presenta un comportamiento tipo meseta al alcanzar su valor máximo.

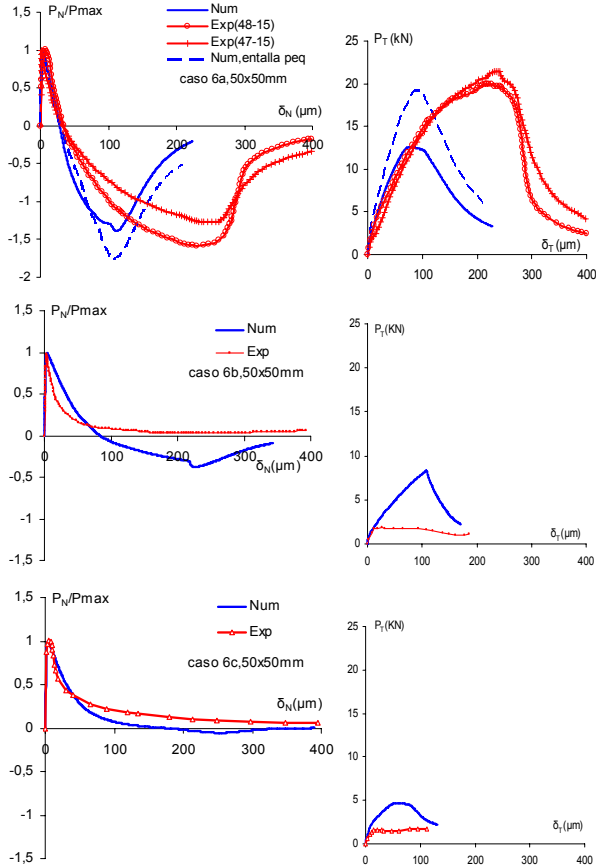


Figura 3. Curvas de fuerza vertical (normalizada) vs. desplazamiento vertical (izquierda) y de fuerza horizontal vs. desplazamiento horizontal (derecha), para los casos de carga 6a, 6b y 6c (de arriba a abajo).

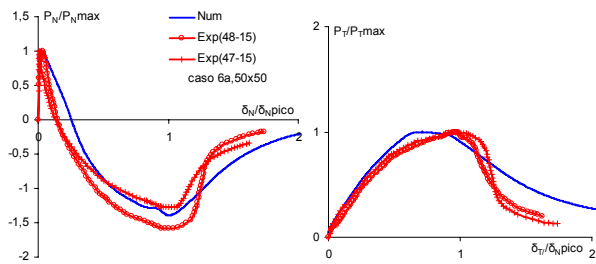


Figura 4. Curvas de fuerza vs. desplazamiento vertical normalizados (izquierda) y curvas de fuerza vs. desplazamiento horizontal normalizados (corte), para el caso de carga 6a en la muestra de 50x50 mm².

En la figura 5 se presenta la tendencia de fisuración del modelo numérico en términos del trabajo de fractura

disipado, representado por el espesor de línea en cada punto de las juntas (izquierda), junto con la experimental (derecha), para los casos de carga 6a, 6b y 6c de arriba hacia abajo, respectivamente. Resulta especialmente interesante el comportamiento del caso 6a, que se comenta en detalle en el apartado 3.3.

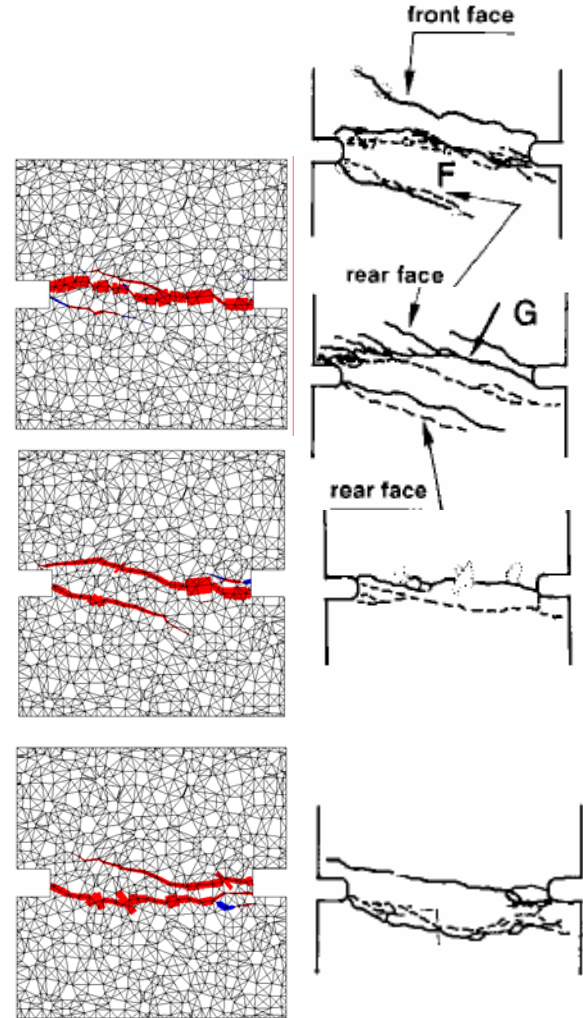


Figura 5. Tendencia de fisuración en el ensayo experimental (derecha) y en la simulación numérica (izquierda) para los casos de carga 6a, 6b y 6c en las muestras de 50x50 mm².

3.2. Comparación con otros resultados de modo mixto

El comportamiento experimental de la zona de proceso de fractura del hormigón en modo mixto también ha sido estudiado por Hassanzadeh [2]. Estos ensayos se han realizado en probetas prismáticas de hormigón de 60 mm de altura y 70x70 mm² en su sección transversal, que presenta una entalla perimetral de 15 mm de ancho (área neta de 40x40 mm²). Durante la primera parte del ensayo, la muestra está sometida a tracción pura hasta que se alcanza el pico de tensiones normales. A partir de este punto, se aplican simultáneamente desplazamientos relativos normal y de corte en una proporción fija caracterizada por el ángulo $\tan \theta =$

δ_N/δ_T . Los ensayos fueron realizados con valores de $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$. Nooru-Mohamed (1992) ha comparado sus resultados con los de Hassanzadeh, empleando las muestras de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ para los casos de carga 6 con δ_N/δ_T iguales a 1 ($\theta = 45^\circ$), 2 ($\theta = 63.4^\circ$) y 3 ($\theta = 71.6^\circ$), en términos de las tensiones y los desplazamientos correspondientes.

En las figuras 6 y 7 se presentan estos resultados junto con los obtenidos con el modelo numérico, diferenciando para su mayor claridad los casos 6a, 6b y 6c, que se comparan respectivamente con los ensayos de $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ de Hassanzadeh. En la figura 6 se muestran los gráficos tensión-desplazamiento vertical (normal) de postpico. Para $\delta_N/\delta_T = 1$ y $\theta = 30^\circ$ los tres resultados muestran comportamientos cualitativos similares: luego del post-pico de tracción, cambia el signo de las tensiones, se alcanza un pico de compresión y finalmente las tensiones tienden a anularse asintóticamente desde el lado de compresión. Cuando la relación δ_N/δ_T pasa a 2 y 3, los resultados numéricos mantienen la tendencia anterior aunque de manera más atenuada, lo cual concuerda con los resultados obtenidos por Hassanzadeh, mientras que en los experimentos de Nooru-Mohamed las curvas siguen un reblandecimiento que tiende a anularse del lado de tracción. En la figura 7 se muestran los gráficos tensión-desplazamiento lateral (de corte). Para $\delta_N/\delta_T = 1$ y $\theta = 30^\circ$, los resultados experimentales presentan entre sí una gran diferencia en el pico de la tensión de corte y en el comportamiento de reblandecimiento que en el caso de Hassanzadeh resulta mucho más atenuado. La curva numérica presenta un pico más parecido al de Hassanzadeh, si bien la caída de reblandecimiento resulta más acentuada como en el caso de Nooru-Mohamed. Los resultados numéricos de los casos 6b y 6c concuerdan mejor con los correspondientes de Hassanzadeh, ya que presentan un pico en la tensión de corte en correspondencia con un máximo en la zona de compresión.

3.3. Comparación de resultados entre las muestras de 200 y de 50 mm de lado

En un artículo anterior [3], se han presentado los resultados completos de la simulación numérica del estado de carga 6 sobre la muestra de 200 mm de lado. En la figura 8 izquierda se muestran las respectivas curvas de fuerza vertical versus desplazamiento vertical obtenidas con el modelo junto con los resultados experimentales. Se puede apreciar en esta figura la influencia del desplazamiento lateral en relación al desplazamiento normal, que genera que las curvas pasen al sector de compresión con un comportamiento más acentuado con el aumento de la proporción de corte. En la muestra de 50 mm de lado este comportamiento se mantiene en un principio (figura 3 izquierda), sin embargo, posteriormente en los resultados numéricos se produce un pico de compresión seguido de una reducción que tiende asintóticamente a cero. En los ensayos experimentales, este comportamiento se aprecia

claramente en el caso 6a de [1]. También en los tres casos considerados en [2], como puede apreciarse en la figura 6. En la muestra de 50 mm, en correspondencia con el pico de compresión y su decrecimiento, el diagrama de fuerza-desplazamiento lateral alcanza un máximo seguido del reblandecimiento.

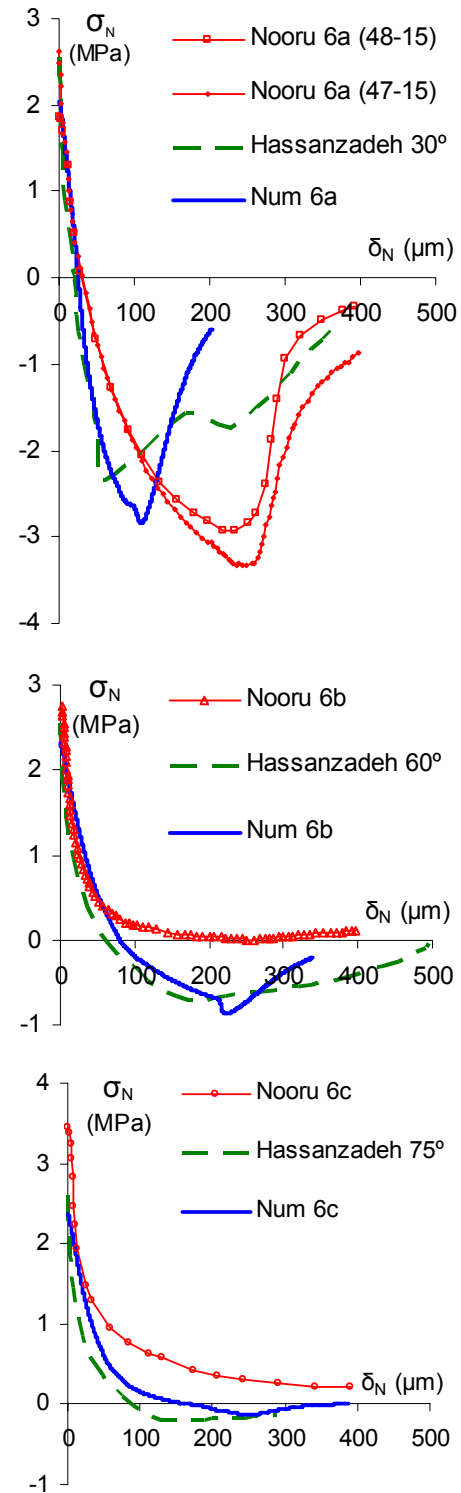


Figura 6. Curvas de tensión vs. desplazamiento vertical (normal) para los casos de carga 6a, 6b y 6c (de arriba a abajo).

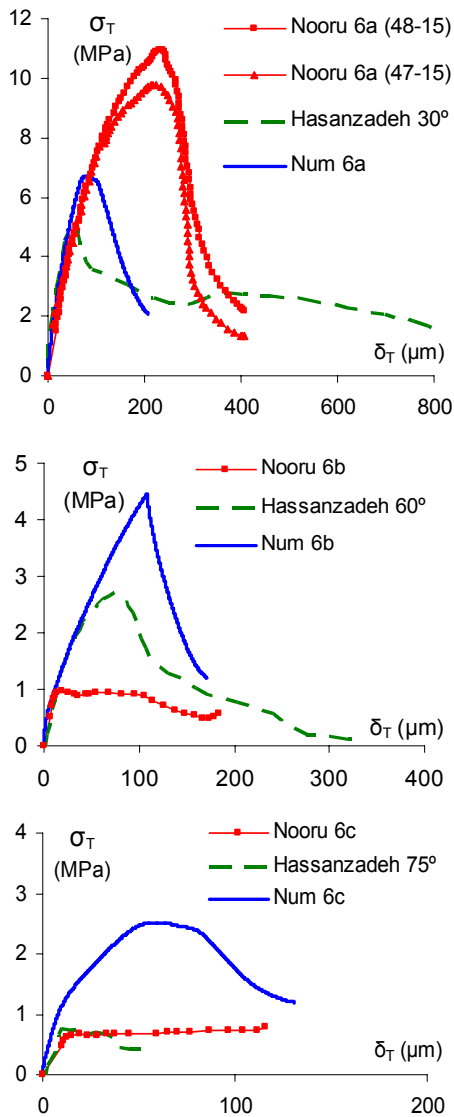


Figura 7. Curvas de tensión vs. desplazamiento horizontal (corte) para los casos de carga 6a, 6b y 6c (de arriba a abajo).

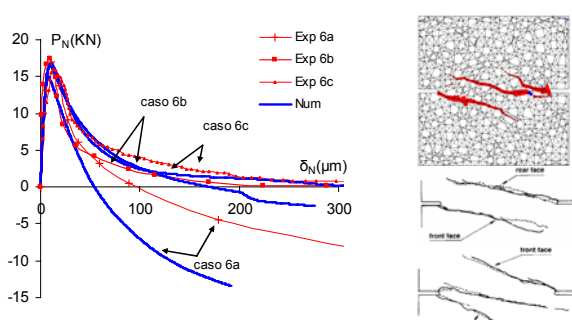


Figura 8. Curvas de fuerza vs. desplazamiento vertical (izquierda) y tendencia de fisuración (derecha) en la simulación numérica (arriba) y experimental (abajo) para el caso 6a de la muestra de 200 mm.

Por el contrario, en el caso 6a de la muestra de 200 mm, dentro del rango de desplazamientos considerados, la fuerza lateral y la vertical siguen en aumento (tanto en

los experimentos como en la modelización). En la figura 8 derecha se muestra la trayectoria de fisuración de la simulación numérica (arriba) y la experimental (abajo) para el caso 6a de la muestra de 200 mm. En ambos casos se puede apreciar una tendencia inclinada a partir de cada entalla. Por su parte, en la figura 5 superior se observa la fisuración correspondiente al caso 6a de la muestra de 50 mm, a la izquierda la del modelo y a la derecha la experimental. En [1] se han realizado dos ensayos experimentales en las muestras denominadas 47-15 y 48-15. Se comenta en esta referencia, que tanto la fisura F para la muestra 47-15 como la fisura G para la muestra 48-15 (figura 5 superior derecha), se convierten en cada caso en la fisura dominante (tanto en la cara frontal como dorsal), mientras las otras fisuras inclinadas se cierran. Más aún, se dice que la caída en la capacidad resistente de corte está asociada con la apertura de las fisuras F y G, que presentan una trayectoria tortuosa. Para apreciar la evolución de la tendencia de fisuración en la simulación numérica del caso 6a, en la figura 9 se muestran varios estados representados en este caso en términos del módulo del vector desplazamiento plástico (en rojo fisura activa y en azul en descarga), que permite apreciar más claramente la incidencia de cada modo de fractura (en los gráficos en función de la energía disipada de la figura 5 izquierda, en la apreciación visual incide la diferencia entre los valores de los parámetros G_F^I y G_F^{IIa}). En la figura 9a se observan tres fisuras inclinadas, de las cuales posteriormente dos de ellas evolucionan de forma activa y la restante ubicada en la parte superior de la entalla de la derecha entra en descarga (figuras 9b y 9c correspondientes a $\delta_N = 42 \mu m$ y $\delta_N = 76 \mu m$, respectivamente). En la figura 9d, para $\delta_N = 110 \mu m$, en una situación cercana a donde se producen los picos tanto de la carga vertical como de la horizontal de corte (ver figura 3 superior), se aprecia que progresa desde la entalla izquierda una fisura aproximadamente horizontal (que ya se observa de forma incipiente en la figura 9c), que se une a la fisura desarrollada desde la entalla derecha, formando una tendencia aproximadamente horizontal, a la vez que se cierran las tendencias inclinadas. En la figura 9e, para $\delta_N = 226 \mu m$, se observa que se acentúa la fisura orientada de una a otra entalla, cuyo desarrollo completo propicia la disminución progresiva hasta anularse de ambas cargas, vertical de compresión y lateral de corte. En la figura 9f se muestra la malla deformada para $\delta_N = 226 \mu m$, en la cual puede apreciarse la fisura completamente formada, que presenta una tendencia más o menos tortuosa motivada por la representación explícita de la mesoestructura, que determina que la fisuración tienda a bordear los áridos ("aggregate interlock").

El modelo mesoestructural captura correctamente el comportamiento mecánico cuando se impone una proporción fija de los desplazamientos, lo cual puede atribuirse al efecto de la dilatancia. Mientras la relación fija entre los desplazamientos impuestos se mantenga inferior al efecto de dilatancia de la muestra, ésta verá

impedido su progreso y se desarrollarán tensiones de compresión crecientes, hasta que la evolución de la degradación propicia un pico de las tensiones de compresión y la posterior tendencia a cero. Este fenómeno detectado en la muestra de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ cabría esperar que se produjera en la muestra de $200 \times 200 \text{ mm}^2$ (figura 8) si se prolongaran los rangos de carga (limitados en los experimentos de Nooru-Mohamed, para las muestras de 100×100 y $200 \times 200 \text{ mm}^2$, por la capacidad de carga de la máquina de ensayo).

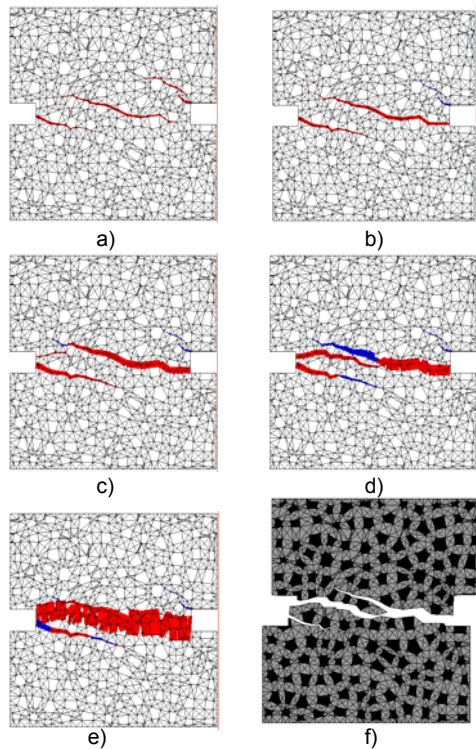


Figura 9. Evolución de la fisuración para el caso 6a en la muestra de 50 mm, en términos del módulo del vector desplazamiento plástico, para valores de a) $\delta_N = 17 \mu\text{m}$, b) $\delta_N = 42 \mu\text{m}$, c) $\delta_N = 76 \mu\text{m}$, d) $\delta_N = 110 \mu\text{m}$, e) $\delta_N = 226 \mu\text{m}$ y f) malla deformada para $\delta_N = 226 \mu\text{m}$.

4. CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo se ha empleado un modelo numérico mesoestructural para simular algunos ensayos experimentales llevados a cabo en [1] sobre una muestra de 50 mm de lado, que se han comparado con resultados previos obtenidos en la muestra de 200 mm [3]. Se ha conseguido reproducir satisfactoriamente el comportamiento de las curvas de carga-desplazamiento (tensión-desplazamiento) de los ensayos de Nooru-Mohamed y similares de Hassanzadeh. Este comportamiento no resulta nada trivial puesto que una imposición de desplazamientos combinados de apertura y de corte, dan lugar a una evolución de las fuerzas axial y lateral (tensiones normales y de corte) que puede variar considerablemente desde estados en tracción/corte a estados de compresión/corte. Cabe señalar que si bien existen numerosos trabajos de modelización numérica de estos ensayos, todos los

artículos consultados se refieren a la malla de 200 mm y no aparece el comportamiento con pico y posterior reblandecimiento en compresión. Los trabajos en curso incluyen completar el análisis del efecto tamaño, extendiendo los cálculos a las mallas de 100 y 200 mm con un tamaño de áridos similar al de los experimentos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MICINN (Madrid) la ayuda recibida a través del proyecto BIA2009-10491 y la beca FPI concedida al segundo autor.

REFERENCIAS

- [1] Nooru-Mohamed, M. B. “Mixed-Mode Fracture of concrete: An experimental approach”. PhD thesis, University of Technology, Delft, Holanda (1992).
- [2] Hassanzadeh, M. “Determination of fracture zone properties in mixed mode I and II”. *Engineering Fracture Mechanics*, 35 (4/5), pp. 845-853 (1990).
- [3] Rodríguez, M., López, C.M., Carol, I. “Análisis meso-estructural de la fractura del hormigón en modo mixto”. *Anales de la Mecánica de Fractura*, 26, vol. 2, pp. 452-457 (2009).
- [4] Cusatis, G., Bazant, Z., Cedolin, L. “Confinement-shear lattice CSL model for fracture propagation in concrete”, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 195, 7154-7171 (2006).
- [5] Oliver, J., Huespe, A., Pulido, M.D., Blanco S. “Computational modeling of cracking of concrete in strong discontinuity settings”, *Computers and Concrete*, Vol. 1, Nº 1, 61-76 (2004).
- [6] Di Prisco, M., Ferrara, L., Meftah, F., Pamin, J., de Borst, R., Mazars, J., Reynouard, J. “Mixed mode fracture in plain and reinforced concrete: some results on benchmark tests”. *International Journal of Fracture*, Vol. 103, pp. 127-148 (2000).
- [7] RFGC, Revue française de génie civil. 7 (5), 2003.
- [8] Carol, I., Prat, P. C., y López, C. M. “A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis”, *J. Engng. Mech. ASCE*, 123, pp. 765-773 (1997).
- [9] 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 (1999).
- [10] López C.M., Carol I., Aguado A. “Meso-structural study of concrete fracture using interface element. I: numerical model and tensile behaviour”. *Materials and Structures*, 41, Nº 3, pp. 583-599 (2008).
- [11] 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, Nº 3, pp. 601-620 (2008).
- [12] Caballero, A., López, C.M., Carol, I. “3D meso-structural analysis of concrete specimens under uniaxial tension”. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 195, 7182-7195 (2006).