

ANÁLISIS NUMÉRICO MESO-ESTRUCTURAL DEL HORMIGÓN EN MODO MIXTO DE FRACTURA

C.M. López^a, M. Rodríguez^a, I. Carol^a

^a *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*

Palabras claves: Modo mixto de fractura en hormigón, Análisis mesomecánico, Elemento junta.

Resumen. En ensayos experimentales llevados a cabo sobre muestras de hormigón en modo mixto de fractura, se ha observado una importante influencia de la componente de corte. En este trabajo se presentan resultados de la simulación numérica de algunos de los ensayos experimentales llevados a cabo por Nooru-Mohamed sobre muestras de hormigón sometidas a diferentes trayectorias de carga biaxial que combinan tracción y corte, bajo control de fuerzas o de desplazamientos, con la finalidad de analizar el comportamiento mecánico en modo mixto de fractura.

En el estudio se utiliza un modelo meso-estructural para materiales heterogéneos, que se ha venido desarrollando durante los últimos años dentro del grupo de investigación de la ETSECCPB, UPC. La modelización representa explícitamente los principales componentes de la estructura interna del hormigón a nivel mesoescala, en la cual se discretizan los áridos de mayor tamaño rodeados de una matriz que caracteriza conjuntamente al mortero y a los áridos de menor tamaño. Dentro de la malla de elementos finitos se incluyen a priori elementos junta sin espesor, con el fin de representar las principales trayectorias potenciales de fisuración.

Los ensayos experimentales se realizaron mayoritariamente en muestras de hormigón de 200 mm de lado, con una doble entalla simétrica en el centro. En algunos casos de carga también se emplearon muestras de 100 y 50 mm de lado. En este artículo se incluye el análisis numérico desarrollado hasta el momento para algunos de los estados de carga, en muestras de 200 y 50 mm de lado. Los resultados obtenidos con el modelo meso-estructural permiten reproducir satisfactoriamente los resultados experimentales, tanto en el ajuste de las diversas curvas de carga-desplazamiento como en la tendencia y orientación de la fractura en cada caso.

1 INTRODUCCIÓN

En diversos ensayos experimentales llevados a cabo en diferentes tipos y tamaños de probetas de hormigón (y materiales cuasifrágiles en general) en modo mixto de fractura, se ha puesto de manifiesto la importante influencia de la componente de corte (Hassanzadeh, 1990; Nooru-Mohamed, 1992). Por ejemplo, al aumentar el valor de la carga de corte se produce una reducción de la resistencia a tracción, a la vez que las tendencias de fisuración presentan unas orientaciones más inclinadas que se van alejando del plano que contiene las entallas (Nooru-Mohamed, 1992). Un comportamiento más complejo se produce al imponer un estado combinado de desplazamientos de apertura (normal) y de corte en una proporción fija, en el que 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 (Hassanzadeh, 1990; Nooru-Mohamed, 1992). Este comportamiento resulta más acentuado en la medida en que el desplazamiento relativo de corte que se impone resulta mayor.

En este trabajo se presentan simulaciones numéricas de algunos ensayos experimentales llevados a cabo en Nooru-Mohamed (1992) en el estudio del comportamiento del hormigón en modo mixto de fractura. La mayoría de estos ensayos se realizaron en muestras prismáticas de hormigón de 200 mm de lado y 50 mm de espesor, que contienen dos entallas de 25 mm de largo y 5 mm de altura, ubicadas de forma simétrica en el centro de la altura (también se han ensayado algunos casos en muestras de 100 y 50 mm de lado). En la figura 1 izquierda se muestra un esquema de la configuración del ensayo. Las muestras fueron sometidas a diferentes trayectorias de carga biaxial que combinan tracción y corte, bajo control de fuerzas o de desplazamientos. Como se puede ver en la figura 1 izquierda, los desplazamientos verticales fueron medidos en dos zonas cercanas a las entallas (en cada cara de la probeta), obteniéndose luego el valor medio de cada medida. Los desplazamientos horizontales fueron medidos a un cuarto de la altura sobre la cara vertical izquierda y a tres cuartos de altura sobre la cara vertical derecha.

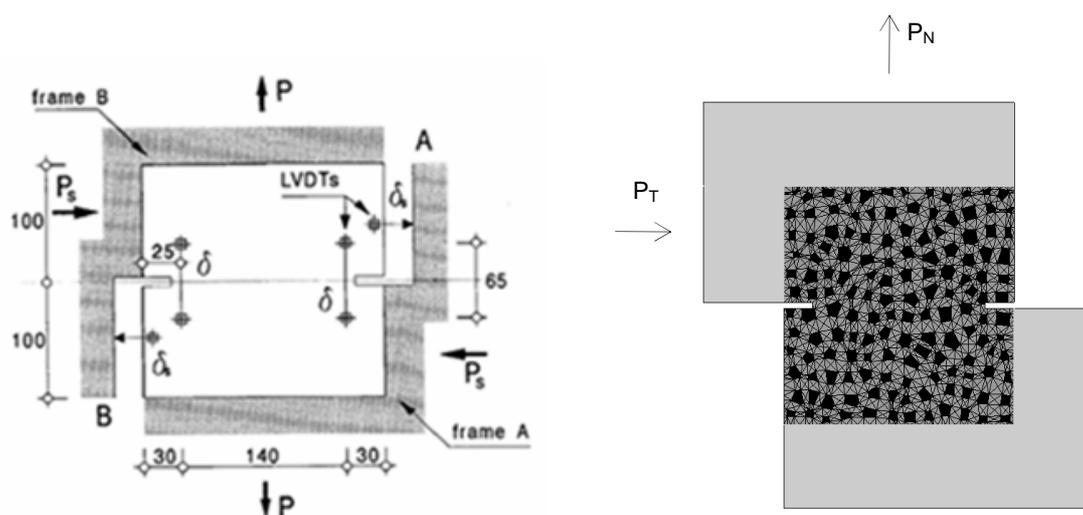


Figura 1: Representación esquemática del ensayo experimental (izquierda) y malla de EF utilizada en la modelización (derecha).

2 MODELIZACIÓN MESOESTRUCTURAL

El comportamiento del hormigón está claramente influenciado por la geometría y las propiedades mecánicas de los componentes de la estructura interna heterogénea del material. Por ello, una manera más adecuada y potente de profundizar el estudio de este tipo de materiales consiste en representar explícitamente la geometría de su mesoestructura, introducir leyes de comportamiento de sus componentes básicos, e intentar reproducir el comportamiento “macro” del material como resultado del análisis mecánico a nivel “meso”.

Durante los últimos 15 años, dentro del grupo de investigación de la ETSECCPB-UPC, se ha venido desarrollando una metodología en 2D (inicialmente) y en 3D (con posterioridad), para el análisis mesomecánico de materiales heterogéneos, en especial para hormigón, utilizando elementos junta de espesor nulo. El modelo consiste en discretizar la estructura interna del material mediante piezas irregulares que representan a los áridos de mayor tamaño (cuya distribución y forma se generan de forma aleatoria mediante un procedimiento basado en la teoría de Voronoi-Delaunay), 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 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 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 el proceso de fractura, el modelo posee dos parámetros que representan las energías de fractura en modo I y II, G_{FI} y G_{FII} . La regla de flujo es no asociada, donde se define una ley de dilatancia para que ésta disminuya 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, y α_d que controla la evolución de la dilatancia en compresión mediante un factor que reduce la componente normal de la regla de flujo. Una descripción más detallada se ha presentado en anteriores publicaciones (Carol et al. 1997; López, 1999; Carol et al. 2001). Resultados del modelo mesomecánico tanto a nivel 2D como 3D para distintas situaciones de carga, tales como tracción y compresión uniaxial, biaxial, ensayo brasileño, etc. pueden consultarse en López et al. (2008a y 2008b) y Caballero et al. (2006, 2007).

En la figura 1 derecha se presenta la malla para el hormigón, junto con las placas de carga, que se ha empleado en este trabajo para las simulaciones de los ensayos numéricos en muestras de 200x200 mm. Se ha discretizado un tamaño de árido de 16 mm de valor máximo, 5.6 mm de valor mínimo y 11.3 de valor medio (25.5 de % en volumen), lo cual representa un tamaño mayor que el máximo de 2 mm empleado en los experimentos analizados con estas muestras. La elección de un tamaño de 2 mm significa un importante incremento del costo computacional, dado el número de áridos y por consiguiente el número de grados de libertad

involucrados. En los estudios que se presentan en el apartado 3 de la malla de 200 mm de lado, se ha adoptado un tamaño mayor a fin de contrastar de forma preliminar el comportamiento del modelo. Posteriormente, en el apartado 4 con una malla de 50 mm de lado, el tamaño de árido empleado es mucho más aproximado al de los experimentos. La medición de los desplazamientos se ha realizado en los mismos puntos que fueron tomados en los ensayos experimentales (Nooru-Mohamed, 1992).

3 RESULTADOS EN LA MUESTRA DE 200 MM DE LADO

Se analizan dos de las trayectorias de carga, correspondientes a los casos 4 y 6 de los ensayos experimentales llevados a cabo por Nooru-Mohamed (1992), los cuales han sido utilizados con frecuencia para contrastar la capacidad de diversos modelos (Cusatis et al., 2006; Oliver et al., 2004; Di Prisco et al., 2000; diversos artículos incluidos en la revista RFGC, 2003). 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: $K_N = K_T = 5 \times 10^8$ MPa/m, $\tan \phi_0 = 0.80$, $\chi_0 = 1.5$ MPa, $c_0 = 7$ MPa, $G_{FI} = 0.00005$ MPa×m, $G_{FII} = 10 G_{FI}$, $\sigma_{dil} = 40$ MPa, $\alpha_d = -2$, $\tan \phi_r = 0.20$ 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, $G_{FI} = 0.0001$ MPa×m. Los ensayos se realizan en condiciones de tensión plana.

Inicialmente, se ha simulado un ensayo de tracción uniaxial (denominado tendencia de carga 0 en Nooru-Mohamed, 1992), llevado a cabo mediante la aplicación de desplazamientos impuestos verticales en la cara superior de la malla. En la figura 2a se presentan las curvas carga-desplazamiento experimental y numérica, mientras que en la figura 2b se muestra el estado de fisuración y en la figura 2c la malla deformada. El estado de fisuración se muestra en términos del trabajo de fractura disipado, representado (en éste y en los demás gráficos en términos de la energía disipada) por el espesor de línea en cada punto de las juntas, en color rojo si la fisura está activa o en color azul si se encuentra en descarga elástica. Se puede apreciar en la figura la concordancia entre las curvas experimental y numérica (este ensayo ha permitido ajustar algunos parámetros del modelo), así como una localización de la fisuración ubicada aproximadamente en el plano que contiene ambas entallas, tal como era de esperar.

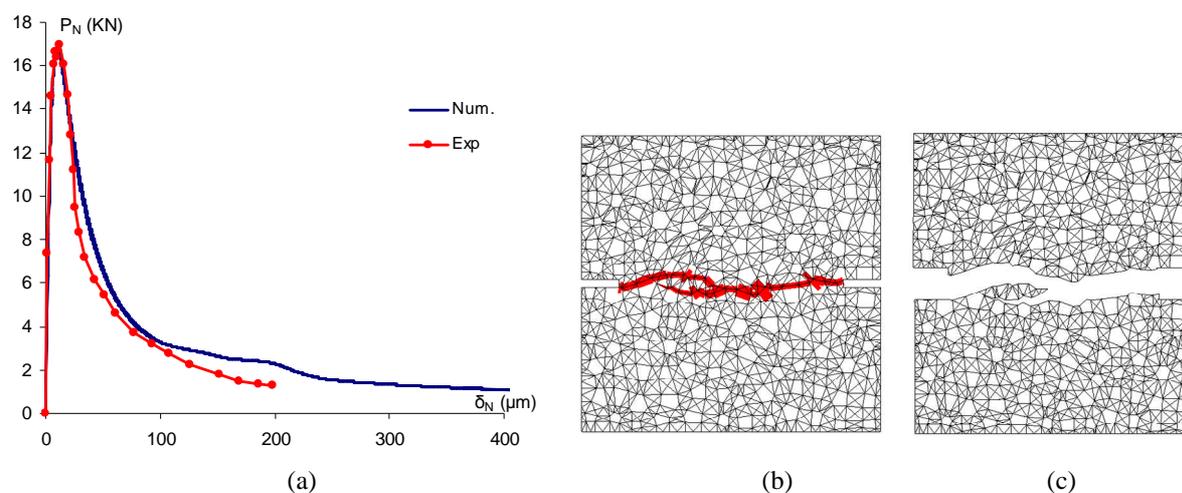


Figura 2: Ensayo de tracción uniaxial: a) curvas carga-desplazamiento, b) estado de fisuración para un valor de $\delta_N = 184 \mu\text{m}$, c) malla deformada para un valor de $\delta_N = 360 \mu\text{m}$.

3.1. Influencia de la carga lateral de corte

Se trata de una tendencia de carga no proporcional, denominada caso 4 en el trabajo experimental, en la cual inicialmente se aplica una carga horizontal en la cara izquierda sobre la entalla en dirección de la muestra (efecto de “corte-confinamiento”) hasta un determinado valor. Posteriormente, mientras la carga de corte permanece constante, se aplica una carga vertical de tracción mediante un control de desplazamientos. En los ensayos experimentales de Nooru-Mohamed, las fuerzas constantes de corte elegidas fueron de 5 KN para la tendencia 4a, de 10 KN para el caso 4b y la máxima carga de corte en ausencia de tracción para el caso 4c.

En la figura 3 se comparan los resultados de los ensayos experimentales y de la simulación numérica mesoestructural, mediante las respectivas curvas de fuerza vertical versus desplazamiento vertical (izquierda) y desplazamientos normal-corte (derecha). En ambas figuras se puede apreciar la muy buena concordancia entre los resultados numéricos y los experimentales. Para los casos 4a y 4b, la modelización captura la reducción de la máxima carga de tracción debido al aumento de la fuerza de corte (en la Fig. 3 izquierda también se incluye la curva de tracción uniaxial). Para el caso 4c la simulación numérica predice una carga máxima de corte algo mayor que el valor experimental (34.56 KN frente a 27.5 KN), si bien captura adecuadamente la pérdida de capacidad resistente a tracción seguida de un cambio a compresión que crece hasta un cierto valor y luego tiende a disminuir gradualmente. La capacidad de la modelización se manifiesta también en el alto grado de concordancia obtenido en la evolución de los desplazamientos en cada caso, mostrada en la figura 3 derecha, resultados que no suelen verse publicados con otros modelos.

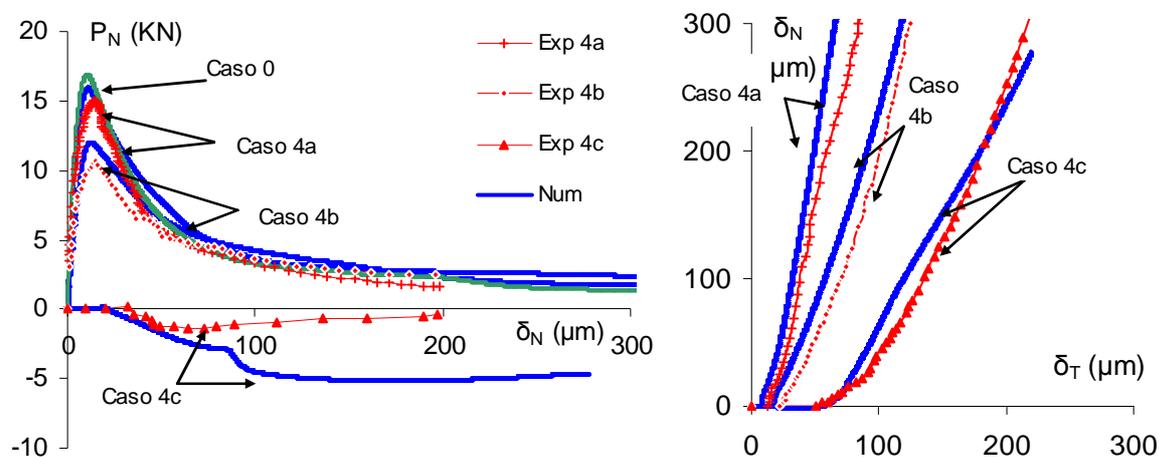


Figura 3. Izquierda: Curvas de fuerza vertical vs desplazamiento vertical para los casos de carga 4a, 4b, 4c (se incluye también el resultado de tracción uniaxial). Derecha: Curvas de desplazamiento normal-corte para los casos 4a, 4b y 4c.

En la figura 4 se presenta la evolución de la tendencia de fisuración correspondiente al caso de carga 4b, obtenida para diferentes etapas de la simulación numérica.

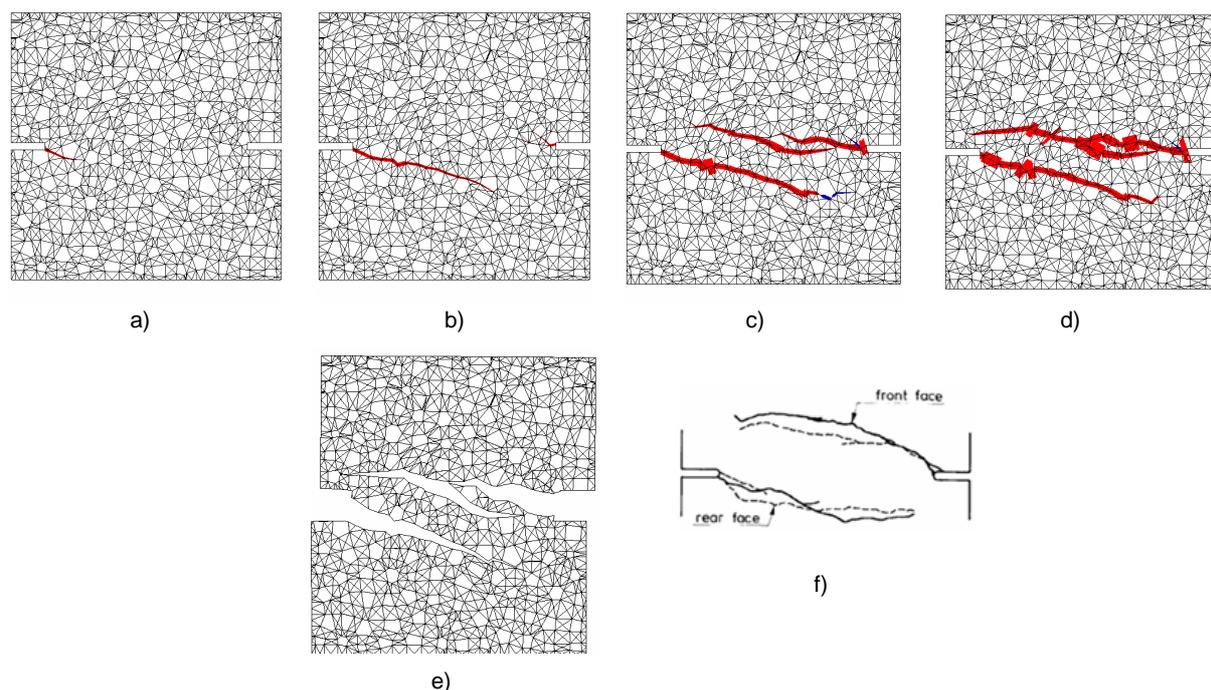


Figura 4. Evolución de la tendencia de fisuración para el caso de carga 4b para valores de desplazamiento vertical de a) $\delta_N = 0.44\mu\text{m}$, b) $\delta_N = 23.69\mu\text{m}$, c) $\delta_N = 166.40\mu\text{m}$, d) $\delta_N = 364\mu\text{m}$. Malla deformada para $\delta_N = 166.40\mu\text{m}$ (e) y tendencia de fisuración para el caso experimental (f).

En la figura 4a, que corresponde al final de la aplicación de la carga de corte, se aprecia que la fisuración comienza en la entalla izquierda con cierta inclinación. En la figura 4b se ve que progresa la fisura inclinada de la izquierda y comienza otra fisura inclinada en zona de la entalla derecha. En la figura 4c se aprecia que la fisura izquierda sigue progresando, pero con cambio de dirección más horizontal, mientras que a la derecha se ha cerrado la incipiente fisura inclinada (en color azul) y progresa una fisuración bifurcada de menor inclinación. En las figura 4d se aprecia que las dos fisuras evolucionan con una marcada tendencia horizontal, incluso inclinada hacia abajo en la fisuración superior. En las figuras 4e y 4f se presentan la malla deformada del estado d) y la tendencia de fisuración para el caso experimental, respectivamente.

En la figura 5 se muestra el estado de fisuración del modelo numérico (izquierda), la malla deformada (centro) y la tendencia de fisuración experimental (derecha), para un estado avanzado del proceso de carga correspondiente al caso 4a. La fisura se inicia de forma inclinada en la zona de la entalla izquierda, posteriormente progresa tendiendo a una posición horizontal, con una franja entre fisuras más estrecha (zona en compresión) que en los otros casos. En el caso 4c, en el proceso de cálculo de llegar a la carga máxima de corte también se ha abierto una fisura horizontal en la zona inferior izquierda cerca de la placa de apoyo, que ha distorsionado el estado de fisuración, si bien los resultados de la carga y los desplazamientos obtenidos han sido bastante aproximados a los experimentales, tal como se aprecia en la figura 3.

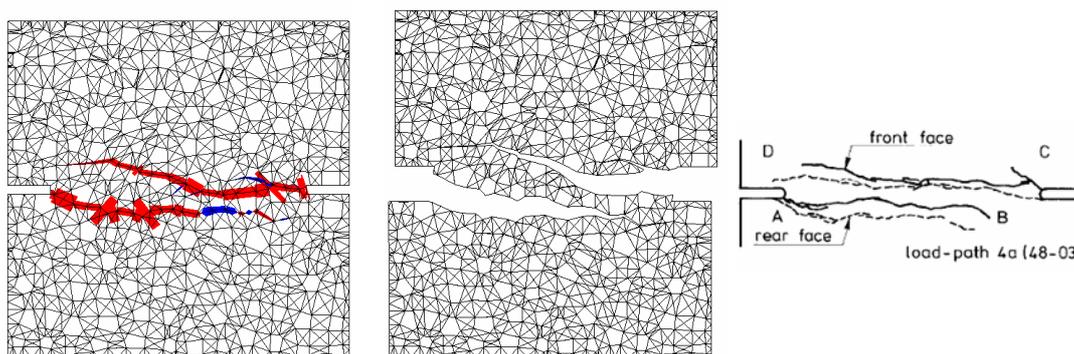


Figura 5. Estado de fisuración final, malla deformada final para la modelización y deformada experimental para el caso 4a (de derecha a izquierda).

En Nooru-Mohamed (1992) se señala que en los tres casos de carga la fisuración se inicia en la zona de las entallas con un ángulo aproximado de 45° . Luego, al aumentar el desplazamiento normal y producirse una rotación de las tensiones principales, la fisuración se propaga con una tendencia curvilínea. La simulación numérica, aún con las limitaciones derivadas del tamaño de árido y en consecuencia de los menores potenciales caminos de fisuración (en zona cercana a entallas), captura cualitativamente los principales aspectos mencionados de la tendencia de fisuración. Por otro lado, en el ensayo numérico las fuerzas de corte de 5 y 10 KN se han impuesto en control de fuerzas y no en control de desplazamientos como en los experimentos (aspecto que se constató luego de realizados los cálculos). Este aspecto de condiciones de contorno posiblemente han condicionado la forma de fisuración del caso 4b. En el caso 4c se requiere evitar la fisuración cerca de la zona de contacto plato de carga-muestra comentado anteriormente.

3.2. Influencia de una relación impuesta de los desplazamientos

En este caso, la tendencia de carga es proporcional, denominada caso 6 en el trabajo experimental, en la cual se aplica una evolución de las cargas en control de desplazamientos de manera que la relación δ_N/δ_T se mantiene constante a lo largo de todo el ensayo. En los ensayos experimentales de Nooru-Mohamed se adoptaron tres diferentes valores de esta relación: δ_N/δ_T iguales a 1, 2 y 3, denominados tendencias de carga 6a, 6b y 6c, respectivamente.

En la figura 6 se presentan los resultados de los ensayos experimentales y de la simulación numérica mesoestructural, mediante las respectivas curvas de fuerza vertical versus desplazamiento vertical (Fig. 6 izquierda) y fuerza de corte versus desplazamiento de corte (Fig. 6 derecha). Se puede apreciar en ambas figuras la tendencia concordante obtenida cualitativamente con la simulación numérica, si bien existen diferencias cuantitativas, que podrían deberse a la necesidad de ajuste de algunos parámetros (de corte) o quizás al tamaño del árido.

El aspecto más saliente de estos resultados es 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.

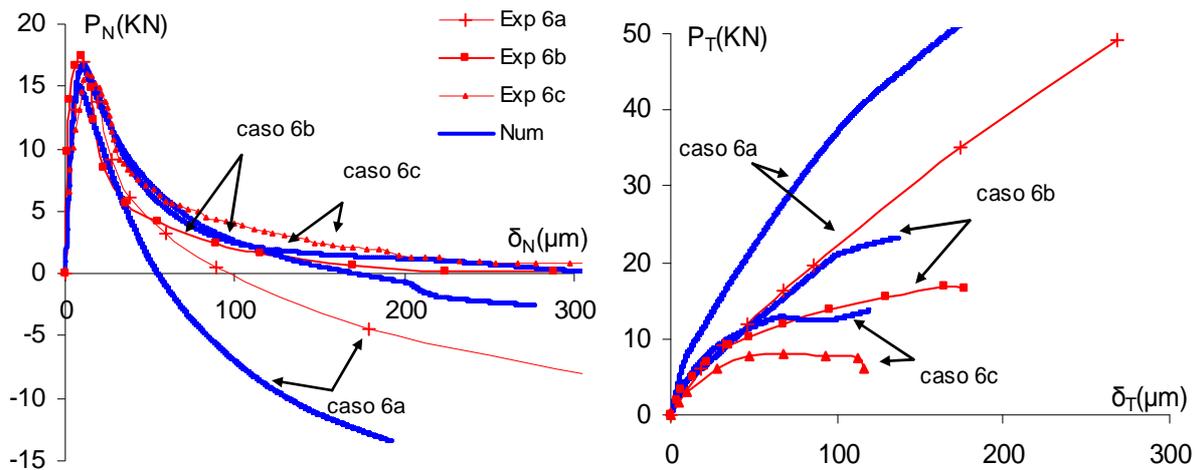


Figura 6. Curvas de fuerza vertical vs. desplazamiento vertical (izquierda) y curvas de fuerza vs. desplazamiento horizontal de corte (derecha), para los casos de carga 6a ,6b y 6c.

Para el caso 6a su efecto es apreciable en el cambio a una fuerza de compresión durante la curva de post-pico; en la medida que aumenta la relación entre δ_N/δ_T (casos b y c), la influencia disminuye drásticamente. Este efecto tiene su correspondencia en las curvas de corte, donde se aprecia que se han alcanzado valores máximos para los caso 6b y 6c, mientras que en el caso 6a sigue en aumento apreciable hasta el nivel alcanzado. En la figura 7 se muestra la tendencia de fisuración experimental (arriba) y la de la simulación numérica (abajo) para los casos 6a, 6b y 6c. Se puede apreciar la concordancia obtenida para los tres casos, así como una tendencia a modo I con el aumento de δ_N/δ_T (en la figura 2 se puede ver el caso de tracción pura).

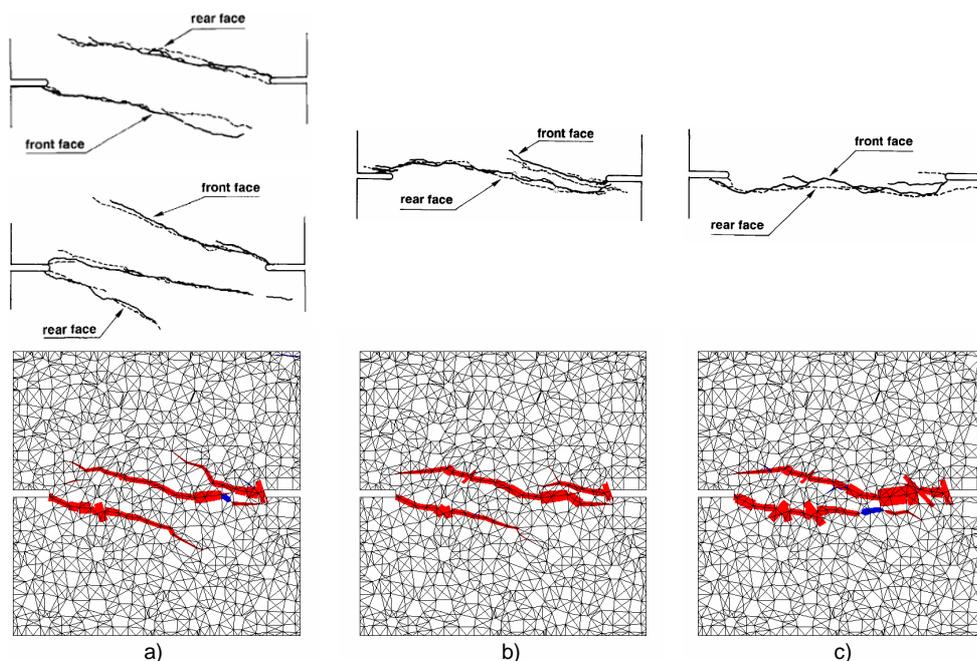


Figura 7. Tendencia de fisuración en el ensayo experimental (arriba) y en la simulación numérica (abajo) para los casos de carga 6a, 6b y 6c (de izquierda a derecha, respectivamente).

4 RESULTADOS EN LA MUESTRA DE 50 MM DE LADO

En Nooru-Mohamed (1992) también se ha analizado el efecto tamaño de la muestra en los casos de carga 4 y 6, ensayando además muestras de 100 y 50 mm de lado. En nuestro modelo mesomecánico, 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. En la adaptación de la malla sólo ha debido corregirse la altura de las entallas para mantenerla en 5mm.

En la figura 8 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. 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 8 en los que, a título ilustrativo, se incluyen también en líneas a trazos los resultados de la malla sin corregir la altura de las entallas). Esto se puede apreciar más claramente en la figura 9, 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 8, 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 resultados experimentales, 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.

En la figura 10 se presenta la tendencia de fisuración experimental (arriba) y la del modelo numérico (abajo) para los casos de carga 6a, 6b y 6c. Resulta especialmente interesante el comportamiento del caso 6a, del cual se han hecho dos ensayos experimentales en las muestras denominadas 47-15 y 48-15 (Nooru-Mohamed, 1992). 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 10 superior), 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 11 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, en la apreciación visual incide la diferencia entre los valores de los parámetros G_{FI} y G_{FII}).

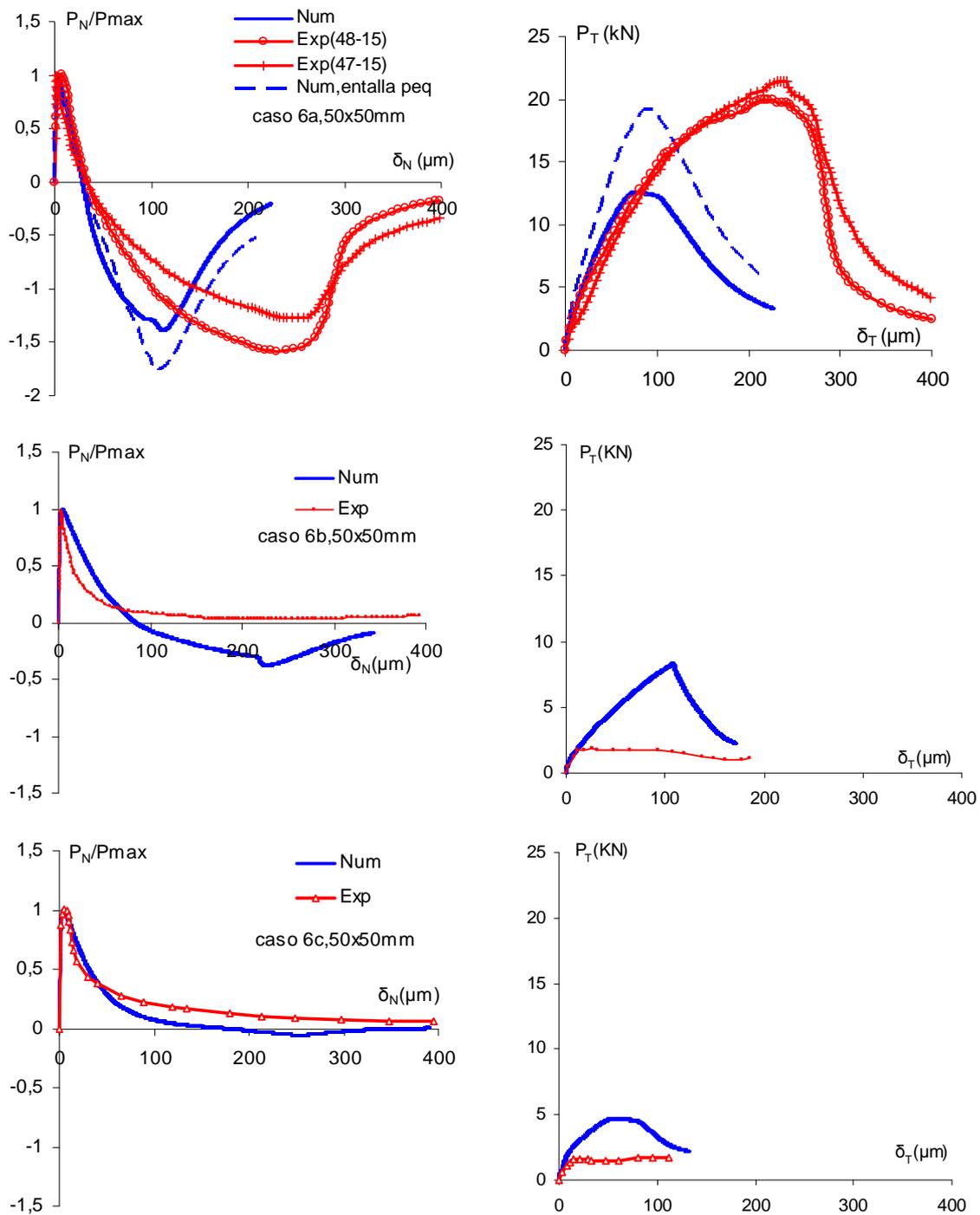


Figura 8. Curvas de fuerza vertical (normalizada) vs. desplazamiento vertical (izquierda) y de fuerza horizontal vs. desplazamiento horizontal (derecha), para los casos de carga 6a, 6b y 6c (de arriba hacia abajo) en las muestras de 50x50 mm.

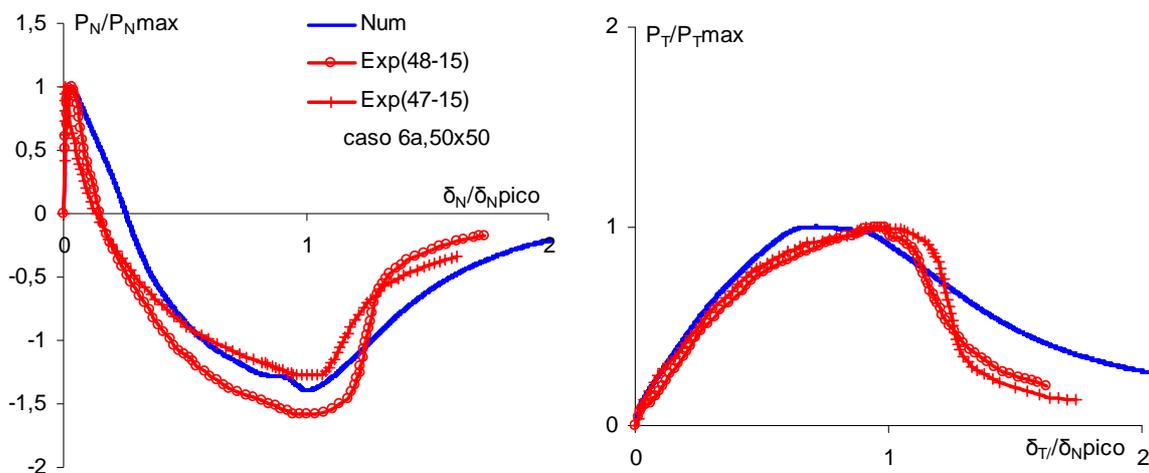


Figura 9. Curvas de fuerza vs. desplazamiento vertical normalizados (izquierda) y curvas de fuerza vs. desplazamiento horizontal normalizados (corte), para el caso de carga 6a en la muestra de 50x50 mm.

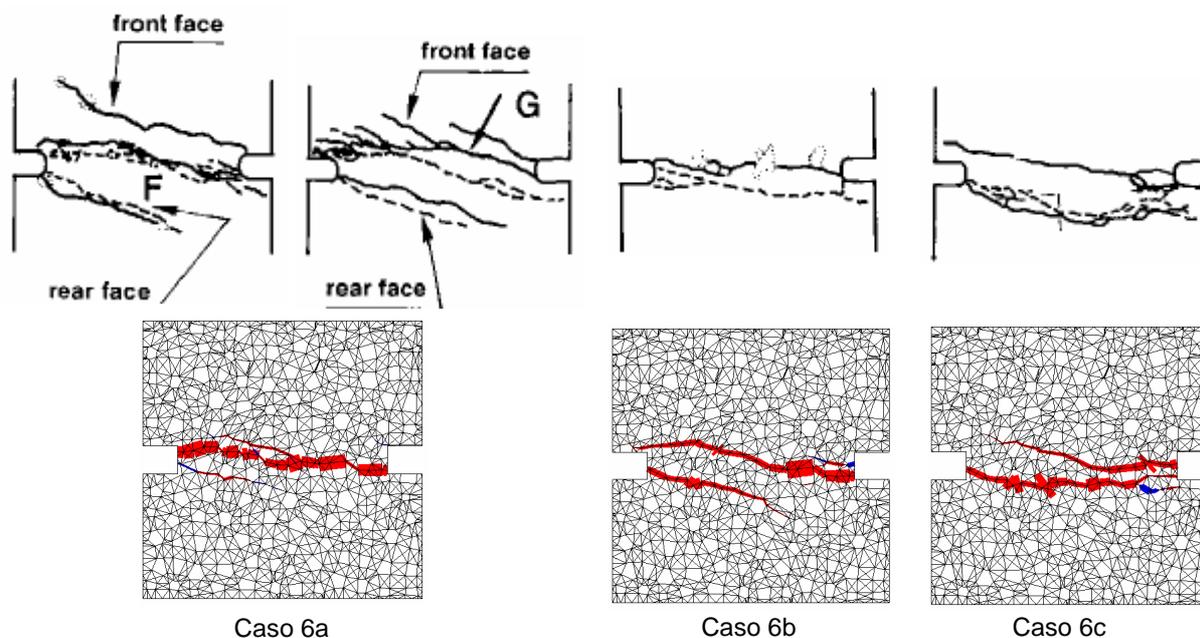


Figura 10. Tendencia de fisuración en el ensayo experimental (arriba) y en la simulación numérica (abajo) para los casos de carga 6a, 6b y 6c en las muestras de 50x50 mm.

En la figura 11a 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 11b y 11c correspondientes a $\delta_N = 42 \mu\text{m}$ y $\delta_N = 76 \mu\text{m}$, respectivamente). En la figura 11d, para $\delta_N = 110 \mu\text{m}$, en una situación cercana a donde se producen los picos tanto de la carga vertical como de la horizontal de corte (ver figura 8 superior), se aprecia que progresa desde la entalla izquierda una fisura aproximadamente horizontal (que ya se observa de forma incipiente en la figura 11c), 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 11e, para $\delta_N = 226 \mu\text{m}$, 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 11f se muestra la malla deformada para $\delta_N = 226 \mu\text{m}$, 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”).

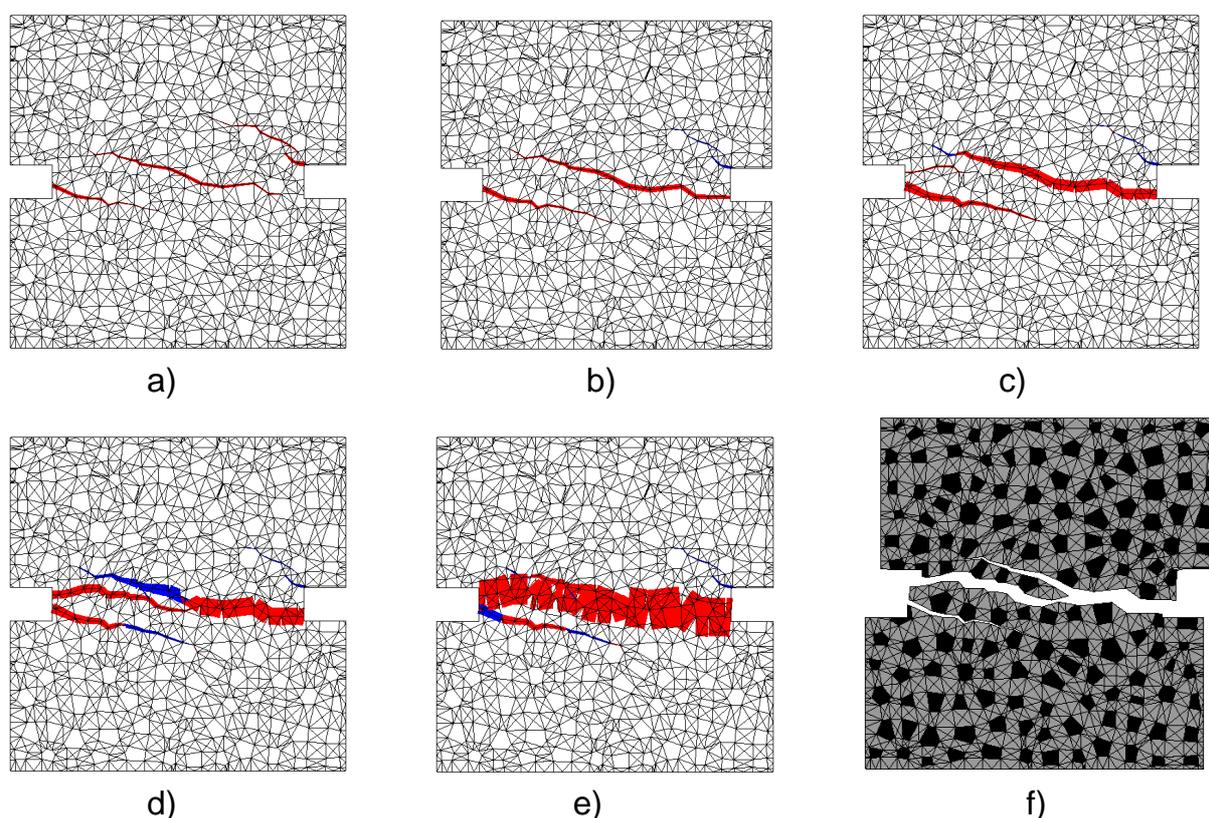


Figura 11. Evolución del estado de fisuración para el caso de carga 6a, en términos del módulo del vector desplazamiento plástico para valores de a) $\delta_N = 17 \mu\text{m}$, b) $\delta_N = 42 \mu\text{m}$, c) $\delta_N = 76 \mu\text{m}$, d) $\delta_N = 110 \mu\text{m}$, e) $\delta_N = 226 \mu\text{m}$ y f) malla deformada para $\delta_N = 226 \mu\text{m}$.

El comportamiento experimental de la zona de proceso de fractura del hormigón en modo mixto también ha sido estudiado por Hassanzadeh (1990). Estos ensayos se han realizado en probetas prismáticas de hormigón de 60 mm de altura y 70x70 mm cuadrados en su sección transversal, que presenta una entalla perimetral de 15 mm de ancho (área neta de 40x40 mm). 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 $\tan \theta = \delta_N / \delta_T$. Los ensayos fueron realizados con valores de $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 75^\circ$.

Nooru-Mohamed (1992) ha comparado sus resultados en las muestras de 50x50 mm para los casos de carga 6 con δ_N / δ_T iguales a 1 ($\theta = 45^\circ$), 2 ($\theta = 63.4^\circ$) y 3 ($\theta = 71.6^\circ$) con los de Hassanzadeh, en términos de las tensiones y desplazamientos correspondientes. En las figuras 12 y 13 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.

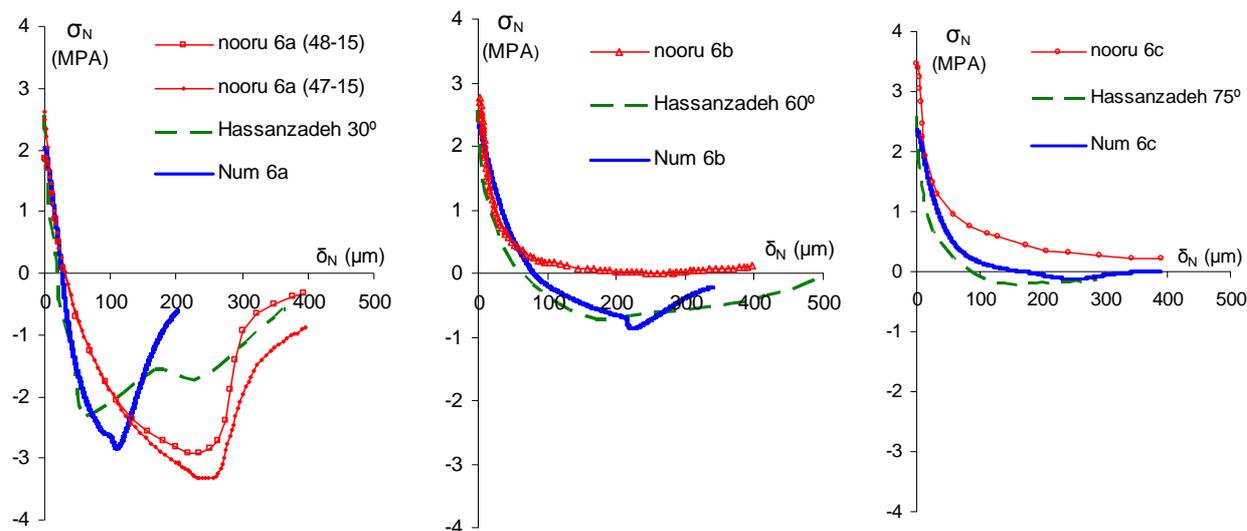


Figura 12. Curvas de tensión vs. desplazamiento vertical (normal) para los casos de carga 6a ,6b y 6c (de izquierda a derecha).

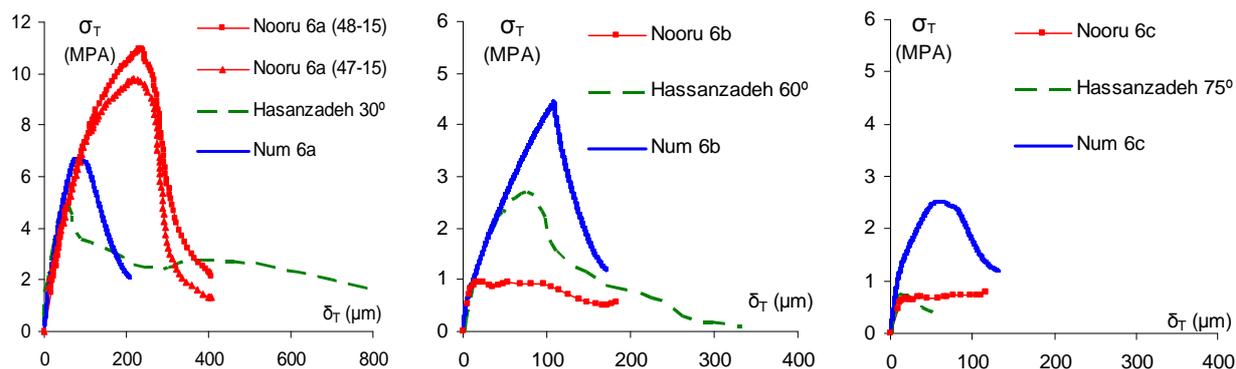


Figura 13. Curvas de tensión vs. desplazamiento horizontal (corte) para los casos de carga 6a ,6b y 6c (de izquierda a derecha).

En la figura 12 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 en cuanto al post-pico de tracción, el cambio de signo de las tensiones, se alcanza un pico de compresión y finalmente 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 13 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.

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 dilatación. Mientras la relación fija entre los desplazamientos impuestos se mantenga inferior al efecto de dilatación 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 anularse. Este fenómeno detectado en la muestra de 50x50 mm cabría esperar que se produjera en la muestra de 200x200 mm (figura 6) si se prolongaran los rangos de carga (limitados en los experimentos de Nooru-Mohamed, para las muestras de 100x100 y 200x200 mm, por la capacidad de carga de la máquina de ensayo).

5 CONSIDERACIONES FINALES

En este artículo se ha empleado un modelo numérico mesoestructural con elementos junta sin espesor para analizar distintos ensayos experimentales llevados a cabo por Nooru-Mohamed (1992), sobre muestras de 200 y 50 mm de lado. Los resultados numéricos obtenidos para la muestra de 200 mm, si bien de carácter preliminar debido al mayor tamaño de árido utilizado en la modelización (y la posible incidencia de las condiciones de contorno en el caso 4 de carga, comentado en el apartado 3.1), muestran una buena concordancia cualitativa y cuantitativa con los resultados experimentales. Por su parte, con la malla de 50 mm de lado y un tamaño de árido similar al de los ensayos experimentales, se ha conseguido reproducir satisfactoriamente el comportamiento de las curvas de carga-desplazamiento (tensión-desplazamiento), así como la formación y evolución de la tendencia de fisuración de los ensayos de Nooru-Mohamed (1992) y similares de Hassanzadeh (1990). El comportamiento detectado en estos ensayos 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 los ensayos de Nooru-Mohamed, todos los artículos consultados se refieren a la malla de 200x200 mm y no aparece el comportamiento con pico y posterior reblandecimiento en compresión. Los trabajos en curso incluyen completar el análisis del efecto tamaño de las muestras empleando un tamaño de áridos similar al de los experimentos, extendiendo los cálculos a las mallas de 100 y 200 mm de lado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MEC (Madrid) la ayuda recibida a través del proyecto de investigación BIA2006-12717 y la beca FPI concedida al segundo autor, así como la colaboración recibida de A. Idiart.

REFERENCIAS

- 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.
- Caballero, A., Carol, I., López C. M., 3D mesomechanical analysis of concrete specimens under biaxial loading. *Fatigue and Fracture Engng. Mat. and Structures*, 30:877-886, 2007.

- Carol, I., Prat, P.C., y López, C.M., A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis. *J. Engng. Mech. ASCE*, 123: 765–773, 1997.
- Carol, I., López, C.M., Roa, O., Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements. *Int. J. Num. Methods in Engineering*, 52(1-2), 193-215, 2001.
- 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.
- 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*, 103:127-148, 2000.
- Hassanzadeh, M., Determination of fracture zone properties in mixed mode I and II. *Engineering Fracture Mechanics*, 35 (4/5):845-853, 1990.
- 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.
- 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 (3): 583-599, 2008a.
- 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(3):601-620, 2008b.
- Nooru-Mohamed, M. B., Mixed-Mode Fracture of concrete: An experimental approach. *PhD thesis, University of Technology, Delft, Holanda*, 1992.
- Oliver, J., Huespe, A, Pulido, M.D. and Blanco, S., Computational modeling of cracking of concrete in strong discontinuity settings. *Computers and Concrete*, 1(1):61-76, 2004.
- RFGC, Revue française de génie civil. 7 (5), 2003.