

## CARACTERIZACION DEL HORMIGON EN MODO MIXTO DE FRACTURA

Oscar I. Montenegro<sup>a</sup>, Ignacio Carol<sup>a</sup>, Domingo Sfer<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ETSECCPB-UPC, Dpto. de Ingeniería del Terreno. Universidad Politécnica de Catalunya.  
Campus Nord, c/Jordi Girona 1-3 Edificio C-1, 08034 Barcelona, España

<sup>b</sup> Instituto de Estructuras. FACET –Universidad Nacional de Tucumán, Avda. Independencia 1800  
4000 San Miguel de Tucumán. Argentina e-mail: dsfer@herrera.unt.edu.ar

**Keywords:** Concrete, Fracture, Experimental Analysis, failure mixed mode.

**Abstract.** A pesar que en los últimos años se vienen desarrollando considerables avances sobre la falla del hormigón, la formación de fracturas bajo confinamiento permanece aún sin ser estudiada suficientemente. En el ámbito teórico numérico algunos modelos proponen un modo mixto tipo asintótico o “modo IIa” con una segunda energía de fractura independiente y significativamente mayor que el modo tradicional de energía I. Las fisuras bajo este modo IIa están sujetas a una compresión suficientemente alta en el plano de fractura, de manera que toda la dilatación se suprime y la fisura es sensiblemente recta a través de los agregados y la matriz. Desde que este modo fue presentado por primera vez, se ha implementado el modelo en un código FE a través de los llamados “elementos de interfase de espesor nulo”, los cuales se han utilizado con bastante éxito en un número importante de estudios numéricos. Sin embargo la validación experimental es una tarea pendiente. En este sentido se pueden encontrar en la literatura intentos de reproducir las fisuras de corte de compresión sobre el hormigón en vigas entalladas sujetas a compresión transversal. No obstante, en la mayoría de los casos la fisura tiende a desviarse del plano de fractura prescripto y los resultados dejan de ser útiles para este propósito. En este trabajo, se describe un trabajo experimental recientemente desarrollado por el grupo de Mecánica de los Materiales de la Escuela de Ingeniería Civil de la UPC de Barcelona (ETSECCPB-UPC) avalado por simulaciones numéricas.

Los especímenes usados son similares a los propuestos por Luong, cilindros cortos con entalladuras circulares en las caras superior e inferior dejando un ligamento también cilíndrico entre ellas. Estas muestras se cargan verticalmente en el núcleo central y se soportan por la corona exterior, originalmente se hacía sin confinamiento. En el montaje desarrollado, se introduce este espécimen en la celda triaxial de gran capacidad, protegida con membranas y sujeta a diferentes niveles de presión de confinamiento antes de aplicar la carga vertical.

Los resultados obtenidos hasta el presente son muy prometedores, la variación carga - desplazamiento y desplazamiento - dilatación muestran las tendencias esperadas. La observación post-mortem de los especímenes también muestran las características previstas en relación con el plano de fractura, presentando fractura en matriz y agregado. Se apunta ahora resolver los detalles experimentales restantes para así evaluar la energía de fractura asociada bajo el “modo IIa”.

## 1 INTRODUCCIÓN

Los fenómenos de fractura juegan un papel esencial en la degradación y rotura de los materiales friccionales cuasi frágiles como el hormigón, y en consecuencia en el comportamiento de muchas estructuras de Ingeniería Civil.

En la actualidad, un buen número de modelos para el análisis del comportamiento mecánico del hormigón incorporan como parámetro la energía de fractura en *modo I* (modo de tracción pura),  $G_f^I$ . Algunos modelos también consideran una segunda energía de fractura en modo mixto, aunque no existe unanimidad de criterio para definir este modo de fractura para estos materiales. En el grupo de Mecánica de Materiales de la UPC, ya hacia 1990 se introdujo el concepto de modo mixto corte-compresión asintótico o *modo IIa* consistente en corte y muy alta compresión sobre el plano de fractura, de tal forma que toda dilatancia queda impedida (I. Carol, P. Prat, 1995 e I. Carol, P. Prat y C. López, 1997).

En hormigón convencional, los áridos son más resistentes que el mortero, y la interfase entre ellos representa el punto más débil del compuesto. Así, en modo I, las fisuras normalmente se inician en las interfase árido-mortero y posteriormente se conectan entre sí a través de la pasta, dando lugar al tipo de trayectoria sinuosa de la Figura 1a. Por otro lado, el modo IIa correspondería a un caso ideal con desplazamiento de corte pero dilatancia totalmente impedida, la única opción cinemáticamente posible para la fisura es una línea recta que corte indistintamente áridos y mortero, ver Figura 1b.

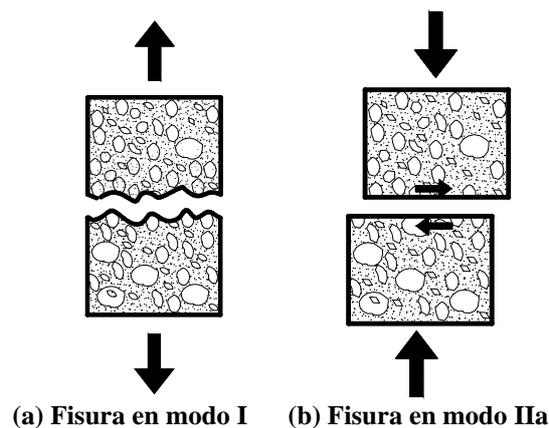


Figura 1. Caminos de la fisura

En la literatura el comportamiento del hormigón en modo I de fractura está ampliamente documentado. En cambio, la fractura en modo mixto está mucho menos estudiada, aún existen controversias respecto a su existencia o no para estos materiales, y muy poco parece existir sobre fractura en corte-compresión.

En este artículo se presentan los trabajos en marcha encaminados a producir una fisura en condiciones lo más aproximadas posible al modo IIa (que como se ha dicho es un modo asintótico) y a caracterizar los parámetros correspondientes a este modo de fractura, fundamentalmente la energía  $G_f^{IIa}$ .

Producir una fisura en corte-compresión en un plano predeterminado no es algo trivial. Para ello se ha tenido que concebir y desarrollar una nueva disposición de ensayo basada en la propuesta original de Luong (M. P. Luong 1991 y M. P. Luong 1992), consistente en muestras cilíndricas con entallas también cilíndricas desde ambas caras, a la que se ha añadido presión lateral mediante su introducción en célula triaxial. Los ensayos experimentales se han acompañado de simulaciones numéricas mediante un modelo de elementos finitos en 3D, usando elementos de interfase, en los que se ha usado una superficie

de fractura que corresponde a un modelo constitutivo no asociado desarrollado en el mismo grupo de investigación (I. Carol, P. Prat y C. Lopez, 1997).

## 2 ENSAYOS EXPERIMENTALES DE CORTE

### 2.1 Geometría de las muestras

Se han usado muestras cilíndricas de 100 mm de diámetro y 40 mm de altura, con entallas concéntricas, también cilíndricas, de 10 mm de profundidad ubicadas en ambas caras, superior e inferior. Con el fin de conseguir que el plano de fractura sea más vertical se han practicado entallas de distintos diámetros en cada cara de la probeta.

En las Figuras 2 y 3 se muestra un esquema y un corte de las muestras utilizadas en los ensayos.

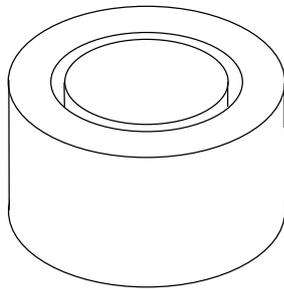


Figura. 2. Vista de la muestra.

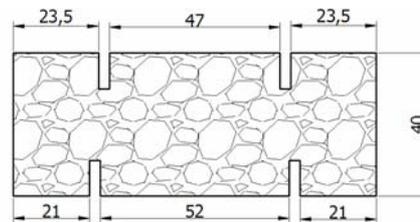


Figura. 3. Sección transversal de la muestra.

Para obtener la geometría de las muestras se han moldeado probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, que se han cortado con un disco de diamante en probetas de 40 mm de altura. Luego se les han realizado las entallas utilizando una broca de extracción de testigos.

### 2.2 Aplicación de cargas

El principio de aplicación de cargas se muestra en el croquis de la figura 4.a, donde se observa la disposición de la muestra entre los cabezales de carga. Se distingue por un lado el caso no confinado donde sólo se aplica la carga que genera la sollicitación de corte (fig. 4b) y por otro lado la aplicación del confinamiento sobre la cara exterior de la muestra (fig. 4c). Esto último se logra introduciendo el conjunto en la célula de carga triaxial que se muestra en la figura 5. Este equipo fue utilizado previamente por el equipo de investigación para otros estudios experimentales (D. Sfer, I. Carol, R. Gettu y G. Etse, 2002)

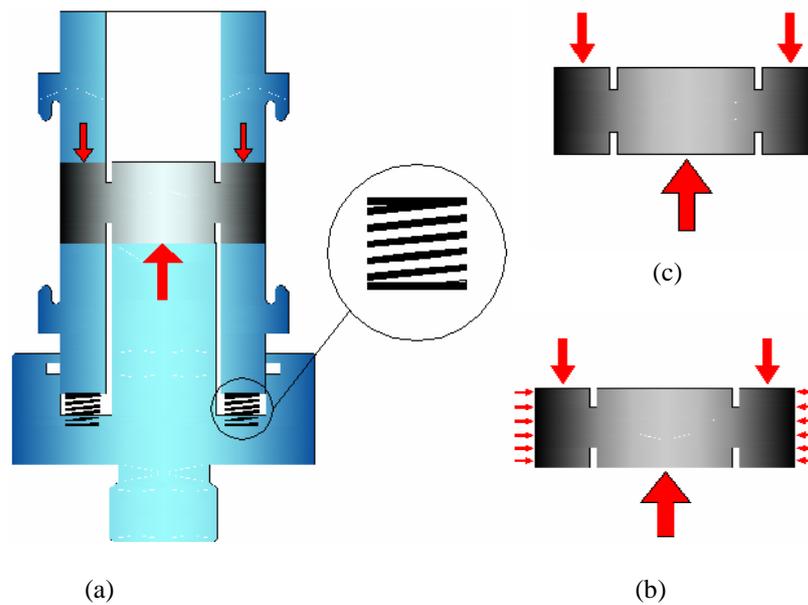


Figura. 4. (a) Sistema de aplicación de cargas. (b) Estado de cargas en ensayos no confinados. (c) Estado de cargas en ensayos confinados.

La aplicación de las cargas se realiza a través de un sistema de cabezales especialmente diseñados para poder realizar los ensayos confinados y no confinados.

Tal como se puede ver en la Figura 4 (a), el sistema de aplicación de cargas cuenta con un sistema de muelles en la parte inferior que le brindan estabilidad al sistema, permitiendo controlar mejor en régimen de post-pico, ya que la falla del hormigón en los ensayos de corte no confinados es de tipo frágil.

Un esquema general del ensayo de corte confinado, realizado en la cámara triaxial, se muestra en la figura 5.

En los ensayos de corte confinados, las muestras se recubren mediante camisas de goma para aislar la muestra del fluido confinante, e impedir la penetración del mismo en los contactos probeta-cabezal generando acciones verticales indeseadas. Así, se consigue sólo confinamiento lateral sobre las probetas ensayadas.

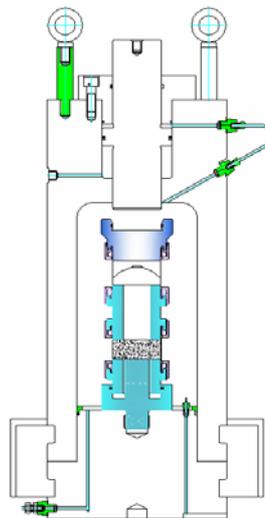


Figura 5. Esquema general de *ensayos confinados*.

## 2.3 Material

Las muestras ensayadas corresponden a dos tipos diferentes de hormigón y a un mortero correspondiente a uno de ellos. Los materiales utilizados se detallan en la Tabla 1.

Material	Tmax	Resistencia Máxima a compresión	Modulo Elástico
Hormigón Normal	8mm	56 MPa	35000 MPa
Hormigón de Alta Resistencia	10mm	90 MPa	35000 MPa
Mortero (Hormigón Normal)	-	56 MPa	35000 MPa

Tabla 1. Materiales utilizados en los ensayos de corte.

En todos los casos los ensayos fueron realizados a edades superiores a los 28 días.

## 2.4 Instrumentos de medida

Para realizar la medición de los desplazamientos verticales se utilizaron LVDTs acoplados adecuadamente al cabezal de aplicación de cargas, con los que se pudo medir directamente los desplazamientos producidos en el plano de fractura.

Para poder realizar la medida de los desplazamientos verticales dentro de la cámara triaxial, se han incorporado LVDTs sumergibles, que permiten operar adecuadamente hasta presiones de confinamiento de 21 MPa.

Para poder realizar la medida de los desplazamientos circunferenciales de las muestras, se ha instalado un dispositivo que consta de una cadena circunferencial envolvente de longitud invariable que lleva instalado en sus extremos un transductor extensométrico que permite medir el cambio de longitud de la circunferencia. Este dispositivo fue construido para poder operar adecuadamente en el interior de la cámara triaxial.

## 2.5 Descripción del ensayo

Para la realización del ensayo la probeta se coloca entre los cabezales especiales mencionados anteriormente. La probeta recibe la carga vertical desde arriba sobre la superficie anular exterior (entre la entalla y el límite de la probeta). Por la parte inferior, la carga se transmite a la superficie central de la probeta (círculo interior a la entalla). Esta disposición permite que la transmisión de las cargas se realice en un modo predominante de corte (o modo II) a lo largo del ligamento cilíndrico entre ambas entallas.

Básicamente los ensayos realizados se dividen en dos grupos:

*Ensayos de corte sin confinamiento lateral*, que se realizan de acuerdo a lo explicado anteriormente.

*Ensayos de corte con confinamiento lateral* (confinados), en los que antes de ser cargadas verticalmente, las probetas se someten a una presión de confinamiento lateral que luego se mantiene constante durante el resto del ensayo.

En este último tipo de ensayos la superficie de fractura prescrita se encuentra sometida a un modo de *corte – compresión*.

Los ensayos confinados se realizan para distintas presiones de confinamiento lateral, ya que se busca llegar a determinar la energía de fractura en modo II asintótico, el cual se logra para presiones de confinamiento suficientemente altas.

## 3 MODELO 3D DE ELEMENTOS FINITOS

Las muestras ensayadas experimentalmente han sido contrastadas con un modelo

tridimensional de elementos finitos, figuras 6 y 7. Se ha realizado el mallado de un cuarto de probeta, ya que por razones de simetría geométrica y de cargas no es necesario representar la totalidad de la muestra. El mallado se ha realizado parcialmente a través del pre-procesador comercial GiD.

En el modelo se han utilizado elementos tipo junta de espesor cero, cuyo comportamiento se rige por el modelo de constitutivo anteriormente referido que tiene en cuenta las energías de fractura en modo I y en modo IIa [2].

Básicamente el mallado del modelo se ha realizado utilizando elementos tetraédricos con un comportamiento elástico ( $E = 35000$  MPa,  $\nu = 0,2$ ).

A lo largo del plano de fractura se han insertado los elementos junta de espesor nulo mencionados anteriormente. También se ha incorporado un plano de junta en dirección radial, ubicado en la zona central del cuarto de probeta, para poder representar las fisuras de tracción que se producen en ensayos con bajo o nulo confinamiento debido a la dilatancia.

Los parámetros de fractura adoptados para estos elementos son:

$$G_f^I = 0.03 \text{ N/mm (energía de fractura en modo I)}$$

$$G_f^{IIa} = 0.3 \text{ N/mm (energía de fractura en modo IIa)}$$

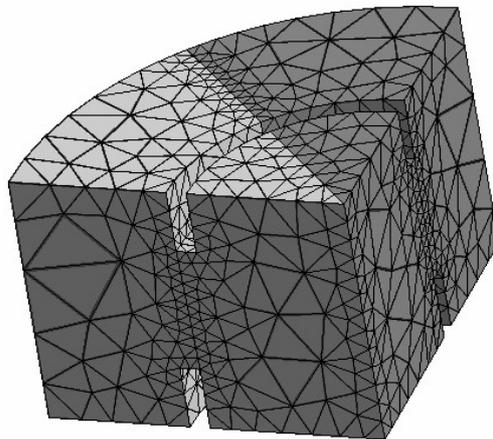


Figura 6. Modelo de elementos finitos 3D.

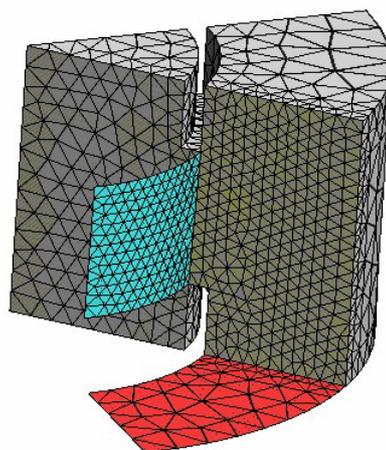


Figura 7. Ubicación de elementos de interfase de espesor cero, en el modelo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados experimentales

Con el objetivo de poder determinar los parámetros de fractura en modo II, se ha realizado una primera serie de ensayos incluyendo ensayos no confinados y ensayos con presiones de confinamiento lateral de 1MPa, 2MPa, y 4MPa.

En los ensayos realizados se ha medido la carga vertical aplicada, los desplazamientos verticales de corte directamente producidos en el plano de fractura y los desplazamientos circunferenciales.

A partir de estos resultados se han obtenido curvas carga-desplazamiento vertical y curvas desplazamiento vertical- desplazamiento lateral.

### 4.2 Ensayos no confinados

En la figura 8 se observa una fotografía de la disposición general del ensayo. La figura 9 muestra la curva carga-desplazamiento vertical típica obtenida en estos ensayos.



Figura 8. Disposición ensayo no confinado

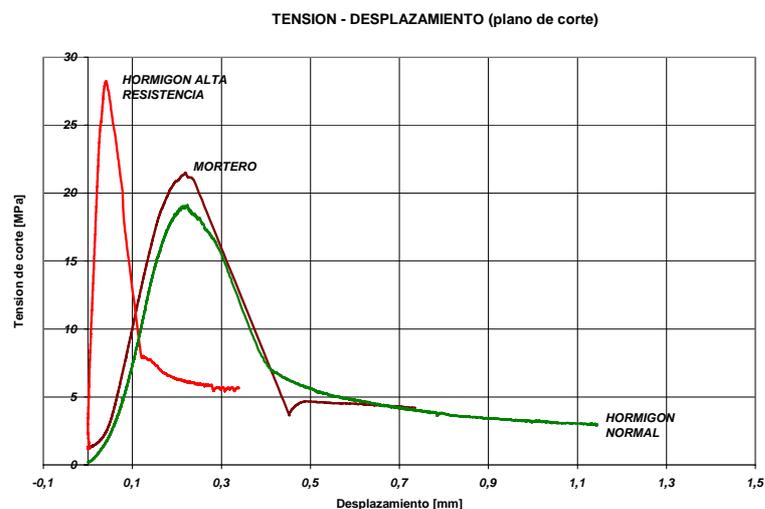


Figura 9. Curvas tensión de corte - desplazamiento vertical, ensayos no confinados.

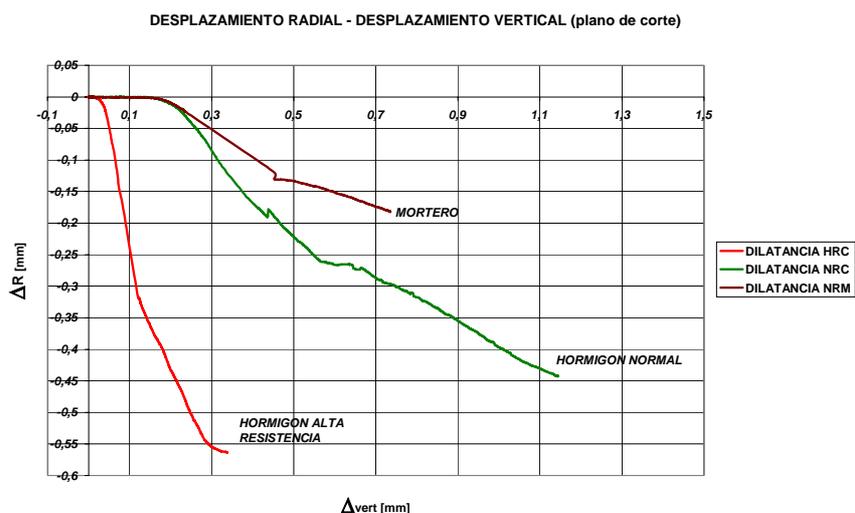


Figura 10. Desplazamiento radial vs. Desplazamiento vertical.

En la figura 10 podemos observar las curvas tensión de corte vs. Desplazamiento vertical, y en la figura 9 podemos observar las curvas de dilatación correspondientes a las mismos ensayos mostrados en la figura 9.

En todos los casos se observa una zona después del pico de máxima carga que la gráfica cambia bruscamente su pendiente. Esto nos marca dos mecanismos bien diferenciados para resistir las tensiones de corte generadas:

Un primer mecanismo es el que las tensiones son transmitidas por corte a través del ligamento cilíndrico entre entallas. El cambio brusco de pendiente en la curva se produce cuando se desarrolla completamente la fisura circunferencial a lo largo de dicho ligamento.

El segundo mecanismo entra en funcionamiento a continuación, y se refleja en la curva carga- desplazamiento por la rama descendente después del salto. En esta rama, la probeta sigue resistiendo la carga, y va perdiendo gradualmente su resistencia a medida de que se van abriendo las fisuras radiales de tracción. Estas fisuras se producen debido a la dilatación que se genera al deslizar sobre la fisura cilíndrica el sector central respecto al anillo circunferencial exterior.

Una vez de que se han abierto aproximadamente cuatro fisuras radiales, la probeta alcanza su resistencia residual.

En la figura 11 podemos observar las fisuras radiales que se producen en las muestras ensayadas.



Figura 11. Fotografía de una muestra ensayada a corte sin confinamiento lateral.

### 4.3 Ensayos con presión de confinamiento

En los ensayos de corte con confinamiento lateral, también se han medido: la carga vertical, los desplazamientos verticales y los desplazamiento circunferenciales. Adicionalmente en estos ensayos se ha medido la presión de confinamiento impuesta en la cámara, a través de un transductor de presión.

La disposición de la muestra junto con los LVDTs en el interior de la cámara de confinamiento se muestra en la Figura 12.

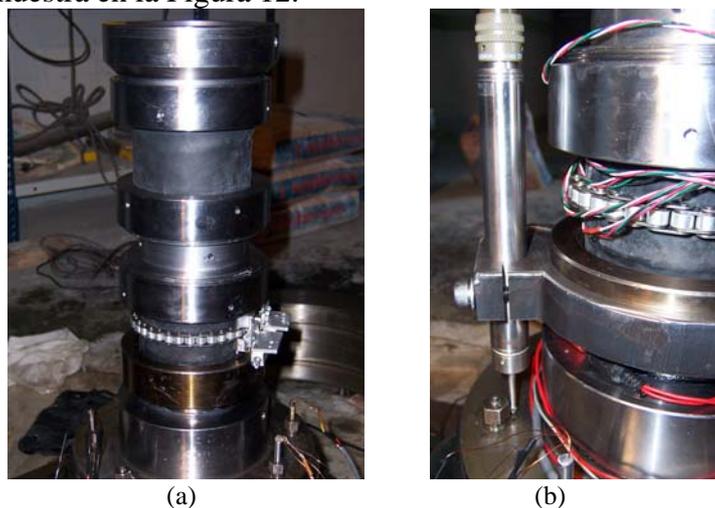


Figura 12. a) Fotografía de la muestra en el interior de la cámara de confinamiento. b) LVDTs acoplados a los cabezales de aplicación de carga.

De los resultados obtenidos hasta el momento se ha observado que, en el caso de un hormigón normal con un tamaño máximo de árido grueso ( $t_{\max}$ ) de 10 mm, las fisuras radiales aun se siguen produciendo para presiones de confinamiento lateral de 4 MPa.

Esto se puede apreciar en las muestras ensayadas, que se muestra en las fotografía de la Fig. 13.

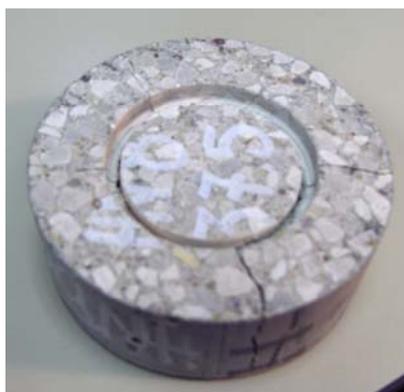


Figura 13. Fotografía de muestra ensayada a corte con confinamiento lateral de 4 MPa.

En la Fig. 14 se representan las curvas tensión de corte *vs.* Desplazamiento vertical y desplazamiento radial *vs.* Desplazamiento vertical, para presiones de confinamiento lateral de 0MPa y 2MPa, en los ensayos realizados en un hormigón normal con  $t_{\max}=10\text{mm}$ .

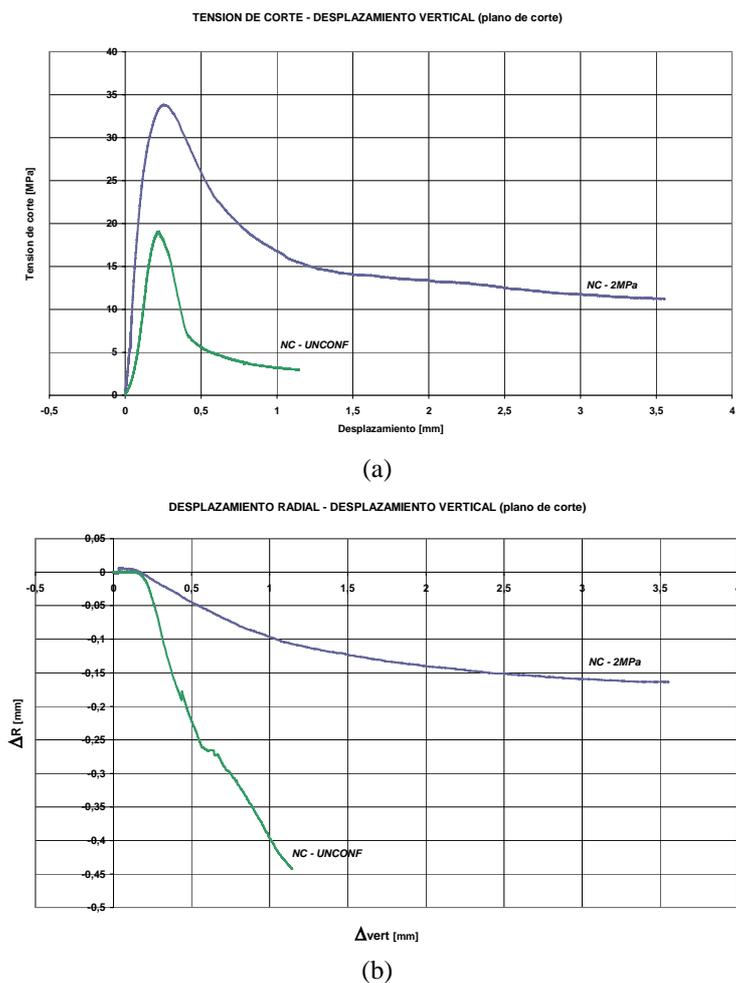


Figura 14.a) Curvas tensión de corte vs. Desplazamiento vertical. b) Desplazamiento radial vs. Desplazamiento vertical, en ensayos con y sin presión de confinamiento.

#### 4.4 Resultados numéricos

Hasta el momento se ha realizado la simulación de los ensayos de corte no confinados, y de los ensayos de corte confinados para presiones de confinamiento de 1 y 2MPa.

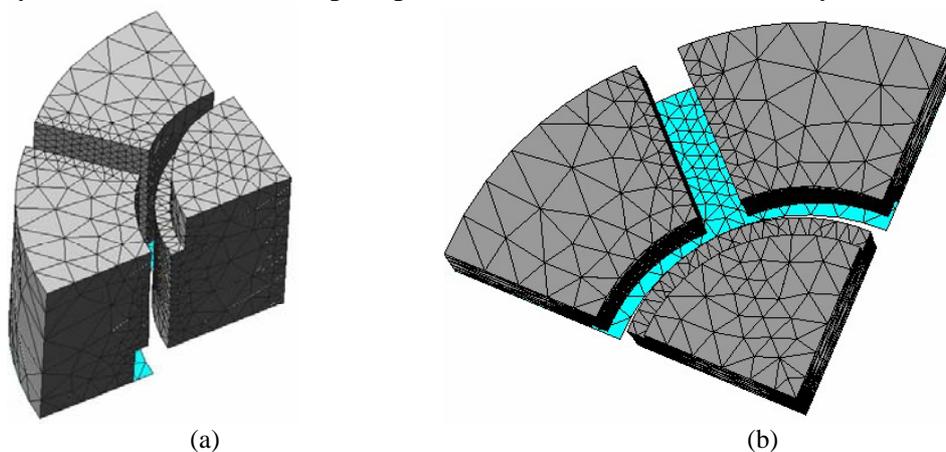


Figura 15. (a) Vista lateral del modelo deformado. (b) Vista cara superior del modelo deformado.

En la Figura 15 se puede observar el modelo totalmente deformado, una vez que abiertas por completo las fisuras de corte y de tracción.

En la actualidad se está trabajando en ajustar los parámetros del modelo de elementos finitos para obtener curvas tensión de corte vs. Desplazamiento vertical y desplazamiento vertical vs. Desplazamiento radial, que se ajusten a las obtenidas en los ensayos experimentales.

#### 4.5 Existencia del modo II asintótico o modo IIa.

En una serie preliminar de ensayos se pudo comprobar la existencia del modo IIa, sin que aún se pudieran medir adecuadamente los desplazamientos verticales y circunferenciales en el interior de la cámara triaxial.

En la figura 16 se muestra una fotografía tomada a una muestra ensayada en un ensayo de corte confinado a una presión de confinamiento mayor de 4 MPa, en la cual se observa claramente que el plano de fractura se produjo a través de una línea recta cortando indistintamente áridos y mortero. En esta probeta tampoco se observaron fisuras radiales de tracción.



Figura 16. Plano de fractura en modo IIa.

## 5 CONCLUSIONES

De los resultados experimentales obtenidos hasta el momento se pueden extraer las siguientes conclusiones preliminares:

- Los ensayos realizados sin confinamiento lateral muestran que el hormigón de alta resistencia presenta un comportamiento más frágil que el hormigón normal, y a su vez la resistencia a corte también es mayor.
- En los ensayos sin confinamiento también pudo comprobarse que el mortero presenta un comportamiento de “softening” algo más frágil que el hormigón normal al que pertenece.
- La resistencia al corte y la ductilidad se incrementan significativamente ante el efecto del confinamiento lateral.
- Para presiones de confinamiento lateral de aproximadamente 4MPa, aun se producen las fisuras radiales de tracción debidas a la dilatación por lo que cabe esperar que la dilatación se suprima totalmente para presiones de confinamiento algo mayores.
- En los ensayos preliminares realizados con presiones superiores se ha podido verificar la existencia de un modo II asintótico en el cual está suprimida completamente la dilatación.

- Los resultados preliminares de la modelación numérica muestran un buen acuerdo cualitativo con el comportamiento experimental, a falta del ajuste cuantitativo de las curvas.

## AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se financian principalmente mediante el proyecto MAT2003-02481. El primer autor agradece la beca doctoral FPU-MEC. EL tercer autor disfrutó de una beca de movilidad MEC (jóvenes doctores) en 2004-05 y en Febrero de 2006 vino de visita a la UPC financiado mediante una ayuda de “Grups Consolidats” de la Generalitat de Catalunya (2005SGR-L-00291).

## REFERENCIAS

- I. Carol, P. Prat. “Multicrack model based on the theory of multisurface plasticity and two fracture energies”. In *E.Oñate et al, eds, COMPLAS4. CIMNE (UPC) Barcelona*, Pp 1583-1594, 1995.
- I. Carol, P. Prat, C. Lopez. “Normal/shear cracking model: Application to discrete crack analysis”. *Journal of Engineering Mechanics*. Vol. 123, No.8, Pp. 765-773, 1997
- M. P. Luong. “Tensile and shear strength of concrete and rock” *Engineering Fracture Mechanics*. Vol. 35, Nº1/2/3, pp 127-135, 1990
- M. P. Luong. “Facture testing of concrete and rock materials”. *Nuclear Engineering and Design* Vol. 133, pp 83-95, 1992
- D. Sfer, I. Carol, R. Gettu and G. Etse. “Experimental study of the triaxial behaviour of concrete” *Journal of Eng.. Mech. ASCE*, vol. 128/2, pag 156-163, Feb. 2002.