

## EFFECTO DEL CONFINAMIENTO EN LAS PROPIEDADES DE FISURACION DEL HORMIGON

Domingo Sfer<sup>\*</sup>, Ignacio Carol<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Construcciones y Obras Civiles, Universidad Nacional de Tucumán  
Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina  
e-mail: dsfer@herrera.unt.edu.ar

<sup>†</sup> Departamento de Ing. del Terreno Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña  
Jordi Girona 1-3, Edif. D2, 08038 Barcelona, España  
e-mail: ignacio.carol@upc.es

**Key words:** hormigón, ensayos triaxiales, confinamiento, fisuración bajo estado multiaxial.

**Abstract.** *El comportamiento mecánico del hormigón y los materiales cuasifrágiles muestran una gran sensibilidad al confinamiento, por lo tanto el estudio experimental bajo estados multiaxiales es de fundamental importancia. Frente a la acción de bajo confinamiento, el material muestra un notable incremento en su capacidad resistente y bajo la acción de confinamientos moderados sobreviene además un radical cambio en su comportamiento de post pico, presentándose claramente la transición frágil - dúctil. Estos efectos son de gran importancia en el diseño de estructuras de hormigón armado, en donde la ductilidad y la sobrerresistencia revisten un gran interés. En este artículo se presenta un estudio experimental sobre muestras cilíndricas de hormigón bajo confinamiento. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la UPC, Barcelona, España. Para el desarrollo de los mismos se ha utilizado una célula de carga triaxial con una capacidad de hasta 140 MPa de presión de confinamiento y una prensa servocontrolada de 500 t. Se presentan los resultados de los ensayos triaxiales de compresión y de extensión respectivamente. Se discuten estos resultados y otros aspectos claves en la evolución de la fisuración bajo estados multiaxiales.*

## 1 INTRODUCCION

El comportamiento del hormigón se caracteriza por tres fases diferenciadas: una etapa inicial de reducida o nula disipación energética, la cual puede aproximarse como lineal dentro de márgenes de error aceptable. Una etapa no lineal de tensiones incrementales, conocida como endurecimiento, caracterizada por una continua y creciente degradación de las propiedades mecánicas iniciales. Finalmente, una etapa de ablandamiento caracterizada por rigideces negativas con caída de tensiones frente a deformaciones crecientes.

Tanto los límites como la extensión de cada una de estas tres fases poseen una fuerte dependencia del estado e historia de carga seguida. Esta propiedad sitúa al hormigón y a otros materiales cohesivo-friccionales en un grupo de materiales altamente complejos para su modelación teórica.

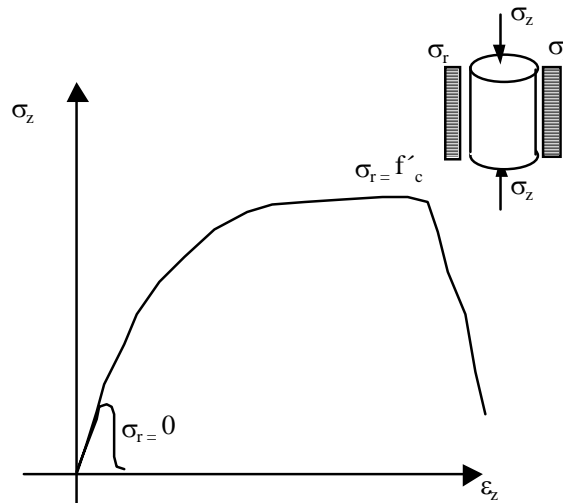


Figura 1. Respuestas tensión-deformación para compresión con y sin confinamiento

La figura 1 muestra la respuesta material frente a dos situaciones de carga, en la misma se aprecia la fuerte dependencia de la respuesta del hormigón respecto del estado de tensiones, caracterizado en este caso por el nivel de confinamiento lateral.

## 2 MECANISMO DE FALLA

Si bien el mecanismo de falla del hormigón está caracterizado por un proceso continuo de degradación, involucrando una transición paulatina de las 3 fases antes señaladas, existen submecanismos estrictamente diferenciados que permiten interpretar la cinemática del material en dichas etapas. Más aún esos submecanismos varían notablemente con la presión media que caracteriza al estado tensional.

Una descripción del micro mecanismo interno que explica el comportamiento del Hormigón es el propuesto por Van Mier [1], figura 2. En este esquema se representa al material mediante partículas circulares, unidas entre sí a través de fuerzas internas de cohesión. Asimismo se representa a la carga externa  $P_1$ , que corresponde a una fuerza vertical de compresión. Extendiendo este concepto al marco de la teoría de la Elasto-plasticidad, se puede interpretar que en realidad existe un mecanismo de resortes uniendo las partículas. Estos resortes en presencia de presión externa responden en un primer momento elásticamente, siendo el límite elástico del resorte a tracción considerablemente menor que el del resorte de compresión. De la interacción entre partículas puede apreciarse claramente que la acción de esta carga vertical de compresión genera una tracción en la dirección horizontal. Por lo tanto la deformación plástica por pérdida de cohesión en la dirección transversal a la fuerza externa se desarrolla conjuntamente con una respuesta elástica de contacto diagonal entre partículas. Si el comportamiento plástico en la dirección transversal se limita a un ablandamiento, el comportamiento global corresponde a una fisura vertical como la observada en compresión uniaxial (compression splitting)

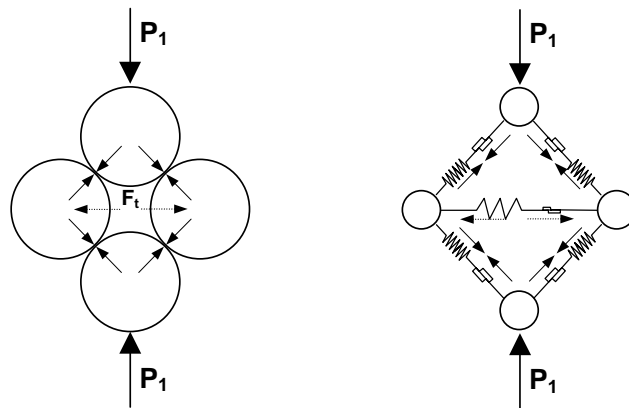


Figura 2. Esquema de interacción entre partículas (caso compresión uniaxial)

Bajo estas mismas consideraciones y con un esquema similar puede explicarse también el caso de compresión biaxial. La diferencia radica en que en este caso aparece también una fuerza externa horizontal de compresión. En la figura 3 se presenta un esquema análogo sólo que este caso también se tiene una carga horizontal de compresión. Esta fuerza de compresión es opuesta a la fuerza de tracción que genera la fisura, por lo tanto la fuerza de tracción se reduce. Es decir, la presencia de esta presión de confinamiento es la responsable de un incremento en la carga axial necesaria para producir la fisuración. De esta forma puede explicarse que una consecuencia directa de la acción del confinamiento es el incremento de la capacidad portante o resistencia del material.

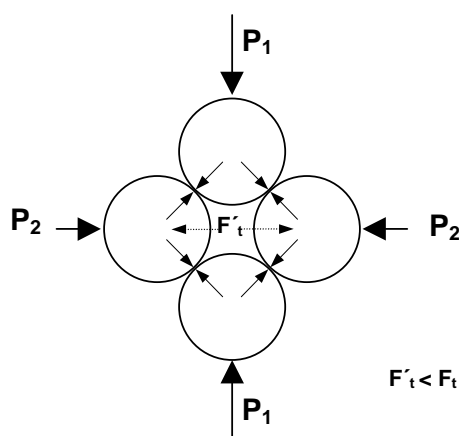


Figura 3. Esquema de interacción entre partículas (caso compresión con confinamiento)

El caso de una compresión triaxial presenta una situación análoga, sólo que en este caso se tiene una fuerza horizontal de compresión adicional en la dirección perpendicular a la figura 3, la acción de esta fuerza reduce aún más la fuerza de tracción responsable de la fisura. De manera que el efecto de un confinamiento triaxial produce un mayor incremento de la capacidad portante del material.

Por otro lado se puede considerar el caso del ensayo triaxial de extensión, es decir aquel en el que las presiones de confinamiento horizontales son altas y se combinan con presiones verticales nulas o muy bajas. Bajo estas circunstancias aún sin que se tenga la acción de una fuerza de tracción vertical, se producen fisuras horizontales. Este caso bien podría explicarse de forma análoga si se gira  $90^\circ$  el mecanismo de la figura 3, con la diferencia de que en el caso triaxial de extensión las altas presiones se presentan en los dos planos horizontales.

### 3 SUPERFICIE DE MÁXIMA CAPACIDAD

Del análisis de la variación de las 3 etapas ya señaladas que caracterizan la respuesta del hormigón en bajo, medio y alto confinamiento, surge la caracterización de la superficie de máxima resistencia del material, la cual está constituida por los puntos de máxima capacidad del material, representados en el espacio de las tensiones principales. Esta superficie involucra dependencias de por lo menos los 3 invariantes de tensión, si se interpreta al material como un medio isótropo. La figura 4 muestra una envolvente típica representativa del criterio de rotura del hormigón.

Esta superficie límite representada en forma tridimensional es algo complicada, sin embargo presenta algunas similitudes y simetrías. Específicamente esta superficie representada en el espacio de tensiones se asemeja a un cono, (Figura 4), cuyo vértice se halla en la intersección del octante de tracción triaxial sobre el eje, mientras que en el octante de compresión triaxial está abierta, esto indicaría que cargando sobre el eje hidrostático de compresión no se encontraría falla.

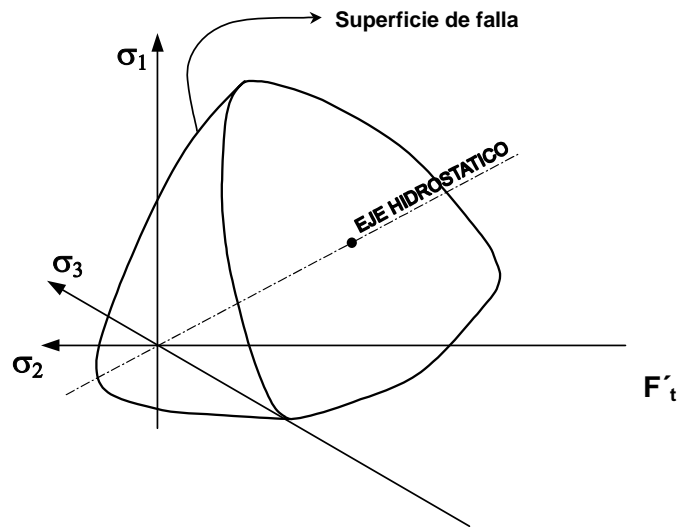


Figura 4. Esquema de la superficie límite representada en el espacio de tensiones

En síntesis, la superficie de máxima resistencia incluye las siguientes propiedades relevantes:

- Presenta una intersección con el eje hidrostático ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ) en régimen de tracción
- La superficie presenta una fuerte curvatura o variación de su tangente en el sector del primer invariante positivo, o negativo próximo a cero, correspondiente a tracción uniaxial, biaxial o triaxial con nulo o bajo confinamiento.
- Curvatura invariable en sector de elevado valor negativo del primer invariante, correspondiente al régimen de alto confinamiento.
- Curvatura y desarrollo no uniforme en los planos octaédricos, aunque existe simetría cada  $60^\circ$ .

La definición de esta superficie surge de estudios experimentales, desarrollados durante años y que han aportado datos de las diferentes regiones de la superficie a fin de poder definirla en términos matemáticos.

Una propuesta realista del comportamiento del hormigón es la correspondiente al Criterio Modificado de Leon [2, 3], la cual define a esta superficie mediante la siguiente expresión:

$$F(p, \rho, \theta) = \left\{ \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\rho r(\theta)}{f'_c} \right\}^2 + \frac{m}{f'_c} \left[ p + \frac{\rho r(\theta)}{\sqrt{6}} \right] - c = 0 \quad (1)$$

donde  $p$ ,  $\rho$  y  $\theta$  son las coordenadas tensionales de Haigh Westergaard definidas de la forma:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \frac{I_1}{3} \quad (2)$$

$$\rho = \sqrt{(\sigma_1 - p)^2 + (\sigma_2 - p)^2 + (\sigma_3 - p)^2} = \sqrt{2J_2} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos \left( 3 \sqrt{\frac{3 J_3^2}{2 J_2^3}} \right) \quad (4)$$

El radio vector  $r(\theta)$  se obtiene a partir de:

$$r(\theta) = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + 5e^2 - 4e}} \quad (5)$$

Donde la excentricidad  $e$  es una relación dada por  $e = \frac{\rho_t}{\rho_c}$

Los parámetros  $c$  y  $m$  son los parámetros de cohesión y fricción respectivamente, que para caracterizar la superficie de máxima capacidad se determinan de resultados empíricos.

#### 4 ENSAYOS TRIAXIALES DE COMPRESIÓN

Los estudios experimentales han permitido trazar esta superficie, dentro de estos estudios los de mayor importancia son los ensayos multiaxiales, tales como los triaxiales de compresión y extensión respectivamente. Muchos de estos ensayos triaxiales se han realizado sobre probetas cilíndricas y por lo tanto en estos casos se presenta una simetría axial, de manera que los datos obtenidos pueden representarse sobre el plano  $\sigma_h = \sqrt{2} \sigma_1 = \sqrt{2} \sigma_2$  (“rendulic plane”). En este caso la superficie de máxima capacidad material se reduce a una curva que resulta de la intersección entre la superficie de máxima capacidad y el plano antes mencionado.

En la bibliografía experimental específica se pueden encontrar diferentes estudios de ensayos triaxiales realizados sobre muestras cilíndricas de hormigón, [4, 5]. En general se encuentran en mayor número ensayos de triaxiales de compresión que los triaxiales de extensión, pues estos últimos tecnológicamente son más complejos en su realización.

Respecto de los ensayos triaxiales de compresión, no existe una normativa única que defina la historia de carga a seguir en el ensayo, sin embargo en general se sigue un camino hidrostático inicial y luego manteniendo el confinamiento se aplica una carga axial desviadora de compresión hasta la rotura de la muestra.

A continuación se muestra un gráfico en el que se representan los caminos de carga seguidos en una serie de ensayos triaxiales de compresión realizados por el autor sobre muestras cilíndricas de 15cm de diámetro y 30cm de altura [6], conjuntamente con la curva límite propuesta por el criterio extendido de León calibrada para el hormigón ensayado. Se observa que existe un buen ajuste entre los resultados y esta propuesta analítica. (En este caso la curva queda caracterizada por  $f_c' = 38\text{MPa}$ ,  $e = 8.44$ ,  $m = 8$  y  $c = 1$ )

### CURVA LIMITE

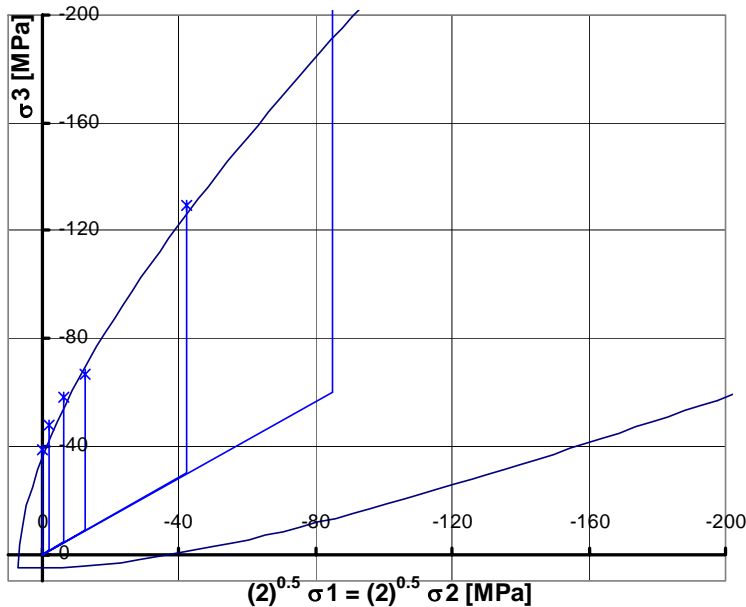


Figura 5. Trayectorias de carga (ensayos triaxiales de compresión Sfer et al) y curva límite de León

## 5 ENSAYOS DE EXTENSIÓN TRIAXIAL

Estos ensayos tienen por objetivo alcanzar la rotura de las muestras cuando sobre ellas actúa un fuerte confinamiento y en la dirección axial una nula o muy baja carga de compresión. De hecho no puede existir una carga neta de tracción en la dirección vertical, ya que esta despegaría los platos de la muestra. Por lo tanto, tomando como referencia la curva límite representada en el espacio de tensiones, se propone alcanzar la rotura en la zona en donde las tres tensiones son de compresión, es decir que la trayectoria propuesta para este ensayo alcanzaría a la curva límite en el octante negativo.

Para el desarrollo de estos ensayos se utiliza la misma célula de carga utilizada para los triaxiales de compresión, sólo que en este caso las muestras cilíndricas utilizadas son de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura.

En la Figura 6 se observa un corte de la célula de carga triaxial, con los cabezales expresamente diseñados para el desarrollo de estos ensayos.

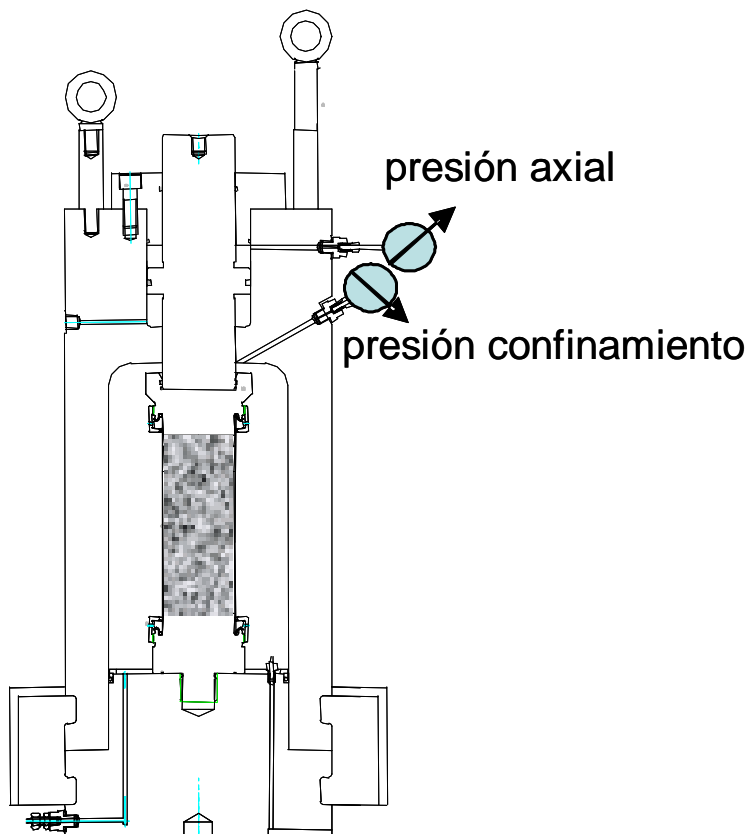


Figura 6 Célula de Carga Triaxial

Para el desarrollo de los ensayos de extensión se intentó seguir una historia de carga análoga a la de los ensayos triaxiales de compresión, es decir seguir una trayectoria hidrostática y luego manteniendo el confinamiento, en este caso, reducir la carga axial hasta la rotura de la muestra. Sin embargo siguiendo este camino se presenta el inconveniente de que la trayectoria hidrostática debe llegar hasta un alto confinamiento para lograr que al disminuir la carga axial se rompa la muestra. Siguiendo este camino se mantiene en forma prolongada un alto confinamiento, esto provoca la pérdida de la estanqueidad de la muestra, lo cual es inadmisibles. Se observa que un punto crítico de estos ensayos es mantener estanqueidad de la muestra y evitar que el fluido confinante ingrese en la superficie de contacto entre plato y muestra, que de ingresar impide controlar la carga axial. Por lo tanto es conveniente mantener la muestra el menor tiempo posible frente a un alto confinamiento. Es por ello que se decidió alcanzar la rotura máxima aplicando primeramente una pequeña carga axial de compresión y luego incrementar el confinamiento progresivamente hasta la rotura



## 6 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE EXTENSION TRIAXIAL

En la Figura 7 se presenta las trayectorias de tensiones desarrollada para el ensayo de extensión, conjuntamente se representan la curva límite propuesta por León. En línea llena se presenta la trayectoria de carga seguida y en línea de trazo la trayectoria alternativa siguiendo un camino análogo a los ensayos triaxiales de compresión.

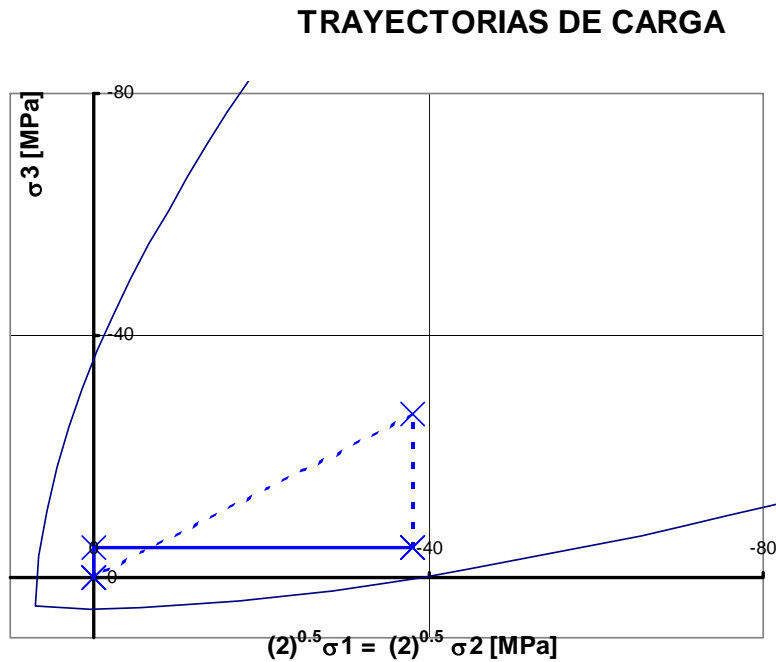


Figura 7. Trayectorias de carga del ensayo triaxial de extensión

Se observa que la rotura se alcanzó antes de alcanzar la curva límite propuesta por León. Ante esta situación, se propone repetir el ensayo realizando un mayor número de muestras para un mejor control de las características mecánicas de las mismas y repetir a otros niveles de confinamiento, con lo cual se daría una mayor confiabilidad a los resultados experimentales.

En la figura 8 se presenta una fotografía de muestra luego de ser ensayada en donde puede apreciar la típica rotura de tracción con una superficie de falla prácticamente plana en las proximidades de una entalla realizada a los fines de inducir la falla.

Al analizar esta muestra se observó curiosamente que presentaba a diferentes alturas otros planos potenciales de falla (fig 9). Esto se evidenció al intentar despegar la trozos de muestra de los cabezales de acero, los trozos de muestras se partieron en forma de rebanadas cilíndricas, es decir que existían varios planos potenciales de falla horizontales. Esto puede explicarse ya que a diferencia del ensayo de tracción uniaxial, en este caso la aparición de un plano potencial de falla no relaja a los otros, sino que en este caso esto no ocurre hasta que se produce efectivamente la rotura.



Figura 8. Fotografía de la Muestra post ensayo



Figura 9. Planos potenciales de falla horizontal

## 7 CONSIDERACIONES FINALES

Los estudios experimentales realizados han permitido definir una técnica de ensayo para el desarrollo de los ensayos triaxiales de extensión.

Los ensayos y pruebas realizadas indicarían que se debe realizar un número mayor de ensayos, como así también una detallada caracterización de las propiedades mecánicas del hormigón ensayado. Con ello se pretende poder concluir respecto del grado de ajuste que presenta la propuesta de León y otras en este rango de carga.

Con estos resultados es posible obtener datos experimentales de toda la curva límite, tanto del sector de compresión (meridiano de compresión) como del sector de tracción (meridiano de tracción).

El cuadro de fisuración observado con la formación de múltiples planos potenciales de falla representa una importante diferencia respecto del caso uniaxial, por lo que se espera en próximos ensayos registrar las deformaciones axiales a fin de profundizar en la formación de fisuras en este rango de carga.

## 8 AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece la beca SB2002-0124 del MECD para una estancia post doctoral en la UPC. Asimismo agradece la financiación del MCYT mediante los proyectos MAT 2003-2481 y MAT 2003-5530. Por otro lado agradece la valiosa colaboración de los técnicos de la UPC en la asistencia para la realización de los ensayos.

## 9 REFERENCIAS

- [1] Van Mier, J (1997), "Fracture Concrete Process" CRC Press
- [2] Etse, G-. (1992) ~Theoretische und nurnerische Untersuchnng zum diffusen und Lokalisierten versagen in beton" PhD thesis, Universidad de Karlsruhe, Karlsruhe, Alemania.
- [3] Willam, K.; Warnke, E. (1975) " Constitutive models for the triaxial behavior of concrete" Proc. Int. Assoc. Bridge Stuct. Engrg., Report 39 Zurich, Swirtzerland, 1-30.
- [4] Gerstle, K. ; Aschl, H. ; Bellotti, R. ; Bertacchi, P. ; Kotsovos, M.; Ko, H.; Linse, D.; Newman, J; Rossi, P.; Schickert, G.; Taylor, M.; Traina, L.; Winckler, H. And Zimmerman, R. (1980) "Behavior of Concrete under multiaxial stress states" JEM ASCE, EM6, pag 1383-1403.
- [5] Chern, J.; Yang, H. and Chen, H. (1992) "Behaviour of steel fiber concrete in multiaxial loading" ACI Materials Journal, V 89, No 1, pag. 32-40.
- [6] Sfer, D.; Carol, I; Gettu, R and Etse, G. (2002) "Experimental study of the triaxial behaviour of cocrete" Journal of Eng.. Mech. ASCE, volume 128 N° 2, pag 156-163, Feb. 2002