

## COMPORTAMIENTO DE FALLA DEL HORMIGON EN MODO MIXTO

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

<sup>\*</sup> Instituto de Estructuras  
Universidad Nacional de Tucumán,  
Av Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Argentina  
e-mail: sgutierrez@herrera.unt.edu.ar, dsfer@herrera.unt.edu.ar

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

**Palabras claves:** hormigón, falla al corte, análisis experimental

**Resumen.** *El comportamiento de falla del hormigón es un tema de constante actualidad debido a su gran uso en elementos estructurales y estructuras, cuyo desempeño involucra la seguridad y/o se halla asociado a importantes costos. Estas estructuras y elementos estructurales bajo cargas críticas incurren en la falla y por lo tanto es relevante conocer la respuesta de los mismos bajo esta condición. Tal es el caso de la estructura de centrales nucleares, depósitos radiactivos subterráneos y superficiales, estructuras pretensadas esbeltas, bases marinas de extracción de petróleo “Off Shore”, etc. En estos casos existe la necesidad de poseer un conocimiento realista del comportamiento de falla, a fin de poder caracterizarlo paramétricamente para su aplicación numérica computacional. No obstante, en la bibliografía no existen suficientes estudios experimentales que permitan definir y analizar el comportamiento de falla según modo de corte-compresión, esta falencia genera la necesidad de llevar a cabo trabajos experimentales confiables en este campo. En este trabajo se presenta un estudio experimental que analiza el comportamiento de falla en modo mixto corte-compresión. Se describen los ensayos de fisuración sobre probetas tipo Luong, esta propuesta surge en 1990 para la determinación de la resistencia a cortante del hormigón mediante un procedimiento experimental simple con la utilización de un equipamiento de ensayo convencional.*

## 1 INTRODUCCION

Los materiales cuasifrágiles como hormigones, rocas, cerámicos, algunos compuestos, etc., se caracterizan por su carácter heterogéneo (microestructura de primer nivel o mesoestructura que está formada por partículas, granos, poros a escala milimétrica sobre una matriz más o menos homogénea) y por su comportamiento mecánico. En condiciones habituales de carga, marcadas por la ausencia de confinamiento (p. e. tracción o compresión simple) estos materiales se caracterizan por la aparición y desarrollo de múltiples microfisuras, algunas de las cuales en una fase más avanzada del proceso se conectan entre si para formar macrofisuras localizadas mientras el resto descarga. Las curvas fuerza-desplazamiento son de tipo frágil, con un pico claramente marcado a deformaciones relativamente bajas (0.10 a 0.30% en hormigón) seguido por una rama descendente.

Sin embargo, estos mismos materiales presentan otro tipo de comportamiento al ser sometidos a estados multiaxiales. Estas condiciones son importantes en situaciones de impacto de proyectiles, rótulas plásticas de tipo Freyssenet en pilas de puente, en punzonamiento de placas, estructuras fuertemente pretensadas como vasijas de reactores nucleares, etc. Bajo estados multiaxiales de compresión estos materiales se comportan de manera más dúctil, con resistencias superiores, curvas tensión-deformación redondeadas, picos poco marcados y tramos post-pico cuasi-horizontales con deformaciones que pueden alcanzar el 5-10%, correspondiéndole a una deformación de 20 a 40 veces mayores a las habituales en compresión simple. Los ensayos realizados en este régimen mediante célula triaxial conducen a una rotura con una o dos fisuras como máximo, que dividen la probeta en 2 o 3 partes considerablemente deformadas pero cada una de ellas puede mantener su integridad con resistencias entre 1/2 y 1/3 de la original<sup>6</sup>.

La profundización en el estudio del comportamiento y falla del hormigón en compresión y la observación de las probetas durante y después de los ensayos, conduce inevitablemente al problema de la fisuración y la fractura del material en condiciones de corte-compresión. En efecto, fisuras de este tipo constituyen los planos que finalmente dividen la probeta en bloques que deslizan entre si con rozamiento. Esta configuración se observa especialmente en ensayos con confinamiento no nulo. En la literatura se pueden encontrar diversos estudios que tratan de producir una fisura bajo estas condiciones, aunque el éxito de dichos intentos basados en vigas con entallas ha sido relativo<sup>3,4,5</sup>. El problema surge al aplicar compresión sobre el plano de fisuración previsto, la fisura puede desviarse de ese plano, dando lugar a geometrías de fisuras complejas y modificándose así las condiciones de homogeneidad, tensiones previstas necesarias para poder interpretar el ensayo.

En base a ello, para este estudio se ha optado por una geometría propuesta originalmente en 1990 por Luong<sup>2</sup> para la determinación de la resistencia a cortante del hormigón mediante un ensayo relativamente simple con la utilización de un equipamiento de ensayo convencional.

Desde el punto de vista tecnológico este ensayo es también una interesante propuesta a fin de caracterizar al hormigón según su comportamiento a cortante. Mediante el mismo resulta relativamente simple determinar la resistencia a cortante si se lo compara con otros ensayos que requieren de configuraciones tipo viga más complejos, para lo cual se deben moldear probetas especiales. Adicionalmente puede constatar que existe poca dispersión en los resultados de resistencia a cortante obtenidos mediante el ensayo tipo Luong<sup>1,2</sup>

## 2 ANALISIS EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de estos ensayos se utiliza una muestra cilíndrica de 10 cm de diámetro y 4 cm de altura sobre la cual se realizan dos entallas circulares concéntricas de 5 cm de diámetro y 1 cm de profundidad en la cara superior e inferior respectivamente. La diferencia con respecto a las probetas originales de Luong<sup>1,2</sup> radica en las entallas radiales, que en este caso se han omitido. En la figura 1 se presenta una muestra típica utilizada en estos ensayos.

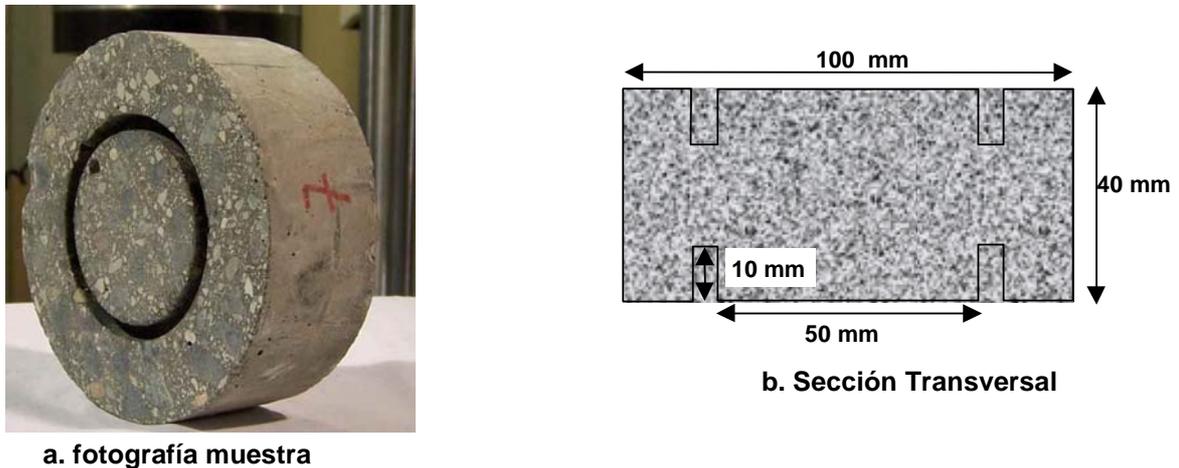


Figura 1. Muestra utilizada en los ensayos

La carga se aplica sobre la corona externa y se soporta sobre el sector central de manera que la superficie cilíndrica entre entallas resulta solicitada a tensiones cortantes. Esta superficie de ligamento es la zona en la que se espera la formación de la fisura, la cual espacialmente está constituida por el cilindro que las conecta. En la figura 2 se esquematiza la forma de carga de las muestras.

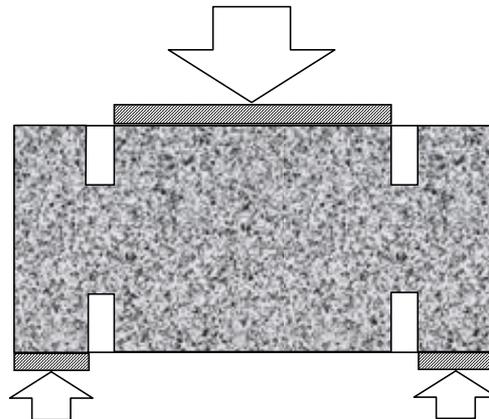


Figura 2. Esquema de aplicación de carga

Según los ensayos realizados, los resultados presentan una gran confiabilidad experimental, pues la configuración de falla y los mecanismos asociados a ella se mantienen en las diversas series llevadas a cabo. Además, este ensayo tiene ventajas sobre otras propuestas de ensayos de corte. Por una parte, permite la caracterización de la energía de Fractura de una forma relativamente simple, que contrasta con los procedimientos y equipos mucho más sofisticados de otras propuestas<sup>3, 4, 5</sup>. Por otra parte, la simetría axial permite que las cargas sean homogéneas y que las tensiones se concentren en el plano cilíndrico previsto. Adicionalmente esta configuración puede ser introducida en una célula triaxial, de esta forma es posible conseguir la aplicación de una tensión normal sobre el plano de fisura, logrando así la falla en corte-compresión, lo cual representa un logro con pocos antecedentes en la bibliografía específica.

En este trabajo se presenta el desarrollo de una serie experimental que incluye ensayos de corte de tipo Luong, con diferentes niveles de confinamiento. Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña. Para el desarrollo de los mismos se utilizó una Prensa servocontrolada INSTRON de una capacidad de hasta 100 t y una célula de carga triaxial WIKHAM FARRANCE con una capacidad de confinamiento máximo de hasta 140 MPa. Se realizaron ensayos con confinamientos de 2 MPa, 1 MPa y sin confinamiento respectivamente

### 3 MATERIAL Y PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

Las muestras de este ensayo fueron ejecutadas con un hormigón autocompactable (HAC), de resistencia característica de 80 MPa y módulo elástico de 35000 MPa.

Las muestras se obtuvieron de probetas estándar de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, se cortaron en 4 secciones obteniendo de cada probeta 4 cilindros de aproximadamente 4 cm de altura, luego se refrentó las caras superior e inferior de cada muestra ajustando la altura y garantizando el paralelismo entre las caras, posteriormente con una broca de copa de 5 cm de diámetro se hicieron las entallas, cuidando que ambas sean concéntricas. (ver figura 1). Finalmente se mide exhaustivamente cada una de las muestras registrando la geometría de cada una de ellas a los efectos de controlar la posible heterogeneidad de los resultados

derivados de muestras con geometrías diferentes.

#### 4 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

El procedimiento de ensayo se desarrolla en dos etapas de carga, en la primera se aplica una carga inicial con control de carga, es decir que se impone una variación creciente de la fuerza axial. En la segunda se incrementa la carga axial pero en este caso imponiéndose una variación lineal de desplazamiento axial, es decir con un control de desplazamiento. En los casos confinados se agrega en esta segunda etapa la acción de una presión confinante constante, es decir que además de la carga axial, existe también una presión lateral que actúa sobre las paredes del cilindro, la cual permanece constante conforme se incrementa la carga axial. De esta forma en esta última etapa un punto entre las entallas estará solicitado por tensiones de corte creciente (dirección vertical) y tensiones normales constantes (dirección radial).

El sistema de medición que se adopta en este ensayo permite registrar la carga aplicada y el desplazamiento axial. Por otro lado mediante un dispositivo envolvente se registra la deformación circunferencial de la muestra en el perímetro exterior. En los ensayos confinados además de los 3 registros mencionados se mide la presión de confinamiento.

La introducción de esta configuración de ensayo en la célula triaxial no fue simple sino que para ello se han debido resolver previamente una serie de temas técnicos, principalmente aquellos vinculados a mantener las caras superior e inferior aisladas del líquido confinante, evitando así el ingreso del fluido por las entallas. Para ello se han diseñado especialmente los cabezales de carga superior e inferior respectivamente. En la figura 3 se presenta la disposición del ensayo en el caso confinado.

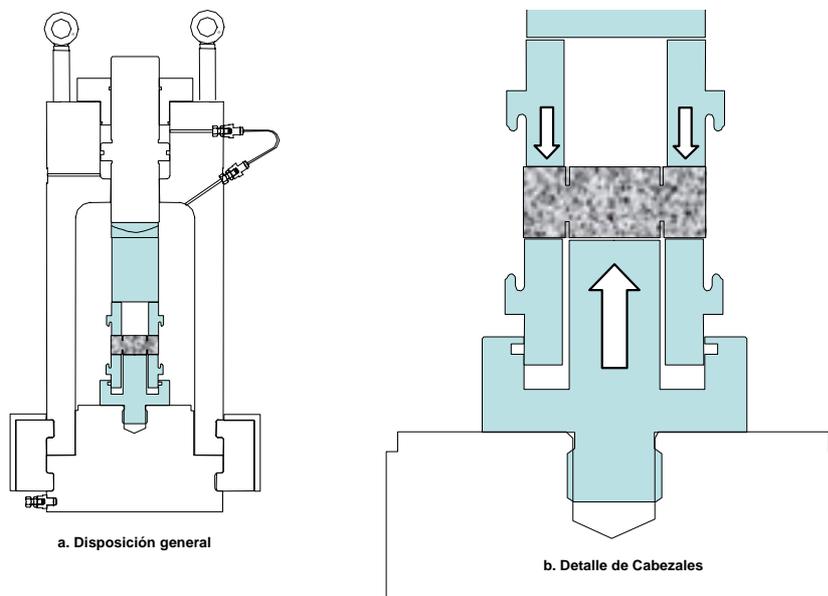


Figura 3. Disposición general en la célula triaxial

## 5 ANALISIS NUMERICO PRELIMINAR

Se ha desarrollado un análisis numérico preliminar sobre un modelo correspondiente a un cuarto de la muestra. Se ha considerado un comportamiento material elástico lineal y se han aplicado las condiciones de borde del ensayo, es decir se impone un descenso del sector central superior y se soporta inferiormente por la corona exterior.

A partir de este ensayo numérico se puede analizar la distribución de tensiones en la muestra. En el gráfico siguiente se aprecian la distribución de tensiones tangenciales en el plano vertical. Se evidencia la concentración de tensiones en el cilindro entre entallas.

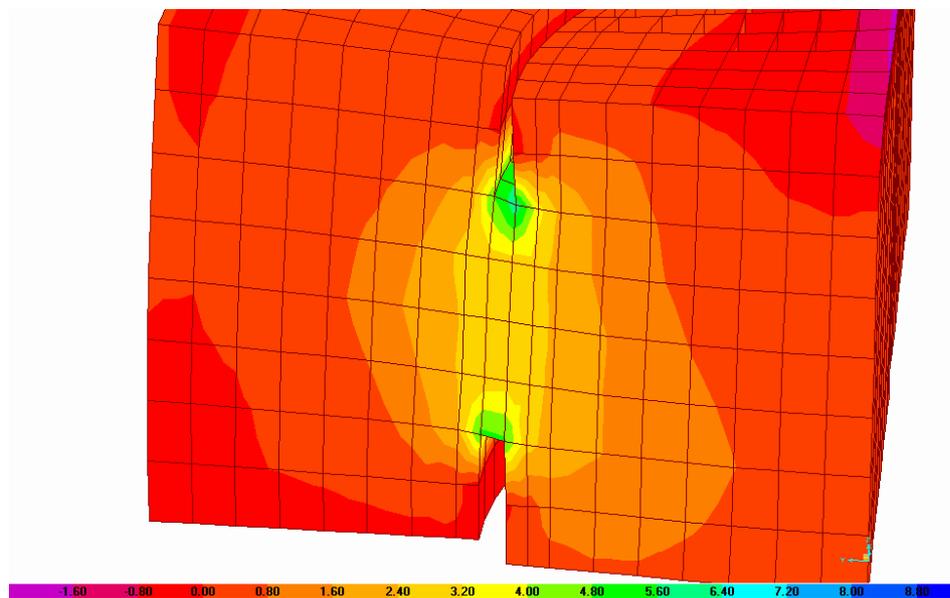


Figura 4. Distribución de tensiones tangenciales

## 6 MECANISMO DE FALLA

A partir del comportamiento material correspondiente al ensayo de corte no confinado pudo observarse la existencia de dos mecanismos de falla. Se debe considerar que la respuesta a cortante del hormigón como la de otros materiales del tipo “cuasifrágiles”, es muy frágil, es decir que se caracteriza por una rama descendente de pospico abrupta que se traduce en la formación de fisuraciones repentinas y experimentalmente difíciles de controlar.

El comportamiento observado muestra en un primer momento una respuesta lineal a la aplicación de la carga, posteriormente y prácticamente sin indicios previos se produce el pico seguido de una caída abrupta de la carga. Esto representa una respuesta esperada para solicitaciones a cortante en este tipo de materiales. La caída abrupta corresponde a la

formación de fisuras en la superficie cilíndrica entre entallas, la cual puede ser más o menos tortuosa de acuerdo a la heterogeneidad del material, pero en general se concentra en el cilindro entre entallas (mecanismo corte). Esta superficie de falla divide a la muestra en un cilindro central y un anillo exterior que al continuar actuando la carga tiende a deslizarse uno dentro del otro. Sin embargo debido a la tortuosidad de la fisura existe una fricción entre ambas que genera una tensión normal en el plano de la fisura (dilatancia). Esto genera un confinamiento del cilindro central y por otro lado una tracción anular al anillo exterior, finalmente sobreviene la rotura cuando se forma una red de fisuras de tracción radiales que dividen el anillo exterior en varios sectores (mecanismo tracción). En la figura 5 se presenta una fotografía de la muestra ensayada en donde se evidencian ambos tipos de fisuras.



Figura 5. Fisuración en muestra ensayada

Por otro lado en la figura 6 se muestra un gráfico con la respuesta carga - desplazamiento axial de estos ensayos, esta respuesta corresponde a un ensayo con un control de desplazamiento poco sensible, por lo que se observa la formación de un primer pico que corresponde al mecanismo de corte y un segundo pico que corresponde a la formación de las fisuras de tracción. En el procedimiento de los ensayos realizados posteriormente se utilizó un control de mayor sensibilidad lográndose que ambos picos se superpongan.

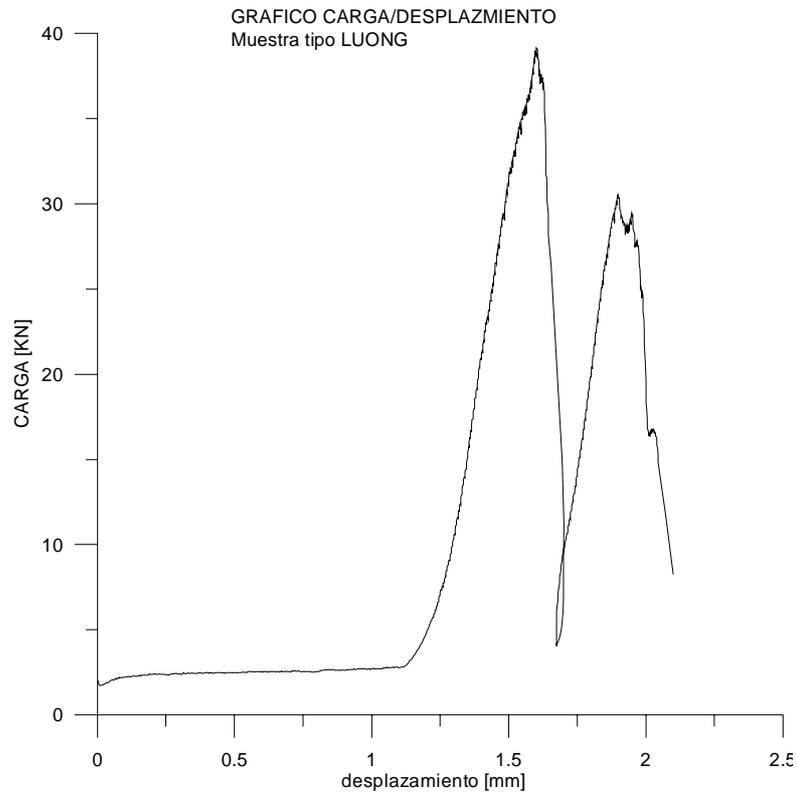


Figura 6. Gráfico carga – desp. axial del ensayo

## 7 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

A continuación se presenta una tabla con los resultados de los ensayos, en la misma se consigna la carga máxima aplicada, el confinamiento aplicado y la tensión cortante máxima calculada entre entalla.

| MUESTRA | CARGA PICO<br>[KN] | CONF.<br>[MPa] | $\tau_{\max}$<br>[MPa] |
|---------|--------------------|----------------|------------------------|
| 1       | 57.82              | 0.00           | 18.40                  |
| 2       | 107.57             | 1.00           | 34.24                  |
| 3       | 161.28             | 2.00           | 51.33                  |

Tabla 1. Resultados de los ensayos

En la figura 7 se han representado la carga y el desplazamiento axial para los diferentes niveles de confinamiento. Simultáneamente en este gráfico se presenta también el desplazamiento lateral, que es indicativo de la deformación circunferencial en el perímetro exterior de la muestra, en función del desplazamiento axial.

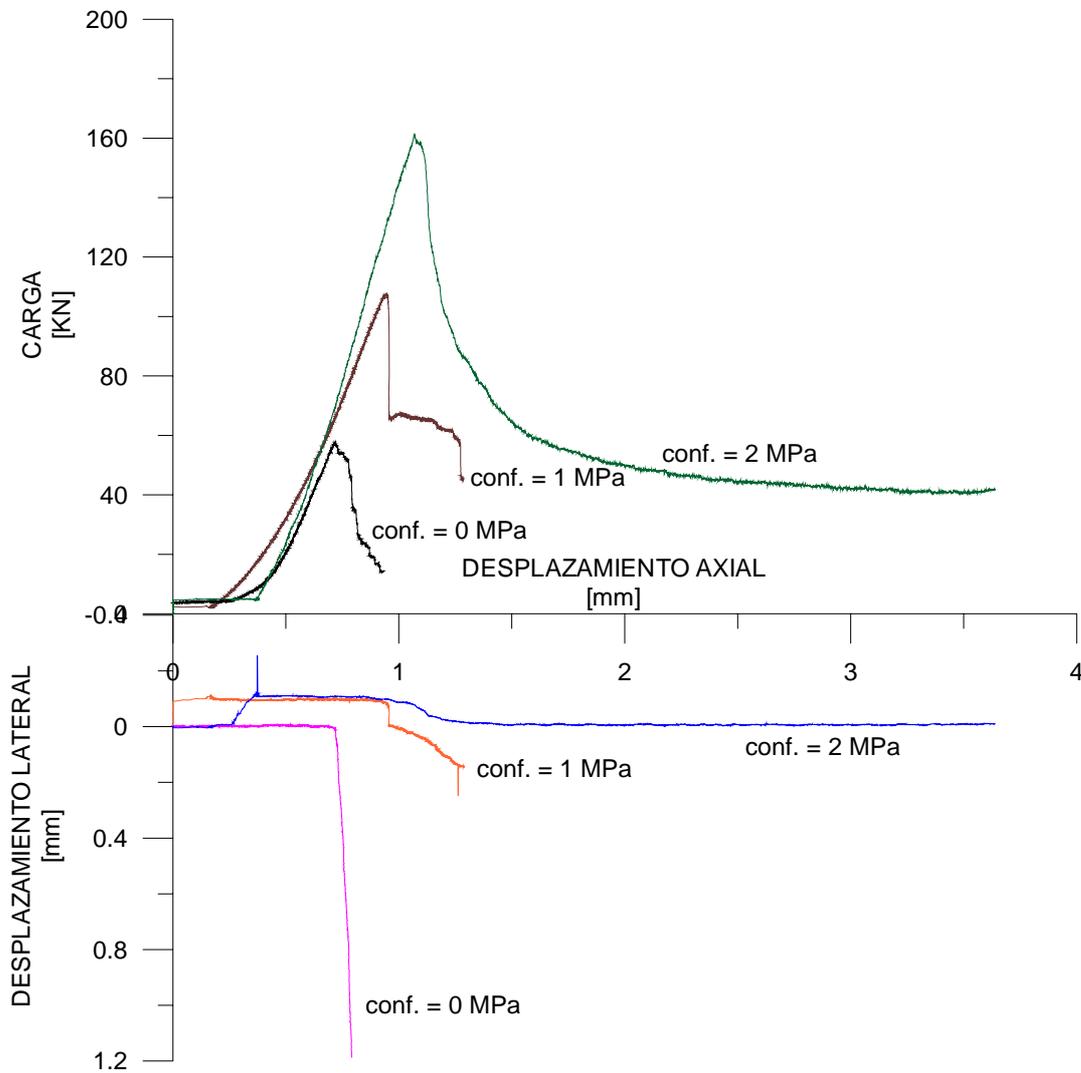


Figura 7. Gráficos carga – desplaz. axial y desplaz. lateral – desplaz. axial

## 8 DISCUSION Y CONCLUSIONES

A partir de la tabla 1 puede observarse que la capacidad máxima a cortante, como era de esperarse, se eleva considerablemente con el incremento de la tensión normal aportada por el confinamiento. De la figura 7 se observa que el efecto del confinamiento, aún siendo muy bajo, impide la formación de las fisuras de tracción que corresponden al segundo mecanismo y consecuentemente se aprecia que el desplazamiento lateral está controlado por la acción del confinamiento. Se llega a eliminar completamente el desplazamiento lateral en el caso de un confinamiento de 2 MPa. Puede verse claramente que en el caso no confinado la formación de fisuras de tracción es incontrolable, lo cual se traduce en incremento abrupto del desplazamiento lateral y consecuentemente una caída de la carga hasta valores casi nulos.

Esto se hace evidente al observar las muestras que en el tramo final del ensayo no confinado muestran un importante crecimiento de las fisuras radiales, como se observa en la fotografía de la figura 8.

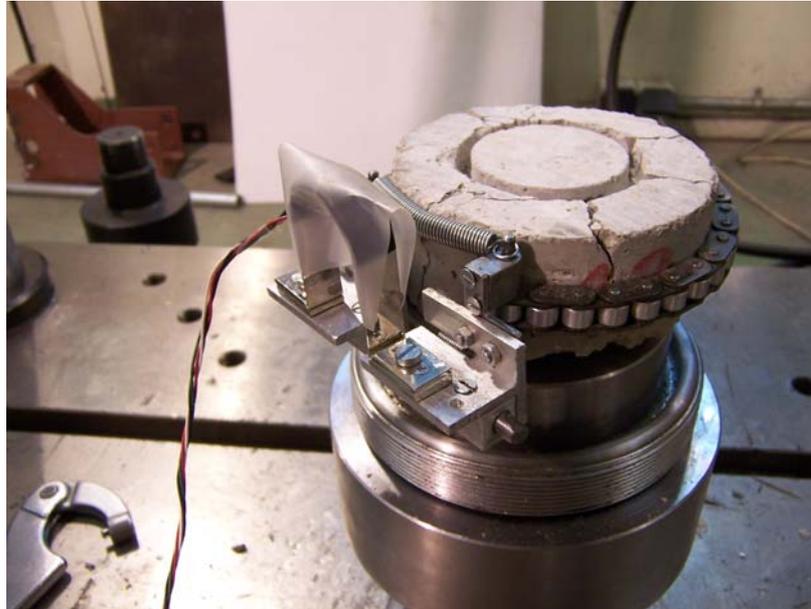


Figura 8. Muestra ensayada (ensayo no confinado)

En cambio en el caso con confinamiento de 2 MPa el desplazamiento lateral crece levemente para luego estabilizarse en un valor y permanecer constante a pesar de que el desplazamiento vertical crece constantemente, consecuentemente la carga se estabiliza en un valor constante equivalente a la fricción. Esto corresponde a que en la zona de ligamento próxima a la fisura se producen grandes desplazamientos relativos siendo esta una zona de fricción concentrada con presencia de un material altamente degradado en donde es factible que se produzcan importantes desplazamientos relativos sin que se produzcan fisuras radiales a consecuencia de tracciones anulares. Se observa que en este caso el desplazamiento relativo de ambos bloques es de hasta 3 mm sin que se observen visiblemente fisuras radiales. (ver corte de probeta ensayada en la fotografía de la figura 9).

La configuración de ensayo de Luong, a parte de las ventajas en su versión original, combinada con el confinamiento lateral es capaz de generar una fisura en compresión-cortante de una forma nítida y sobre una superficie prefijada (ligamento cilíndrico) que no había sido documentada en la literatura. Esto genera posibilidades muy prometedoras de definir más objetivamente el modo de fractura mixto en el hormigón y la determinación de su energía asociada.

En marco de este estudio numérico experimental que persigue la caracterización material en corte compresión se prevé realizar simulaciones numéricas del ensayo incorporando en el mallado la microestructura, es decir árido y matriz. Además se incluirán elementos de junta en la zona de ligamento.

Estas simulaciones se realizarán considerando diferentes modelos constitutivos existentes en la actualidad a los efectos de analizar las diversas respuestas numéricas de acuerdo a la caracterización paramétrica del material.

Teniendo en cuenta la influencia del tamaño del agregado en la respuesta de la falla se analizará numéricamente el efecto tamaño de la probeta a fin de definir las dimensiones apropiadas de las muestras, escaladas de acuerdo al tamaño máximo de árido del hormigón.



Figura 9. Muestra ensayada (ensayo confinado)

Finalmente en materia de caracterización mecánica de materiales, se observa que en esta misma línea de trabajo se puede analizar la relación entre el comportamiento a cortante y a compresión uniaxial, comparándose ambas capacidades y su relación frente a las diferentes variantes constitutivas que presenta actualmente la elaboración del hormigón, como por ejemplo en hormigones autocompactables, hormigones con fibras, etc.

## 9 AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la ayuda del MEC SB2002-0124 que ha permitido la estancia del segundo autor en la UPC para la realización de este trabajo. El trabajo se ha realizado gracias a la financiación parcial del proyecto MAT2003-02481 (MEC, Madrid). Asimismo se agradece la ayuda del Proyecto E313 financiado por el Consejo de Investigaciones de la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNT.

## 10 REFERENCIAS

- [1] Luong, M.P., 1992. Fracture testing of concrete and rock materials. Nuclear Engineering and Design, 133:33-95 [1]...
- [2] Luong, M. P. (1990) "Tensile and Shear Strength of Concrete and Rock", Engineering Fracture Mechanics Vol 35, N° 1/2/3, pp 127-135
- [3] Nooru-Mohamed, M.B.(1992) Mixed-mode fracture of concrete: An experimental approach, PhD thesis, Delft University of Technology, The Netherlands.
- [4] Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A. (1985). Tests of shear fracture and strain softening in concrete, Proceedings of the 2nd Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures, April 15–19, Panama City Beach, Florida.
- [5] Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A. (1986) Shear fracture test of concrete. Materials and Structures (RILEM) 110,111–121.
- [6] Sfer, D.; Carol, I; Gettu, R and Etse, G. (2002) "Experimental study of the triaxial behaviour of concrete" Journal of Eng.. Mech. ASCE, vol. 128/2, pag 156-163, Feb. 2002