

ANÁLISIS NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE PROCESOS DE LOCALIZACIÓN DE HORMIGÓN EN RÉGIMEN DE ALTO CONFINAMIENTO

Domingo Sfer, Guillermo Etse

*Laboratorio de Estructuras – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Universidad Nacional de Tucumán. Avda Independencia 1800 – 4000 Tucumán – Argentina*

Ignacio Carol, Ravindra Gettu

*Escuela Técnica Superior de Caminos Canales y Puertos de Barcelona
Universidad politécnica de Cataluña. Jordi Girona 1/3 - 08028 Barcelona – España*

RESUMEN

El análisis de la respuesta de materiales cuasifrágiles como hormigón, roca, cerámicos, etc., bajo estados de carga multiaxiales es un tema de crucial importancia para lograr una mejor comprensión del comportamiento material en estados límites y para la definición de modelos numéricos más ajustados.

En condiciones normales, el fenómeno dominante en el mecanismo de rotura de estos materiales es la fractura por tracción. Bajo cargas de compresión sin confinamiento este mecanismo se caracteriza por la formación de fisuras aproximadamente paralelas a la dirección de máxima compresión, conduciendo al conocido mecanismo de falla “compression splitting”⁹. Sin embargo en presencia de cargas de confinamiento el comportamiento de estos cambia sustancialmente. En el caso del hormigón por ejemplo, su comportamiento se torna mucho más dúctil, reduciéndose la rama de pospico hasta desaparecer. Con una compresión lateral del orden del valor de la resistencia a compresión, la tensión normal máxima puede alcanzar unas 4 a 5 veces el valor de la resistencia uniaxial, además la zona del pico se torna como un plafón horizontal y pueden alcanzarse fácilmente deformaciones de 10, 20 o 30 veces mayores que las correspondientes a las del pico del ensayo uniaxial.

En este trabajo se presenta en primer lugar, un estudio experimental desarrollado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña (España), en el cual se han ensayado a compresión una serie de probetas cilíndricas de 15x30, bajo diferentes confinamientos. Una particularidad que presentan estos ensayos es que se ha controlado el desplazamiento y se han tomado registros de la totalidad de la rama de ablandamiento.

Por otro lado se han desarrollado comparaciones con modelos numéricos y se estudia la transición frágil – dúctil del hormigón. Finalmente se analiza la influencia del grado de no asociatividad del modelo en las mediciones de la respuesta material y de falla localizada.

ABSTRACT

A principal step in the constitute model develop is the experimental study of strain stress response of materials under multiaxial stress state, particularly in quasi brittle materials like concrete, ceramics, ice. The experimental analysis leads to a better knowing of material behavior under critics states and in developing an accurate formulations to describe this behavior.

The typical failure of this kind of material is the fracture in tension, but under confinement the failure mechanism is different, the material turns ductile and the residual strength increase 4 to 5 times upper the uniaxial compression strength. Also the strain at the peak increase 10 to 30 times respect the correspondent uniaxial strain at peak. Near the peak the stress strain curve tends to be a horizontal line.

In this work an experimental study of concrete is presented. This has been carried out at the Structural Technology Laboratory of ETSECCPB-UPC (Spain). A cylindrical cell for 15x30 cm concrete specimens under confinement up to 70 MPa was used in the tests. Also a servo-controlled test equipment was used and it was possible to measure the whole response in the post peak zone.

Also a numeric comparison was made. In it, a brittle – ductile transition was considered and some reference about the nonassociated characteristic of the model was made.

INTRODUCCIÓN

El estudio experimental de la respuesta material bajo estados triaxiales ha significado una importante contribución para la formulación de modelos constitutivos, sin embargo la infraestructura de laboratorio necesaria para la investigación experimental es bastante específica y compleja. En este trabajo se han desarrollado ensayos triaxiales sobre probetas de hormigón standard de 15 x 30 cm

Uno de los inconvenientes más limitantes del análisis experimental del comportamiento del hormigón es la pérdida de estabilidad que se registra en las cercanías del punto de máxima resistencia (punto límite)^{2,10} y en el régimen de pospico o ablandamiento. Por este motivo la gran mayoría de los estudios experimentales cubre solamente el régimen de prepico^{1,3}. También es de destacar las considerables aperturas de fisuras que tienen lugar en estados de deformación adentrados en el régimen de pospico, los cuales dificultan los procesos de medición y registro.

En el marco del presente trabajo, el programa de estudio experimental se llevó a cabo con una célula de carga triaxial especialmente diseñada para probetas 15x30 cm y con una prensa de 5000 KN que permitieron controlar el desarrollo del ensayo y de los registros durante toda la historia de carga.

Complementariamente al análisis experimental se desarrolló un estudio teórico numérico utilizando un modelo realista para hormigón, el Modelo Extendido de León¹¹, con 3 objetivos fundamentales. En primer lugar evaluar la capacidad predictora de modelos constitutivos ya probados frente a ensayos experimentales que incluyeron un amplio espectro de valores de confinamiento lateral. En segundo término calibrar las funciones internas del modelo, en particular la ley de flujo no asociado y la de endurecimiento para lograr predicciones realistas para todo el espectro de resultados experimentales que se dispone. En tercer lugar y muy especialmente la calibración de la función de no asociatividad que persigue el objetivo de analizar luego con mayor precisión las soluciones y predicciones de falla localizada del modelo que resultan de la solución explícita de la ecuación que define la singularidad del llamado tensor de localización en función del grado de no asociatividad¹³.

En este trabajo, luego de una discusión de los resultados experimentales obtenidos se presentan los análisis relacionados con los 2 primeros objetivos señalados de los estudios teórico – numéricos.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental que se presenta ha sido desarrollado en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Escuela de Caminos Canales y Puertos de Barcelona en la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Este programa incluye la realización de una serie de ensayos triaxiales sobre probetas de hormigón ($f'c = 30$ MPa) de tamaño 15 x 30cm, bajo 6 niveles de confinamiento, 0, 1.5, 4.5, 9, 30 y 60Mpa.

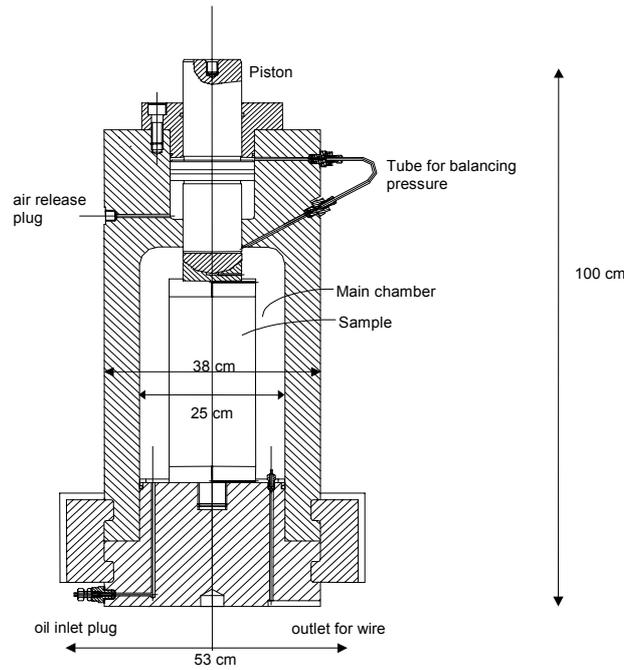


fig. 1 Célula de carga triaxial

Los ensayos se llevaron a cabo en una célula de carga triaxial WIKHAM FARRANCE, preparada especialmente para probetas cilíndricas, con la cual pueden aplicarse confinamientos de hasta 140 MPa [6]. Para la aplicación de la carga axial se utilizó una prensa servo controlada Suzpecar/ MTS, con una capacidad de carga de 5000 KN.

La célula dispone de una cámara secundaria superior a través de la cual es posible la aplicación de un estado hidrostático, es decir equiparar la presión lateral con la del pistón axial, de esta forma la prensa sólo aplica una carga desviadora. En la figura 1 se muestra un corte longitudinal de la célula.

Los ensayos fueron realizados en dos etapas, una primera etapa bajo control de tensión, en la que se incrementaba la presión de confinamiento. Esta era igual a la presión en la dirección axial, hasta alcanzar un determinado nivel de confinamiento. Luego, en una segunda etapa, se imponía una velocidad de desplazamiento axial, manteniendo constante la presión de confinamiento, es decir se aplicaba un control de desplazamientos. En la figura 2 puede verse los caminos seguidos en los ensayos en el espacio de tensiones de Haigh-Westergaard.

Durante estas etapas se registraron las deformaciones axiales y circunferenciales a través de extensómetros pegados en la superficie de la probeta. Se utilizaron 4 extensómetros, 2 axiales y 2 circunferenciales, estos tenían una longitud base de 60 mm (TML, tipo YL-60), diseñados especialmente para el registro de grandes deformaciones. También se registró el desplazamiento axial con un transductor de desplazamientos colocado en el extremo del pistón de la célula de carga. Por otro lado la prensa servocontrolada contaba con su propio sistema de medición de la carga aplicada y del desplazamiento del actuador. La presión interna de la célula se registró mediante un transductor de presión. Uno de los objetivos que se procuraba en estos ensayos era tomar mediciones durante la totalidad del fenómeno de ablandamiento. Es de importancia hacer notar que en los ensayos con confinamientos elevados las deformaciones alcanzan niveles de deformaciones del 12%, con lo cual se verifica que el hormigón en estos estados de tensiones debe ser analizado en el marco de la teoría de grandes deformaciones.

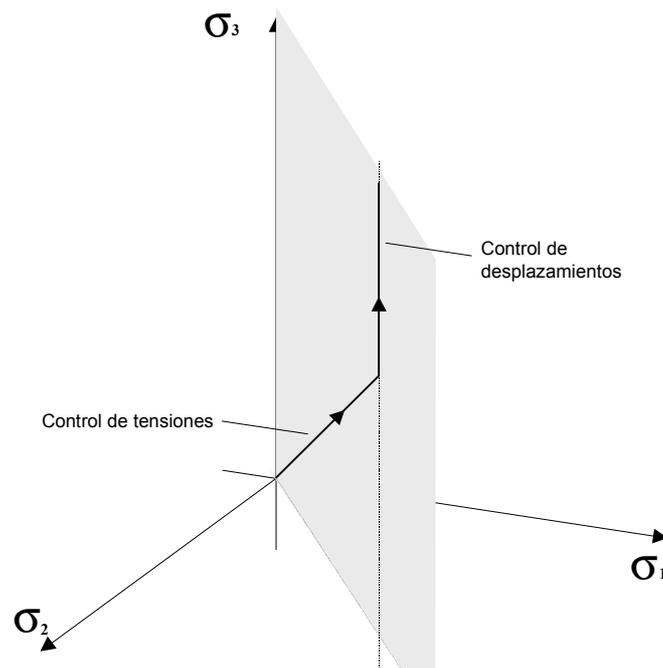


Fig. 2 Historia de carga

Los niveles de confinamiento se eligieron de manera que la relación con la resistencia sea de 0%, 5%, 15%, 30%, 100% y 200%. Se realizaron dos ensayos para cada nivel de confinamiento.

En la tabla 1 se resumen los datos indicativos de cada uno de los ensayos, edad, confinamiento, resistencia de rotura, deformación axial máxima, módulo elástico inicial.

Tabla 1. Resumen de Resultados

Identificación	Edad [días]	Confin. [MPa]	Confin./ f_c [%]	σ_{3max} [MPa]	ϵ_{3max} [%]	E_{tg0} [MPa]
T0.0 – 1	51	0.0	0	32.81	0.18	27300
T0.0 – 2	114	0.0	0	38.84	0.21	28600
T1.5 – 1	64	1.5	5	45.50	0.26	26100
T1.5 – 2	114	1.5	5	47.76	0.34	22500
T4.5 – 1	69	4.5	15	55.29	0.41	22400
T4.5 – 2	112	4.5	15	58.18	0.52	17700
T9.0 – 1	59	9.0	30	65.70	0.83	15500
T9.0 – 2	108	9.0	30	66.45	0.63	18900
T30.0 – 1	56	30	100	124.54	6.97	13400
T30.0 – 2	85	30	100	129.32	10.87	10100
T60.0 – 1	51	60	200	192.89	8.46	7100
T60.0 – 2	106	60	200	205.08	8.27	7900

Los datos de la totalidad de los transductores y extensómetros dispuestos se acondicionaron a través de una central extensométrica y se leyeron mediante un software específico, que además permitió desarrollar un monitoreo de los registros en tiempo real.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Las muestras se acondicionaron especialmente pues debían ser cubiertas con una camisa de neopreno a fin de impermeabilizarlas del aceite confinante. La técnica de preparación de la probeta consistía básicamente en trabajar las superficies. La superior e inferior debía pulirse con una fresa a fin de evitar las perturbaciones por fricción que se producen en la superficie de contacto hormigón - plato de carga. Este fenómeno es particularmente importante en los casos con confinamiento, donde la presión de contacto es mayor que en el caso uniaxial. Por otro lado la superficie lateral de la probeta debía tratarse rellenando los poros con resina epoxi, con ello se evitan oquedades que bajo la presión lateral del fluido confinamiento podrían perforar la camisa. A fin de garantizar la impermeabilidad de la muestra, la camisa se ajusta a los platos mediante bridas metálicas. Finalmente, las probetas acondicionadas e instrumentadas eran introducidas en la célula, la cual posteriormente se montaba dentro del pórtico de la prensa.

El proceso de carga seguido se hizo en dos etapas, una primera hidrostática creciente hasta llegar a la presión de confinamiento y luego una etapa de carga axial desviadora.

A pesar de los recaudos que se tomen para garantizar la impermeabilidad, en la zona de postpico cuando existe una marcada macro fisuración, es particularmente difícil impedir que el fluido ingrese en las oquedades generadas por el proceso de fisuración, máxime considerando los casos de alto confinamiento. Esta situación se evidencia en la respuesta indicando un brusco descenso de la carga.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

De las series de ensayos realizados pudo obtenerse las historias de tensiones y deformaciones tanto axiales como laterales. En la figura 3 se presenta el gráfico tensión deformación correspondiente a las deformaciones axiales, donde se indica el nivel de confinamiento. De la misma forma la figura 4 presenta idénticos resultados para la deformación lateral. En estos gráficos se presenta la historia de deformaciones correspondiente sólo a la etapa desviadora, es decir a la segunda etapa de los ensayos que es precisamente en donde se registran las mayores deformaciones.

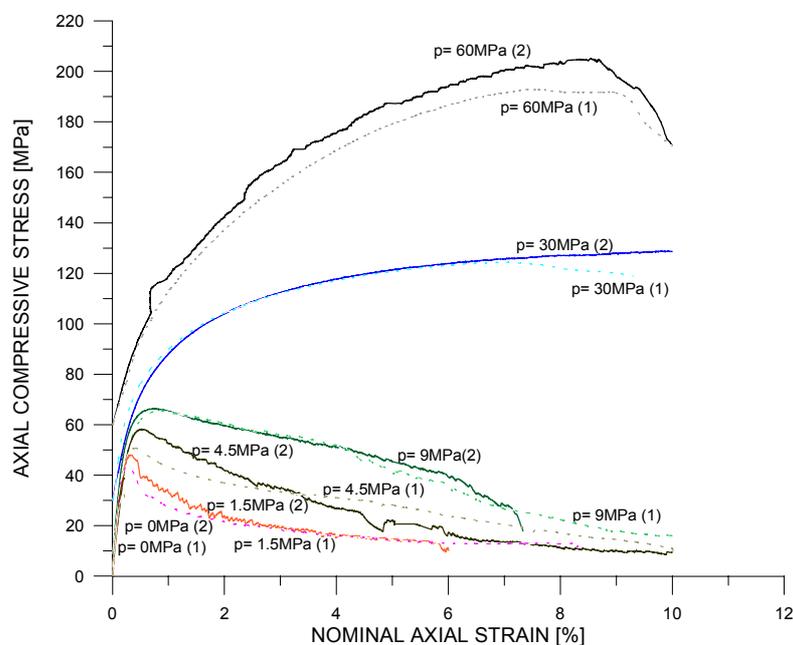


Fig. 3 Deformaciones axiales

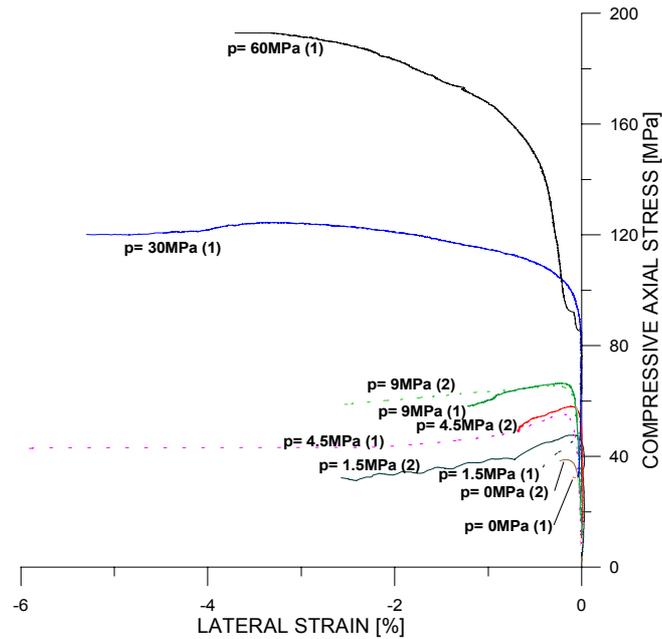


Fig. 4. Deformaciones Laterales

EL MODELO EXTENDIDO DE LEÓN

El modelo de León¹² se presenta como una alternativa realista para reproducir el comportamiento del hormigón. Dado que en dicha formulación constitutiva las leyes de endurecimiento, de ablandamiento y de flujo no asociado son funciones de la presión de confinamiento en particular en el caso bajo la acción de presión de confinamiento, el modelo resulta especialmente apto para analizar los caminos de carga de los ensayos experimentales.

El modelo Extendido de León¹¹ está basado en el criterio de máxima resistencia de León el cual fue extendido de acuerdo a la descripción elíptica de la resistencia cortante del modelo de 5 parámetros de Willam y Wanke.

En la formulación del modelo el criterio extendido de máxima resistencia fue modificado para convertirlo en una condición de fluencia con expansión y contracción continua en los regímenes de pre y postpico del material. De esta manera la condición de fluencia del modelo puede expresarse según la ecuación 1

$$F = F(p, \rho, \theta, h, c, m) = 0 \quad \text{ec. 1}$$

Esta definida en término de los 3 invariantes del espacio tensional de Haigh Westergaard, p , ρ y θ ; y de de las variables de estado h , c y m representando el parámetro de endurecimiento, de cohesión y de fricción respectivamente.

El modelo incluye leyes de ablandamiento y de endurecimiento isótropas definidas ambas como función del grado de confinamiento. Para lograr predicciones objetivas del comportamiento de postpico respecto del tamaño de la malla de elementos finitos, la formulación de ablandamiento está basada en criterios de mecánica de fracturas los que incorporan una característica representativa del espaciamiento entre fisuras tanto para modo I como para modo II de fractura.

Para reproducir el comportamiento dilatante del hormigón en el régimen de bajo confinamiento, el modelo incluye una ley de flujo volumétrica no asociado. En ese sentido el potencial plástico puede ser expresado según la ecuación 2

$$Q = Q(p, \rho, \theta, h, c, m_q) = 0 \quad \text{ec. 2}$$

Este puede formularse a partir de una modificación de la dependencia en el primer invariante p de la condición de fluencia.

ANÁLISIS NUMÉRICO

Como datos materiales necesarios para caracterizar al material en el modelo se requiere el módulo de elasticidad inicial, la resistencia a compresión, la resistencia a tracción, el coeficiente de Poisson y otros parámetros geométricos de la muestra que definen las propiedades de fractura del material para la formulación de ablandamiento del modelo.

De los ensayos experimentales se tienen registradas las tensiones y deformaciones, es decir las acciones y las respuestas a las mismas. A fin de establecer una comparación entre la respuesta del modelo y la experimental se desarrolla un ensayo numérico donde se introducen como datos las acciones aplicadas en el ensayo experimental en las distintas etapas. En la primera etapa de carga hidrostática, se introduce como datos las tensiones, lo que corresponde a un control de tensiones, y posteriormente en la etapa desviadora se introduce como datos la presión lateral y la deformación axial, corresponde a un control mixto.

En las figuras 5 a, b, c, d y e se presentan los resultados numéricos y experimentales obtenidos.

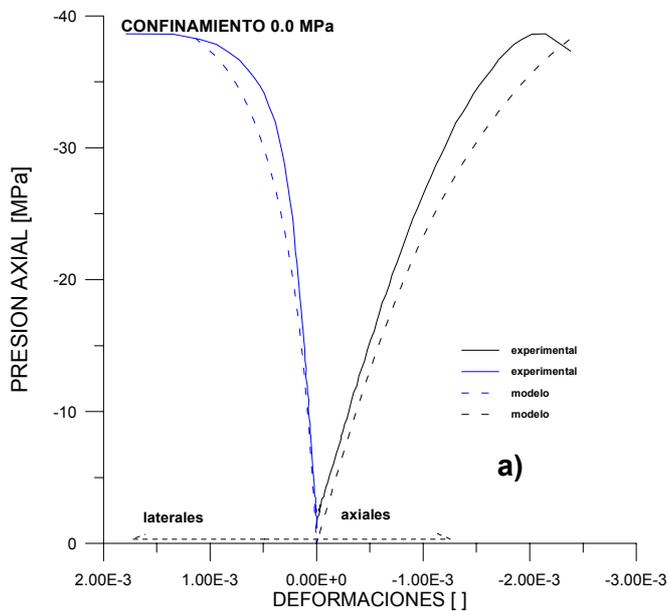


Fig.5a . Comparación Numérica – Experimental

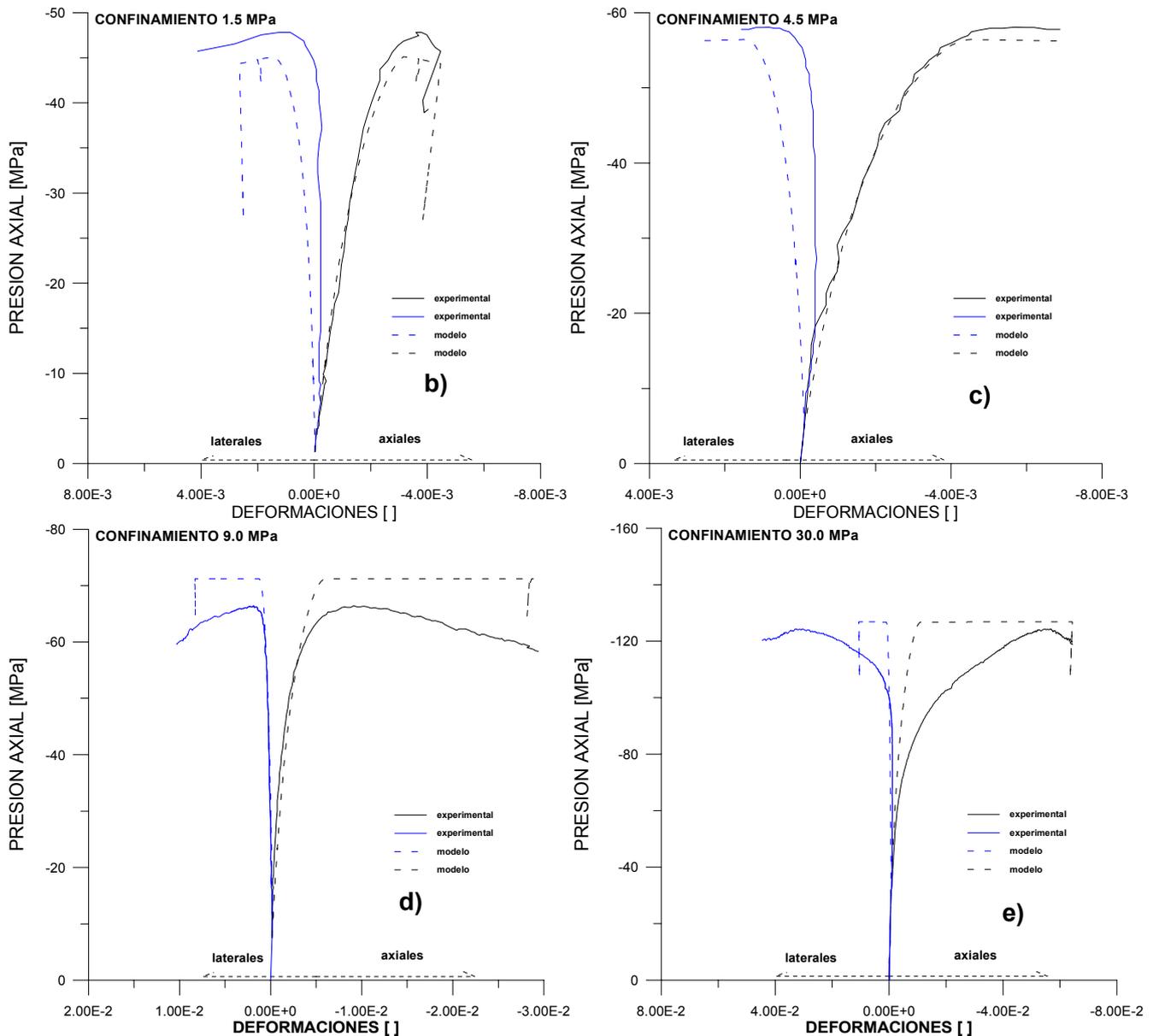


Fig.5. Comparación Numérica – Experimental.

INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados experimentales de las figuras 3 y 4 se puede apreciar respuestas, en algunos aspectos, similares a otros trabajos experimentales realizados precedentemente^{1,3,5,8}. Debe observarse que los resultados del presente trabajo corresponden a probetas cilíndricas, de mayor tamaño a las utilizadas en trabajos experimentales anteriores^{2,3,5,8}. Se aprecia claramente la transición frágil - dúctil conforme se incrementa el confinamiento. Para altos niveles de confinamiento se aprecia un importante incremento de la etapa de endurecimiento, obteniéndose el valor de pico posteriormente a una proceso de endurecimiento plástico. Por el contrario en casos de bajo confinamiento el pico se alcanza abruptamente con un incipiente endurecimiento plástico.

En la interpretación de los resultados experimentales debe tenerse en cuenta que las datos se obtienen de transductores que integran deformaciones en una longitud determinada de las paredes de la muestra. El desarrollo de fisuras en las cercanías de los extensómetros o bien sobre ellos (lo cual es de ocurrencia altamente probable en la zona de pico y postpico) pueden producir perturbaciones en las lecturas. En cuanto a los desplazamientos axiales se han tomado registros superabundantes y de esta manera se pudo auto evaluar los registros de los extensómetros. Sin embargo respecto de las deformaciones laterales sólo se cuenta con los extensómetros.

De la comparación de los resultados experimentales con los del ensayo numérico se concluye que el criterio de falla de León describe la capacidad máxima del material en forma realista para los distintos valores de confinamiento considerado.

Por otro lado observamos diferencias en la descripción del endurecimiento en los casos de alto confinamiento. Los estudios comparativos realizados indican que la dependencia cuadrática propuesta para el parámetro de endurecimiento en términos del primer invariante de tensiones es insuficiente para predecir en forma realista la totalidad del espectro de respuesta del material en alto y bajo confinamiento en régimen de prepico. Por lo que podría resultar conveniente modificar la formulación de endurecimiento para incluir funciones de más alto orden en términos de la presión de confinamiento.

También puede apreciarse que para un bajo nivel de confinamiento las predicciones numéricas de dilatación, es decir las deformaciones laterales, son más realistas que para el caso de alto confinamiento. Considerando que el modelo contempla una regla de flujo no asociado, pareciera que esta propuesta resulta acertada para los casos de bajo confinamiento, sin embargo para alto confinamiento las dilataciones registradas son mayores que las predicciones del modelo.

La modificación de las funciones internas de endurecimiento y de la ley de flujo no asociada del Modelo Extendido de León es el próximo paso en la presente investigación.

Con una definición del flujo no asociado, calibrado con resultados experimentales, se pretende analizar las predicciones de falla localizada en regiones de prepico con alto confinamiento en el meridiano de tracción como de compresión.

REFERENCIAS

- [1]. Newman J. B. "Concrete under complex stress", Development in Concrete Technology – 1, Lydon, F.D., Ed., Applied Science Publishers, London, 151, 1979.
- [2]. Smith S., Willam K., Gerstle K., Sture S., "Concrete over the top, or Is there are a life after the peak?" ACI Material Journal, V.86, N° 5, Sept-Oct 1989, pp. 491-497.
- [3]. Bellotti R., Rossi P. "Cylinder tests: experimental technique and results" . Materials and Structures. 1991, 24, 45-51
- [4]. Van Mier J., Vonk R. "Fracture of concrete under multiaxial stress – recent development" . Materials and Structures. 1991, 24, 61-65
- [5]. Chern J., Yang H., Chen H. "Behaviour of Steel Fiber Reinforced Concrete in Multiaxial Loading". ACI Materials Journal. 1992, V.89, N°1, 32-40.
- [6]. Wikeham Farrance Handbook for use with WF40035 High Pressure Triaxial Cell. Slough, England. 1993
- [8]. Imram I., Pantazopoulou S., "Experimental Study of Plain Concrete under Triaxial Stress". ACI Materials Journal. 1996, V.93, N°6, 589-601.
- [9]. Van Mier J. "Fracture Processes of Concrete" . CRC Press Inc. Boca Raton, Florida, U.S.A., 1997. ISBN 0-8493-9123-7
- [10] Li Q., Ansari F. "Mechanics of Damage and Constitutive Relationships for High-Strength Concrete in Triaxial Compression" ASCE Journal of Engineering Mechanics Vol 125 No 1, January 1999.
- [11] Etse G., Willam K. "Fracture Energy Formulation For Inelastic Behavior of Plain Concrete" ASCE Journal of Engineering Mechanics Vol 120 No 9, September 1994.

[12] Etse G., "Theoretische und numerische Untersuchung zum diffusen und lokalisierten Versagen in Beton"
Doktor Ingenieurs Dissertation Universitat Fridericiana zu Karlsruhe (TH). Karlsruhe. Abril de 1994.