

INTRODUCCIÓN AL COMPORTAMIENTO DE FALLA DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Paula C. Folino* - Guillermo Etse**

* LMNI - Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería –
Laboratorio de Materiales y Estructuras - Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires
e-mail: info@pacefo.com.ar

** LMNI - Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería –
Laboratorio de Materiales y Estructuras - Facultad de Ingeniería – Universidad de Buenos Aires
e-mail: getse@herrera.unt.edu.ar

Key words: Modelo constitutivo, falla, hormigones de alta resistencia, modelo extendido de León, comportamiento triaxial.

Abstract. *Los hormigones de alta resistencia (HSC) según el ACI, son aquellos que poseen una resistencia a la compresión f'_c superior a 41 MPa (6000 psi). Constituyen un grupo dentro de los llamados Hormigones de Alta Performance y son utilizados en la construcción desde hace varios años.*

Por vía experimental se sabe que el comportamiento de estos hormigones, difiere en gran medida del de los hormigones convencionales o normales (NSC). Sus dos grandes ventajas son la mayor resistencia y sus propiedades de durabilidad. Por un lado, la ganancia de resistencia se logra con el costo de pérdida de ductilidad. Por otro lado, el hecho de que puedan emplearse distintas adiciones en la dosificación para alcanzar altas resistencias a la compresión (sílica fume, fly ash, etc), tiene como consecuencia que hormigones de igual resistencia puedan tener un comportamiento bastante diferente por tener una u otra adición. Es decir, entran más parámetros en juego cuando se desea predecir su comportamiento de falla.

El presente trabajo se enmarca en un proyecto de investigación destinado a la formulación de teorías constitutivas no lineales para la predicción computacional del comportamiento hasta la falla de HSC. En esta etapa inicial del proyecto, se incluyen en este trabajo resultados referidos a la evaluación de las predicciones del comportamiento de HSC obtenidos con modelos de hormigones convencionales, en particular, en lo referente a resistencias límite, comportamiento volumétrico, y resistencia residual en postpico. Los resultados muestran que aún cuando se obtienen precisiones aceptables de resistencias pico para HSC, la diferencia, y más aún el comportamiento de ablandamiento del material bajo diferentes presiones de confinamiento, es impreciso.

1 INTRODUCCION

En los últimos años hubo una tendencia creciente al uso de hormigones con prestaciones superiores a las convencionales, tanto en lo referente a sus resistencias características como a sus propiedades elásticas en régimen de prepico. Esto se vio favorecido por la necesidad de mayores esbelteces en estructuras constituidas por este material y a las demandas de resistencias superiores en edades tempranas para reducir los tiempos constructivos. Por el lado de la tecnología del hormigón los logros alcanzados en la última década fueron relevantes. En el presente las resistencias de hormigones comerciales en países desarrollados alcanzan los 100 MPa y en Argentina se construye actualmente con resistencias de 60 MPa, la cual duplica las resistencias más elevadas de construcciones civiles con este material de comienzos de la década del '90. La tendencia es lograr resistencias que permitan hacer hormigones con una resistencia comparable al acero en régimen de compresión, y con velocidades de fraguado elevadas para mejorar sus costos constructivos.

Por el lado de la mecánica computacional, mucho se ha avanzado desde comienzos de la década del '80 en la simulación del comportamiento de hormigones convencionales. Gran parte de estas investigaciones y desarrollos estuvieron dirigidas a evaluaciones macromecánicas basadas en el concepto de "smeared crack" o continuo, en el cual la no linealidad y la microfisuración de este material cuasi-frágil es modelada a través de la relación constitutiva tensión-deformación. Este artificio, si bien eficiente y efectivo para reproducir caminos de tensiones y de deformaciones mas allá del pico, tenía la contrapartida de la fuerte dependencia de sus predicciones computacionales en el tamaño y orientación de los elementos finitos utilizados, cuando se activan formas localizadas de falla caracterizadas por singularidades del conocido tensor "acústico". Para evitar, o más aún, limitar este efecto, se incorporaron teorías constitutivas enriquecidas basadas en conceptos de mecánica de fractura, viscoplasticidad, teoría de gradientes superiores de deformaciones, teoría micropolar de Cosserat, etc. Todas ellas incorporan, invariablemente, una longitud característica en la relación tensión-deformación. De esta manera se lograron avances concretos y destacados en la predicción computacional del comportamiento de falla de hormigones convencionales basadas en observaciones macromecánicas o continuas de la respuesta de este material. En los últimos años se ha observado una tendencia creciente a desarrollar análisis a escalas múltiples del comportamiento del hormigón a fin de interpretar fenómenos altamente complejos que caracterizan la respuesta de este material compuesto, tales como el comportamiento de las diferentes fases de su mesoestructura y, particularmente, el de la junta mortero-agregado y la influencia de estas en la respuesta global del material, como así también evaluar la verdadera dimensión de la longitud característica del proceso de falla o fractura mecánica a nivel de mesoestructura y su variación con el estado de tensión dominante en el material. La intención final es incorporar estas propiedades fundamentales de la micro y mesoestructura del material en las formulaciones enriquecidas macromecánicas mediante la calibración consistente de sus parámetros y leyes internas. En definitiva, mucho se ha avanzado en la interpretación y en el conocimiento de las propiedades del hormigón convencional tanto a nivel macro como mesomecánico, lográndose hasta el presente formulaciones continuas abarcativas, es decir,

válidas para todo el espectro de tensiones del hormigón y basadas en teorías constitutivas enriquecidas. Entre estas se destaca el Modelo Extendido de León (MEL), Etse y Willam 1994, y su formulación tiempo-dependiente, el Modelo Extendido de Perzyna-Leon, Etse y Carosio 1999.

Contrariamente al caso del hormigón convencional, el nivel de conocimiento global y mesomecánico del hormigón de alta prestaciones, en particular del hormigón de alta resistencia, es muy limitado. Teniendo en cuenta las esbelteces y la gran responsabilidad en resistencia que los miembros estructurales compuestos por hormigones de alta resistencia poseen, el déficit de conocimiento y, muy especialmente, la falta de formulaciones constitutivas realistas que permitan evaluar predictivamente el comportamiento de respuesta de este material frente a cualquier tipo de acciones mecánicas dables de acontecer durante la vida útil de las estructuras que componen, constituye un hecho preocupante y una realidad que la comunidad científica debe revertir en el corto plazo. Precisamente, el desarrollo de una formulación constitutiva realista para hormigones de alta resistencia es el objetivo último de las investigaciones en que se enmarca el presente trabajo. El mismo, se refiere a la etapa inicial, en la cual se evalúan las propiedades fenomenológicas del material, en particular su comportamiento no lineal en endurecimiento y ablandamiento y la dependencia de este comportamiento con el nivel de confinamiento existente. Estas propiedades son comparadas con las del hormigón convencional. La teoría constitutiva para hormigones de alta resistencia en estas investigaciones será desarrollada a partir de una modificación del MEL. La idea motriz es reformular sus leyes internas de no asociatividad, endurecimiento y ablandamiento para reproducir las propiedades del hormigón de alta resistencia. Si bien la formulación de ablandamiento estará basada en propiedades de mecánica de fractura, como en el caso del MEL, la misma deberá ser modificada para reproducir la marcada mayor fragilidad del hormigón de alta resistencia y la mayor dependencia en la energía de fractura en Modo I de fractura que presente este material.

En la primera parte del trabajo se discuten las propiedades fundamentales de los hormigones de alta resistencia en base a la observación de ensayos experimentales desarrollados por otros autores. Posteriormente, se evalúan las propiedades del MEL y de sus funciones internas atendiendo a las propiedades del hormigón convencional a los nuevos requerimientos para el hormigón de alta resistencia. Finalmente, se evalúan las predicciones del MEL para el caso de respuestas de hormigones de alta resistencia, de donde se extraen conclusiones en cuanto a las modificaciones necesarias a introducir en el potencial elastoplástico, en la ley de endurecimiento, y en la ley de ablandamiento.

2 HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA – EVIDENCIA EXPERIMENTAL

Dado que el límite entre los hormigones convencionales y los de alta resistencia no está unívocamente aceptado, en este trabajo se seguirán los lineamientos del Comité 363 del código ACI ¹, el cual define como hormigones de alta resistencia (HSC), a aquellos que poseen una resistencia a la compresión f'_c superior a 41 MPa (6000 psi).

Este comité destaca dos cosas. Por un lado, que el límite o frontera entre los NSC y los HSC es convencional, pudiendo aceptarse otro valor de acuerdo a los avances tecnológicos del lugar geográfico. Por otro lado, que la mayoría de las fórmulas que figuran en los reglamentos en vigencia, se sustentan en ensayos realizados con hormigones de resistencias menores que 41 MPa.

La mayor resistencia del hormigón se logra mejorando la calidad de cada uno de los componentes, e incorporando a la mezcla aditivos químicos (plastificantes, superplastificantes, retardadores de fragüe, incorporadores de aire), y en muchos casos también adiciones minerales como *fly ash* o *silica fume*, o cemento de escoria. Además, pueden agregarse fibras para mejorar la ductilidad.

A medida que aumenta progresivamente la resistencia del hormigón, van cambiando las propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido.

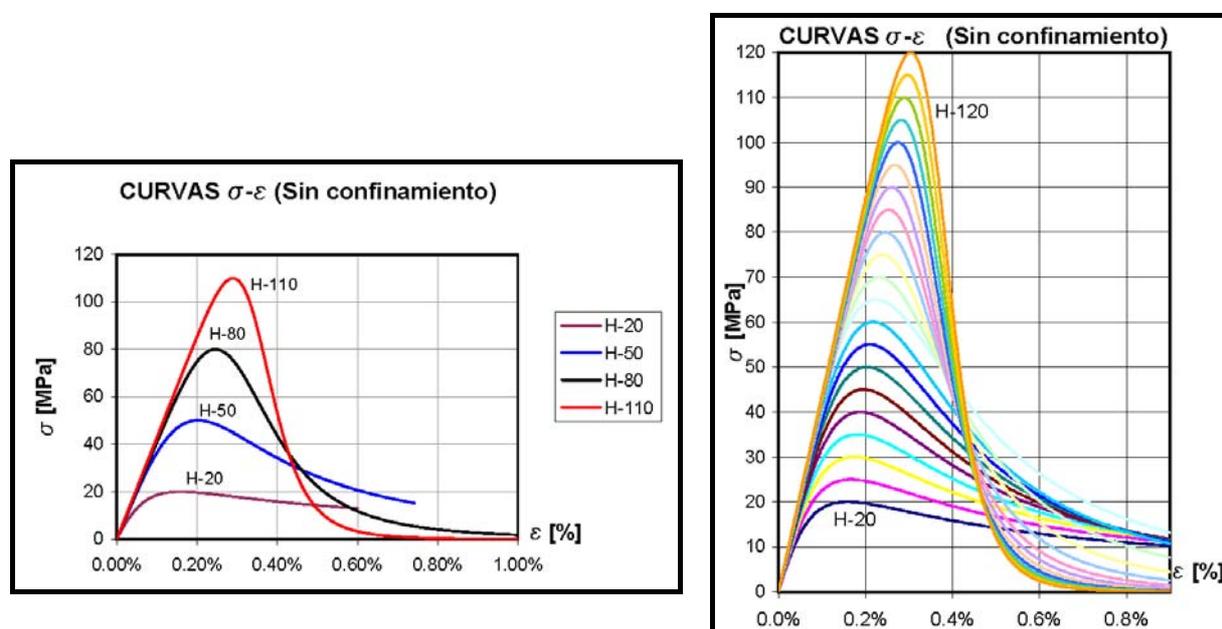


Figura 1: Curvas σ - ε propuestas. Para f'_c hasta 65 MPa, se utilizaron las curvas de Carreira-Chu³; y para $f'_c > 65$ MPa, las propuestas por Lee⁷. En la figura de la izquierda, sólo se representan cuatro calidades de hormigón. En la figura de la derecha, se representa una amplia gama desde H20 hasta H120.

En la Figura 1 se han representado curvas características de acuerdo a curvas propuestas por Carreira and Chu³ para hormigones de resistencia a compresión $f'_c \leq 65$ MPa, y curvas propuestas por Lee⁷ para hormigones de $f'_c > 65$ MPa. En esta figura se aprecia como va variando la forma de la curva a medida que aumenta f'_c , evolucionando hacia un material cada vez más frágil (aumento de resistencia pero disminución de la energía de fracturas involucrada). Se observa que si bien la rama ascendente de las curvas se va empinando cada vez más, mantienen la forma, pero que la diferencia fundamental se encuentra en la rama

descendente, o sea en el ablandamiento después del pico. Este efecto es de vital importancia para evaluar la viabilidad del hormigón de alta resistencia en estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos cíclicos, caso de sismo, donde se requieren ductilidades apreciables del material para permitir un comportamiento estructural apropiado.

Otra característica a destacar de los HSC es que si se los caracteriza por su resistencia a 28 días como se hace con los NSC, se estaría despreciando al menos un 10% de su resistencia, ya que la resistencia pico a compresión a 28 días es entre un 10% y un 15% menor que la análoga a 90 días.

Por otro lado, el comportamiento es muy diferente de acuerdo a los materiales constituyentes empleados. Es decir, dos hormigones de igual resistencia pico, pueden tener una ductilidad diferente si uno tiene fibras y el otro no, o si uno posee una adición de fly ash y el otro de silica fume.

A todo lo anterior debe agregarse que, por ser el hormigón un material cohesivo-friccional, su comportamiento varía radicalmente con el nivel de confinamiento, como puede observarse en las diferentes respuestas en la Figura 2.

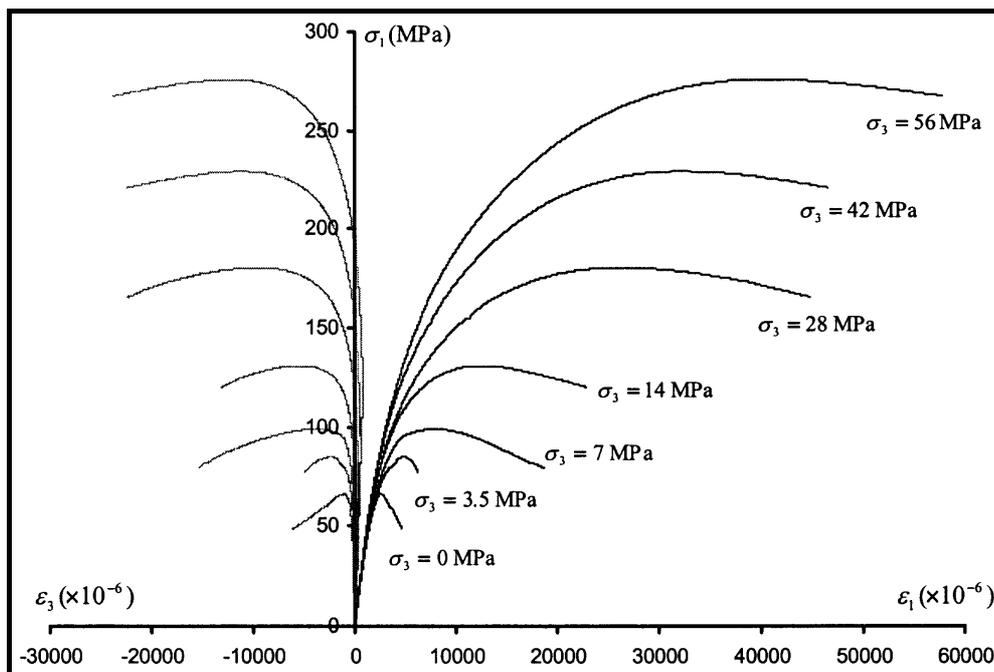


Figura 2: Tensión Axial versus deformaciones axiales y laterales para HSC en compresión triaxial bajo diferentes presiones de confinamiento (Lu⁸)

3 MODELACIÓN ELASTOPLÁSTICA BASADA EN FRACTURA PARA HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Para poder conocer la respuesta de una estructura de HSC más allá del límite elástico, es necesario elaborar un modelo constitutivo capaz de predecir el comportamiento de estos hormigones. Este modelo debe responder satisfactoriamente tanto para caminos de carga

proporcionales como para no proporcionales, debe representar correctamente estados triaxiales, y también estados de tracción y de compresión sin confinamiento.

Para ello se requiere realizar ensayos de los que se pueda obtener las curvas tensión deformación completas, para distintos estados de sollicitación, con sus correspondientes tensiones laterales. Estos ensayos involucran gran complejidad, razón por la cual, aún hoy, los antecedentes bibliográficos son altamente limitados y escasos. Es por ello que las investigaciones en las cuales se enmarca el presente trabajo incluyen entre sus objetivos el análisis experimental para la evaluación y diferenciación de los parámetros mecánicos elásticos, plásticos y de fractura de hormigones convencionales y de alta resistencia, en compresión (simple y triaxial) y en tracción uniaxial. Paralelamente, involucran el desarrollo de formulaciones constitutivas para hormigones convencionales y de alta resistencia que serán implementadas en códigos de elementos finitos, y serán calibradas con los resultados experimentales obtenidos.

Se considera el marco teórico de la elastoplasticidad del flujo no asociado, donde la condición de fluencia en el espacio de Haigh-Westergaard es

$$F = F(\rho, \xi, \theta) \quad (1)$$

con su gradiente

$$\mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial F}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} + \frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \quad (2)$$

y la ley de flujo

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial Q}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \dot{\lambda} \mathbf{m} \quad \text{siendo } Q = Q(\rho, \xi, \theta) \quad (3)$$

siendo $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_p$ la tasa del tensor de deformaciones plásticas, $\dot{\lambda}$ la tasa del módulo plástico y \mathbf{m} el tensor gradiente del potencial plástico con respecto al tensor de tensiones en el espacio Haigh Westergaard. Es claro que la dilatancia del comportamiento material es definida por el tensor gradiente del potencial plástico. En el caso de hormigones de alta resistencia, contrariamente al hormigón convencional, dicha dilatancia volumétrica en régimen inelástico depende no sólo de la presión de confinamiento, representada matemáticamente por el primer invariante de tensiones, sino también por la tracción o compresión dominante que en el caso del espacio de Haigh Westergaard, está definido por el ángulo de Lode θ .

De particular interés es analizar la interacción volumétrica-deviatorica en la formulación constitutiva de hormigones de alta resistencia a desarrollar, a partir del MEL. En el marco de la elastoplasticidad del flujo, esta interacción volumétrica-deviatorica viene dada por

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = 2G \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{dev} - \frac{1}{h_p} \mathbf{m} (\mathbf{n} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{dev}) \quad (4)$$

siendo h_p el denominador del operador material elastoplástico y, en el caso de elasticidad isotrópica,

$$\begin{aligned}\bar{n} &= 2Gn + \Lambda(n : \mathbf{1})\mathbf{1} \\ \bar{m} &= 2Gm + \Lambda(m : \mathbf{1})\mathbf{1}\end{aligned}\quad (5)$$

G y Λ las constantes elásticas de corte y Lamé, y $\mathbf{1}$ el tensor identidad de 2° orden.

El cambio de la tensión volumétrica vendrá dado por

$$\mathbf{1} : \dot{\boldsymbol{\sigma}} = -\frac{1}{h_p}(\mathbf{1} : \bar{m})(\bar{n} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{dev})\quad (6)$$

La condición suficiente para el acoplamiento volumétrico-deviatórico es

$$(\mathbf{1} : \bar{m}) \neq 0 \text{ y } (\bar{n} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_{dev})$$

Por lo tanto, la calibración precisa de los gradientes del potencial plástico y de la condición de fluencia del modelo modificado para hormigones de alta resistencia juega un rol fundamental para la predicción del comportamiento volumétrico inelástico de este material y de su interacción con la deformación deviatórica.

En lo que sigue se analizan las predicciones del MEL de comportamientos experimentales observados en probetas de hormigones de alta resistencia. Este análisis permite evidenciar las ventajas y deficiencias del modelo y de los requerimientos en cuanto a las modificaciones necesarias a introducir para mejorar la predicción de falla de HSC.

4 ENSAYOS NUMERICOS

A continuación, se presenta una serie de ensayos numéricos realizados con un *Constitutive Driver* (ver Willam et al, 1987; Etse, 1992). Este programa permite la implementación de una teoría de plasticidad y la predicción del comportamiento del material de acuerdo a la teoría considerada. Constituye una herramienta sumamente útil para probar una determinada teoría, antes de implementarla en un programa de elementos finitos.

En este programa fue implementado entonces el MEL y, siguiendo un control mixto de deformaciones y tensiones, se evaluaron los diferentes caminos experimentales de carga en estado axilsimétrico.

Para este trabajo se han seleccionado algunos de estos ensayos numéricos. En las Figuras 3 a 8 se presentan estos resultados. Cabe destacar que los resultados experimentales seleccionados para trazar las curvas de las Figuras 3 a 7, no poseían datos de la dilatación observada. Sin embargo, consideramos que igual es de sumo interés poder comparar lo que sucede al ir incrementándose la calidad de hormigón progresivamente. Estas cinco figuras constituyen ensayos para carga creciente, sin confinamiento, para distintas calidades de hormigón, de acuerdo a datos extraídos del trabajo de Lee⁷.

La última figura corresponde al caso de carga y descarga sucesiva, en base a resultados de ensayos que figuran en Lu⁸ (2005), realizados con hormigón sin adiciones minerales, de calidad $f'_c = 77$ MPa, con un confinamiento de 21 MPa, es decir de aproximadamente un 30% de f'_c .

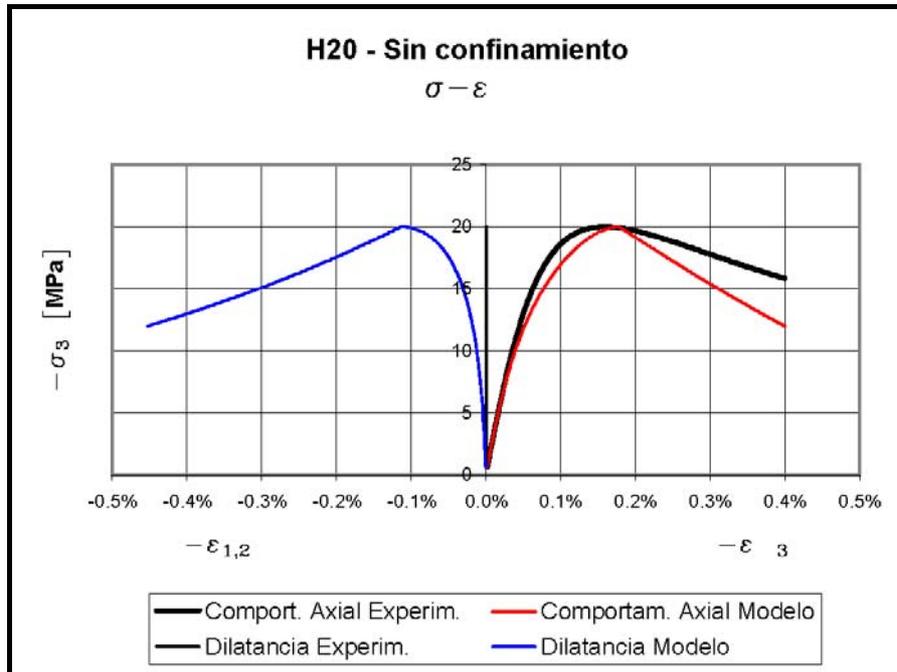


Figura 3: Comparación de resultados para un H20 sin confinamiento (no se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

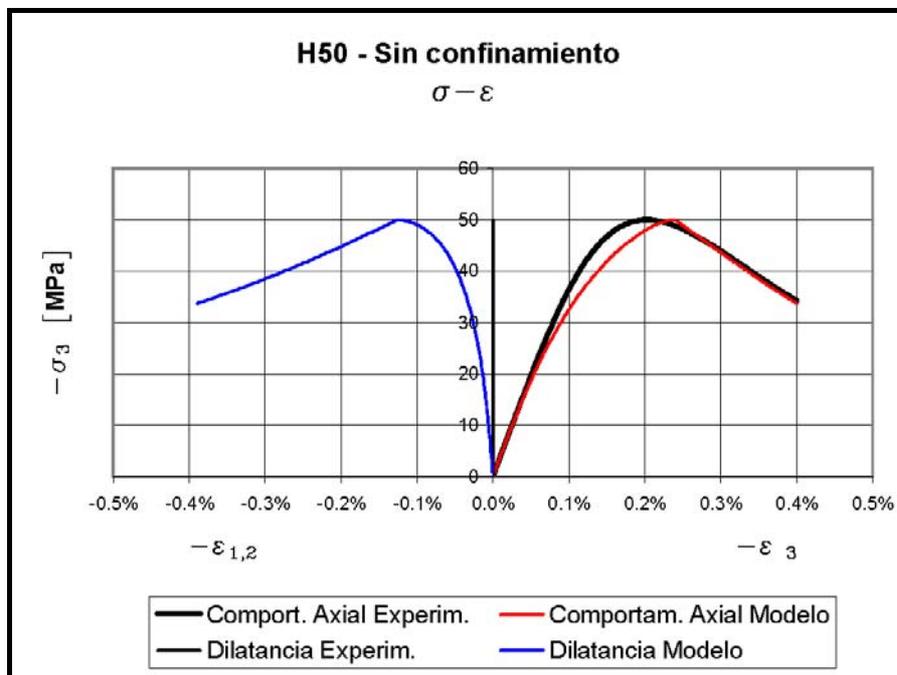


Figura 4: Comparación de resultados para un H50 sin confinamiento (no se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

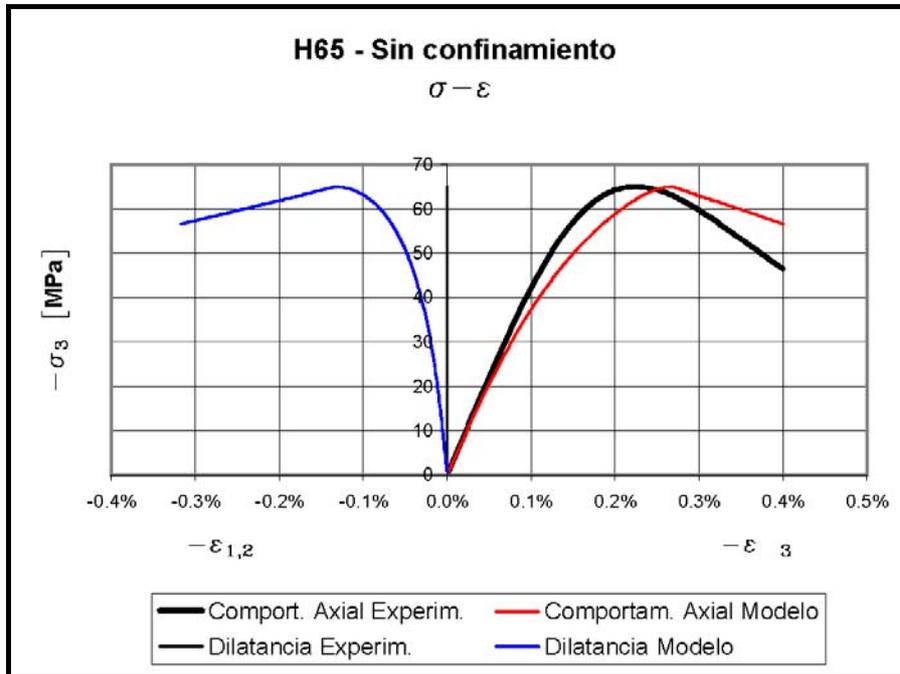


Figura 5: Comparación de resultados para un H65 sin confinamiento (no se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

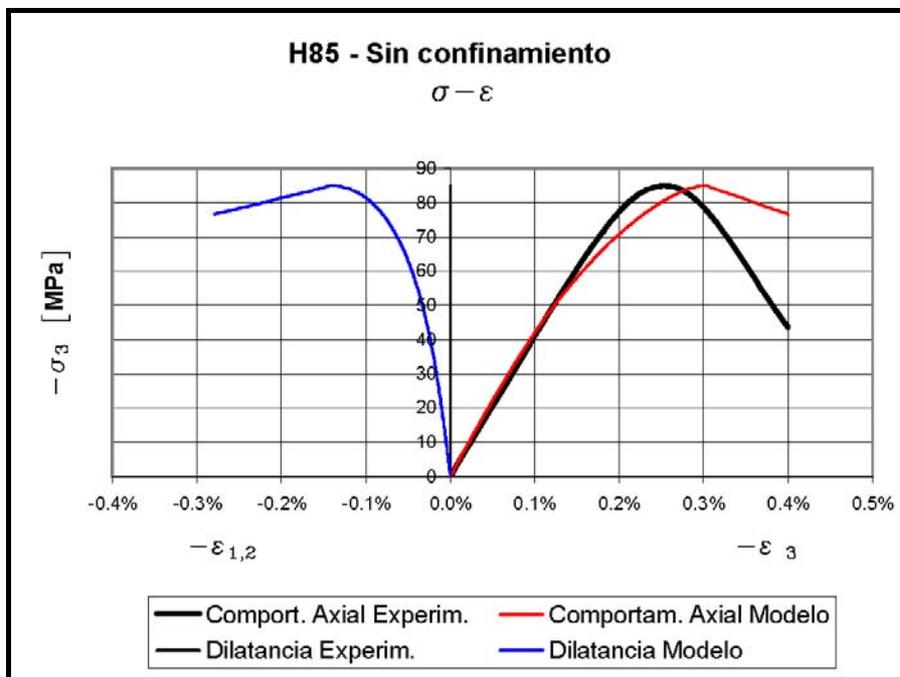


Figura 6: Comparación de resultados para un H85 sin confinamiento (no se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

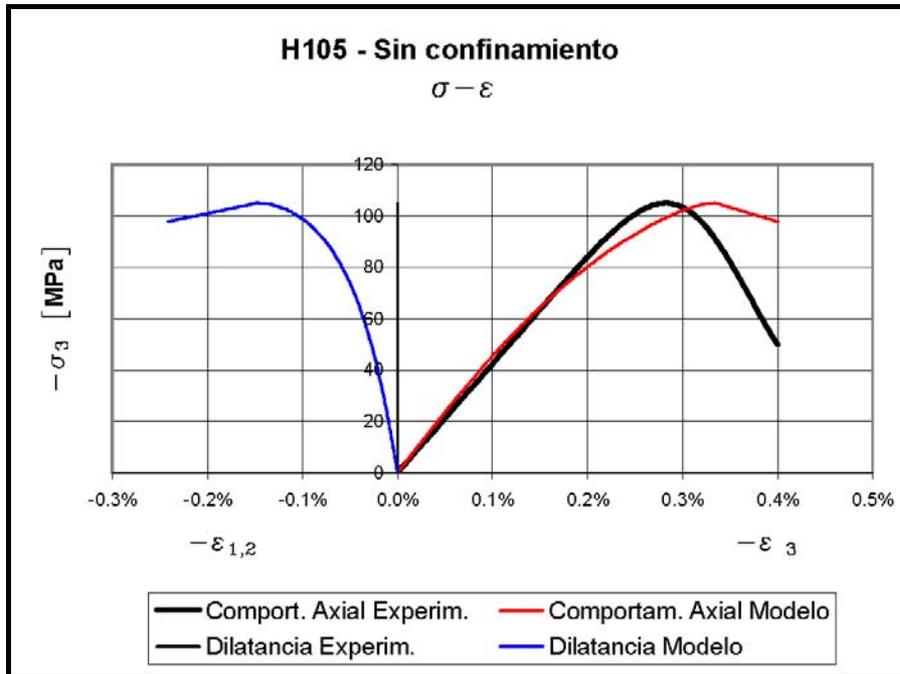


Figura 7: Comparación de resultados para un H105 sin confinamiento (no se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

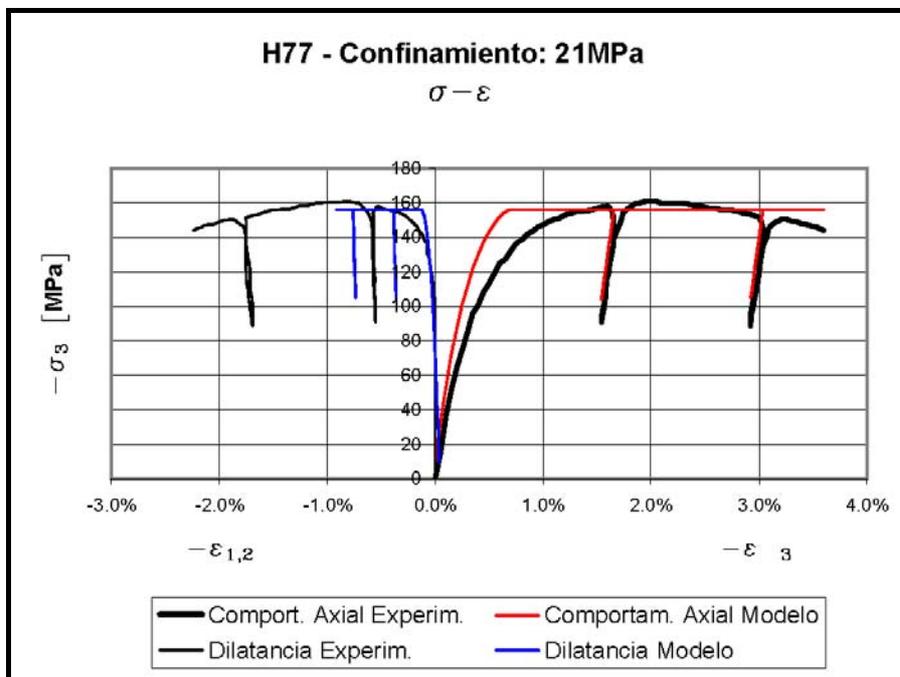


Figura 8: Comparación de resultados para un H77 con un confinamiento de 21MPa (en este caso, sí se obtuvieron datos de la dilatancia experimental)

5 CONCLUSIONES

Las crecientes demandas de mayores resistencias de hormigones junto con los importantes avances tecnológicos para la producción de los mismos han remarcado la necesidad de formulaciones constitutivas unificadas que permitan predecir realísticamente la respuesta de esos materiales para un amplio espectro de sobrerresistencias y de minerales base utilizados.

Las investigaciones en las que se enmarcan los resultados de este trabajo persiguen satisfacer esta necesidad. En esta primera etapa se ha analizado la eficiencia de la formulación elastoplástica basada en mecánica de fracturas, el Modelo Extendido de León, para predecir comportamientos de falla de hormigones con resistencias crecientes. De los resultados obtenidos se observa que este modelo constitutivo responde en forma satisfactoria para hormigones normales, lo cual surge además de ensayos comparativos que figuran en las referencias 5, 6 y 9. Sin embargo, conforme aumenta f'_c decae la precisión de las predicciones de ramas descendentes de caminos de tensiones con bajo confinamiento. Esto demuestra la necesidad de incorporar nuevos parámetros internos al modelo constitutivo que tengan sensibilidad al nivel de prestación del hormigón en términos de su sobrerresistencia de compresión uniaxial. Estos parámetros deberán también ser sensibles al tipo de adición mineral que se emplea en la constitución del mortero cementicio y que sustenta el nivel de prestación. Esto último conferirá al modelo constitutivo mayor precisión del comportamiento mecánico en regímenes de alto y bajo confinamiento, los cuales son influenciados no solamente por el nivel de sobrerresistencia sino también por el tipo de mineral utilizado para alcanzar esta.

Finalmente, los resultados obtenidos, ver Figura 8, demuestran también que la formulación del potencial plástico debe ser modificada sustancialmente para incluir la dependencia del nivel de dilatación en el grado de prestación del material. Esta función de dependencia de la dilatación plástica en el “índice” o grado de prestación debe coexistir con la que controla la dependencia en la presión de confinamiento actuante. De esta manera se arribará a una función de potencial plástica enriquecida que permitirá describir a través de su gradiente la fuerte y compleja variación de la dilatación volumétrica del hormigón con la presión de confinamiento y con el nivel de prestación.

Identificamos entonces los siguientes pasos a seguir en relación al desarrollo de esta formulación modificada de hormigones con alta prestación:

- 1- Una clasificación de acuerdo a la resistencia a la compresión para el estado sin confinamiento, o sea el “grado de prestación”.
- 2- Los materiales de elaboración: podríamos distinguir básicamente tres casos: sin adiciones minerales, con *silica fume* y con *fly ash*. A su vez, cada uno de estos grupos podría dividirse en dos: con fibras y sin fibras.

En conclusión, no puede extrapolarse a partir del comportamiento de un hormigón convencional, el diseño de un hormigón de alta resistencia.

6 REFERENCIAS

- [1] American Concrete Institute, “State-of-the-art report on high strength concrete”, Report by ACI Committee 363. (reapproved in 1997)
- [2] Calixto, J.M., “Microcracking of high performance concrete subjected to biaxial tension-compression stresses”, *Materials Research*, Vol. 5, N° 3, p295-299. (2002)
- [3] Carreira, D., Chu, K.H., “Stress-Strain relationship for plain concrete in compression”, *ACI journal*, V.82, No. 6, p797-804. (1985)
- [4] Etse, G., “Theoretische und numerische untersuchung zum diffusen und lokalisierten Versagen in Beton”, Phd thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany. (1992)
- [5] Etse, G., Willam, K., “Fracture energy formulation for inelastic behavior of plain concrete”, *ASCE journal of Engineering Mechanics* 120(9), p. 1983-2011. (1994)
- [6] Etse, G., Sfer, D., Carol, I., Gettu, R., “Failure analysis of concrete under multiaxial stress state”, *ECOMAS*. (2000)
- [7] Lee, I., “Complete stress-strain characteristics of high performance concrete”, Phd Thesis, New Jersey Institute of Technology. (2002)
- [8] Lu, X., “Uniaxial and triaxial behavior of high strength concrete with and without steel fibers”, Phd Thesis, New Jersey Institute of Technology. (2005)
- [9] Sfer, D., Carol, I., Gettu, R., Etse, G., “Experimental study of the triaxial behavior of Concrete”, *ASCE journal of Engineering Mechanics*. (2002)
- [10] Van Geer, E., “Concrete Behaviour in multiaxial compression”, Doctoral Thesis, Technische Universiteit Eindhoven. (1998)