

EVALUACION NUMERICA DE PARAMETROS MATERIALES EN HORMIGON DE ALTA RESISTENCIA A NIVEL MESOMECANICO

Myriam M. Ledesma^a, Ricardo H. Lorefice^a, Guillermo J. Etse^b y Víctor A. Fares^a

^a*CMAE – CENTRO DE MECANICA APLICADA Y ESTRUCTURAS, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Avda. Belgrano(s)1912, Santiago del Estero, Argentina, mledesma@unse.edu.ar
lorefice@unse.edu.ar, <http://www.unse.edu.ar>*

^b*CEMNCI - CENTRO DE METODOS NUMERICOS Y COMPUTACIONALES EN INGENIERIA, Universidad Nacional de Tucumán, Avda. Roca 4000, Tucumán, Argentina-
getse@herrera.unt.edu.ar <http://www.unt.edu.ar>*

Palabras clave: Hormigón de alta resistencia, calibración de parámetros, interfases, nivel mesomecánico.

Resumen. La modelación numérica del proceso de falla de hormigones de alta resistencia a nivel mesomecánico presenta una fuerte dependencia de la apropiada asignación de los parámetros materiales de cada fase del compuesto, ya que la propagación de falla y por consiguiente la adecuada detección del patrón determinante de rotura es función directa del comportamiento mecánico de las distintas fases intervinientes en el modelo. En este sentido, parámetros tales como el ángulo de fricción interna, energías de fractura en tracción y compresión de las diferentes interfases (mortero-mortero, mortero-agregado, agregado-agregado), resistencias a tracción directa y corte y los criterios de falla asignados a cada una de las mismas constituyen aspectos decisivos al formular un modelo mesomecánico capaz de captar adecuadamente el complejo comportamiento material del hormigón de alta resistencia. En este trabajo se presenta la calibración numérica de los parámetros de un modelo mesomecánico para hormigones considerando datos experimentales disponibles en la literatura. Una vez calibrado el modelo, se analiza su performance numérica mediante simulaciones computacionales de ensayos de compresión uniaxial en hormigones de alta resistencia.

1 INTRODUCCION

Durante las últimas décadas el uso de hormigones de altas resistencia se ha visto incrementado debido a las exigencias arquitectónicas de minimizar el espacio ocupado por las estructuras y el tiempo de desencofrado en forma adicional al siempre creciente requerimiento de mayor resistencia y durabilidad. La existencia de estos tipos de hormigones que superan la resistencia de los denominados *hormigones normales*, se debe al desarrollo de nuevos cementos y a los aditivos que se incorporan a la pasta con el fin de conferirle las características de resistencia, durabilidad y demás propiedades deseables en un hormigón de performance superior. Los parámetros materiales son determinados en su mayoría por medio de ensayos de laboratorio estáticos o dinámicos sometiendo a las probetas a esfuerzos normales de compresión axial, compresión confinada, tracción y corte obteniendo de este modo curvas experimentales que representan el comportamiento constitutivo global (es decir, el resultado obtenido se ubica dentro del denominado “nivel macroscópico de observación”). Sin embargo, a pesar de las extensas investigaciones concretadas en el campo experimental por infinidad de autores, existe aún gran escasez de datos sobre el comportamiento del Hormigón de Alta Resistencia (HAR), y en particular sobre la resistencia al corte y a tracción de sus distintas fases componentes, dada la dificultad práctica de concretar ensayos confiables capaces de brindar dichos parámetros, los cuales serían en este caso representativos del comportamiento constitutivo de cada fase del hormigón y corresponderían a una visión *mesomecánica* del material. En la propuesta presentada por Etse, G., Lorefice, R., Carosio, A. and Carol (2004), Etse, G., Lorefice, R., López, C.M. and Carol I. (2004), Lorefice et al. (2006), Lorefice (2007), se aborda el problema de la fractura del hormigón bajo escenarios de carga estáticos y dinámicos mediante la consideración de un modelo constitutivo cohesivo-friccional de interfase, Carol et al (1997), López (1999), López et al. (2004) el cual incorpora la dependencia en la tasa de deformación mediante el criterio viscoplástico consistente de Perzyna (1963, 1966). La función de discontinuidad de dicho modelo se define en términos de los parámetros materiales de cohesión aparente y resistencia a la tracción de las diferentes fases constituyentes, las cuales a priori determinan la resistencia global del hormigón. Surge entonces la relevancia de una adecuada selección de los parámetros resistentes de las interfases, sobre todo para el caso de los hormigones de alta resistencia, dada la escasa cantidad de datos disponibles en la bibliografía. En este trabajo se presenta la correlación y ajuste funcional entre la cohesión aparente, la resistencia a la tracción uniaxial y la energía de fractura con la resistencia máxima obtenida mediante la aplicación del modelo constitutivo de interfase a nivel mesomecánico, comparándose los resultados con datos obtenidos en pruebas experimentales disponibles en la bibliografía.

2 ENSAYOS NUMÉRICOS - COMPRESIÓN UNIAXIAL

2.1 Modelo constitutivo - parámetros mecánicos y malla mesomecánica

Tal como se resalto anteriormente, un aspecto crucial de la modelación computacional de falla a nivel mesomecánico de un material compuesto tan complejo como el hormigón es la correcta adopción de los valores de los parámetros materiales que rigen el comportamiento mecánico. Esto es debido a que, a diferencia de los modelos macromecánicos, el modelo planteado requiere como datos de entrada valores tales como la cohesión aparente, ángulo de fricción interna, resistencia a tracción y energías de fractura de cada una de las diferentes interfases involucradas. Debido a ello, la calibración del modelo debe realizarse mediante sucesivas pruebas numéricas y posteriores ajustes estadísticos de parámetros a fin de obtener

al final del proceso la definición de un conjunto de parámetros representativos de un tipo específico de mesoestructura que permita alcanzar una determinada resistencia global. Desde el punto de vista mesomecánico, cada fase se caracteriza por un comportamiento constitutivo particular, ver López (1999), Lorefice (2007). Mientras que los elementos de medio continuo representativos de las fases mortero y agregado obedecen una ley constitutiva elástica lineal Hookeana, el caso de la modelación mesomecánica de hormigones de alta resistencia implica además de las juntas mortero-mortero y mortero-agregado la inclusión de elementos finitos de junta de espesor nulo entre los elementos de continuo asignados a la propia fase agregado a fin de permitir la apertura de fisura por fractura dentro de los mismos. Las interfases restantes corresponden a regiones mortero-agregado en zona de transición interfacial (Interfacial Transition Zone - ITZ) y juntas en la pasta cementicia denominadas aquí juntas mortero-mortero. Para todas las interfases se considera una ley caracterizada por la expresión dada en la Ec. (1), con los parámetros propios de cada una de ellas y considerando la siguiente simbología:

$$F = \tau^2 - (c - \sigma \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 - \dot{\lambda} \eta \quad (1)$$

σ : tensión normal actuante en el plano de la interfase, τ : tensión cortante (tangencial) actuante en el plano de la interfase, ϕ : ángulo de fricción interna, η : Viscosidad aparente, χ : resistencia a la tracción, c : cohesión aparente y $\dot{\lambda}$: multiplicador viscoplástico.

De acuerdo a la ley constitutiva puede apreciarse que la evolución hiperbólica de la superficie de fractura (expansión) queda limitada por el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, Figura 1a, mientras que una vez iniciada la fisuración, la superficie se contrae alcanzando el límite inferior, el cual expresa una resistencia residual puramente friccional (curva 2 - Figura 1b), correspondiente a un estado tensional de corte y alta compresión sin dilatación, denominado Modo IIa. Un estado intermedio es el esquematizado por la curva 1, en la cual se alcanza la falla en tracción pura (Modo I de falla). Al tratarse de un HAR, es frecuente que debido a la alta resistencia de la pasta cementicia la fisura atraviese la fase agregado, poniendo de manifiesto la resistencia residual por fricción debido a la rugosidad de las interfases en contacto, siendo este hecho representado en el Modo Mixto de fractura, representando un estado intermedio entre los modos de I y IIa. La tasa de energía disipada durante la evolución de una fisura en el proceso de fractura tiempo-dependiente puede expresarse por medio de la variable de estado \dot{q}_{vcr}

$$\dot{q}^{\text{vcr}} = \mathbf{t}^T \dot{\mathbf{u}}^{\text{vcr}} \quad (2)$$

Donde \mathbf{t} es el vector de tensiones sobre la interfase y \mathbf{u}^{vcr} representa el vector de desplazamientos relativos de apertura de fisura. Las leyes de evolución de los desplazamientos críticos tiempo-dependientes se expresan en términos de la función de potencial viscoplástico Q_{vcr} , que es una función que puede definirse a partir de la superficie de fractura en la que las deformaciones plásticas son normales a ella y que pueden obtenerse con la dirección del incremento temporal de deformación plástica, y el multiplicador viscoplástico $\dot{\lambda}$ como:

$$\dot{\mathbf{u}}^{\text{vcr}} = \dot{\lambda} \mathbf{A} \mathbf{n} \quad (3)$$

$$\text{Donde} \quad \mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma}, \frac{\partial F}{\partial \tau} \right]^T = [2 \tan \phi (c - \sigma \tan \phi), 2\tau]^T \quad (4)$$

Cuando $Q_{vcr} = F$, la matriz de transformación \mathbf{A} es la identidad, y el caso se denomina regla de flujo asociada (caso de tracción – Modo I de falla). La no asociatividad del modelo surge por medio de la modificación de la matriz \mathbf{A} dada en la Ec. (5)

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & \text{si } \sigma \geq 0 \\ \begin{pmatrix} f_{\sigma}^{dil} & f_c^{dil} \\ 0 & \left(1 - \left|\frac{\sigma \tan \phi}{\tau}\right|\right) \end{pmatrix} & \text{si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Con $f_{\sigma}^{dil} = 1 - c/c_0$ y $f_c^{dil} = 1 - |\sigma|/\sigma^{dil}$ donde σ^{dil} es la tensión de compresión, para la cual la dilatancia se anula y c_0 es la cohesión inicial en la junta. Las ecuaciones (6) a (8) completan el modelo elasto-viscoplástico de interfase (Lorefice et al., 2008):

$$\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}^{el} + \dot{\mathbf{u}}^{vcr} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^{el} = \mathbf{E}^{-1} \dot{\mathbf{t}} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{E} (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^{vcr}) \quad (8)$$

Donde $\dot{\mathbf{u}}^{el}$ es la contribución elástica al incremento de desplazamientos totales y \mathbf{E} es la matriz de rigidez elástica (2X2) con componentes diagonales no nulos dados por la rigidez axial E_N y la rigidez de corte E_T ($E_N = E_T$). Los parámetros elásticos de los elementos de continuo (fases mortero y agregado) se asignaron como sigue: $E_{Mort} = 4 \times 10^7 \text{MPa}$ y para los agregados $E_{Agreg} = 7 \times 10^7 \text{MPa}$. El módulo de Poisson para ambos elementos de continuo se adopta igual a $\mu = 0.2$. Para las juntas, la rigidez elástica normal y al corte viene dada por los valores $E_N = E_T = 1.E8 \text{MPa/m}$.

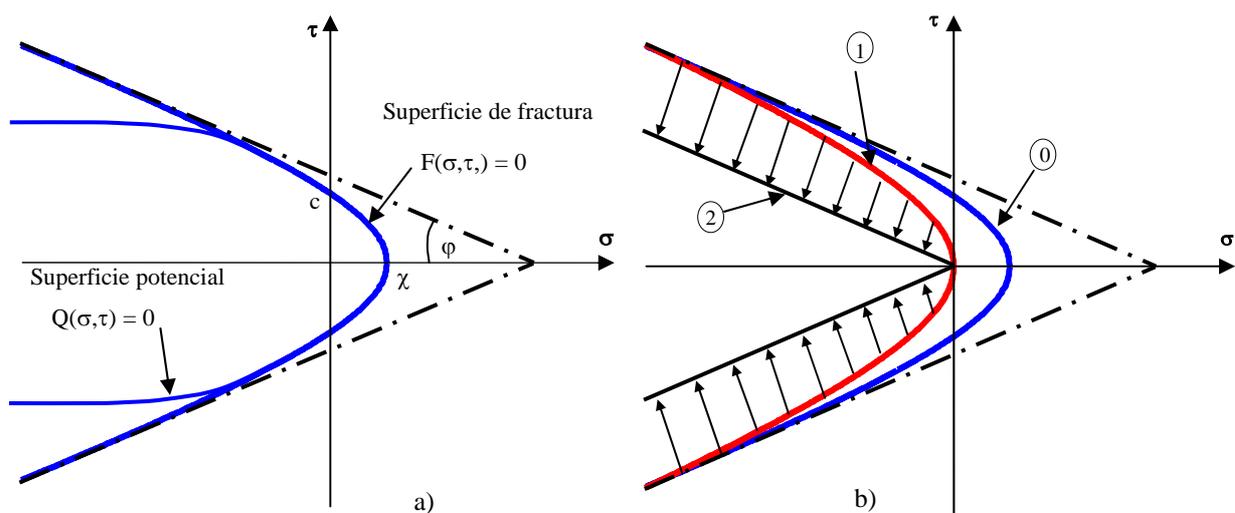


Figura 1: Superficies de fractura – modelo elasto-viscoplástico de interfase

Los ensayos numéricos se realizaron empleando una malla mesomecánica con una distribución de 4x4 agregados, ver Figura 2, imponiendo control de desplazamientos verticales sobre los nodos superiores con condición de borde de desplazamientos verticales nulos en los nodos del borde inferior. Tal como se puntualizó anteriormente, a diferencia de la modelación mesomecánica de hormigones normales, para simular el comportamiento de rotura de hormigones de alta resistencia (HAR) se incorporan juntas de espesor nulo entre los contornos de contacto de los elementos de medio continuo que representan a los agregados. De acuerdo con la evidencia experimental obtenida por diversos autores, Rodriguez et al. (2009), Idiart (2009), en los HAR las interfases más resistentes corresponden a las insertas en la fase mortero, seguidas de las juntas mortero-agregado. Las interfases más débiles corresponden a las juntas agregado-agregado. Con esta distribución se supone que la fractura del espécimen comience en el interior de los áridos, atraviese la interfase agregado-mortero y se propague a la matriz cementicia.

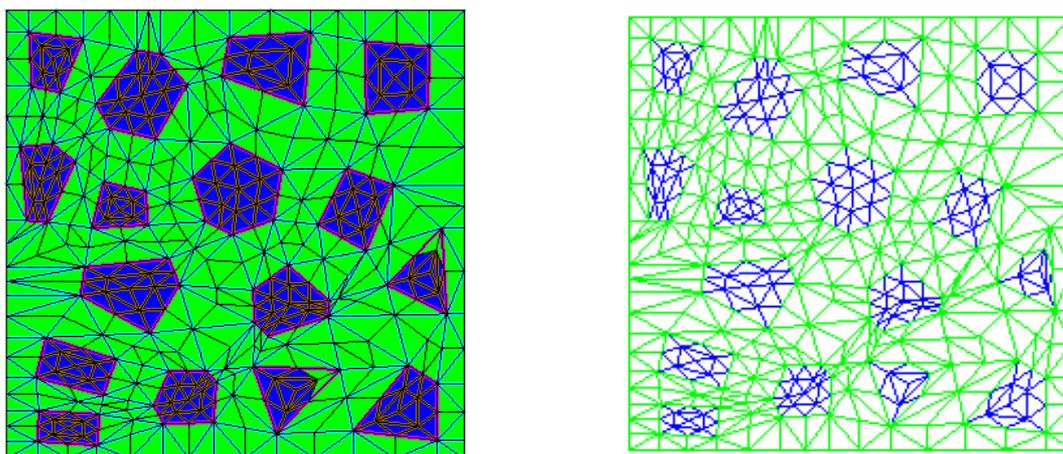


Figura 2: Malla 4x4 – Elementos de continuo (izq.) y configuración de interfases (der.)

Tensión Máxima	Interfase	Cohesión Aparente	Resistencia. Tracción Directa	Energía de Fractura Modo I
19 MPa	Mortero Agregado	7 MPa	1.5 MPa	30 N/m
33 MPa	Mortero Agregado	10 MPa	2 MPa	30 N/m
85 MPa	Mortero Agregado	20 MPa	3 MPa	40 N/m
115 MPa	Mortero Agregado	40 MPa	6 MPa	90 N/m
183 MPa	Mortero Agregado	45 MPa	11 MPa	90 N/m

Tabla 1- Parámetros mecánicos para ensayos numéricos

Los ensayos se realizaron considerando parámetros correspondientes a 5 (cinco) valores de resistencias características de hormigones. El ajuste de los parámetros se concentró en los valores de cohesión, resistencia a la tracción y energías de fractura de las interfaces de la *Zona de Transición Interfacial* (Interfacial Transition Zone - ITZ) manteniendo constantes las demás variables (ángulo de fricción interna, módulos de elasticidad de mortero y agregado, viscosidad y coeficiente de Poisson), ver Tabla 1. A las interfaces mortero-mortero se les asignaron parámetros de resistencia disponibles en la literatura dado que sobre los mismos hay escasa incertidumbre por obtenerse directamente de ensayos sobre probetas de mortero. En cuanto a los parámetros correspondientes a las interfaces agregado-agregado, los mismos corresponden directamente a la rotura por corte del agregado grueso (cohesión de la roca).

2.2 Curvas tensión - deformación

En Figura 3 se ilustran las curvas tensión-deformación en compresión uniaxial obtenida con el criterio descrito para los hormigones de resistencias variables entre 19 y 183 MPa. La rama de pre-pico presenta un comportamiento inicial elástico lineal hasta alcanzar aproximadamente el valor máximo de resistencia, iniciándose a partir del mismo una reducción de rigidez denominada rama de ablandamiento o *softening* originada por la degradación de la mesoestructura debido al inicio del proceso de fisuración (Ledesma, Lorefice y Etse, 2009).

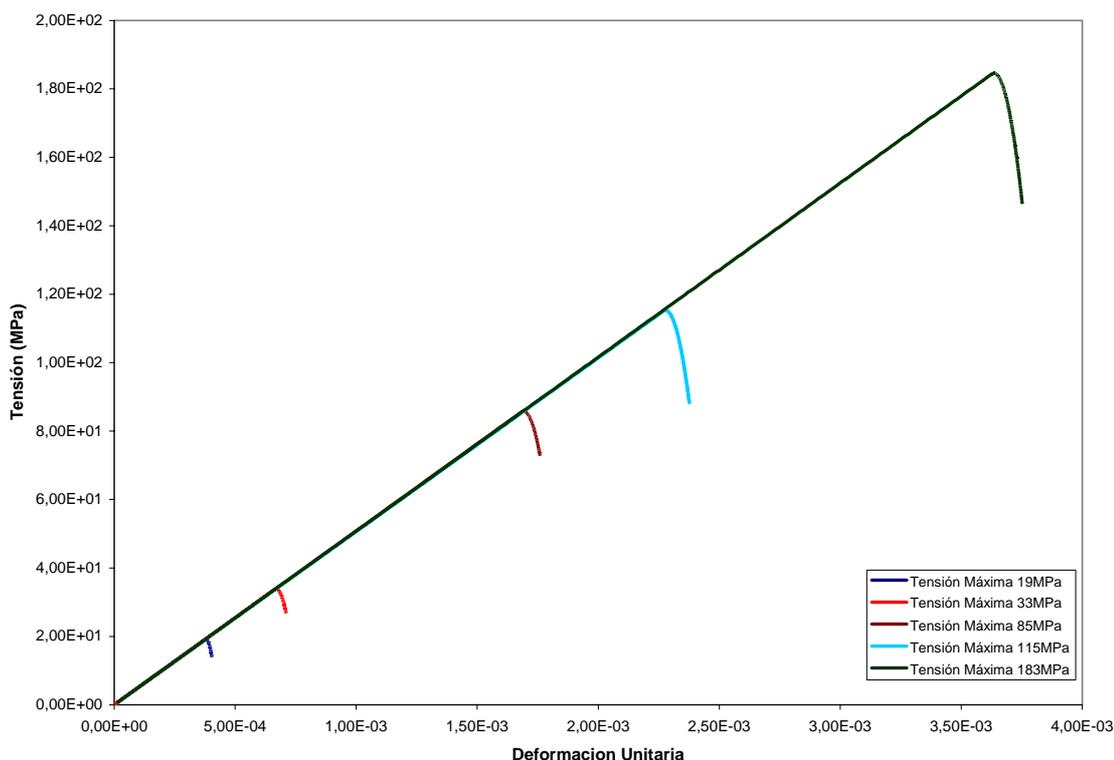


Figura 3: Ensayos numéricos - Curvas Tensión-Deformación

La respuesta mecánica obtenida para los parámetros adoptados muestra una buena concordancia con los resultados experimentales y numéricos presentados por diversos autores (Zia P. et al (1993), Wee (1996), Chin y Mansur (1996), Xiao y Chin (2006), Zongjin Li y Yunsheng Zhang (2005)) lográndose captar el comportamiento global del material a nivel

macromecánico. Para los parámetros adoptados, el proceso de falla se inicia en las juntas agregado-agregado, propagándose luego a las interfaces mortero-agregado y mortero-mortero. Debido a la fragilidad de la respuesta, el comportamiento de pos-pico es de difícil captura numérica a pesar del empleo de técnicas de aceleración de convergencia tales como el método de búsqueda en línea (line-search) y el de longitud de arco (arc-length), ambos combinados con procedimientos iterativos de Newton-Raphson.

3 AJUSTE NUMÉRICO DE PARÁMETROS

Se describe en esta sección el procedimiento seguido con el fin de calibrar los parámetros mecánicos que servirán de entrada al modelo mesomecánico. La calibración se basa en el ajuste de los valores de cohesión aparente, resistencia a la tracción y energías de fractura para Modos I y IIa.

3.1 Cohesión aparente

Es conocida la escasez de datos experimentales respecto de parámetros mecánicos correspondientes a las fases componentes de hormigones de alta resistencia (HAR), sobre todo desde el punto de vista experimental. El ajuste de los datos usados en la modelación se compara con los disponibles en la bibliografía técnico-científica, entre los cuales se destacan los obtenidos por Zía et al (1993, 1993b) y ensayos de corte realizados sobre vigas, Hegger & Bertrand (2008). El ajuste polinomial se realizó usando el software MatLab lográndose un polinomio de cuarto grado que tiene la forma:

$$T = 0.0004 c^4 - 0.0289c^3 + 0.5294c^2 + 2.9898 c - 18.9103 \quad (9)$$

Donde “T” es la tensión máxima alcanzada en el ensayo numérico y “c” la cohesión aparente correspondiente a las diferentes resistencias características consideradas. Los resultados se aprecian en la Figura 4.

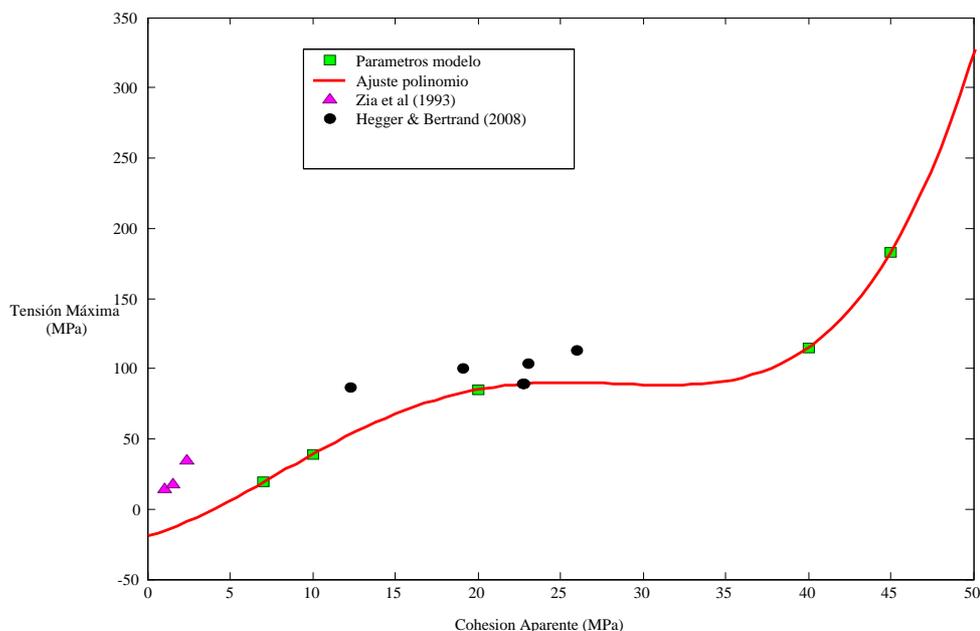


Figura 4: Ajuste cohesión-tensión máxima y datos experimentales

Se observa que si bien los valores obtenidos en pruebas experimentales son superiores a

los numéricos, el ajuste es aceptable. Se debe tener en cuenta además que el valor de cohesión en el modelo no es única pues hay una cierta interacción con las restantes interfases las que poseen sus propios y diferentes parámetros, aunque de todos modos es predominante la incidencia de la fractura en las juntas mortero-agregado debido a que corresponden a la zona de transición interfacial y son las que permiten la propagación de la fisura a través de la muestra. En el caso de la resistencia al corte medida en pruebas experimentales por Hegger y Bertrand (2008) la misma corresponde al conjunto, matriz cementicia y agregados.

3.2 Resistencia a la tracción

El ajuste en este caso resultó en un polinomio de segundo grado:

$$T = -1.0820 \chi^2 + 29.6318 \chi - 13.7933 \quad (10)$$

Donde “T” nuevamente es la tensión máxima, y “ χ ” la resistencia a la tracción uniaxial. El ajuste se compara con resultados experimentales obtenidos por Mc Leod (1998), Fathy et al. (2007) y Vincent (2003). Los resultados se ilustran en la Figura 5.

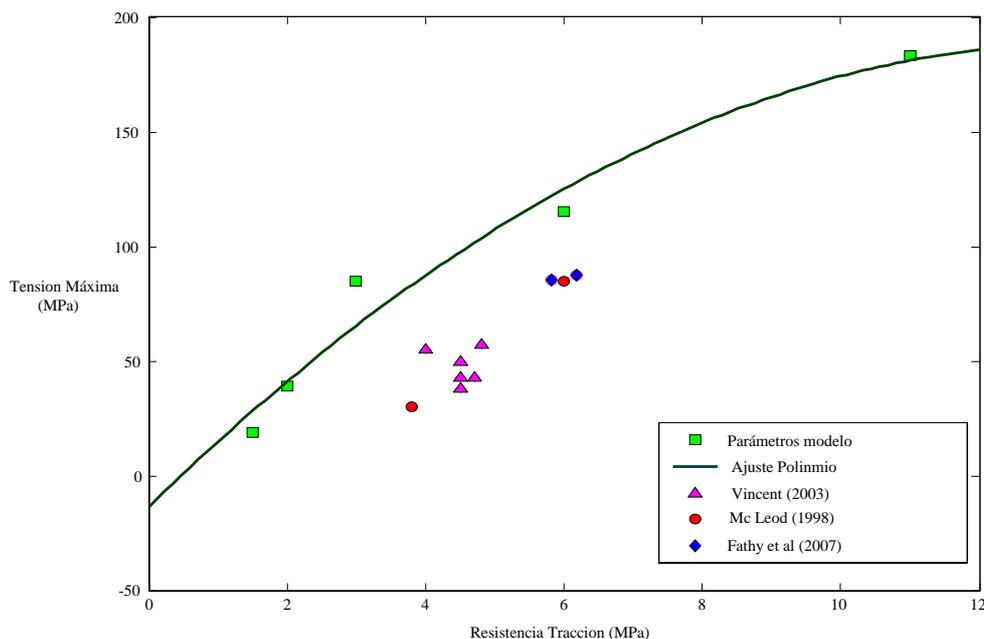


Figura 5: Ajuste polinomial - resistencia a la tracción

3.3 Energía de Fractura

El ajuste de la energía de fractura se logró mediante una función lineal de la energía de fractura en Modo I:

$$T = 1.8531 G_f^I - 15.5714 \quad (11)$$

Los resultados se ilustran en la Figura 6. Se observa la dispersión de datos experimentales y parámetros numéricos. Por un lado, los resultados experimentales no consideran el tipo de

energía de fractura (Tipo I o II), por lo que en el modelo numérico se conserva la relación indicada por la evidencia experimental y por diversos autores ($G_f^I = 0.10G_f^{II}$). Por otro lado se observa que los parámetros del modelo aumentan con la resistencia, mientras que en el caso experimental hay resistencias similares para diferentes energías de fractura. Se debe considerar además que la energía de fractura es función del tamaño y disposición espacial del agregado grueso en la probeta, de las interacciones mecánicas de las inclusiones, de la baja ductilidad de los HAR y de la contracción por secado, ver Wittmann (2002). Es evidente que en nuestro caso se hace necesario disponer de resultados de ensayos más específicos y numerosos a fin de evaluar en forma más precisa la energía de fractura de los HAR para el ajuste de este parámetro del modelo.

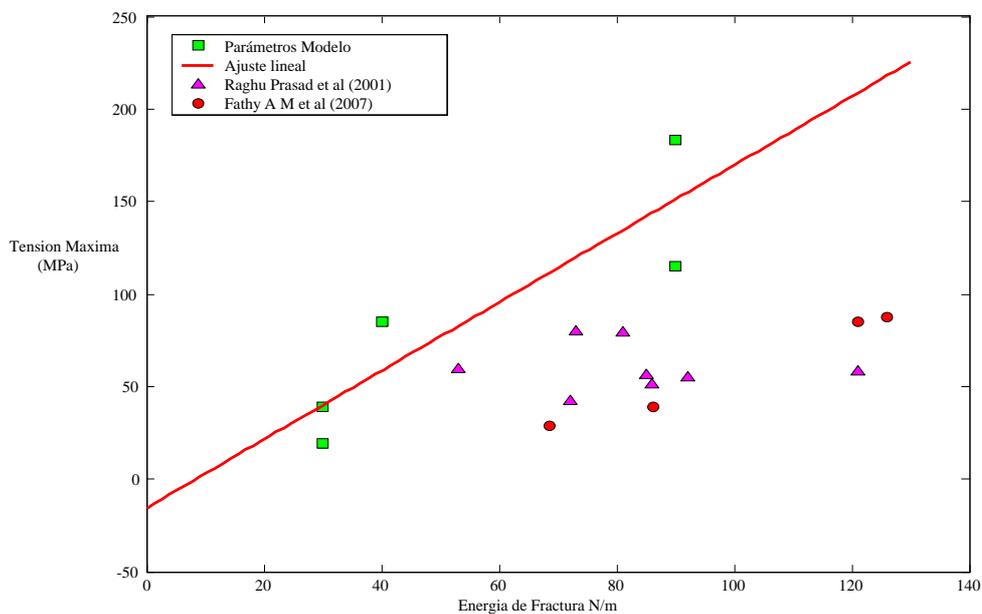
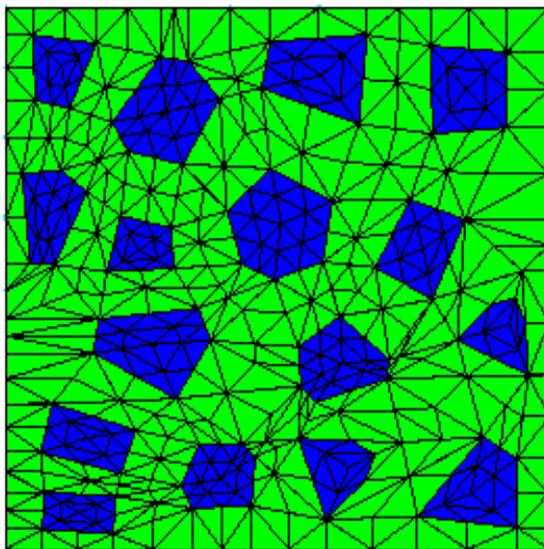


Figura 6: Ajuste energía de fractura - tensión máxima y datos experimentales.

4 ANALISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan algunos resultados numéricos correspondientes al caso de resistencia máxima $\sigma_{\max} = 115$ MPa. Las Figuras 7 y 8 presentan las mallas deformadas para estados de tensiones de pre-pico y máxima resistencia, los desplazamientos relativos entre las juntas de un vértice se muestran en un detalle (sector ampliado). El proceso de fractura se inicia en una junta interna de la fase agregado-agregado, propagándose luego a la zona de transición interfacial mortero-agregado (ITZ). Este proceso puede apreciarse claramente en términos de la energía de fractura disipada, la cual se incrementa conforme avanza el proceso de carga monótonica aplicada en el borde superior de la probeta, expresándose los resultados de post-proceso en términos del cociente entre el trabajo de fractura disipado en las juntas durante el proceso elasto-viscoplastico (dW_{cr}) y el parámetro de energía de fractura en Modo I de falla, ver Figuras 9 y 10. En las Figuras 11 y 12 se ilustra el módulo de tensiones en las juntas para etapa de pre-pico y estado de máxima resistencia y los módulos de desplazamientos resultantes en las juntas, ver Figuras 13 y 14, donde nuevamente se manifiesta que las tensiones y desplazamientos críticos de apertura de fisura son mayores en las juntas de la fase agregado, lo cual determina el inicio del proceso de fractura en el caso de

los hormigones de alta resistencia. Si bien los resultados son coherentes con los datos disponibles en la bibliografía, es claro que debe considerarse un número mayor de datos de entrada y que también debe realizarse la calibración de los parámetros para otros casos de carga, tales como tracción pura, corte y compresión confinada a fin de cubrir un espectro de escenarios de carga lo suficientemente amplios que permitan evaluar la confiabilidad de los parámetros adoptados y realizar las modificaciones o ajustes necesarios en cada caso.



Deformation (x61.3229): DISPLACEMENTS of Load Analysis, step 10790.

Figura 7: Malla deformada – estado previo al pico

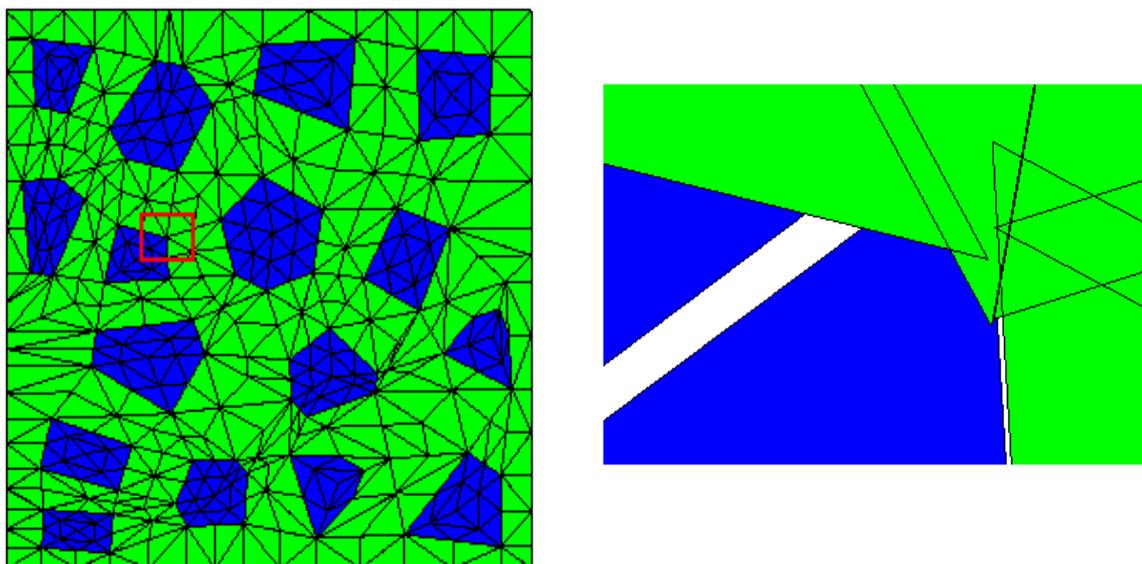


Figura 8: Malla deformada para tensión máxima y detalle de vértice

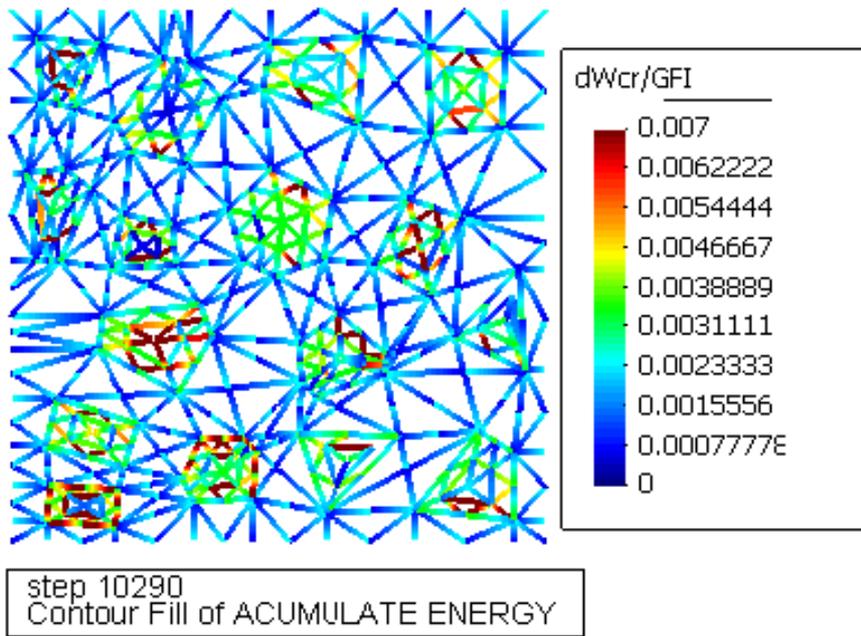


Figura 9: Energía acumulada etapa de pre-pico

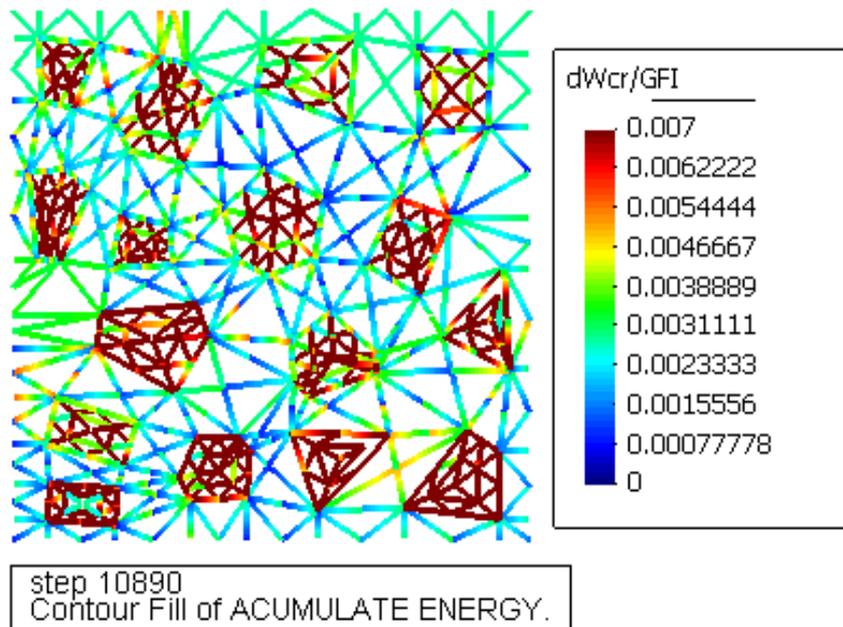


Figura 10: Energía disipada – etapa de softening

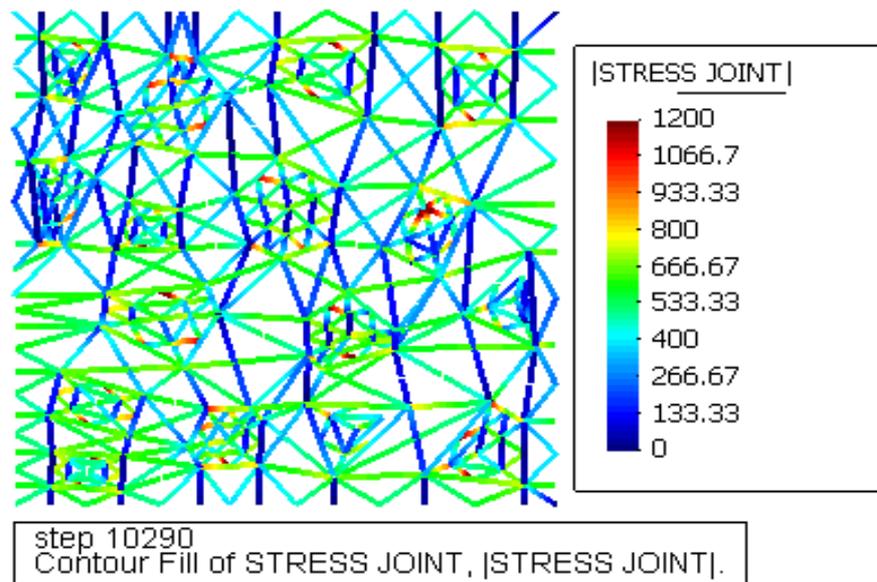


Figura 11: Tensión en juntas etapa de pre-pico

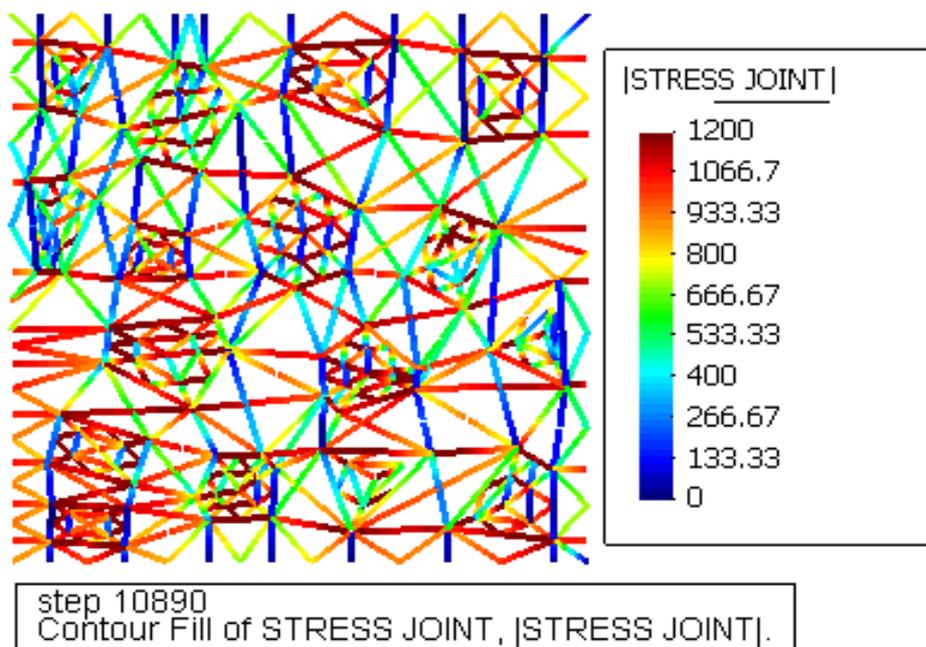


Figura 12: Tensión resultante en juntas – estado de máxima resistencia

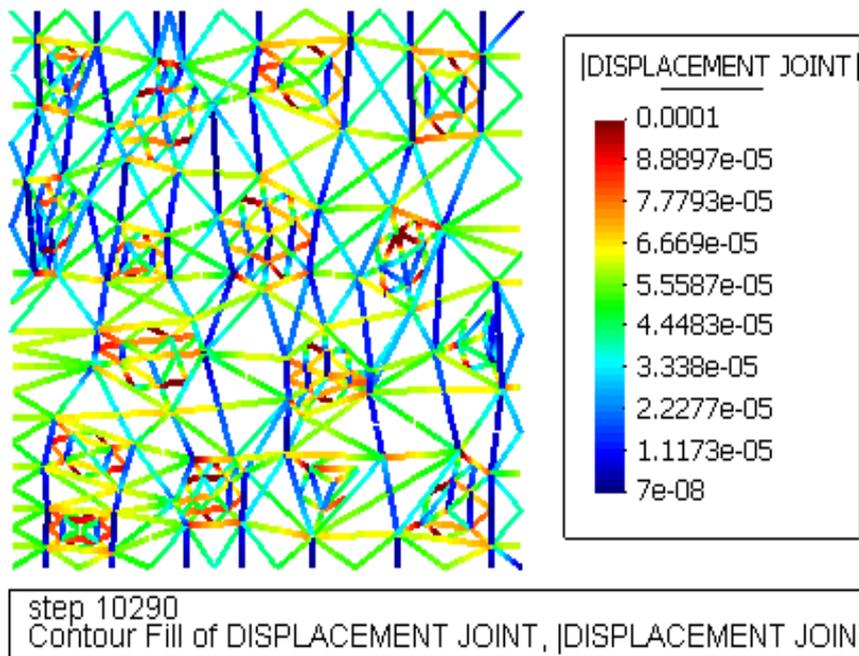


Figura 13: Módulo del desplazamiento de ruptura- estado pre-pico

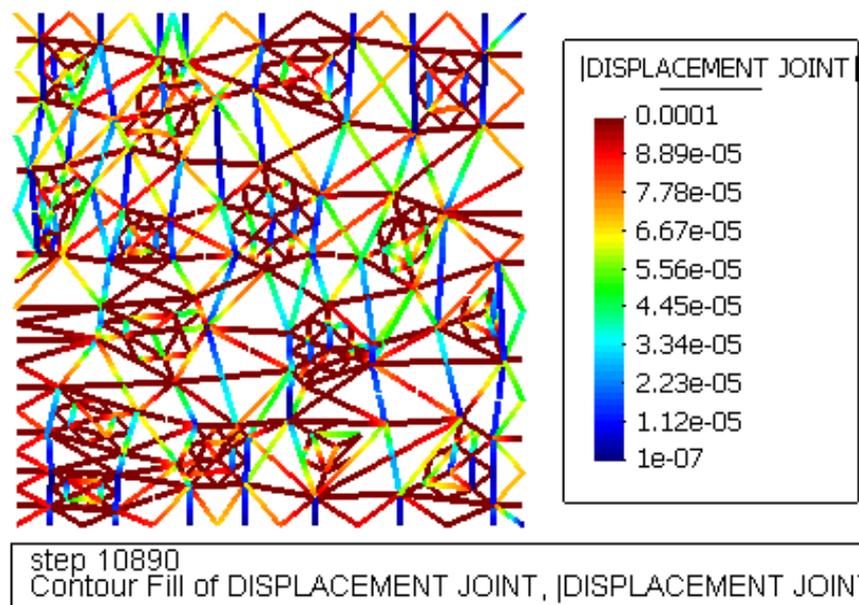


Figura 14: Módulo de desplazamiento de ruptura – estado final rama de softening

5 CONCLUSIONES

Se ha presentado el proceso de calibración de parámetros mecánicos de las interfases de un modelo mesomecánico de fractura apto para la simulación de procesos de falla estáticos en hormigones de alta resistencia bajo condiciones de compresión uniaxial. Los resultados alcanzados indican que las funciones de ajuste determinadas permiten reproducir con aceptable precisión la carga máxima de rotura para diferentes resistencias características de compresión, teniendo presente que la utilidad de las mismas corresponde al rango limitado por el ajuste y solo para el caso de compresión uniaxial. Entre los parámetros de ajuste, el logrado para la cohesión parece ser el más cercano a los datos experimentales. En relación a la energía de fractura, la dispersión de datos demuestra la fuerte dependencia del proceso de rotura en función de diversos factores que influyen en su determinación experimental y que dificulta el proceso de calibración numérica. En este sentido, es claro que se requiere profundizar las investigaciones tanto experimentales como numéricas a fin de lograr un modelo numérico de mayor confiabilidad y que resulte preciso para distintas calidades de hormigones y diferentes estados de carga.

REFERENCIAS

- Carol, I., Prat, P.C., and López, C.M., Normal/shear cracking model. Interface implementation for discrete analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE 123 (8), 765-773, 1997.
- Etse, G., Lorefice, R., Carosio, A. and Carol, I., Rate Dependent Interface Model Formulation for Quasi-Brittle Materials. *Proc. International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures, FRAMCOS 5*. Boulder, Colorado, USA, pp. 301-305, 2004.
- Etse, G., Lorefice, R., López, C.M. and Carol, I., Meso and Macromechanic Approaches for Rate Dependent Analysis of Concrete Behavior. *International Workshop in Fracture Mechanics of Concrete Structures*, Vail, Colorado, USA, 2004.
- Fathy, A., M., Sanz B., Sancho, J.M. and Planas J. Modelización de hormigones de alta resistencia utilizando elementos finitos con fisura cohesiva embebida – *Anales de la Mecánica de Fractura*, Vol. 1, 289-293, 2007.
- Hegger J. and Bertram G. Shear carrying capacity of Ultra_High Performance Concrete beams. *Institute of Structural Concrete at RWTH Aachen, Germany - Tailor Made Concrete-Walraven & Stoelhorst (Eds) Taylor & Francis Group*, London, ISBN978 – 0 – 415 - 47535 – 8, 2008.
- Idiart, A. E. Coupled analysis of degradation processes in concrete specimens at the meso-level. *Tesis doctoral*, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2009.
- Ledesma, M., Lorefice, R. and Etse G. Ensayos numérico-computacionales del proceso de fractura de hormigones de alta resistencia. *ENIEF 2009. Mecánica Computacional, Vol XXVIII*, Págs. 2211-2255. Tandil Argentina, 2009.
- López Garello, C.M., Análisis Microestructural de la Fractura del Hormigón Utilizando Elementos Tipo Junta. Aplicación a diferentes Hormigones. *Tesis doctoral*, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 1999.
- López, C. M., Ciancio, D., Carol, I., Murcia, J. and Cuomo, M., Análisis micro-estructural de la fluencia básica del hormigón mediante elementos junta. *Anales de Mecánica de la Fractura*, vol. 20, 2004.
- Lorefice, R., Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios

- Meso y Macromecánicos. *Tesis Doctoral, CEMNCI - Univ. Nac. de Tucuman*, 2007.
- Lorefice, R., Etse, G., and Carol, I., Viscoplastic Approach for Rate-Dependent Failure Analysis of Concrete Joints and Interfaces. *International Journal of Solids and Structures*, 45 2686–2705, 2008.
- Lorefice, R., Etse, G., C.M. Lopez and I. Carol, Mesomechanic Analysis of Time Dependent Concrete Behavior. *EURO-C 2006, Computational Modeling of Concrete Structures*, Mayrhofen, Austria, 2006.
- McLeod R. G. Minimum Reinforcement for High-Performance Concrete Slabs. *Tesis degree of Master of Science*. Department of Civil Engineering, University of Calgary, Alberta, 1998.
- Perzyna, P., The Constitutive Equations for Rate Sensitive Materials. *Quarter of Applied Mathematics*, Vol. 20, pp. 321-332, 1963.
- Perzyna, P., Fundamental Problems in Viscoplasticity. *Advances in Applied Mechanics*, 9, pp. 244-368, 1966.
- Rodríguez M., López C.M. and Carol I. Análisis meso-estructural de la fractura del hormigón en modo mixto. *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26, Vol. 2, 2009.
- Vincent E., Compressive Creep of Lightweight, High Strength Concrete Mixture - *Tesis degree of Master of Science in Civil Engineering*, Virginia Polytechnic Institute and State University –Blacksburg, VA, 2003.
- Wee T. H., Chin M. S. and Mansur M. A. Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol 8 – ASCE . 70 – 76, 1996.
- Wittmann F. H., Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete. *Sadhana*, Vol 27, Part 4. pp 413-423. India, 2002.
- Xiao R.Y. and Chin C.S, Nonlinear finite element modelling of the tension softening of conventional and fibrous cementitious composites. *13th UK National Conference of the Association of Computational Mechanics in Engineering*, 103-106, UK, 2006.
- Zia P., Leming M. L., Ahmad S. H., Schemmel J. J., and Elliott R. P., Mechanical Behavior of High Performance Concretes, *Production of High Performance Concrete. Strategic Highway Research Program, National Research Council*, Volume 2, Washington, D. C., xi, 92 pp. (SHRP-C-362), 1993.
- Zongjin Li and Yunsheng Zhang, Handbook of Structural Engineering, *Chen and Liu (Eds)*. ISBN 0-8493-1569-7 - USA.15.1 -15.58, 2005.