

# Análisis del proceso de fractura de Hormigones de Alta Resistencia bajo cargas sostenidas mediante Criterios Mesomecánicos

Myriam M. Ledesma<sup>1</sup> & Marcia Rizo Patron<sup>1</sup> & Ingrid Navarro<sup>1</sup>

(1)CMAE-Centro de Mecánica Aplicada y Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.

[mmledesma@unse.edu.ar](mailto:mmledesma@unse.edu.ar) – [mrizopatron@unse.edu.ar](mailto:mrizopatron@unse.edu.ar) – [ingridmnavarro@gmail.com](mailto:ingridmnavarro@gmail.com)

**RESUMEN:** Las estructuras de hormigón actuales demandan mayor resistencia, durabilidad y economía de espacio convirtiéndolas en piezas cada vez más esbeltas y sometidas a esfuerzos cada vez mayores. Es así que se impone el análisis del comportamiento de los hormigones de alta resistencia ante diferentes tipos de solicitaciones. En este trabajo se analiza el proceso de fractura de hormigones de alta resistencia (HAR) mediante ensayos numéricos a nivel mesomecánico realizados a probetas generadas computacionalmente sobre las cuales se aplican cargas de corta y larga duración. La dependencia temporal del proceso de fractura se modela considerando la Teoría de la Viscoplasticidad de Perzyna. El enfoque mesomecánico permite apreciar el desarrollo de la fractura y la incidencia de las propiedades de las distintas fases intervinientes, las cuales finalmente condicionan el mecanismo de falla.

## 1 INTRODUCCION

Con las exigencias de las actuales estructuras, como la economía de espacio y durabilidad, además del menor tiempo de desencofrado y resistencia adecuada, el uso de los Hormigones de Alta Resistencia se ha visto incrementado. Es así, que el estudio del comportamiento mecánico de este tipo de hormigones por medio de pruebas experimentales de laboratorio o mediante simulaciones numéricas ha aumentado en los últimos años. El más analizado es el comportamiento bajo acciones mecánicas, principalmente en régimen quasi-estático, es decir, a velocidades de carga muy bajas, y en general restringiendo el análisis al empleo de modelos desarrollados a niveles macromecánicos de observación asumiendo el criterio clásico de asimilar al material a un medio continuo. A la luz de los resultados experimentales más recientes, es claro que estas hipótesis de trabajo se alejan bastante de la realidad, dado que para este tipo de hormigones cumple un rol fundamental la interacción mecánica entre las fases componentes del material, a lo que debe sumarse la incidencia del tipo de áridos y los fenómenos que se desarrollan en la zona de transición interfacial (ITZ – Interfacial Transition Zone), los cuales determinan el comportamiento en rotura del material. Una de las solicitaciones de interés para avanzar en el estudio de HAR es su

comportamiento ante la aplicación de cargas sostenidas de larga duración en problemas de relajación de tensiones o de creep (fluencia básica), tal como lo indican los datos experimentales disponibles en la literatura, (Xotta, et. al., 2010, Chen and Yuan, 2008, Bažant and Panula, 1984, Bažant and Chern, 1985, Bažant et al., 1991, Bažant, 2000, Bažant and Baweja, (1995, 2000), Jianxin and Schneider, 2003, Vincent et al., 2004, Tía et al., (2005). La incorporación de aditivos, para lograr las características deseadas, la relación agua-cemento, la proporción y tipo de agregados en su composición mesoestructural, son factores que influyen en su comportamiento en creep. Es de esperarse que su comportamiento en fluencia lenta sea diferente que en caso de hormigones normales.

El presente trabajo presenta un análisis del comportamiento mecánico del hormigón de alta resistencia, bajo cargas de larga duración (creep), mediante un criterio de modelación numérica a nivel mesomecánico considerando al hormigón como un material bifásico en el cual se distinguen las fases agregado y mortero. El análisis mesomecánico comprende la discretización de las fases constitutivas en elementos de continuo triangulares para modelizar el agregado y la pasta cementicia, y elementos de junta de espesor nulo para modelizar las interfaces. Estos elementos de junta permiten captar el proceso de fisuración tanto en la fase mortero como en la fase agregado,

lo cual es de gran relevancia dada la tendencia observada experimentalmente de fisurarse a través de la fase pétreo debido a la gran resistencia que alcanza el mortero cementicio en las dosificaciones de este tipo de hormigones. El estudio del proceso de fractura se lleva a cabo por medio de un modelo elasto-viscoplástico de interfase basado en la Teoría Viscoplastica continua de Perzyna (1963, 1966), desarrollado recientemente, ver Lorefice et al. (2004, 2006), Lorefice (2007), Lorefice et al. (2008).

## 2 DEFORMACION POR FLUENCIA LENTA

### 2.1 Estado del arte-Formulaciones

El fenómeno de creep o fluencia básica bajo carga es el aumento a través del tiempo de la deformación del hormigón sujeto a cargas externas sostenidas. A criterio de diversos autores, el fenómeno de fluencia del hormigón es el resultado del movimiento o acomodamiento del agua entre las capas solidas del hormigón o partículas del agregado. Normalmente se obtiene de la diferencia de la deformación total con la suma de la deformación inicial instantánea elástica, la retracción y dilatación térmica (ver Fig.1).

Usualmente el creep del hormigón se

desarrolla a una elevada velocidad al comienzo (etapa inicial o creep primario) y disminuye lentamente conforme transcurre el tiempo. El segundo estado del creep presenta una aceleración de la tasa de deformaciones inmediatamente antes de la falla de la muestra debido al aumento del proceso de microfisuración y consiguiente degradación de la resistencia que ocurre bajo cargas de larga duración y se produce cuando la tensión supera a la resistencia a largo plazo del material.

Entre las propuestas empíricas para su determinación se destacan las emitidas por el ACI (1992), Gardner y Lockman (2000), Euro International Concrete Committee y la International Federation for Prestressing (1990) y el modelo B3 de Bažant and Baweja (1995). Dichas formulaciones pueden resumirse como sigue:

*Formulación del ACI:* propone una función temporal para determinar el coeficiente de creep, con correcciones por medio de coeficientes de humedad relativa, edad de carga, forma y tamaño de la muestra, asentamiento, contenido de agregado fino y contenido de aire.

$$C_c(t) = \frac{t^{0.6}}{10+t^{0.6}} C_{cu} K_{CH} K_{CA} K_{CS} \gamma_{sc} \gamma_{ac} \gamma_{oc} \quad (1)$$

Con  $C_{cu} = 2.35$

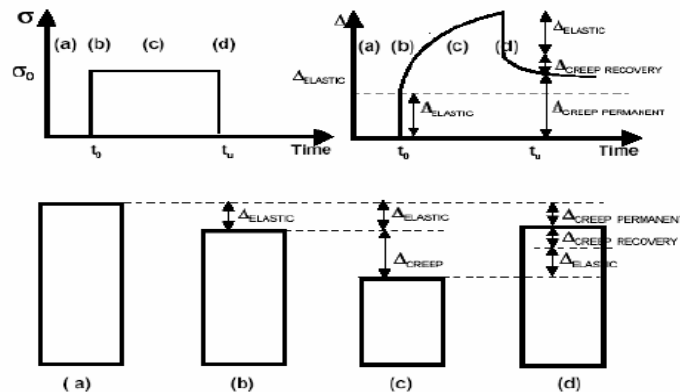


Figura 1 – Fenómeno de deformación diferida

*Formulación de Gardner y Lockman:*

Estos autores proponen una función de la forma

$$J(t, t_0) = \left[ \frac{1 + \phi_{28}}{E_{cmt_0}} \right] \quad (2)$$

Donde el coeficiente del creep viene dado por

$$\phi_{28} = \Phi_{(t_c)} \left[ 2 \left( \frac{(t-t_c)^{0.5}}{(t-t_c)^{0.5} + 14} \right) + \left( \frac{7}{t_0} \right)^{0.5} \left( \frac{t-t_c}{t-t_c + 7} \right)^{0.5} + 2.5(1-1.08\phi^2) \left( \frac{t-t_0}{t-t_0 + 97(V/S)^2} \right)^{0.5} \right] \quad (3)$$

Donde:

$\phi_{(t_c)}$ : corrector por secado V/S: relación volumen y área superficial.

El Comité Europeo del Hormigón (CEB-FIP 90): propone la determinación de la deformación total a través de la expresión:

$$\epsilon(t) = \epsilon(t - t_s) + \left[ \frac{\phi(t, t_0)}{E_c} + \frac{1}{E_c(t_0)} \right] \sigma \quad (4)$$

Modelo B<sub>3</sub> de Bažant y Baweja (1995):

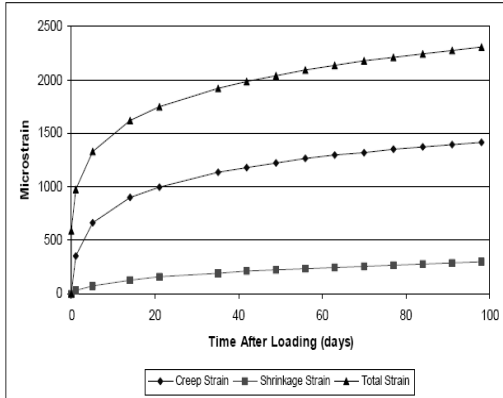


Figura 2– Predicción ACI 209

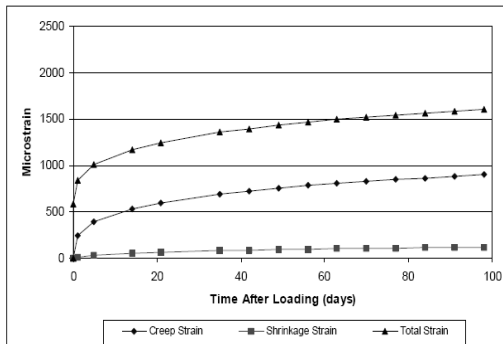


Figura 4 – Predicción CBE-MC 90

Este análisis del comportamiento bajo cargas sostenidas del HAR, comprende el ensayo numérico sobre mallas mesomecánicas a las cuales se les aplica un carga que origina un estado de compresión sobre la misma. Para estudiar su respuesta, y evidenciar la interacción de diversos mecanismos en el proceso de falla, se realiza la modelación mediante leyes constitutivas no-lineales. Estas se usan para la representación del comportamiento de las fases que constituyen el material (creep básico o por cargas sostenidas), siendo también relevante la configuración de la malla considerada.

#### Modelo de Interfase Viscoplastico

El modelo de interfase considerado en este trabajo para analizar el proceso de fractura bajo carga sostenida está basado en la Teoría

Considera la deformación diferida por creep, elástica, retracción por secado y por cambio de temperatura

$$\epsilon(t) = J(t, t')\sigma + \epsilon_{sh}(t) + \alpha\Delta T(t) \quad (5)$$

La comparación de resultados a través de estos modelos puede apreciarse en las Figuras 2 a 5, observándose discrepancias relevantes entre las mismas, lo cual pone de manifiesto los diversos criterios existentes y la complejidad del fenómeno en estudio.

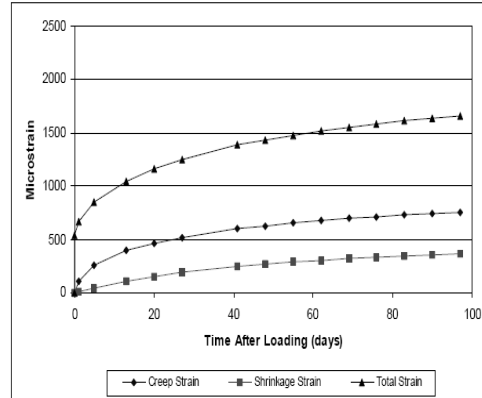


Figura 3 – Predicción GL 2000

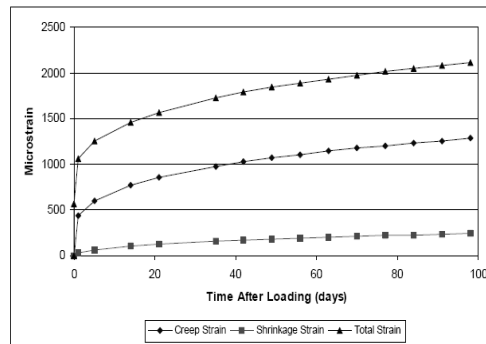


Figura 5 – Predicción B3 Bažant and Baweja

Viscoplastica de Perzyna (1963, 1966). La condición de fluencia viscoplastica se incorpora mediante la introducción en la función de fluencia original un término adicional el cual es sensible a los efectos de tasa-tiempo con un exponente de Perzyna N = 1.

$$\Gamma = \tau^2 (c - \sigma \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 \lambda \eta \quad (6)$$

En la ecuación (6),  $\tau$  y  $\sigma$  representan las componentes tangencial y normal del vector tensión  $\mathbf{t}$  sobre la interfase en estudio,  $c$  es la cohesión aparente,  $\phi$  el ángulo de fricción interna, mientras que  $\chi$  es la tensión de tracción uniaxial. El parámetro  $\lambda$  representa la tasa del multiplicador viscoplastico y  $\eta$  es la viscosidad aparente del material. La ecuación (6) implica un

criterio no-lineal de máxima resistencia dependiente de la velocidad de aplicación de la carga, cumpliendo a la vez con las condiciones de consistencia clásicas formuladas por Kuhn-Tucker, recuperándose la formulación elastoplástica (invíscida) si el parámetro de viscosidad  $\eta$  toma valor nulo. La tasa de liberación de energía durante el desarrollo del proceso de fractura tiempo-dependiente se puede expresar como:

$$\dot{q}^{vcr} = \mathbf{t}^T \dot{\mathbf{u}}^{vcr} \quad (7)$$

Los desplazamientos críticos tiempo-dependientes se expresan en términos de la función de potencial viscoplastico  $Q^{vcr}$  definida a partir de la superficie de fractura  $F$ , la matriz de no asociatividad  $A$  y los gradientes a la superficie de fluencia:

$$\dot{\mathbf{u}}^{vcr} = \dot{\lambda} \mathbf{A} \mathbf{n} \quad (8)$$

El gradiente de la función de fluencia viscoplastica  $n$  se define como:

$$\mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} = \left[ \frac{\partial F}{\partial \sigma}, \frac{\partial F}{\partial \tau} \right]^T = [2 \tan \phi (c - \sigma \tan \phi), 2\tau]^T \quad (9)$$

La solución del problema se plantea a partir de la condición de consistencia viscoplastica en la forma:

$$\dot{F} = \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{t}} + \bar{r} \dot{q}^{vcr} + s \dot{\lambda} = 0 \quad (10)$$

La solución del problema no lineal se realiza mediante el Método de Newton-Raphson con la estrategia de proyección al punto más cercano o Closest Point Projection Method (CPPM), Etse et al. (1997), Carosio et al. (2000), Lorefice (2007), Lorefice et al. (2008).

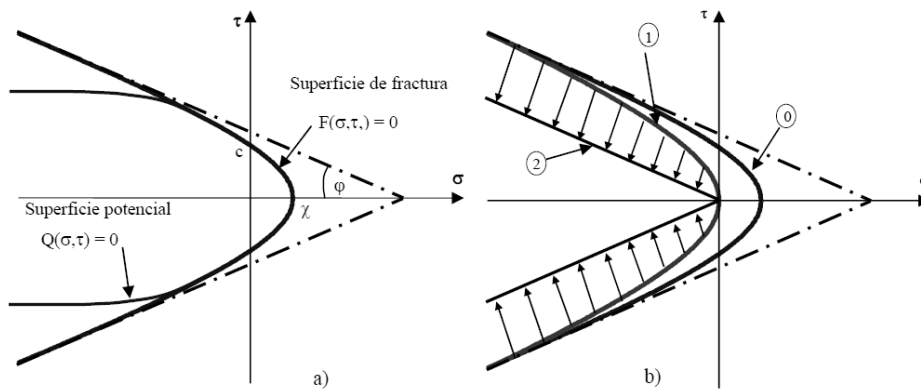


Figura 5. Superficie de fractura - modelo elasto-viscoplastico de interfase.

### 3 -MODELACION MESOMECANICA

El modelo mesomecánico empleado consiste básicamente en la representación de una probeta de hormigón en dos dimensiones (Figura 7). En ella se distinguen las fases mortero y agregado representados mediante elementos de continuo triangulares. El cabezal ubicado en la parte superior de la malla, no posee elementos de junta, está discretizado por elementos de continuo cuadrangulares de gran rigidez de manera de lograr una distribución uniforme de tensiones sobre el borde superior de la malla mesomecánica en estudio. Los parámetros materiales para los elementos de continuo se asignaron como:  $E_{ag} = 4 \times 10^7$  MPa;  $E_{cab} = E_{mor} = 7 \times 10^7$  MPa, el coeficiente de Poisson para los tres materiales fue  $\mu = 0.2$ . En las interfaces mortero-agregado la resistencia a la

tracción directa  $\chi = 6.0$  MPa, cohesión aparente  $c = 40$  MPa y energía de fractura en Modo I = 90 N/m. Con los mencionados parámetros se logra numéricamente una resistencia a la compresión global de 115 MPa (ver figura 6).

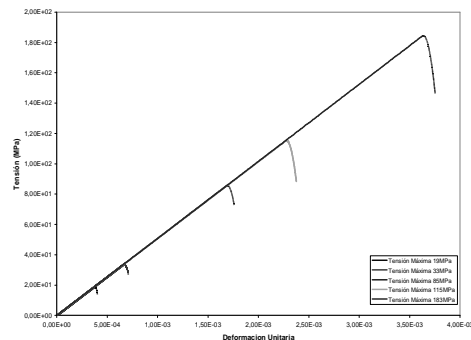


Figura 6: Ensayos numéricos - Curvas Tensión-Deformación

En las juntas mortero-mortero los parámetros usados fueron  $\chi=7.0$  MPa, cohesión aparente  $c = 50$  MPa y energía de fractura en Modo I = 95 N/m, en las juntas agregado-agregado fueron  $\chi=5.0$  MPa, cohesión aparente  $c= 35$  MPa y energía de fractura en Modo I = 80 N/m. El total de nodos que componen la malla, fueron 2201, con 702 elementos de continuo y 1043 elementos de interface. El ensayo numérico se lleva a cabo mediante el código DRAC (versión 2007 – UPC/CMAE), el cual se incorpora el modelo de fractura viscoelastoplástico propuesto. Los resultados obtenidos se procesan por medio de la interfase gráfica GID (CIMNE/UPC), la cual permite visualizar las configuraciones de las mallas y los parámetros del proceso de falla en forma incremental tanto en elementos de medio continuo de fases mortero/agregado como en los elementos de junta (disipación de energía, desplazamientos de apertura de fisura, etc.). En Figura 8 y 9 se ilustra el estado deformado de la malla aplicar 2 pasos y 29 pasos de tiempo de 90 incrementos cada uno. Las Figuras 10 a 12 ilustran la energía disipada en etapas inicial,

intermedia y final del análisis, mientras que en Figuras 13 a 19 se presenta el estado aplicación de la carga inicial sostenida, tras lo tensional y desplazamientos de los elementos de continuo y juntas en la etapa final del proceso

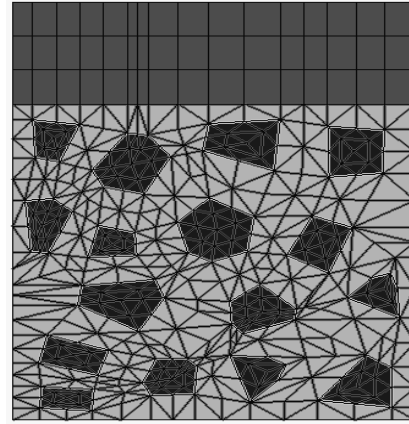
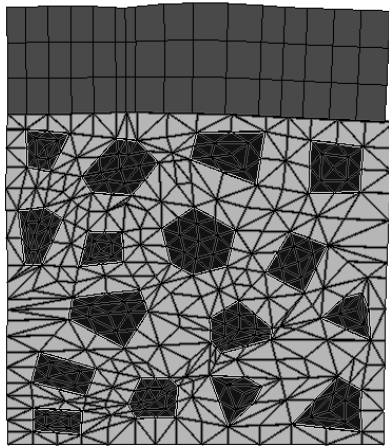
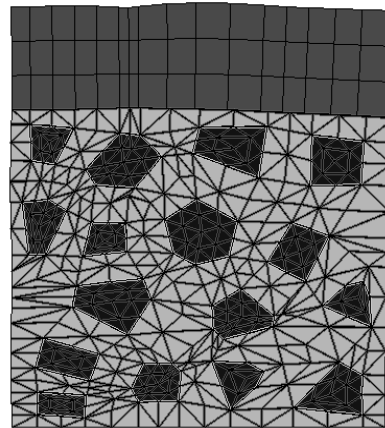


Figura 7 – Malla 4x4 y cabezal



Deformation ( x8843.05): DISPLACEMENTS of Load Analysis, step 10290.

Figura 8 – Deformada en estado inicial



Deformation ( x8843.55): DISPLACEMENTS of Load Analysis, step 12990.

Figura 9 – Deformada en estado final

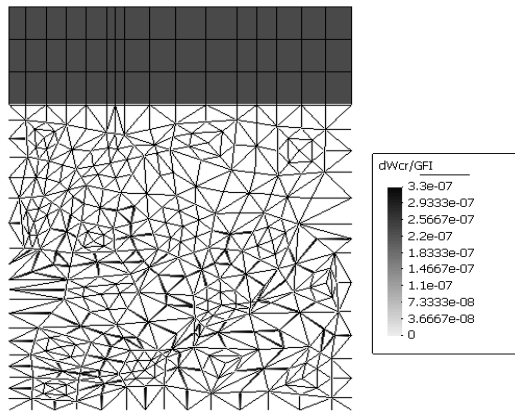


Figura 10 – Energía acumulada – estado inicial

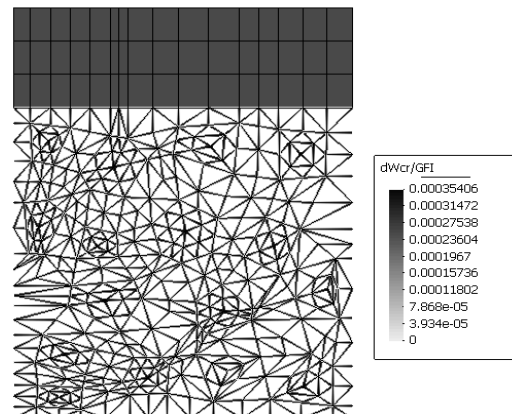


Figura 11 – Energía acumulada – etapa intermedia

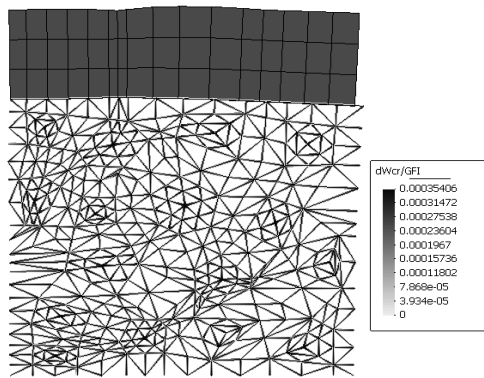


Fig 12 – Energía acumulada – etapa final

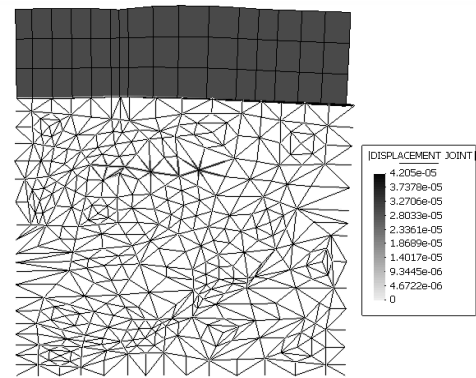


Fig 13 – Módulo del desplaz de juntas – Último paso

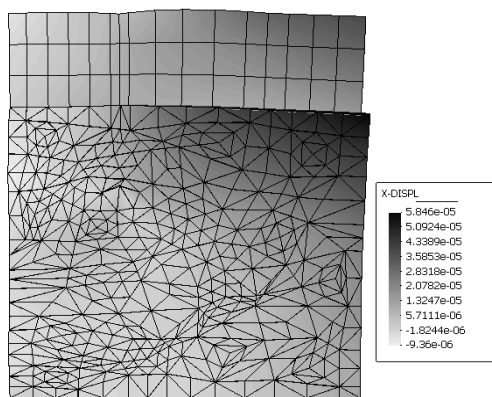


Fig 14– Desplaz en direcc. “X” de cont. Último paso.

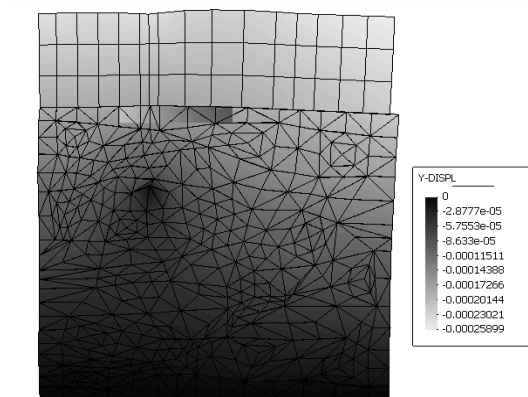


Fig. 15–Desplaz en direcc. “Y” cont. Último paso

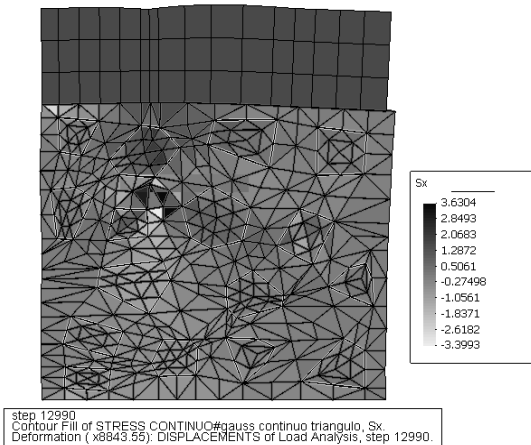


Fig16– Tens en la direcc “X”continuo–Último paso

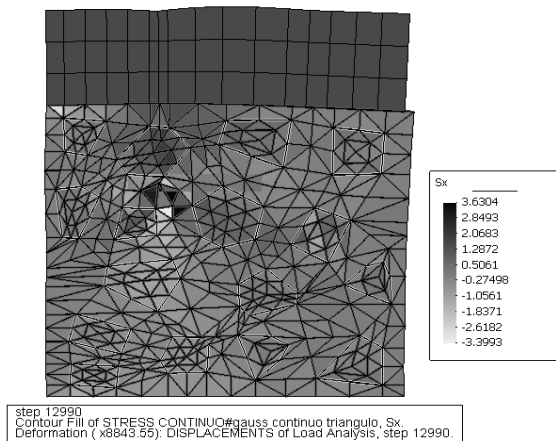


Fig 17 – Tens en la direcc. “Y”continuo–Último paso

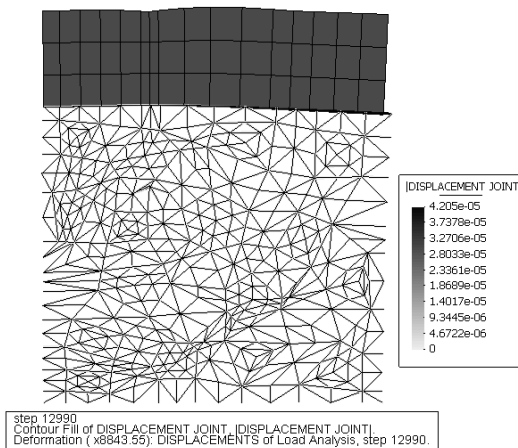


Fig 18 – Desplazamiento de juntas- etapa final

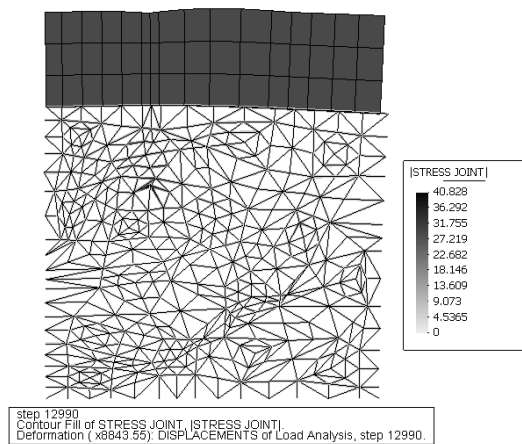


Fig 19 – Tensiones en las juntas – etapa final

#### 4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un primer ensayo numérico computacional sobre una malla mesomecánica con cabezal para la repartición de presiones, y sometida a un estado de cargas de larga duración con el propósito de investigar el comportamiento de fluencia lenta en hormigones de alta resistencia. Se observa que durante el mecanismo de fractura la configuración de las mallas en el proceso dependen de la geometría de la discretización y de los parámetros materiales asignados a los fases intervinientes. Se hace necesario un trabajo de calibración de dichos parámetros para lograr el ajuste a los resultados experimentales. De todos modos, desde el punto de vista numérico-computacional, es claro que el modelo desarrollado permite el estudio detallado de procesos de fractura que evolucionan en el tiempo, considerando la incidencia de las distintas

fases componentes del material, así como los procesos de transferencia de carga e interacción que se produce entre los agregados y la pasta cementicia a través de la zona de transición interfacial. Si bien los resultados ilustrados son preliminares, los mismos ponen de manifiesto los procesos indicados, y servirán de base para la calibración del modelo y la generación de una geometría más fina que permita contrastar los resultados numéricos entre sí y con los datos disponibles en la literatura científica.

#### REFERENCIAS

Carol, I., P.C Prat, and López, C.M., Normal/shear cracking model. Interface implementation for discrete analysis. *Journal fisura cohesiva embebida – Anales de la Mecánica de Fractura*, Vol. 1, 289-293, 2007.

American Concrete Institute - *State of Art Report*  
- ACI 363R-92 (Reapproved 1997) - 363R-1 - 363R-55  
- 1997

Bazant, Z.P., Chern, J.C., “*Triple Power Law for Concrete Creep*”. *Journal of Eng. Mech. ASCE*, 111, pags. 63-83, (1985). Predicción práctica del creep y retracción del Hormigón de alta Resistencia”. *Matériaux et Constructions*. Vol.17 –Nº101, pags. 375-378, (1984).

Bazant, Z.P., Chern, J.C., “*Triple Power Law for Concrete Creep*”. *Journal of Eng. Mech. ASCE*, 111, pags. 63-83, (1985).

Bazant, Z.P. and Kim, J.K., “*Improved Prediction Model for time-dependent deformations of concrete*. Part 2: basic creep”. *Materials and Structures*, 24 (144), pags. 409-421, (1991).

Bazant, Z.P. and Baweja, S., “*Creep and Shrinkage Prediction Model for analysis and design of concrete Structures: Model B3*”. *Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects*, ACI SP 194, Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pags. 1-83, (2000).

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).

Hanson N.W, Kaar P.H. & Capell H.T. “*Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete*”. *Portland Cement Association*. 11pp - 1977.

Ledesma M., Lorefice R. and Etse G., “*Evaluación Numérica de Parametros Materiales en Hormigón de Alta Resistencia a Nivel Mesomecánico*” *Mecánica Computacional Vol XXX*, págs. 703-717, Rosario, Argentina, 2011

Lorefice, R. H., Etse, G., Rizo Patrón, M., Sosa E. “*Influencia de la tasa de deformación en el creep y relajación de hormigones normales*”. *Anales de ENIEF 2007*, Córdoba, Argentina. 2007.