

## **ESTUDIO MESOMECANICO DEL PROCESO DE FRACTURA DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA BAJO CARGAS SOSTENIDAS**

**Myriam M. Ledesma, Ricardo H. Lorefice, Marcia Rizo Patron y Franco Salto**

*CMAE – CENTRO DE MECANICA APLICADA Y ESTRUCTURAS, Universidad Nacional de  
Santiago del Estero, Avda. Belgrano(s)1912, Santiago del Estero, Argentina,*

*[mmledesma@unse.edu.ar](mailto:mmledesma@unse.edu.ar) , [lorefice@unse.edu.ar](mailto:lorefice@unse.edu.ar)*

*<http://www.unse.edu.ar>*

**Keywords:** modelación mesomecánica – Hormigón de alta resistencia – fractura – cargas sostenidas

**Abstract** El creciente uso de estructuras de hormigón con secciones cada vez más esbeltas y con requerimientos de resistencias crecientes 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 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

El uso de Hormigones de Alta Resistencia ha tenido un notable crecimiento debido a las exigencias de las nuevas estructuras que requieren el cumplimiento simultaneo de aspectos tales como economía de espacio (mayor esbeltez estructural), menor tiempo de desencofrado y resistencia adecuada. Debido a ello, el estudio del comportamiento mecánico de los hormigones de alta resistencia (HAR) por medio de pruebas experimentales de laboratorio o mediante simulaciones numéricas se ha extendido en los últimos años, con particular énfasis en la comprensión de su comportamiento mecánico 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. El problema se vuelve más complejo si se considera 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). Esto es debido a que por su composición mesoestructural, la relación agua-cemento, la proporción del contenido de cemento y agregados, la incorporación de aditivos puzzolánicos, etc. son factores que afectan el comportamiento en creep del hormigón en forma mucho más significativa que lo que ocurre en hormigones normales.

En este trabajo se 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 básicamente las fases agregado y mortero. A la vez, cada una de estas fases incluye una discretización mediante elementos de junta de espesor nulo las cuales 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. DEFORMACIÓN DIFERIDA EN HORMIGON

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 reacomodamiento 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).

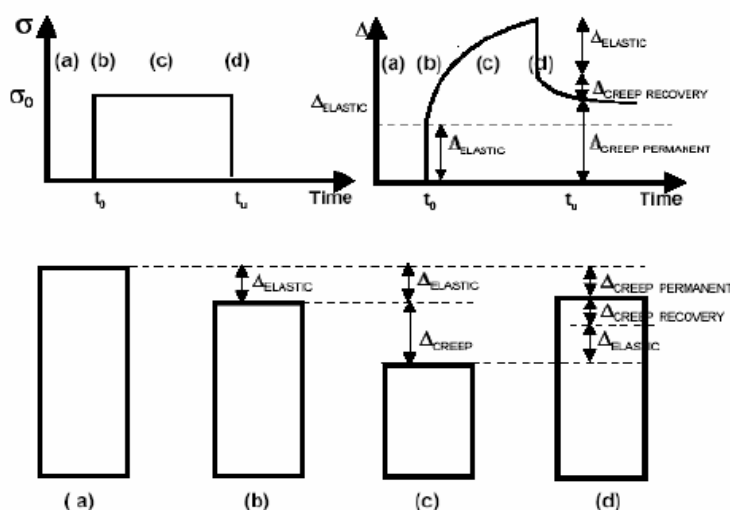


Figura 1 – Fenómeno de deformación diferida

Usualmente el creep del hormigón se desarrolla a una elevada velocidad inicial al comienzo (etapa inicial o creep primario) y disminuye lentamente conforme transcurre el tiempo. Este tiene lugar cuando la tensión es inferior a la Resistencia a largo plazo del hormigón. 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 al mismo 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.

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

Con  $C_{cu} = 2.35$

*Formulación de Gardner y Lockman:*

Estos autores proponen una función de la forma

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

Donde el coeficiente del creep viene dado por

$$\phi_{28} = \Phi_{(t_c)} \left[ 2 \left( \frac{(t-t_c)^{0.3}}{(t-t_c)^{0.3} + 14} \right) + \left( \frac{7}{t_0} \right)^{0.5} \left( \frac{t-t_c}{t-t_c + 7} \right)^{0.5} + 2.5(1-1.086h^2) \left( \frac{t-t_0}{t-t_0 + 97(V/S)^2} \right)^{0.5} \right] \quad (3)$$

Donde  $\Phi_{(t_c)}$  es el término corrector por secado hasta el momento de aplicación de la carga y  $V/S$  es la relación volumen y el área superficial.

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

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

Finalmente el modelo B3 de Bažant y Baweja (1995), considera la deformación diferida por creep, deformación elástica, retracción por secado y por cambio de temperatura

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

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.

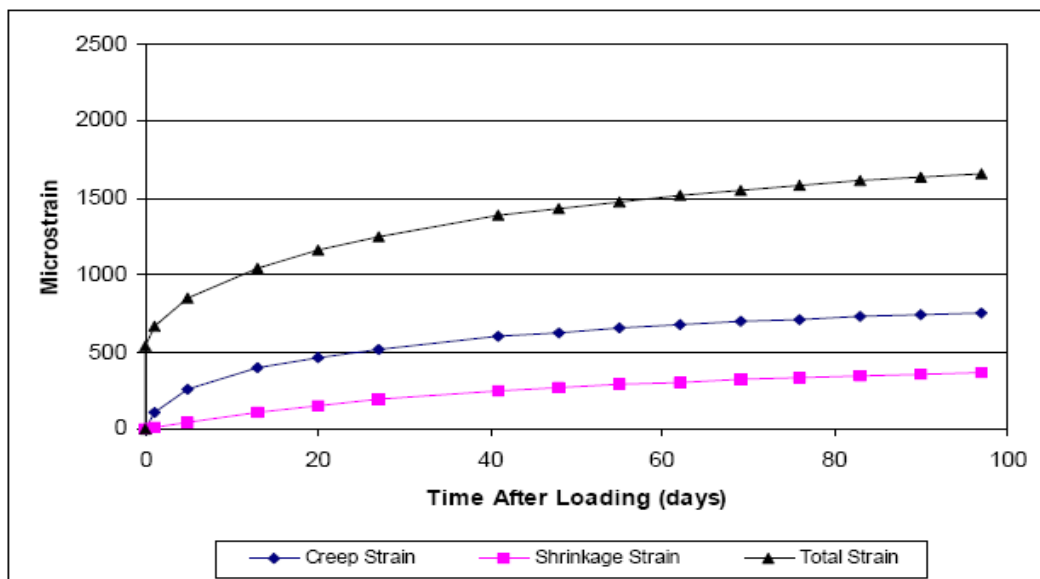


Figura 2 – Predicción ACI 209

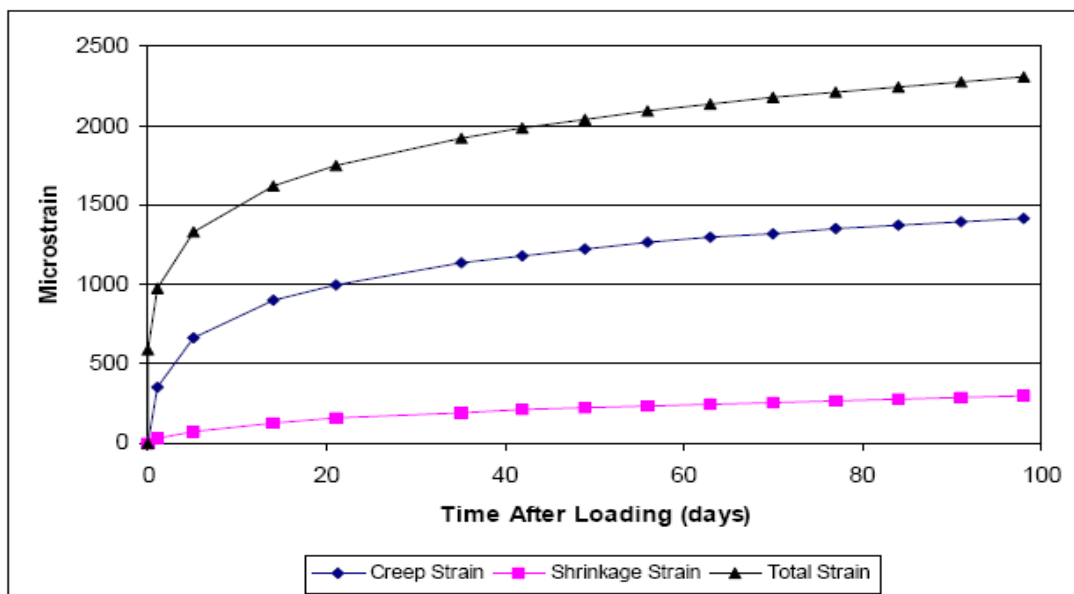


Figura 3 – Predicción GL 2000

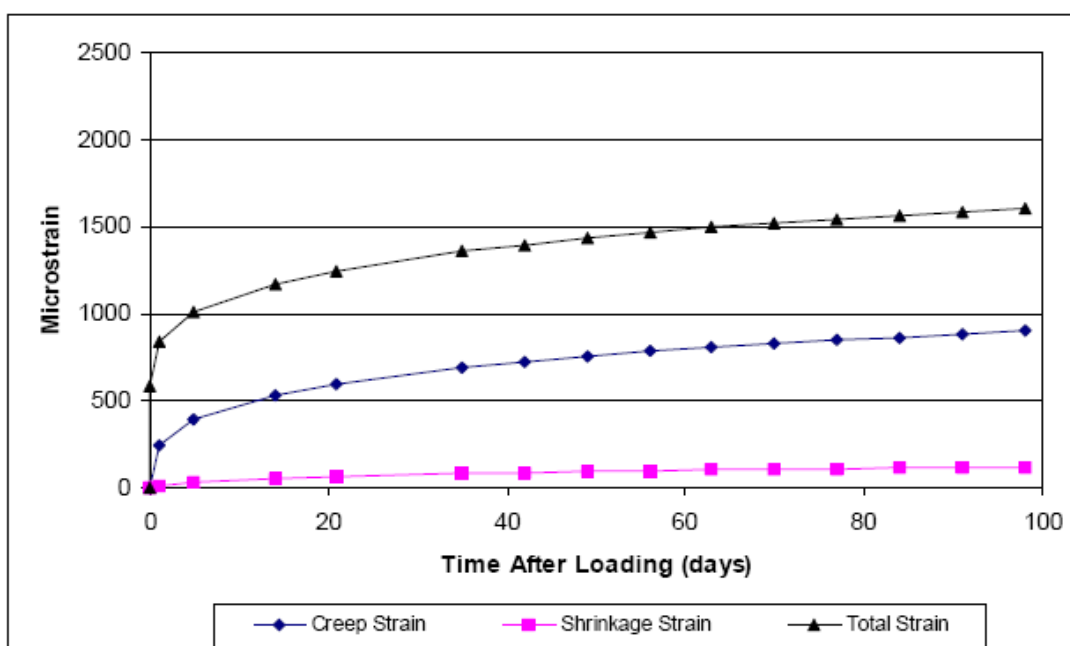


Figura 4 – Predicción CBE-MC 90

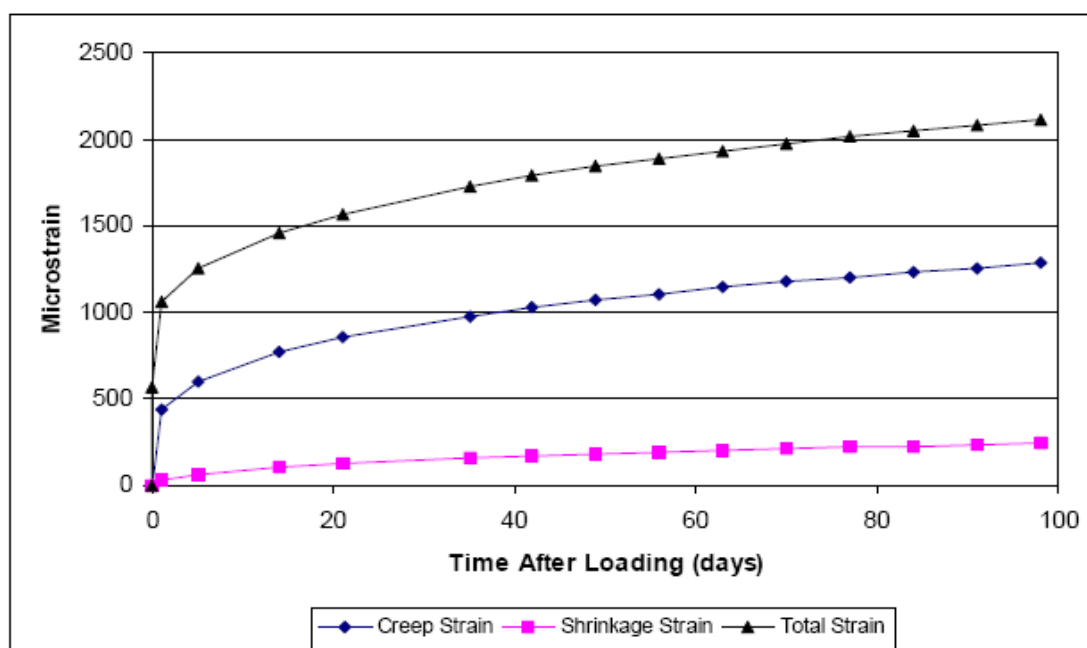


Figura 5 – Predicción B3 Bažant and Baweja

### 3 MODELO CONSTITUTIVO

Dado que el hormigón es un material heterogéneo que presenta una respuesta mecánica de alta complejidad como resultado de la coexistencia e interacción de diversos tipos de mecanismos y procesos en forma simultánea, desde el punto de vista Mesomecánico es necesaria la consideración de las leyes constitutivas no-lineales 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.

El modelo de interfase considerado en este trabajo para analizar el proceso de fractura bajo carga sostenida está basado en la Teoría 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  $N = 1$ .

$$F = \tau^2 - (c - \sigma \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 - \dot{\lambda} \eta \quad (6)$$

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  $\dot{\lambda}$  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 elastoplastica (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:

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

Los desplazamientos críticos tiempo-dependientes se expresan en términos de la función de potencial viscoplastico  $Q^{ver}$  definida a partir de la superficie de fractura  $F$  (Figura 6), la matriz de no asociatividad  $\mathbf{A}$  y los gradientes a la superficie de fluencia:

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

El gradiente de la función de fluencia viscoplastica  $\mathbf{n}$  se define como:

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

$\mathbf{A}$  es una matriz de transformación que introduce la pérdida de normalidad durante la evolución de apertura de fisura  $\dot{\mathbf{u}}^{ver}$  en la forma:

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, & \text{Si } \sigma \geq 0 \\ \begin{pmatrix} f_{\sigma}^{dil} & f_{\sigma}^{dil} \\ 0 & \left(1 - \left| \frac{\sigma \tan \phi}{\tau} \right| \right) \end{pmatrix}, & \text{Si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Con

$$f_{\sigma}^{dil} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{dil}} \quad (11)$$

$$f_{\sigma}^{dil} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (12)$$

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

$$\dot{F} = \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{t}} + \bar{r} \dot{q}^{ver} + s \dot{\lambda} = 0 \quad (13)$$

Con:

$$\mathbf{r} = \left( \frac{\partial F}{\partial c} \frac{dc}{dq^{ver}} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \frac{d\chi}{dq^{ver}} \right) \quad (14)$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \tan \phi (\sigma - \chi) \tag{15}$$

$$\frac{\partial F}{\partial \chi} = -2 \tan \phi (\sigma - \chi \tan \phi) \tag{16}$$

$$\frac{dc}{dq^{VCF}} = - \frac{c_0 e^{-\alpha c} G_f^{II}}{[(e^{-\alpha c} - 1) q^{VCF} + G_f^{II}]^2} \tag{17}$$

$$\frac{d\chi}{dq^{VCF}} = - \frac{\chi_0 e^{-\alpha \chi} G_f^I}{[(e^{-\alpha \chi} - 1) q^{VCF} + G_f^I]^2} \tag{18}$$

$$s = - \frac{\partial \varphi^{-1}(\eta \lambda)}{\partial \lambda} = -\eta \tag{19}$$

Donde  $G_f^I$  y  $G_f^{II}$  representan la energía de fractura en Modo 1 (falla por tracción pura), y en Modo 2a (estado tensional de corte y alta compresión sin dilatación), respectivamente.

Durante el proceso de carga, la degradación de los parámetros de resistencia evoluciona en función de las expresiones dadas en las ecuaciones (17), (18) y (19).

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).

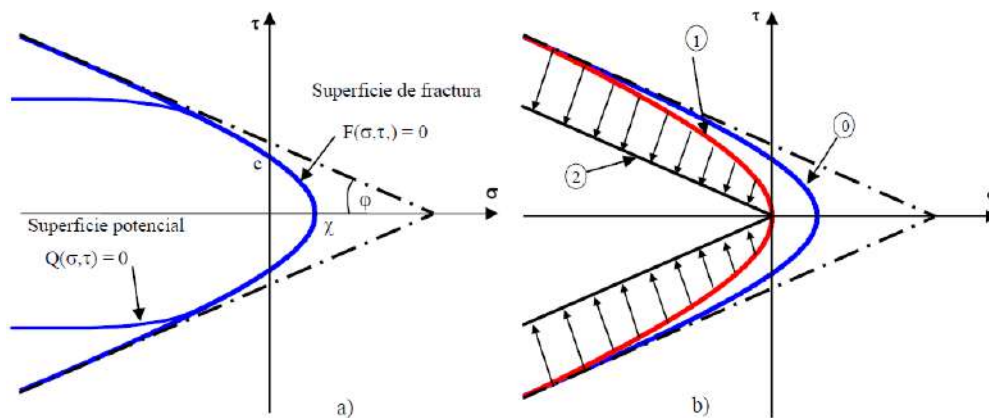


Figura 6. Superficie de fractura - Modelo elasto-viscoplástico de interfase.

#### 4 ANALISIS MESOMECANICO

El modelo mesomecánico empleado consiste básicamente en la representación de una probeta de hormigón en dos dimensiones (Figura 7). Las dimensiones de la misma son 13.97cm x 13.97cm, y 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 con módulo de rigidez elevado 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:  $E_{cab}=9.9 \times 10^7$  MPa,  $E_{ag}=4 \times 10^7$  MPa;  $E_{mor}=7 \times 10^7$  MPa, el coeficiente de Poisson para los tres materiales fue  $\mu=0.2$ . En las interfases 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 Ledesma y Lorefice, 2011). 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. Los parámetros materiales de la junta que separa el cabezal de la probeta mesomecánica corresponden a una ley elástica con alta rigidez normal y muy baja rigidez tangencial ( $K_N=1 \times 10^8$  MPa,  $K_T=1$  MPa). El total de nodos que componen la malla, es de 2201, con 702 elementos de continuo y 1043 elementos de interfase.

El ensayo numérico se lleva a cabo mediante el código DRAC (versión 2007 – UPC/CMAE), en 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 se ilustra el estado deformado de la malla luego de la aplicación de la carga inicial sostenida, mientras que en Figura 9 se ilustra el estado deformado luego de la aplicación de 29 pasos de tiempo (270 subincrementos,  $\Delta t=2 \times 10^3$  seg). Las Figuras 10 a 12 ilustran la relación de energía de fractura disipada (la escala es adimensional e ilustra la relación normalizada  $du^{vcf}/Gf_I$ ) en etapas inicial, intermedia y final del análisis. De acuerdo con estos resultados, la mayor disipación de energía se presenta en las juntas agregado-agregado, lo cual es lógico dada la menor resistencia de dichas interfases en relación a las interfases restantes, siendo este factor determinante en el caso de hormigones de alta resistencia en el patrón de fractura final de la muestra. En Figuras 13 a 18 se presentan el estado tensional y mapeos de desplazamientos de los elementos de continuo y juntas en la etapa final del proceso. En particular, las Figuras 13 y 18 muestran los desplazamientos resultantes en las interfases en el estado final, permitiendo apreciar las juntas más exigidas. En Figuras 14 y 15 se ilustran los mapeos de desplazamientos en las direcciones principales X e Y, mientras que en la Figura 16 se ilustra el mapeo de tensiones en elementos de medio continuo, apreciándose la concentración de esfuerzos alrededor de los agregados. En Figura 18 se presentan las tensiones en las juntas en estado final del análisis, observándose que los valores más altos se concentran en el sector de la mitad superior de la probeta, en concordancia con los máximos valores de desplazamientos resultantes en las juntas. Estos resultados preliminares son cualitativamente concordantes con lo observado en diversos ensayos experimentales, permitiendo apreciar la fuerte incidencia de la configuración de fases de la probeta en el proceso de falla diferida.



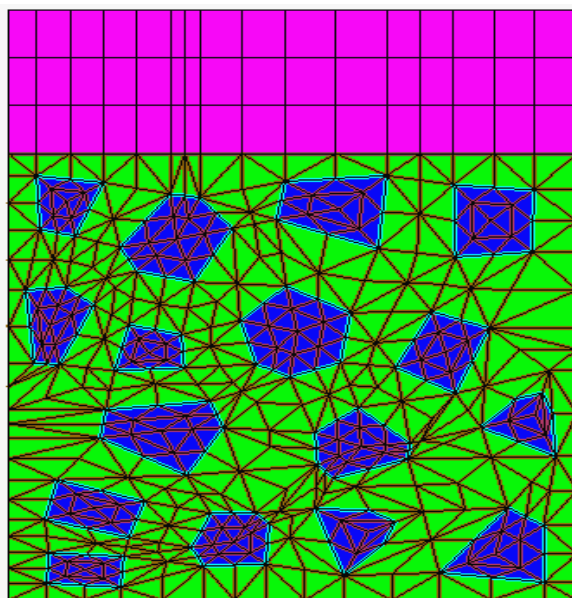
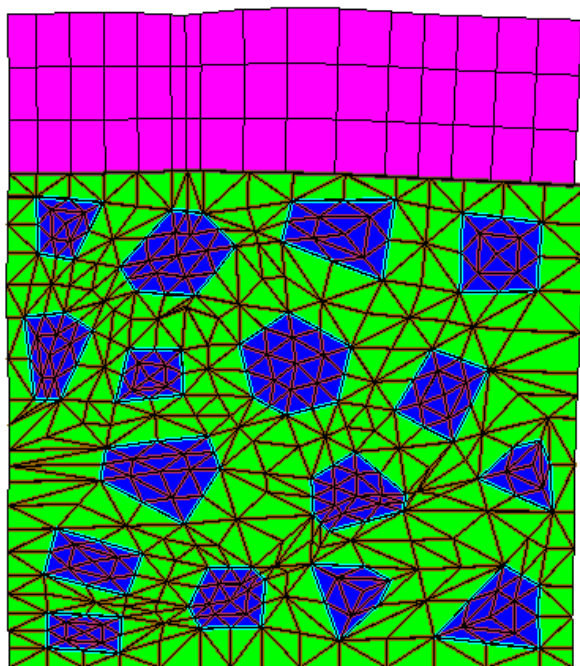
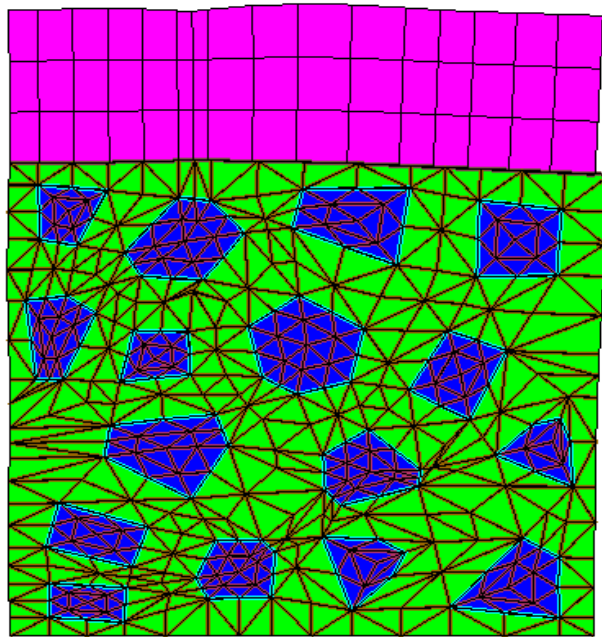


Figura 7 – Malla 4x4 y cabezal



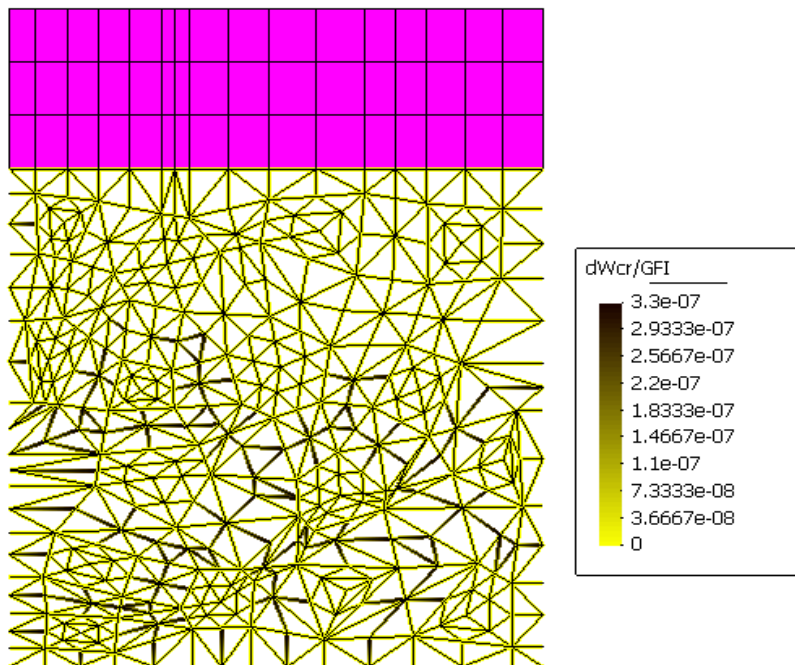
Deformation ( x8843.05): DISPLACEMENTS of Load Analysis, step 10290.

Figura 8 – Deformada en estado inicial



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

Figura 9 – Deformada en estado final



step 10201  
Contour Fill of ACUMULATE ENERGY.

Figura 10 – Energía acumulada – Etado inicial

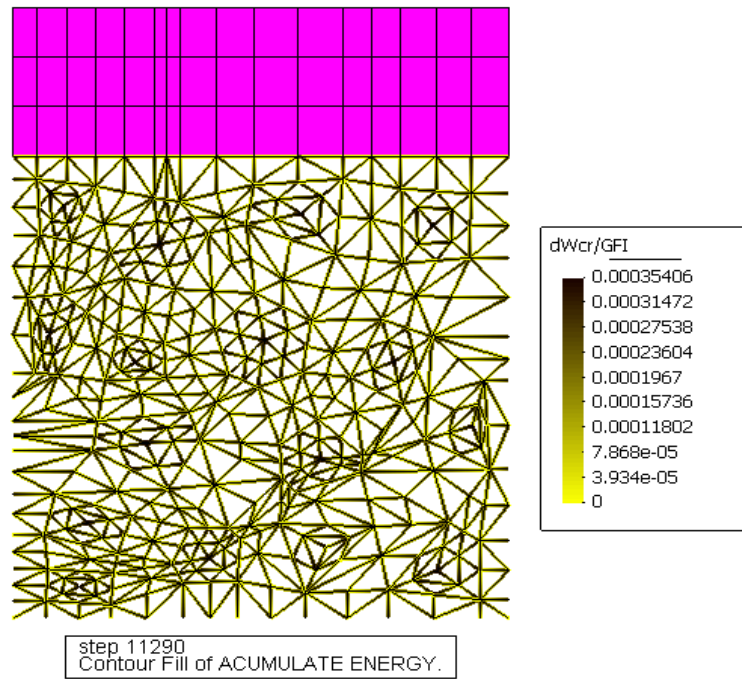


Figura 11– Energía acumulada – Etapa intermedia

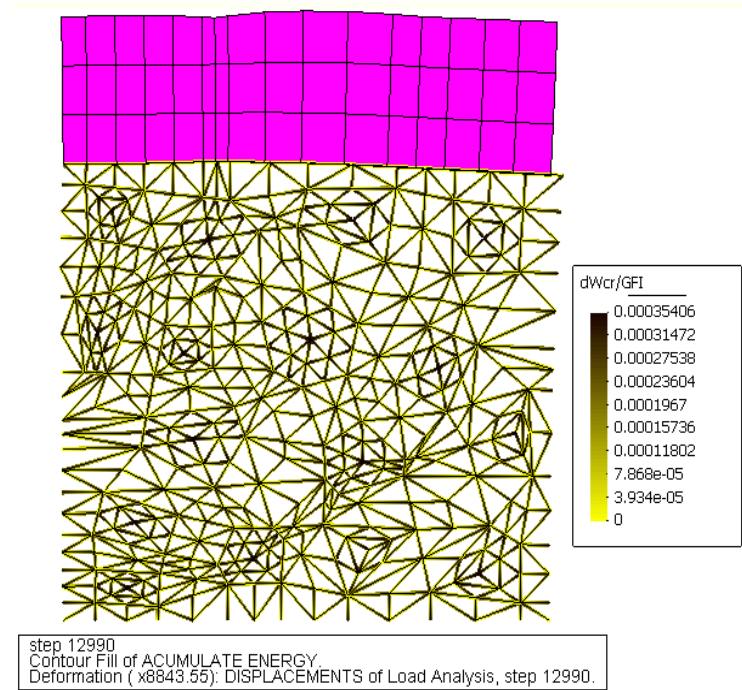


Figura 12– Energía acumulada – Etapa final

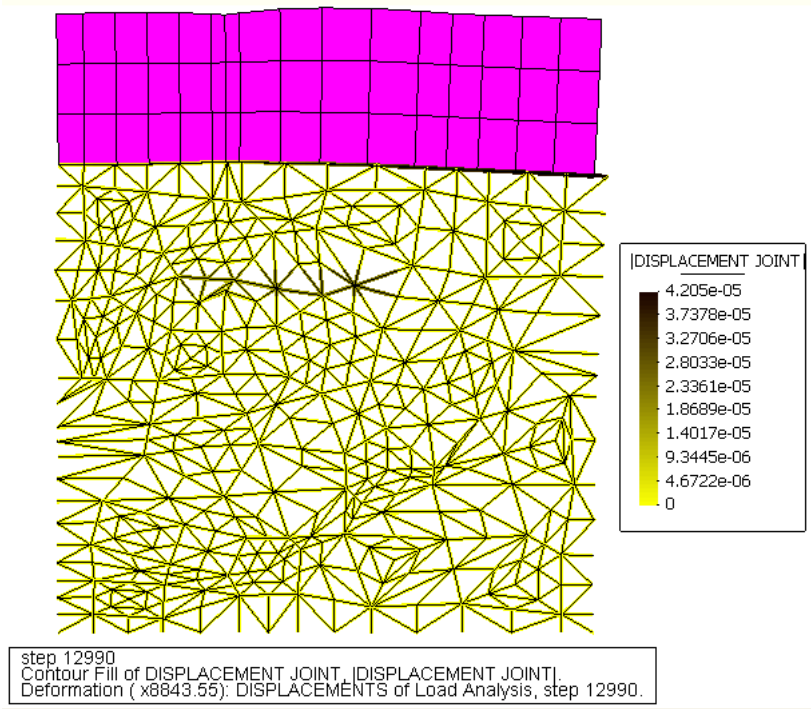


Figura 13 – Módulo del desplazamiento de juntas – Último paso

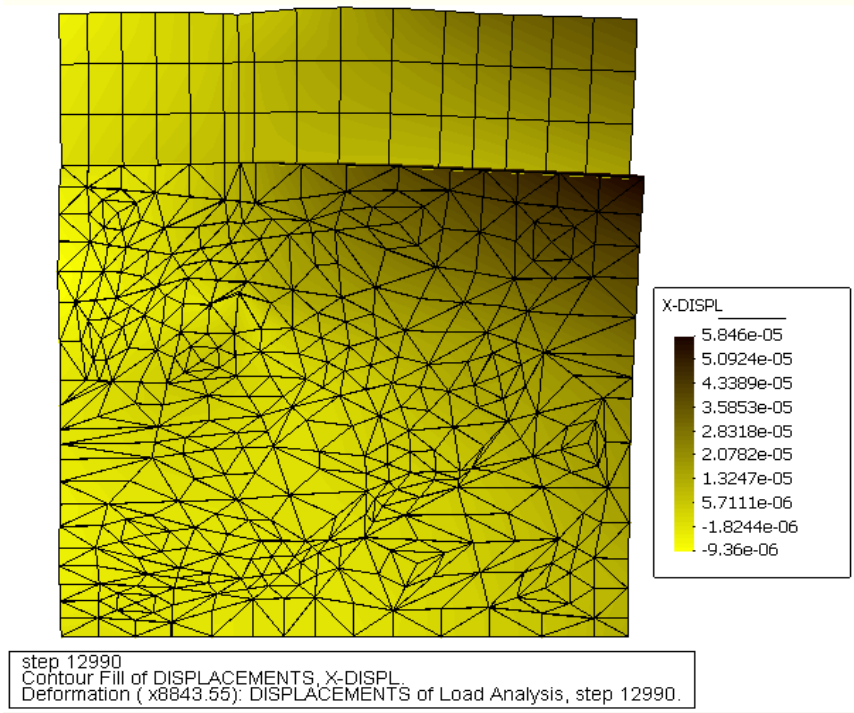


Figura 14– Desplazamiento en dirección. “X” de continuo – Último paso.

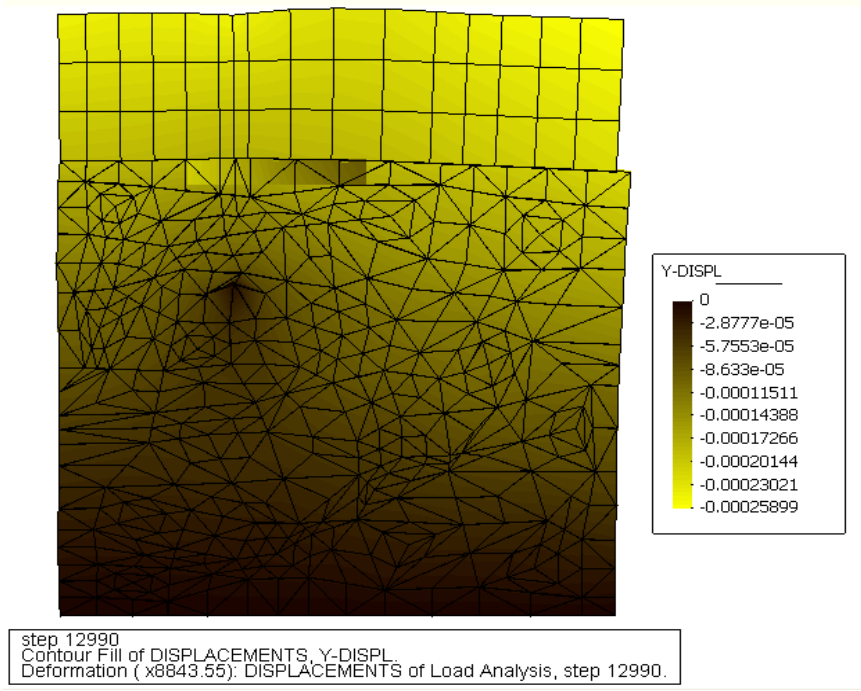


Figura 15 – Desplazamiento en dirección. “Y” medio continuo – Último paso

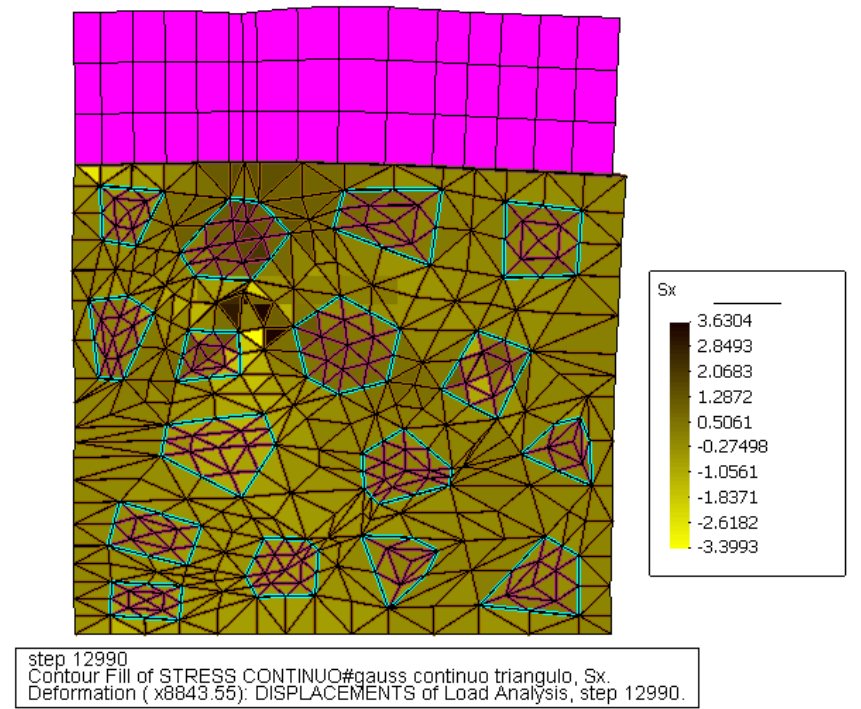


Figura 16– Tensiones en la dirección. “X” medio continuo – Último paso

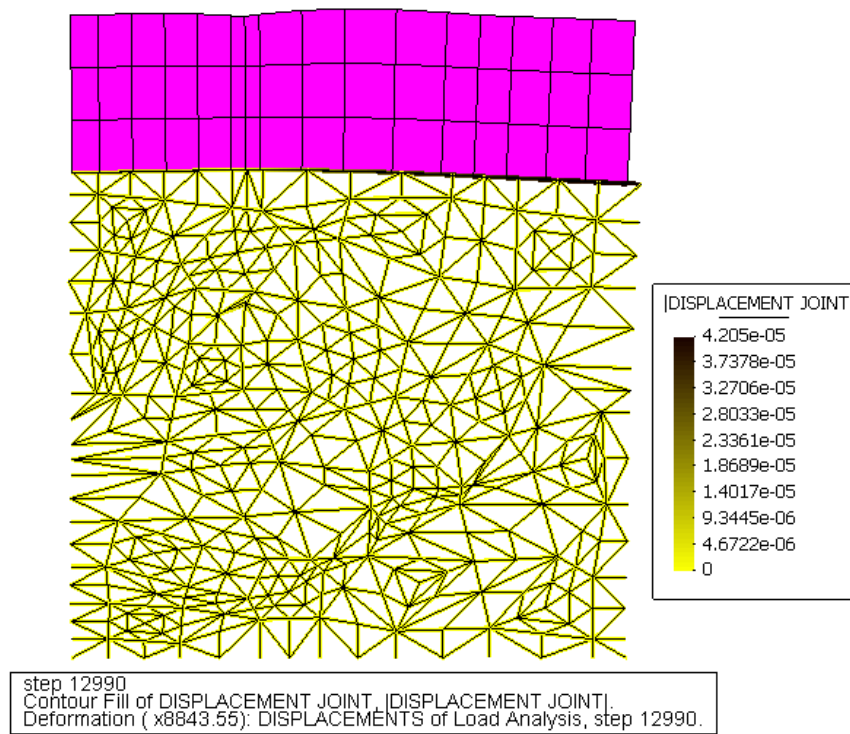


Figura 17 – Desplazamiento de juntas- etapa final

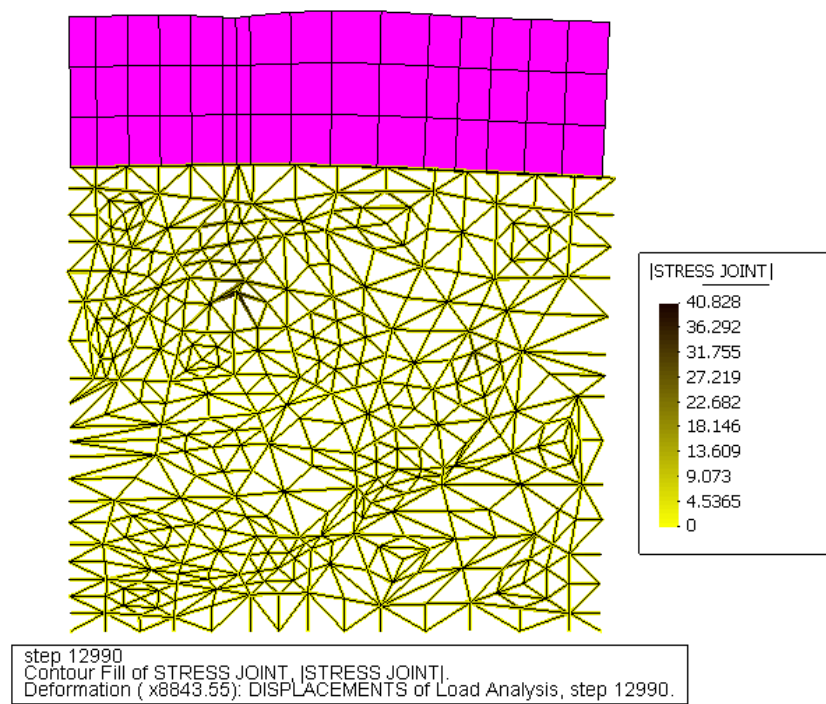


Figura 18 – Tensiones en las juntas – etapa final

## 5 CONCLUSIONES

Se ha presentado un ensayo numérico computacional a nivel mesomecánico sobre una malla con cabezal de repartición de presiones sometida a carga de larga duración con el propósito de analizar el fenómeno de fluencia básica en una probeta de Hormigón de Alta Resistencia. La observación de las diferentes configuraciones de la malla durante el proceso de fisuración muestra que en este tipo de hormigones el mismo es función de la geometría de la discretización y de los parámetros asignados a las fases intervinientes, siendo necesario un trabajo de calibración de los parámetros tiempo-dependientes del modelo a fin de ajustar los resultados del mismo a las observaciones 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 en este trabajo son preliminares, los mismos ponen de manifiesto los procesos indicados en forma concordante con los resultados experimentales disponibles en la literatura, 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

- 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, págs. 63-83, (1985). Predicción práctica del creep y retracción del Hormigón de alta Resistencia". *Matériaux et Constructions. Vol.17 - N°101*, págs. 375-378, (1984).
- Bazant, Z.P., Chern, J.C., "Triple Power Law for Concrete Creep". *Journal of Eng. Mech. ASCE*, 111, págs. 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), págs. 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, págs. 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 Parámetros 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.
- 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).
- 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 (2008) 2686–2705.
- Ma J., and Shneider H., “Creep of ultra-high performance concrete under compressive stresses” *LACER N°8*, Leipzig, Pag 39-50, 2003
- 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).
- Reinhardt H-W., and Rinder, T., Tensile Creep of High-Strength Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology Vol 4*, N°4, 2,277-283, 2006.
- Tia M., Liu Y.,” Modulus of elasticity, creep and shrinkage of concrete” *Final Report*– Dep. Of Civil & Coastal Engineering, Universidad de Florida, Florida, 2005.
- Vincente E., Townsend B., and Weyers R., “ Creep of High-Strength Normal and Lightweight Concrete” *Final Contract Report*, Virginia Transportation Research Council, Charlottesville, Virginia , VTRC 04-CRS, 2004
- Wee T. H., Chin M. S. & Mansur M. A. “Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compression” – *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 8 – ASCE . 70 – 76 . 1996
- Xiao R.Y. & 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.
- Zongjin Li & Yunsheng Zhang, *Handbook of Structural Engineering*, Chen & Liu Editores - ISBN 0-8493-1569-7 - USA.15.1 -15.58, 2005.