

ANÁLISIS MESOMECÁNICO DE FALLA DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA EN PROCESOS DE CARGA TIEMPO/TASA DEPENDIENTES

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

^aCMAE – CENTRO DE MECANICA APLICADA Y ESTRUCTURAS, Universidad Nacional de Santiago del Estero, Santiago del Estero, Argentina, lorefice@unse.edu.ar,
<http://www.unse.edu.ar>

^bCEMNCI, 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, creep, efectos de tasa, análisis mesomecánico, estructuras de hormigón.

Resumen. En este trabajo se presenta una simulación computacional a nivel mesomecánico del proceso de fractura de hormigones de alta resistencia (HAR) cuando los mismos se someten a procesos de carga estática de larga duración (creep). El estudio se conduce mediante el MEF analizando un sector típico de la mesoestructura compuesto por elementos finitos de interfase de espesor nulo y elementos de medio continuo tradicionales representativos de las dos fases típicas que caracterizan al hormigón (fase agregado y fase mortero). Los elementos de medio continuo se emplean para representar las fases agregado y mortero, mientras que los elementos de junta de espesor nulo se incluyen a fin de modelar el comportamiento de las interfases. Las simulaciones de procesos de falla en función del tiempo se analizan en problemas de creep y se estudian considerando un modelo de junta elasto-viscoplastico basado en la Teoría de la Viscoplasticidad de Perzyna (1963, 1966). Se presentan resultados computacionales de ensayos de carga en tracción simple para casos de carga estática sostenida (cargas de larga duración) analizando la respuesta numérica de dos configuraciones de la mesoestructura para valores de los parámetros mecánicos de las interfases típicos de Hormigones de Alta Resistencia.

1 INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas el uso de Hormigones de Alta Resistencia (HAR) se ha visto incrementado de manera significativa por diversas razones como ser la necesidad creciente de formas arquitectónicas cada vez más complejas, el diseño de puentes cada vez más esbeltos, y en definitiva estructuras más económicas. Influyen también en su elección la necesidad de mejorar el uso del espacio mediante la reducción de dimensiones de las piezas y la demanda de estructuras de mayor resistencia y durabilidad que posean un mejor comportamiento ante cargas de larga duración (fenómeno de creep o relajación) y ante cargas dinámicas. El origen de estos hormigones de performance superior a los llamados hormigones de resistencia normal se debe al desarrollo de nuevos cementos y aditivos los que les confieren las especiales características de resistencia y durabilidad. Si bien los ingredientes de los Hormigones de Alta Resistencia son prácticamente los mismos que los de los hormigones convencionales, su baja relación Agua-Cemento y la presencia de puzolanas y aditivos químicos hacen que sus características difieran de las de los Hormigones de Resistencia Normal. Ambos, las puzolanas y aditivos químicos, aumentan la rapidez de hidratación del cemento y del desarrollo de la resistencia, lo que produce una mayor resistencia a edades tempranas. En los HAR todos los componentes de la mezcla del hormigón son llevados al límite. Como contraparte, su producción debe desarrollarse bajo estrictos controles técnicos en la selección de materiales, diseño de sus proporciones, trabado y colocación. Desde el punto de vista numérico, las investigaciones tendientes al desarrollo de modelos computacionales capaces de predecir el comportamiento mecánico de este tipo de material se han centrado principalmente en la respuesta cuasi-estática, es decir, a velocidades de carga muy bajas, siempre a niveles macro mecánicos de observación empleando el criterio clásico de asumir al material como un medio continuo en el que el proceso de fisuración y falla se ve representado a través de una variable interna de degradación de la resistencia basada en la teoría de la elastoplasticidad o bien considerando el criterio de daño. Este criterio de análisis se engloba en la denominada “aproximación difusa” a la fisuración. Por otro lado, recientemente han cobrado gran auge los métodos explícitos o de “aproximación discreta” al proceso de fractura, los cuales implican el empleo de tecnologías especiales de elementos finitos, diseñados específicamente para la modelación de discontinuidades físicas. Este último es el criterio que se sigue en este trabajo, abordando el problema de la fractura de hormigones de alta resistencia bajo cargas de larga duración a un nivel de análisis mesomecánico, con énfasis en los procesos tiempo-dependientes tales como el fenómeno de fluencia lenta, bajo carga constante (creep básico) el cual puede conducir a la rotura diferida de la pieza estructural. En este caso, se estudia el proceso de fractura por medio de un modelo elasto-viscoplástico de interfase basado en la Teoría Viscoplastica continua de Perzyna (1963, 1966), desarrollado por Lorefice et al. (2004, 2006), Lorefice (2007), Lorefice et al. (2008).

2 MODELACION NUMERICA

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 en forma simultánea, desde el punto de vista mesomecánico es necesaria la consideración de diversos modelos o leyes constitutivas para cada una de las fases que constituyen el material. En la Figura 1 se representa el comportamiento típico del hormigón bajo carga sostenida. Bajo este tipo de sollicitaciones se producen deformaciones recuperables y no-recuperables. Las deformaciones elásticas se recuperan luego de retirada la carga, mientras que las deformaciones diferidas permanentes se relacionan con la disipación de energía de fractura en el proceso de fisuración, originando la pérdida de rigidez de la matriz

cementicia y la consiguiente disminución de resistencia y estabilidad. Esta pérdida de rigidez es la causante de la fuerte no-linealidad de la respuesta mecánica cuando la relación de tensión a la que es sometida la probeta en un ensayo típico supera el 40 – 45 % de la capacidad mecánica estática del hormigón. Una vez que el proceso de degradación de la resistencia se inicia, se produce una interacción compleja entre el comportamiento diferido de la matriz cementicia (comportamiento reológico visco-elástico), el comportamiento elástico de los agregados pétreos y la fractura de la matriz la cual sigue un comportamiento viscoplastico. Esta complejidad del comportamiento mecánico implica la necesidad de incorporar diversas leyes constitutivas a las fases componentes. En trabajos previos, Lorefice et al. (2007), se ha analizado la incidencia de la configuración mesomecánica en la respuesta numérica de falla considerando parámetros del modelo de junta y de los elementos constitutivos del mortero y agregado referidos a hormigones normales. En este trabajo se estudia la performance numérica de una configuración mesomecánica típica considerando que los parámetros materiales del modelo de junta viscoplastico y las constantes elásticas de los elementos representativos del medio continuo corresponden a un hormigón de alta resistencia. En este sentido, existen marcadas diferencias en el comportamiento mecánico de este tipo de hormigones con respecto a los hormigones normales, lo cual se traduce en una respuesta de falla diferente cuando los mismos son sometidos a cargas de larga duración, ver Smadi et al. (1985), Smadi y Slate (1989), Garcia Alvarez (1997), Berthollet (2003) entre otros. El objetivo de este trabajo es el de dar los primeros pasos en el estudio numérico del comportamiento de falla bajo cargas sostenidas considerando un sector de la mesoestructura configurado de modo tal que represente cualitativamente a un hormigón de alta resistencia, y permita evaluar mediante la comparación de resultados entre las mallas en estudio las diferencias en los patrones de falla diferida y disipación de energía. A diferencia de trabajos previos, las nuevas configuraciones de sectores mesomecánicos típicos que se presentan aquí permiten modelar patrones de fisuración que incluyen fractura en la fase agregado, la cual caracteriza en general a la rotura de los hormigones de alta resistencia (HAR).

2.1 Modelo Viscoelástico de Maxwell

Desde el punto de vista numérico, es conveniente el empleo de una cadena viscoelástica de Maxwell para la modelación del comportamiento reológico del mortero, dado que permite introducir el efecto del envejecimiento o edad del hormigón al instante de ser cargado. Este tipo de ley puede desarrollarse en forma integral o diferencial. En el caso de las formas integrales, la solución de la integral de Volterra requiere la evaluación de la historia de tensión para cada incremento que compone la misma. La implementación del algoritmo correspondiente implica el uso de un espacio de almacenamiento muy grande a fin de salvar las variables involucradas en cada paso de cálculo. Por el contrario, las formulaciones diferenciales sólo requieren el almacenamiento en memoria del valor de la variable para el paso de tiempo previo. La respuesta tensional en un problema de esta clase puede expresarse como

$$\{\sigma(t)\} = R(t,t')(D^*)\{\varepsilon(t')\} \quad (1)$$

donde D^* es la matriz elástica dividida por el módulo de Young, t' es el tiempo al cual se aplica la carga, $\varepsilon(t')$ es el vector deformación, y $R(t,t')$ es la función de relajación de Dirichlet expandida en serie

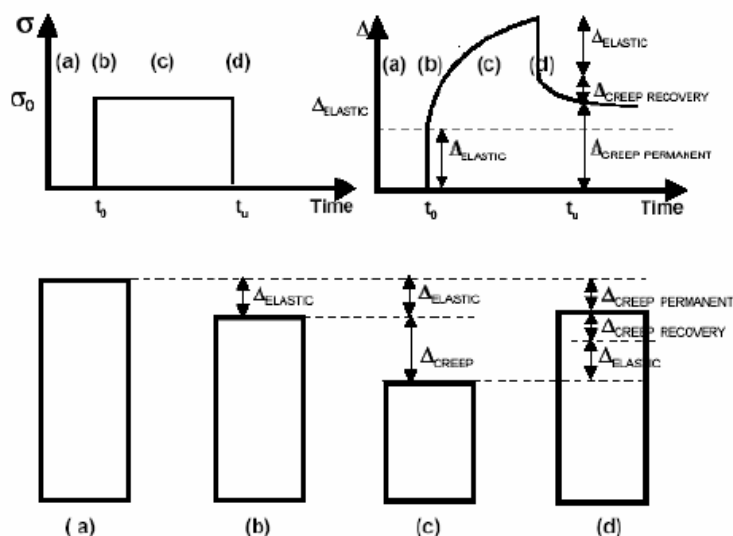


Figura 1: Deformaciones en proceso de fluencia: (a) longitud original, (b) deformación elástica, (c) carga en creep, y (d) deformación permanente bajo carga sostenida

$$R(t, t') = \sum_{\mu=1}^n E_{\mu}(t') e^{-\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}} = \sum_{\mu=1}^{n-1} E_{\mu}(t') e^{-\frac{t-t'}{\tau_{\mu}}} + E_{\infty}(t') \quad (2)$$

con n el número de términos de la serie; $E_{\mu}(t')$ representa los coeficientes elásticos de la cadena (a determinar), y $\tau_{\mu} = \eta_{\mu}(t')/E_{\mu}(t')$ representa el tiempo de relajación intrínseco de cada término. Las tensiones dadas por la (1) se evalúan en función de los términos involucrados en la cadena de Maxwell como

$$\sigma(t) = \sum_{\mu=1}^n \sigma_{\mu}(t) \quad (3)$$

Considerando el principio de superposición de Boltzmann, las tensiones dadas por la (3) pueden aplicarse en pasos discretos, pero para ello previamente debe establecerse una hipótesis para los elementos de la cadena en el intervalo de análisis $[t_r, t_{r-1}]$, a saber: que los coeficientes elásticos E_{μ} se consideran constantes durante el intervalo de tiempo y se calculan usando el valor medio en dicho intervalo. Esto nos conduce a la forma incremental de la ecuación constitutiva viscoelástica

$$\{\Delta\sigma(t_r)\} = E''(t_r)(D^*) \left(\{\Delta\varepsilon(t_r)\} + \{\Delta\varepsilon^c(t_r)\} \right) \quad (4)$$

con

$$\Delta\varepsilon^c(t_r) = \frac{1}{E''(t_r)} \sum_{\mu=1}^n \left[\sigma_{\mu}(t_{r-1}) \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_r}{\tau_{\mu}}} \right) \right] \quad (5)$$

La evaluación de la tensión en un elemento de la cadena en el instante t toma la forma

$$\{\sigma_{\mu}(t_r)\} = \{\sigma_{\mu}(t_{r-1})\} e^{-\frac{\Delta t_r}{\tau_{\mu}}} + [D^*] \frac{\tau_{\mu}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_r}{\tau_{\mu}}} \right) E_{\mu}(t_{r1/2}) \Delta\varepsilon(t_r) \quad (6)$$

mientras que el efecto del envejecimiento en el tiempo se incluye mediante el módulo evolutivo E'' en la forma:

$$E''(t_r) = \sum_{\mu=1}^n \left[\frac{\tau_{\mu}}{\Delta t} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t_r}{\tau_{\mu}}} \right) E_{\mu}(t_{r1/2}) \right] \quad (7)$$

2.2 Modelo de interfase viscoplástico

En el marco de la Teoría Viscoplástica continua de Perzyna, la condición de fluencia para el modelo de interfase se define introduciendo en la función de fluencia original un término adicional el cual es sensible a los efectos tasa/tiempo (se considera un exponente de Perzyna $N = 1$)

$$F = \tau^2 - (c - \sigma \tan \phi)^2 + (c - \chi \tan \phi)^2 - \dot{\lambda} \eta \quad (8)$$

donde σ y τ son las componentes de tensión normal y tangencial respectivamente sobre la interfase, χ representa la resistencia a tracción uniaxial, c la cohesión aparente y ϕ el ángulo de fricción interna del material. El parámetro $\dot{\lambda}$ simboliza la tasa del multiplicador viscoplástico y η la viscosidad del material. Es evidente que a partir de la ec. (8), si el parámetro viscoso $\eta \rightarrow 0$ se recupera la formulación original inviscida (elastoplástica). La tasa de liberación de energía disipada necesaria para la formación de una fisura durante el proceso de fractura tiempo-dependiente puede expresarse como

$$\dot{q}^{ver} = \mathbf{t}^T \dot{\mathbf{u}}^{ver} \quad (9)$$

mientras que los desplazamientos críticos tiempo-dependientes se expresan en términos de la función de potencial viscoplástico Q^{ver} y el multiplicador viscoplástico $\dot{\lambda}$ en forma análoga al caso inviscido

$$\dot{\mathbf{u}}^{ver} = \dot{\lambda} \mathbf{A} \mathbf{n} \quad (10)$$

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

$$\mathbf{n} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{t}} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma}, \frac{\partial F}{\partial \tau} \right]^T = [2 \tan \phi (c - \sigma \tan \phi), 2\tau]^T \quad (11)$$

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

$$\mathbf{A} = \begin{cases} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} & \text{si } \sigma \geq 0 \\ \begin{pmatrix} f_{\sigma}^{dil} & f_c^{dil} & 0 \\ 0 & \left(1 - \left| \frac{\sigma \tan \phi}{\tau} \right| \right) \end{pmatrix} & \text{si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (12)$$

con

$$f_c^{dil} = 1 - \frac{c}{c_0} \quad ; \quad f_{\sigma}^{dil} = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_{dil}} \quad (13)$$

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

$$\dot{F} = \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{t}} + \bar{r} \dot{q}^{ver} + s \dot{\lambda} = 0 \quad (14)$$

Con las siguientes definiciones:

$$\bar{r} = \left(\frac{\partial F}{\partial c} \frac{dc}{dq^{ver}} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \frac{d\chi}{dq^{ver}} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = 2 \tan \phi (\sigma - \chi) \quad ; \quad \frac{\partial F}{\partial \chi} = -2 \tan \phi (c - \chi \tan \phi) \quad (16a,b)$$

$$\frac{dc}{dq^{ver}} = - \frac{c_0 e^{-\alpha_c} G_f^{II}}{\left[(e^{-\alpha_c} - 1) q^{ver} + G_f^{II} \right]^2} \quad ; \quad \frac{d\chi}{dq^{ver}} = - \frac{\chi_0 e^{-\alpha_\chi} G_f^I}{\left[(e^{-\alpha_\chi} - 1) q^{ver} + G_f^I \right]^2} \quad (17a,b)$$

$$s = - \frac{\partial \varphi^{-1}(\eta \lambda)}{\partial \lambda} = -\eta \quad (18)$$

Los parámetros de estado del modelo evolucionan durante el proceso de carga, y son función de los parámetros originales de la superficie, χ y c . El sistema de ecuaciones no-lineal resultante se resuelve por medio del Método de Newton-Raphson en el marco de la estrategia de proyección al punto mas cercano o Closest Point Projection Method (CPPM), Etse et al. (1997), Carosio et al. (2000), Lorefice (2007), Lorefice et al (2008). Los modelos constitutivos previamente descritos se emplean en el análisis numérico del problema de creep básico a nivel mesomecánico en la sección siguiente.

3 ANALISIS COMPUTACIONAL

A fin de estudiar la interacción entre las distintas fases constituyentes en el comportamiento mecánico de un hormigón de alta performance bajo cargas de larga duración, el mismo se aborda considerando las mallas mesomecánicas de Figura 2, de dimensiones totales 4 x 12 (cm). La malla 1 posee una discretización horizontal de modo de lograr que las juntas se vean sometidas a estados de tracción pura, mientras que la configuración de la malla 2, en la que se disponen además juntas diagonales, permite el estudio de la respuesta en el caso mas general que es el que corresponde a estados de carga que involucran la acción de tensiones combinadas de tracción y corte sobre las interfases. Considerando el hormigón como un material bifásico (fase mortero y fase agregado), a los elementos finitos de medio continuo se les asignan diferentes leyes constitutivas, a saber: los elementos representativos de los agregados siguen la ley elástica de Hooke con $E_{agreg} = 70000$ MPa, mientras que los elementos de mortero obedecen la ley viscoelástica de Maxwell descrita en la Sección 2, con $E_{mort} = 25000$ MPa y coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$ para ambos. Los elementos de interfase o juntas de espesor nulo se sitúan en las fases agregado y mortero, y se equipan con la ley constitutiva viscoplástica, considerándose los siguientes casos:

- 1a) Malla 1: juntas agregado-agregado elastoplásticas, juntas mortero-mortero y mortero-agregado viscoplásticas.

- 1b) Malla 1: juntas agregado-agregado viscoplásticas, juntas mortero-mortero y mortero-agregado viscoplásticas.
- 2a) Malla 2: juntas agregado-agregado elastoplásticas, juntas mortero-mortero y mortero-agregado viscoplásticas.
- 2b) Malla 2: juntas agregado-agregado viscoplásticas, juntas mortero-mortero y mortero-agregado viscoplásticas.

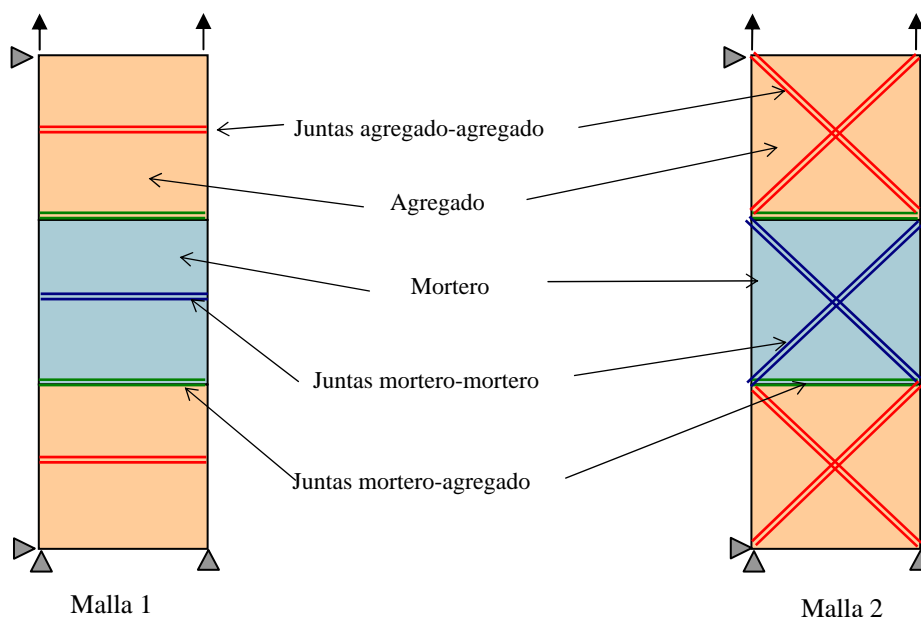


Figura 2: Mallas mesomecánicas

Para ambas configuraciones de mallas, el ensayo numérico consiste en aplicar cargas de tracción sobre los nodos superiores de la malla en 10 incrementos de carga bajo estado de tensiones planas hasta alcanzar la carga de fluencia. Una vez alcanzada la misma, la carga se mantiene constante y se deja transcurrir el tiempo a fin de estudiar la evolución de los desplazamientos diferidos y analizar el proceso de falla. Las cargas aplicadas variaron desde 5, 10, 15, 20 y 25×10^2 kg respectivamente. Los parámetros de resistencia de las juntas a tracción se tomaron iguales a 5, 10, 15, 20 y 22.5 MPa, mientras que la resistencia al corte es de 10, 20, 30, 40 y 45 MPa respectivamente, correspondiendo los valores iniciales a los de un hormigón normal. Los valores de G^d empleados en cada caso fueron 3, 5, 7.5, 9 y 9.9×10^{-5} MPa.m, respectivamente. Dado que en los hormigones de alta resistencia la falla se produce por rotura de los agregados, a las juntas agregado-agregado se les asigna un comportamiento elastoplástico ($\eta = 0$). Los resultados de los análisis computacionales del caso 1a se presentan en las curvas de Figura 3, en las que se observa que con el aumento de la resistencia general del hormigón la manifestación del fenómeno se retrasa, exhibiendo tasas de deformación cada vez menores al principio, retardando el inicio de la etapa final que conduce a la denominada “rotura diferida”. Respecto a esta última etapa, es claro que una vez iniciada, la misma posee una menor duración y un incremento de deformación cada vez más abrupto dado por una mayor curvatura de la respuesta a medida que la resistencia se incrementa. Las curvas de Figura 4 ilustran los resultados del Caso 1b, en las que la rama de creep secundario se inicia mucho antes que en las curvas correspondientes al Caso 1a.

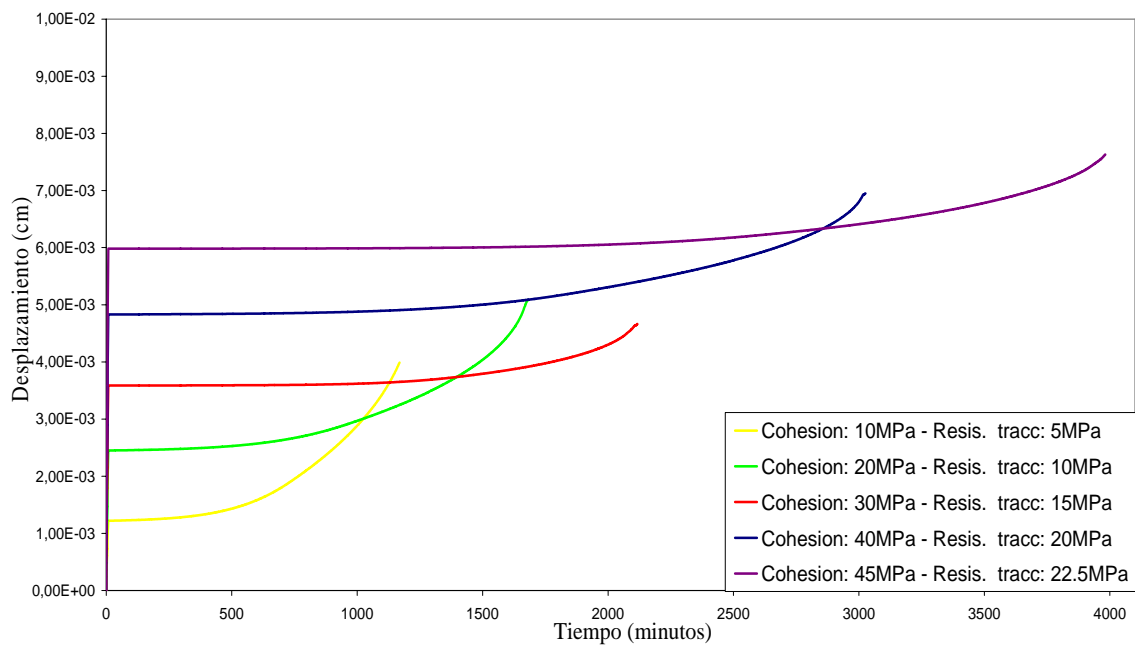


Figura 3: Caso 1a. Evolución de desplazamientos diferidos

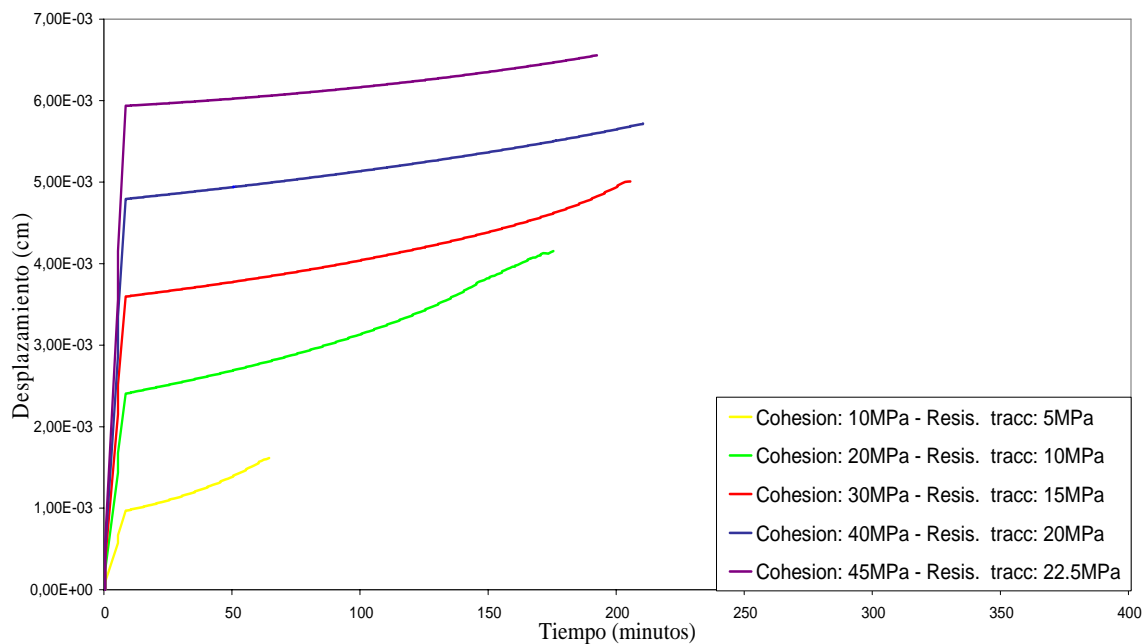


Figura 4: Caso 1b. Evolución de desplazamientos diferidos

Este resultado se debe a que en el caso de incluir juntas viscosas en los agregados, las mismas introducen una respuesta mas sensible a la deformación en relación al caso de juntas agregado-agregado elastoplásticas. Los resultados de la configuración mesomecánica de malla 2 se presentan en las Figuras 5 y 6, en las que se observa claramente la incidencia de las juntas diagonales, las que modifican el mecanismo de falla diferida en relación a los Casos 1 a) y b). La presencia de las juntas diagonales introduce estados combinados de tracción-corte para los que la respuesta diferida es mucho mas pronunciada, iniciandose directamente la etapa de creep secundario y a continuación la de creep terciario que conduce a la rotura diferida. En las Figuras 7 - 10 se presentan resultados del pos-proceso de dos casos típicos, en los que se aprecia la diferencia entre los mecanismos de falla generados en cada caso en

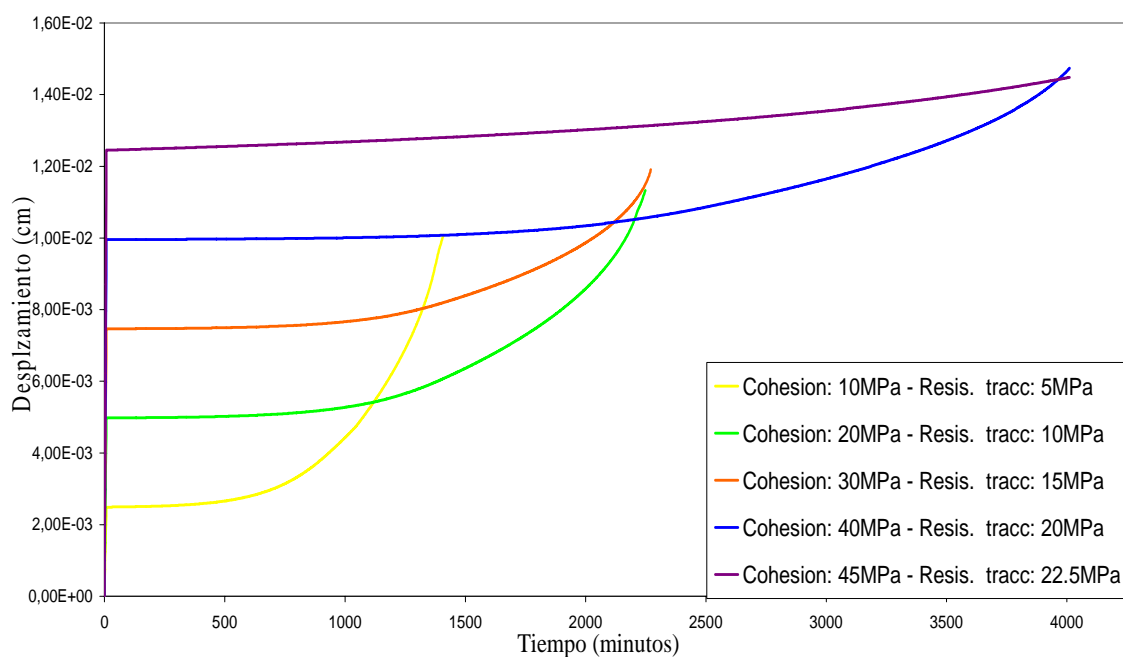


Figura 5 - Caso 2a. Evolución de desplazamientos diferidos

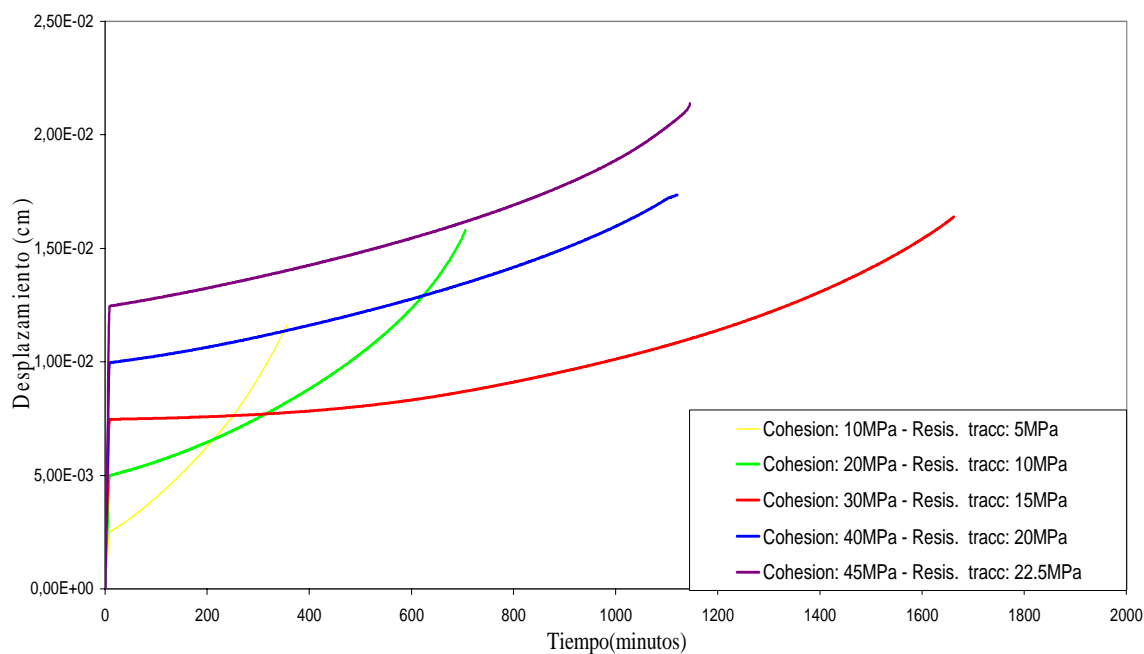


Figura 6: Caso 2b. Evolución de desplazamientos diferidos

términos de la deformada y disipación de energía en las juntas, dado que el resto de los elementos que componen la malla obedecen una ley elástica lineal. La disipación de energía se representa por medio de la relación dW_{cr}/GF^I que representa el cociente entre la energía de fractura acumulada y el parámetro GF^I representativo de la energía de fractura del modelo en Modo I de falla (falla en tracción directa). En las figuras 8 y 10 se muestra la distribución de dW_{cr}/GF^I para el último paso de carga de los casos 1b y 2b. Se puede observar en la figura 8 que en la malla 1 los mayores valores corresponden a las juntas de los agregados y menor

energía disipada en las juntas del mortero. En el caso 2b, en cambio, la mayor cantidad de energía se disipa en las juntas de la pasta cementicia siguiendo luego por las juntas en los agregados indicando que la mayor cantidad de energía se disipa en las juntas mortero-mortero aunque el inicio de la fractura se presente en los agregados. Se verifica esto observando la figura 9 en donde la apertura de fisura de la malla deformada indica que los mayores desplazamientos corresponden a las juntas en los áridos donde se inicia el proceso de fractura, pero la mayor disipación de energía se produce en las juntas inclinadas dado que las mismas se encuentran sometidos a estados combinados de tensión.

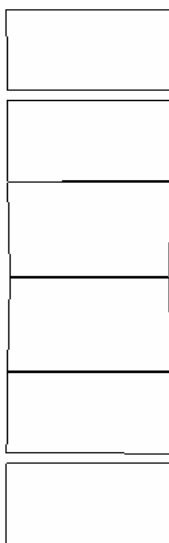


Figura 7: Deformada típica – Malla 1

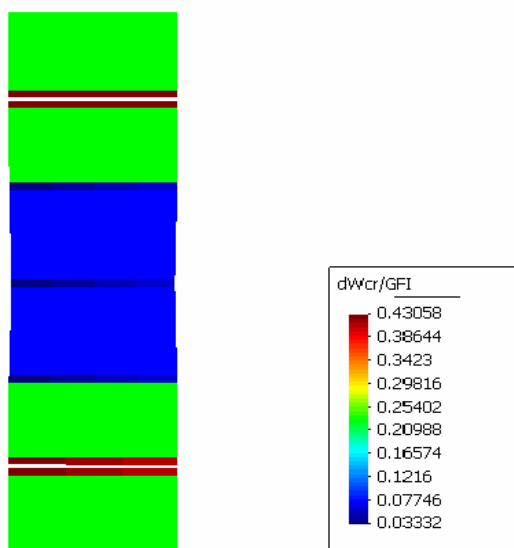


Figura 8: Disipación de energía – Malla 1

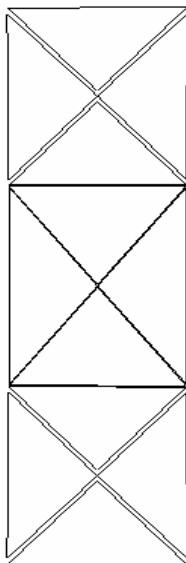


Figura 9: Deformada típica – Malla 2

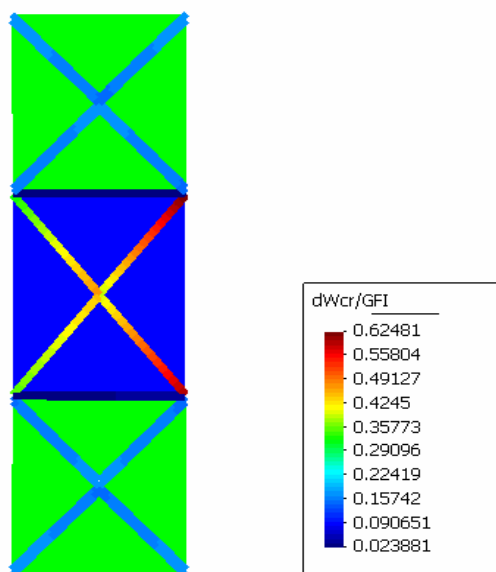


Figura 10: Disipación de energía – Malla 2

4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en el análisis numérico, es claro que es esencial la consideración de la configuración de la mesoestructura en la modelación a nivel mesomecánico tanto respecto de la adopción de las leyes constitutivas representativas del comportamiento de las distintas fases del material como en el planteo de las interfases, dado que las mismas interactúan en forma diferente de acuerdo con la geometría de la configuración mesomecánica, la cual incide sobre la evolución del mecanismo de rotura diferida dominante en cuanto al tiempo transcurrido hasta la falla y la rapidez del proceso,

factores determinantes a la hora del diseño estructural de elementos esbeltos sometidos a cargas de larga duración. El estudio de estos mecanismos mediante el empleo de mallas y estados tensionales simples posibilita un mejor entendimiento del fenómeno físico y de los diferentes aspectos relativos a la modelación computacional de procesos de falla en materiales complejos tales como el hormigón empleando el criterio de aproximación discreta, el cual es el más adecuado para una modelación realista del proceso de fractura. Debido a que estos resultados son de carácter preliminar, los pasos siguientes consisten en analizar mallas mesomecánicas completas a fin de comparar sus resultados con ensayos de laboratorio y resultados de otros modelos numéricos.

5 REFERENCIAS

- Berthollet, A., Contribution a la modelisation du beton vis-a-vis du vieillissement et de la durabilite: interaction des deformations de fluage et du comportement non-lineaire du materiau: analyse et modelisation. *Ph.D. Thesis, INSA, Lyon, France, Octubre 2003.*
- Carol, I., Prat, P. and Lopez, C.M., A Normal/ Shear Cracking Model. Interface Implementation for Discrete Analysis. *Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 123(8), pp. 765-773, 1997.*
- Carosio, A., Viscoplasticidad Continua y Consistente. *Tesis doctoral, Laboratorio de Estructuras - Univ. Nac. De Tucumán, Argentina, 2001.*
- Carosio, A., Willam, K. and Etse, G., On the Consistency of Viscoplastic Formulations. *International Journal of Solids and Structures, Vol. 37, pp. 7349-7369, 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).*
- Etse, G., Carosio, A. and Willam, K., Limit State and Localization of Perzyna Viscoplastic Material. *Int. Journal on Cohesive and Frictional Materials, (23), 1, pp. 32-42, (1997).*
- García Álvarez, V., Estudio de la fractura en Modo Mixto de los materiales cuasi frágiles: Aplicación al hormigón convencional y al hormigón de alta resistencia. *Ph.D. tesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, Mayo 1997.*
- 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 noviembre de 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 Tucumán, Agosto de 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.*
- 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).*

Smadi, M.M., and Slate, F.O. Microcracking of high and normal strength concrete under short and long term loadings. *ACI Materials Journal* , no. Vol 2, 86, Pags. 117-127, 1989.

Smadi, M.M., Slate, F.O, and Nilson, A.H. High, medium and low strength concretes subjected to sustained overloads- strains, strength and failure mechanisms. *ACI Materials Journal* , no. Vol 82, 5, Pags. 657-664, 1985.

