

INFLUENCIA DE LA TASA DE DEFORMACION EN EL CREEP Y RELAJACION DE HORMIGONES NORMALES

R. Lorefice^a, G. Etse^b, M. Rizo Patron^a y E. Sosa^a

^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 Tucuman, Avda. Roca 4000, Tucuman, Argentina,
getse@herrera.unt.edu.ar, <http://www.unt.edu.ar>

Palabras clave: creep, efectos de tasa, análisis mesomecanico, estructuras de hormigon.

Abstract. Este trabajo aborda el problema de la interacción entre los fenómenos de creep y relajación y la incidencia que sobre ellos ejerce la tasa de deformación aplicada. El problema se enfoca a un nivel de análisis mesomecanico con un modelo computacional que incluye una ley viscoplastica de interfase basada en la teoria de Perzyna con el fin de simular el comportamiento tiempo-tasa dependiente de la pasta cementicia. Esto se logra insertando elementos de interfase o juntas de espesor nulo entre los elementos finitos de medio continuo que representan al mortero y al agregado, así como también entre los elementos mismos del mortero cementicio. Este criterio de análisis permite estudiar los problemas de acoplamiento entre creep y fractura considerando un marco teórico unificado. Los resultados obtenidos demuestran que la ley viscoplastica de interfase combinada con un criterio de aproximación mesomecanico es una herramienta numérica muy potente para el estudio de este tipo de fenómenos a nivel mesomecanico de observación.

1. INTRODUCCION

El estudio de los procesos de falla en estructuras de hormigón es de vital importancia a la hora de estimar la vida útil de dichas estructuras. Para construcciones de cierta relevancia, la naturaleza reológica del hormigón implica la necesidad de realizar un análisis detallado del comportamiento estructural bajo cargas sostenidas con el fin de lograr una predicción acertada de las deformaciones diferidas que sufre el material cuando es sometido a cargas de larga duración que superan el rango usual de las cargas de servicio. Este estudio es crucial para la predicción de la posible aparición de patrones de fisuras, los cuales en ciertos casos pueden derivar en el fenómeno conocido como rotura diferida de la estructura, aún para valores de las cargas inferiores a las cargas últimas obtenidas en un análisis estructural convencional. Tradicionalmente, el comportamiento reológico del hormigón se ha abordado mediante modelos viscoelásticos (cadenas de Maxwell o de Kelvin), o bien mediante modelos teóricos calibrados a partir de observaciones experimentales, tales como los adoptados por diversos códigos de construcciones internacionales (Modelos B2 y B3 en ACI 2005, EuroCode 2, etc.). En este trabajo se exploran las performances numéricas de los modelos reológicos viscoelástico de Maxwell y viscoplástico continuo de Perzyna para la simulación del comportamiento tiempo-dependiente de estructuras de hormigón, consideradas desde el punto de vista mesomecánico. Ambas teorías han sido empleadas por separado por diversos autores con el fin de representar el comportamiento diferido del hormigón. La teoría de la viscoelasticidad ha sido aplicada para este fin por Bazant y Gettu (1992), Bazant et al. (1995), Bazant et al. (1997a,b), Bazant y Chern (1998), entre otros. La teoría de la elasto-viscoplasticidad desarrollada originalmente por Perzyna (1963, 1966) se ha empleado principalmente para el estudio de efectos de tasa como los originados ante la aplicación de cargas a velocidades superiores a las consideradas cuasi-estáticas con el fin de predecir el fenómeno de sobrerresistencia dinámica, ver Desai and Zhang (1987), Etse y Willam (1997), Winnicki et al. (2001), Etse et al. (2004), Lorefice et al. (2006), entre otros. Un análisis exhaustivo de las diversas teorías propuestas y de los resultados obtenidos con las mismas indica que, en principio, no existe hasta el momento una única formulación capaz de representar con precisión el comportamiento de falla del hormigón en todo el rango posible de sollicitaciones de interés, y sobre todo, en el rango no lineal de comportamiento. Debido a esta razón, los esfuerzos actuales se concentran en la búsqueda de una combinación apropiada de teorías tiempo/tasa dependientes capaces de conformar un modelo único que contemple los aspectos salientes de cada una de ellas. El objeto de los análisis numéricos que se presentan en este trabajo es el de determinar el comportamiento característico de los modelos reológicos combinados resultantes con el fin de evaluar su aptitud para capturar los fenómenos de rotura diferida bajo carga sostenida, relajación de tensiones bajo deformación constante y el fenómeno de acoplamiento o interacción que necesariamente se produce entre estos dos fenómenos tiempo dependientes y el proceso de fractura que sufre el material. Se debe resaltar aquí que en los análisis que se presentan a continuación no se considera ningún tipo de intercambio de humedad con el medio, y tampoco la influencia de la temperatura, limitando el análisis al denominado *creep básico* o *fluencia básica*. Los modelos numéricos se complementan con un criterio de observación a nivel mesomecánico que incluye el uso de elementos finitos de medio continuo tradicionales y de elementos de junta o interfase de espesor nulo con el fin de analizar específicamente la falla del conjunto formado por agregados, mortero y sus respectivas interfases evaluando diversos aspectos relacionados con el problema de la falla del hormigón tales como incidencia de la tasa de deformación, incidencia del nivel de tensión, valor final de deformación a la rotura, tiempo transcurrido a la falla que predice cada una de ellas y por sobre todo, analizar bajo qué condiciones estos

modelos son capaces de captar el fenómeno denominado rotura diferida.

2. INTERACCION CREEP-FRACTURA

A pesar de los avances realizados en las últimas dos décadas en los campos de la Mecánica Computacional de Sólidos y Estructuras y de la Ciencia de los Materiales, el fenómeno de la fluencia lenta o creep del hormigón presenta aun hoy grandes retos a los investigadores e ingenieros. La creciente demanda de estructuras confiables y económicas redundan en recomendaciones de diseños que conducen a elementos estructurales cada vez más esbeltos y en una exigencia cada vez mayor de los materiales estructurales. En este contexto, el problema de la durabilidad y seguridad a mediano y largo plazo de las estructuras de hormigón es un tema crucial, dado que el problema de la deformación diferida se concatena con el proceso de fractura que sufre el material bajo carga. En este sentido, es sabido que la resistencia última de un elemento estructural de hormigón armado sometido a carga sostenida es de alrededor de un 80 % de la resistencia última para carga aplicada en forma cuasi-estática. La razón de esta reducción en la capacidad portante es precisamente el desarrollo de la interacción o acoplamiento que se produce entre el proceso de deformación diferida del elemento y el proceso de fractura del mismo, los cuales pueden ocurrir simultáneamente. La interacción creep-fractura conduce a un incremento de la degradación de la matriz cementicia o mortero del hormigón, con la consiguiente pérdida de rigidez y reducción de capacidad portante de la estructura. El desarrollo de este proceso de interacción entre la fluencia lenta del hormigón y la fisuración depende principalmente de las características mecánicas del material, y en particular, de la distribución espacial de los microdefectos presentes desde el inicio de la vida del hormigón. Estos defectos se presentan en forma de microfisuras que se sitúan en la masa del hormigón en función del proceso de hormigonado del elemento estructural y de su configuración a nivel mesomecánico. Una vez que el hormigón es sometido a carga, el creciente aumento del nivel de tensión produce concentración de tensiones en los extremos de estas microfisuras provocando el crecimiento de las mismas hasta formar verdaderas fisuras o planos de debilidad a partir de los cuales se inicia un rápido proceso de degradación que culmina con la falla estructural. Este proceso de degradación de rigidez y consecuente pérdida de resistencia es el causante de la no linealidad que se observa en el comportamiento diferido del hormigón, el cual generalmente se acentúa para valores de la relación carga aplicada/carga última superiores al 50 %. Desde el punto de vista numérico, este fenómeno implica en general el planteo del acoplamiento entre dos modelos diferentes, a saber: un modelo puramente reológico (por ejemplo cadenas viscoelásticas de Maxwell o Kelvin), y un modelo capaz de captar el fenómeno de falla o fractura del hormigón en forma realista. Esto último puede plantearse a diferentes niveles de observación, dependiendo del objetivo del análisis. En el caso del estudio del fenómeno de interacción creep-fractura desde el punto de vista mesomecánico, es indispensable el empleo de leyes constitutivas capaces de representar el proceso de degradación en forma discreta, con una modelación explícita del proceso de apertura de fisura bajo cargas estáticas y dinámicas, incluyendo a la vez la incidencia de la tasa de deformación en el proceso. Teniendo en cuenta esto último, se plantea aquí el uso de un modelo elasto-viscoplástico de interfase basado en la teoría de Perzyna (1963, 1966), el cual es sensible a los procesos tiempo/tasa dependientes. El modelo de Perzyna se aplica a nivel mesomecánico a través de una ley constitutiva de junta capaz de captar el proceso de degradación en tracción y corte, incluyendo una formulación de disipación de energía diferenciada para cada caso, ver Carol et al (1997), López (1999), Etsé et al (2004a, b). A nivel mesomecánico, esta ley de junta tiempo-dependiente se incorpora en elementos finitos de junta de espesor nulo, a fin de dotar a las interfases mortero-agregado y

mortero-mortero de las características mecánicas propias del fenómeno en estudio.

3. MODELACION NUMERICA DEL FENOMENO

3.1 Modelo Viscoelástico

Como se explico anteriormente, el hormigón presenta un comportamiento mecánico diferido de alta complejidad, en el cual pueden distinguirse diferentes etapas. En la Figura 1 se aprecia que el proceso de deformación bajo carga sostenida implica la coexistencia de 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 interacción explicado anteriormente, y no pueden recuperarse.

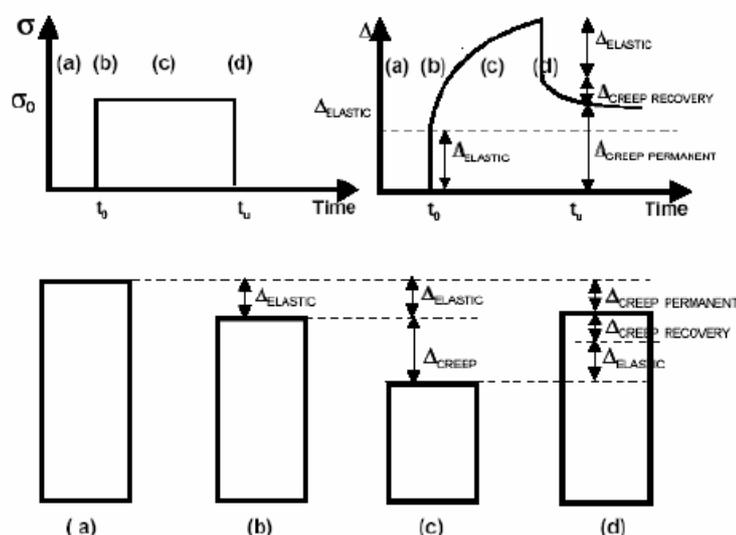


Figura 1: Deformaciones en proceso de fluencia: (a) longitud original, (b) deformación elástica, (c) carga en creep, y (d) deformación permanente bajo carga sostenida

Debido a este comportamiento del hormigón, para una simulación precisa del fenómeno es necesaria la combinación de diferentes modelos reológicos para cada etapa del proceso de degradación. Desde el punto de vista numérico, es conveniente el empleo de una cadena viscoelástica de Maxwell para la modelación en el rango de deformaciones recuperables, 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 otro lado, las formulaciones diferenciales sólo requieren el almacenamiento en memoria del valor de la tensión 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

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

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:

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

3.2 Modelo viscoplástico de interfase

En el rango no lineal del proceso de interacción creep-fractura, la degradación de la matriz de rigidez puede considerarse a nivel mesomecánico en términos de una ley constitutiva elasto-viscoplastica de junta, ver Etse et al.(2004a). La extensión de dicha ley para incluir efectos de tasa/tiempo se realiza a través de la teoría de Perzyna (1963, 1966) mediante el concepto de viscoplasticidad continua, Etse y Willam (1997), Carosio et al. (2000), Etse et al (2004a), Lorefice et al. (2006). En este modelo, la superficie de fluencia que delimita el estado elástico del viscoplástico en una interfase dada toma la forma

$$\bar{F} = \sigma^2 - (c - \tau \tan \phi)^2 + (c - \chi \tau \tan \phi)^2 - (\dot{\lambda} \eta)^{1/N} \quad (8)$$

siendo σ y τ las componentes de tensión normal y tangencial respectivamente, χ la resistencia a tracción (vértice de la hipérbola), c la cohesión aparente (resistencia al corte) y ϕ el ángulo de fricción interna. N representa el exponente de Perzyna, el cual regula la sensibilidad del modelo a la tasa de deformación. La dependencia con el tiempo/tasa se introduce con el producto $(\dot{\lambda} \eta)$, siendo $\dot{\lambda}$ la tasa del multiplicador viscoplastico y η la viscosidad. Considerando una interfase típica, el modelo de fractura plantea dos escenarios extremos para la definición de la variable viscoplastica de estado. La energía disipada durante el proceso tiempo-dependiente se expresa como

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

con \mathbf{t} el vector tension en la interfase y \mathbf{u}^{ver} el vector de desplazamientos criticos. La regla de flujo viscoplastica se expresa como

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

con el vector de flujo definido como

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

De este modo, la no-asociatividad del modelo se plantea en función de la matriz de transformación \mathbf{A} que determina la pérdida de normalidad durante la evolución del proceso de apertura de fisura \mathbf{u}^{ver} en la forma siguiente:

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

Los términos f_c^{dil} and f_σ^{dil} introducen el efecto de la dilatación en régimen de compresión por medio de una reducción en la componente normal del vector de tensiones, siguiendo una función lineal

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

con c_0 el valor inicial de la cohesión y σ_{dil} el valor de tensión normal para el cual la dilatación se anula. La forma viscoplastica continua de las ecuaciones de la elastoplasticidad clásica para el caso del modelo de interfase pueden escribirse en la forma siguiente

$$\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}^{el} + \dot{\mathbf{u}}^{ver} \quad (14)$$

$$\dot{\mathbf{u}}^e = (\mathbf{E})^{-1} \dot{\mathbf{t}} \quad (15)$$

$$\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{E}(\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^{ver}) \quad (16)$$

donde $\dot{\mathbf{u}}$ representa la tasa de desplazamientos relativos que se supone descompuesta en una parte elástica $\dot{\mathbf{u}}^e$ y otra viscoplastica $\dot{\mathbf{u}}^{ver}$, \mathbf{E} es la matriz de rigidez elástica, la cual posee una estructura diagonal con términos no nulos iguales a la rigidez normal y de corte del material, E_N y E_T , respectivamente. El punto de partida del proceso numérico es el planteo de la denominada condición de consistencia viscoplastica continua, la cual para el modelo de interfase toma la forma

$$\dot{\bar{\mathbf{F}}} = \mathbf{n}^T \dot{\mathbf{t}} + \bar{r} \dot{q}^{ver} + s \dot{\lambda} = 0 \quad (17)$$

con

$$\bar{\mathbf{r}} = \left(\frac{\partial F}{\partial c} \frac{dc}{dq^{ver}} + \frac{\partial F}{\partial \chi} \frac{d\chi}{dq^{ver}} \right) \quad (18)$$

y

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

Los parámetros de estado del modelo evolucionan durante el proceso de carga, y son función de los parámetros originales de la superficie, χ , c . El sistema de ecuaciones resultante es no-lineal, y 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 (2006).

4. ANALISIS COMPUTACIONAL

A fin de evaluar la performance numérica de las distintas situaciones que pueden presentarse para el análisis de problemas de deformación diferida y la incidencia de la tasa de deformación en el proceso de fractura a nivel mesomecanico, es necesario distinguir entre las distintas fases componentes del hormigón, y las zonas de interfase entre las mismas. En este sentido, se considera al hormigón constituido por dos fases continuas, el agregado y el mortero. Las interfases entre las mismas se modelan mediante juntas de espesor nulo, las que se distinguen entre juntas mortero-mortero y juntas mortero-agregado. Estas últimas se modelan mediante la misma ley viscoplastica a la que se asigna una viscosidad nula. Los distintos casos analizados se muestran en la Figura 2, en la que se indican 4 variantes típicas mediante parcelas de elementos de medio continuo y de junta que representan una porción de la estructura mesomecánica del material, siendo todas las mallas de dimensiones 4 cm x 12 cm. Los ensayos numéricos consisten en la imposición de un estado de carga con una determinada velocidad de aplicación bajo control de fuerzas hasta alcanzar el 90 % de la resistencia característica a tracción de un hormigón normal ($f_t = 2$ MPa). Las distintas fases de medio continuo (agregados y mortero cementicio) se caracterizan mediante diferentes parámetros elásticos. Para el agregado, $E_{agr} = 70000$ MPa, mientras que para el mortero $E_{mor} = 25000$ MPa. En ambos casos se considera un coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$. La resistencia a la tracción directa de las juntas es de 2 MPa, mientras que la cohesión o resistencia al corte es de 7 MPa. La carga se aplica en 10 incrementos iguales hasta alcanzar el nivel de tensión deseado. Una vez logrado esto, la fuerza aplicada se mantiene constante y se deja pasar el tiempo a fin de estudiar el comportamiento diferido del conjunto. En todos los casos se asigna al mortero una ley viscoelástica de Maxwell, y se analizan distintas alternativas para el

comportamiento de las interfases, considerándose que las interfases mortero mortero son siempre viscoplásticas, mientras que las interfases mortero-agregado pueden ser elastoplásticas o viscoplásticas (alternativas a) y b) respectivamente). Se distinguen entonces las siguientes variantes en los cuatro casos:

- a) Mortero viscoelástico, agregados elásticos y juntas mortero-mortero viscoplásticas y juntas mortero-agregados elastoplásticas
- b) Mortero viscoelástico, agregados elásticos y todas las juntas viscoplásticas

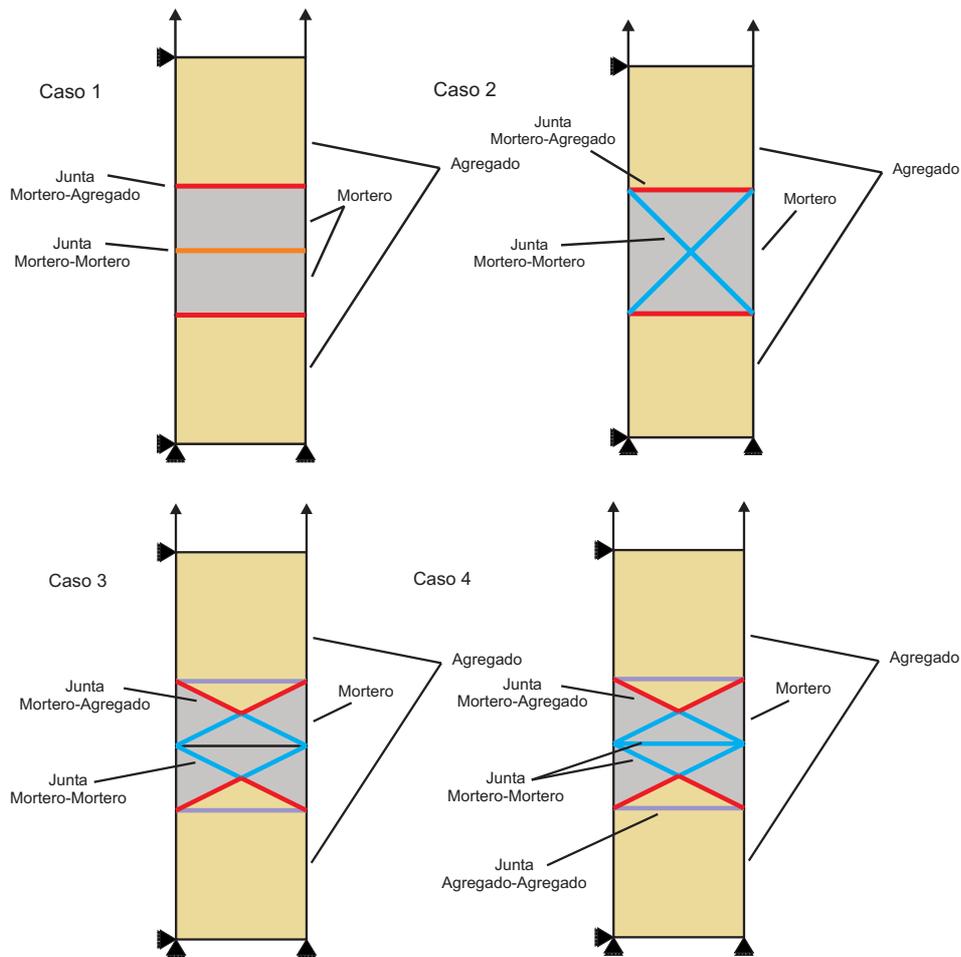


Figura 2: Esquemas mesomecánicos – Casos 1 a 4

La consideración de distintas leyes constitutivas para las interfases de mortero-mortero y mortero-agregado obedecen al hecho de que dichas interfases poseen en general un comportamiento mecánico diferido marcadamente diferente. En relación a los casos indicados en la Figura 2, el Caso 1) se trata de juntas sometidas a tracción pura, mientras que en el Caso 2) se analiza el comportamiento del modelo para estados combinados de tracción-corte en el mortero y solo tracción en las interfases mortero-agregado. El Caso 3) presenta estados combinados de tracción-corte en ambos tipos de interfase y el Caso 4) incluye una junta de tracción en la matriz del mortero combinada con las juntas inclinadas sometidas a tracción-corte. Los resultados obtenidos para los distintos casos pueden apreciarse en las Figuras 3 a 6, en las que se presentan los resultados en términos del desplazamiento en el tiempo de los nodos superiores de la malla.

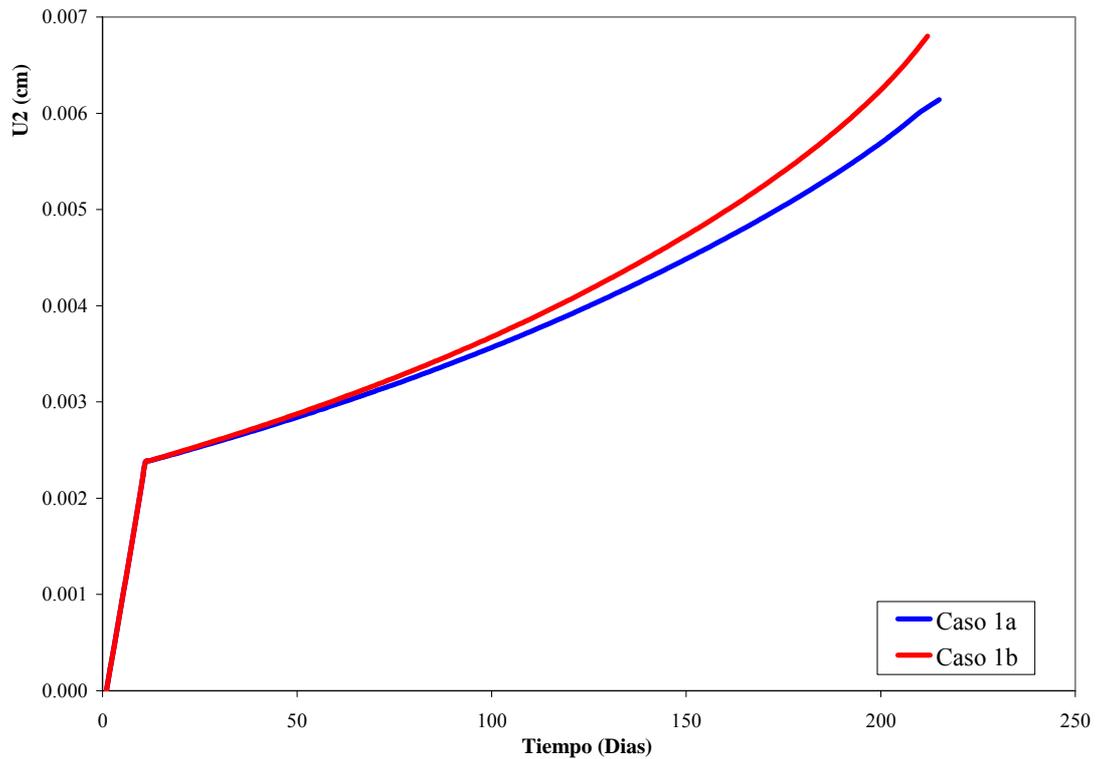


Figura 3: Deformación diferida Casos 1a, b

Tal como se aprecia en las Figuras 3 a 6, en todos los casos la alternativa b) que corresponde a todas las juntas viscoplásticas presenta más sensibilidad a la deformación con el paso del tiempo, con una pendiente negativa mayor de la curva. Entre los cuatro casos analizados, es claro que la situación más desfavorable para la probeta es la de tracción pura, dado que en este caso se desarrolla la deformación máxima antes de los 250 días. El caso 4 presenta un comportamiento similar, ya que al existir una junta mortero-mortero central, la misma gobierna el proceso de deformación diferida. Los casos 2 y 3 muestran la incidencia de las juntas inclinadas en la respuesta diferida, activándose en las mismas estados combinados de tracción-corte que retardan la deformación diferida, ya que al ser mayor la resistencia a corte, no se presenta una deformación diferida cortante de la misma magnitud que la de tracción pura, produciéndose un efecto global de retardo en la componente vertical total del desplazamiento de la malla. A esta situación contribuye también la presencia de la junta elastoplástica (inviscida) entre mortero y agregado, la cual no contribuye al efecto diferido.

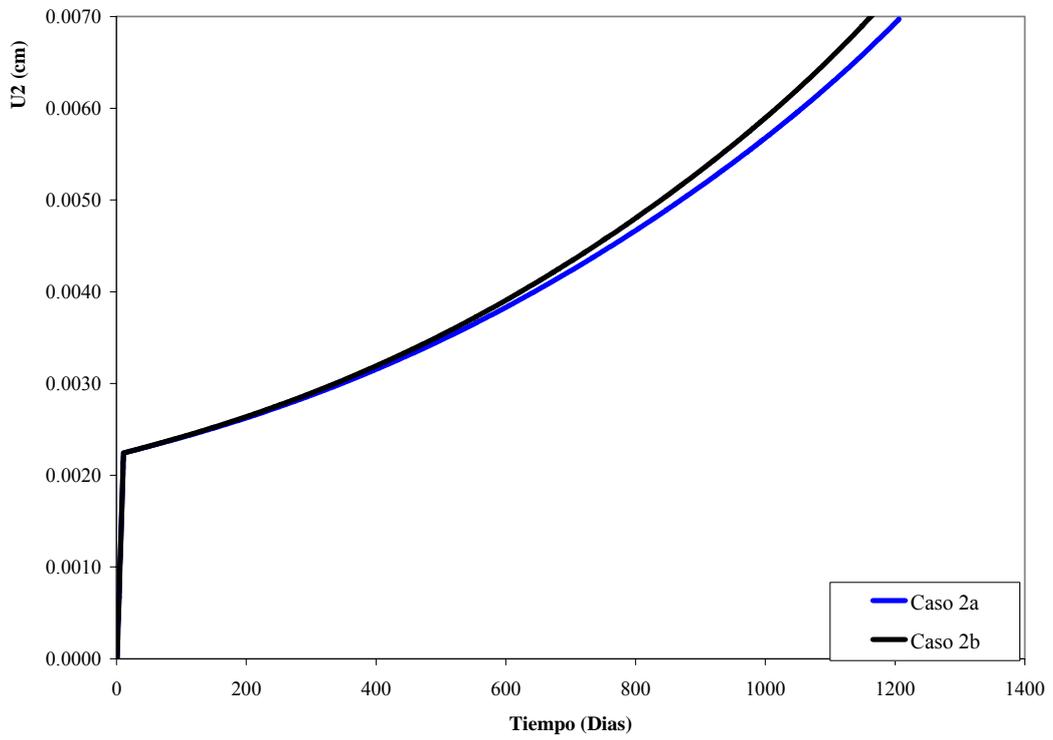


Figura 4: Deformación diferida Casos 2a, b

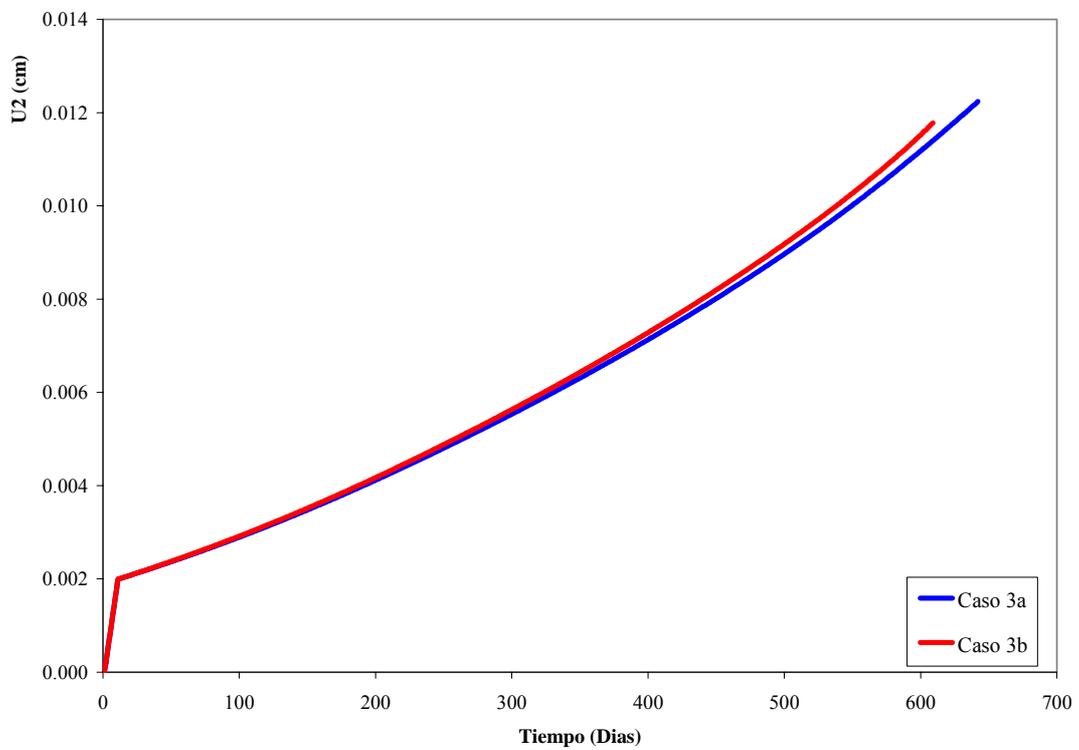


Figura 5: Deformación diferida Casos 3a, b

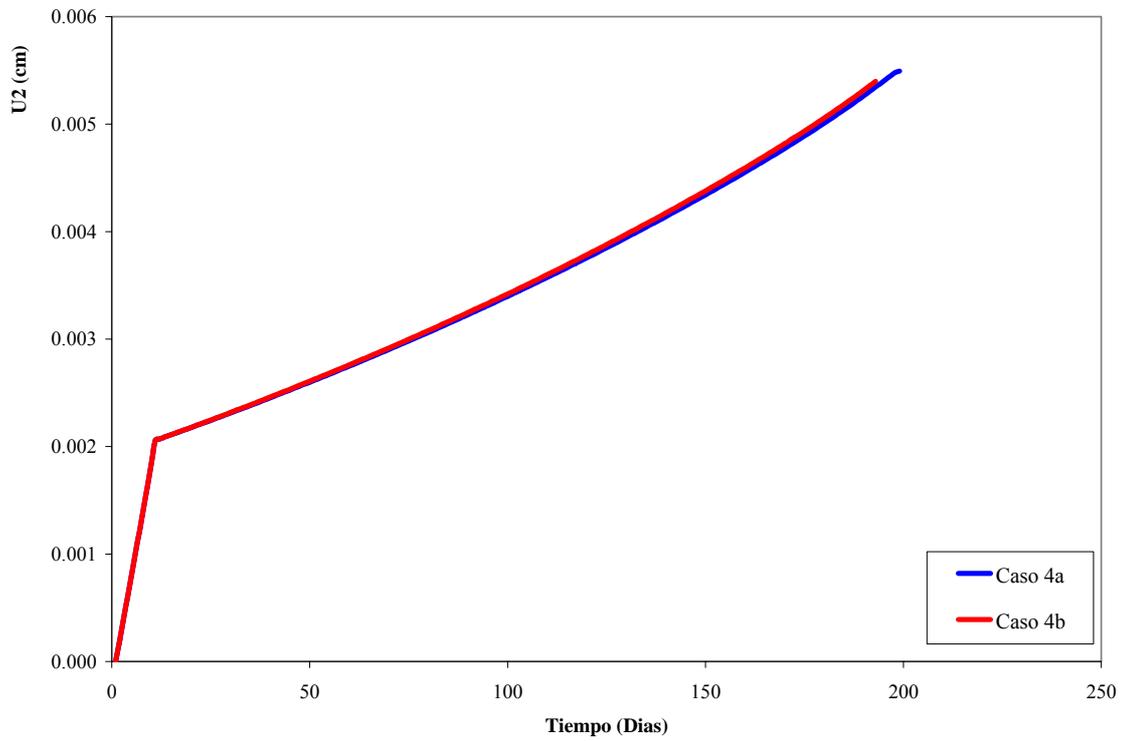


Figura 6: Deformación diferida Casos 4a, b

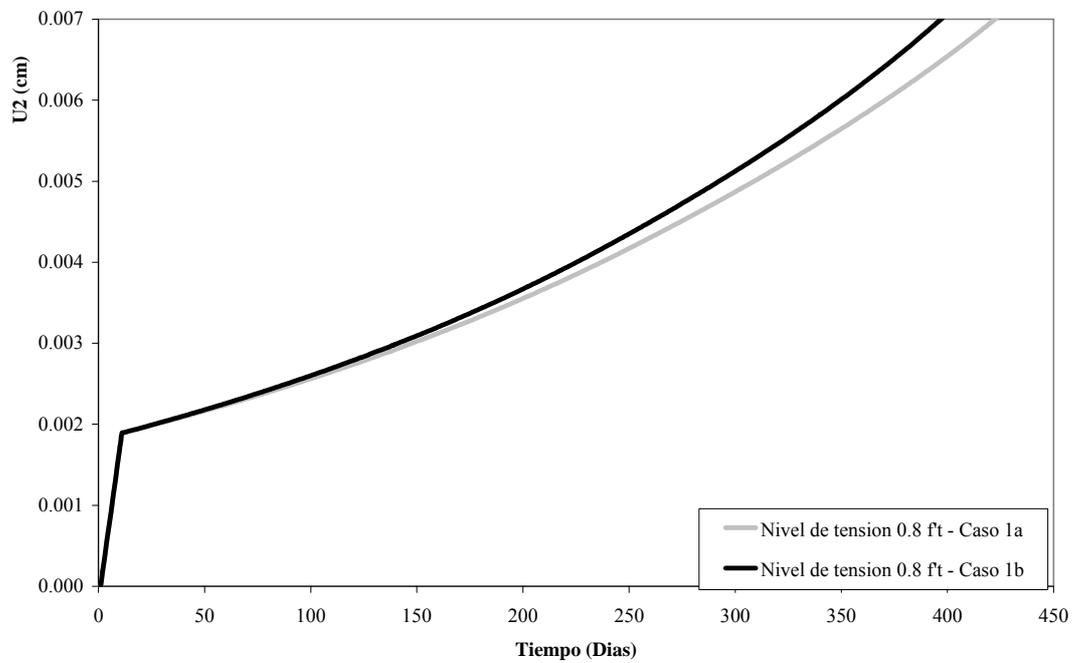


Figura 7: Influencia del nivel de tensión, Casos 1a, b

La incidencia del nivel de carga aplicada/resistencia ultima a tracción en el proceso de deformación diferida se muestra en la Figura 7, en la que se puede apreciar que la magnitud

de la tasa de aplicación de la carga tiene un efecto relevante en la magnitud de la deformación diferida. La carga aplicada representa un 80 % de la carga última, es decir, una reducción respecto al Caso 1 presentado en la Figura 3 de un 12%. Comparando los valores de los desplazamientos diferidos máximos de cada caso, vemos que la reducción de la carga implica que la magnitud del desplazamiento máximo de los nodos superiores es menor para el mismo instante de observación, lo cual se debe a que para menores niveles de carga corresponde una menor degradación de la estructura interna de la probeta. En las Figuras 8 a 15 se presentan los contornos de disipación de energía en los casos 1 a 4. Como se observa en las Figuras 3 a 6, en todos los casos se produce el desarrollo de una rama de creep secundario sin creep primario, mientras que la rama de creep terciario se presenta antes en el caso b) que en el caso a), debido a la presencia de una mayor proporción de juntas viscoplásticas y al efecto de acoplamiento entre la tasa de deformación y el proceso de creep. Comparando las Figuras 8 y 9 se observa que el patrón de disipación de energía de las alternativas a) y b) refleja claramente que el caso b) representa una distribución de la disipación entre las juntas mortero-mortero y mortero agregado, mientras que en el caso a) la mayor parte de la misma se concentra en la junta central mortero-mortero. Los casos 2 y 3 muestran un comportamiento similar del patrón de disipación, mientras que el caso 4 vuelve a demostrar la concentración de la deformación en la junta central, debido a que esta junta esta orientada con la dirección del esfuerzo predominante.

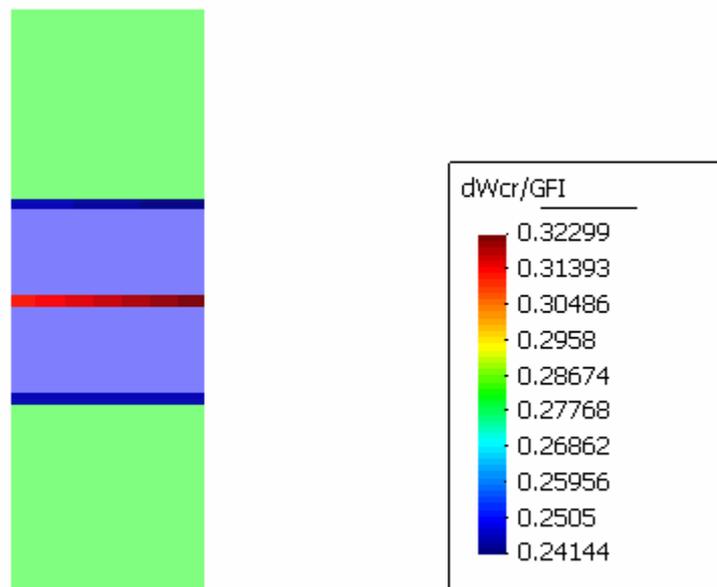


Figura 8: Disipación de energía Caso 1a

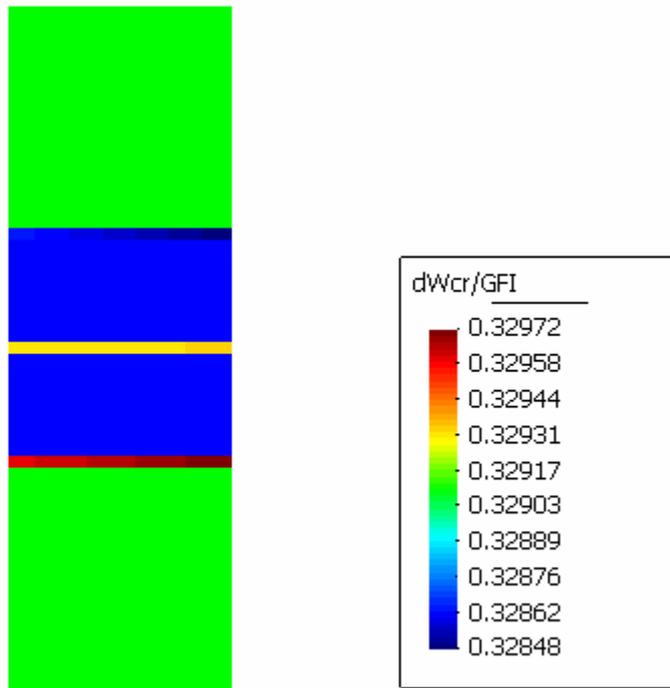


Figura 9: Disipación de energía Caso 1b

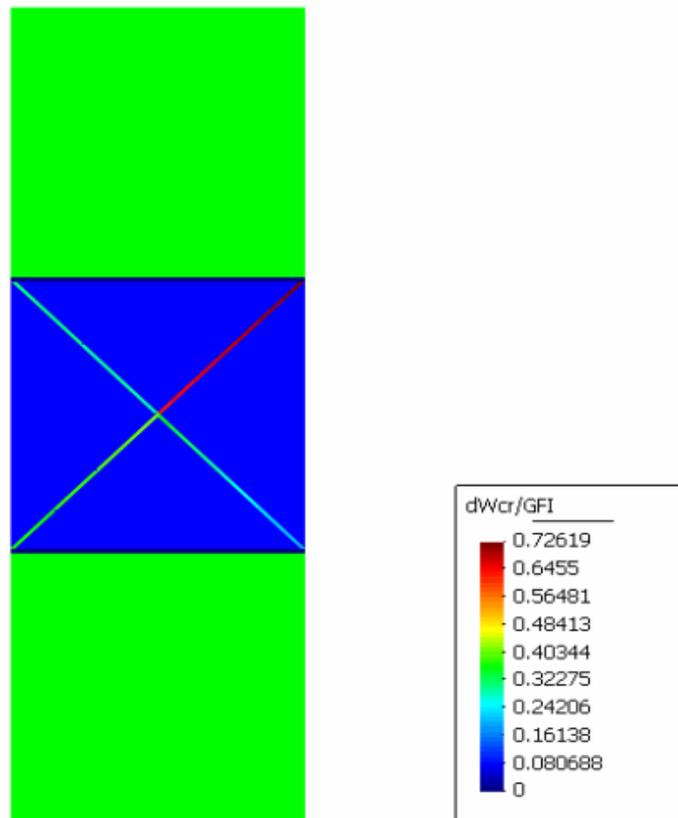


Figura 10: Disipación de energía Caso 2a

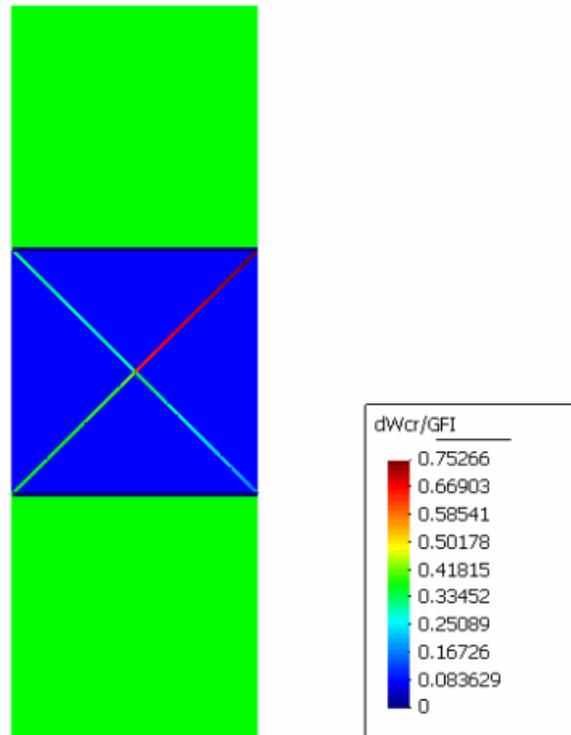


Figura 11: Disipación de energía Caso 2b

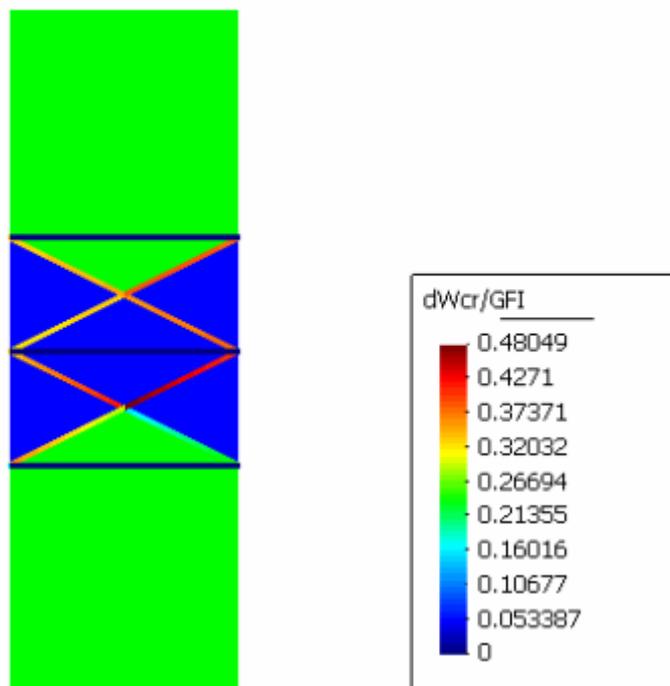


Figura 12: Disipación de energía Caso 3a

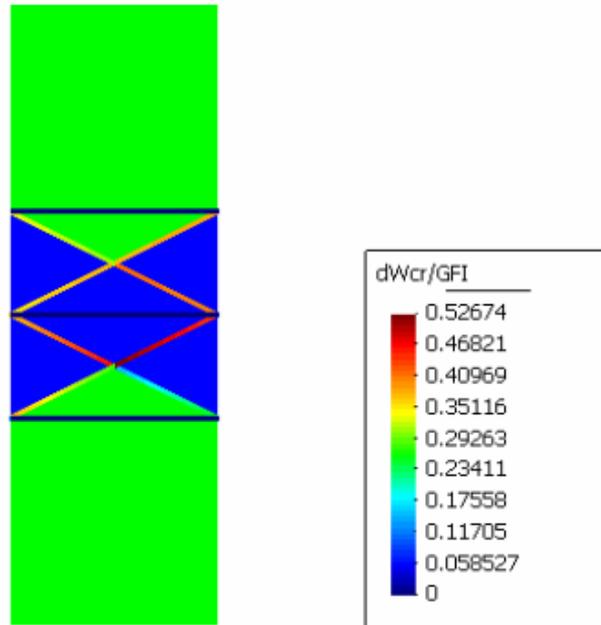


Figura 13: Disipación de energía Caso 3b

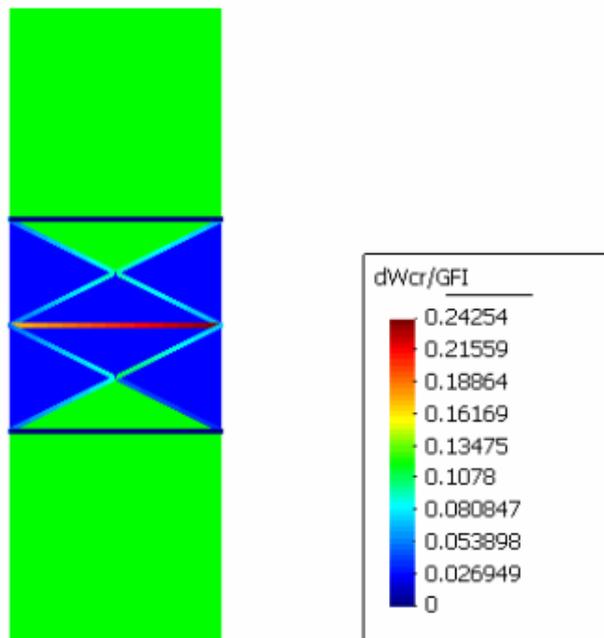


Figura 14: Disipación de energía Caso 4a

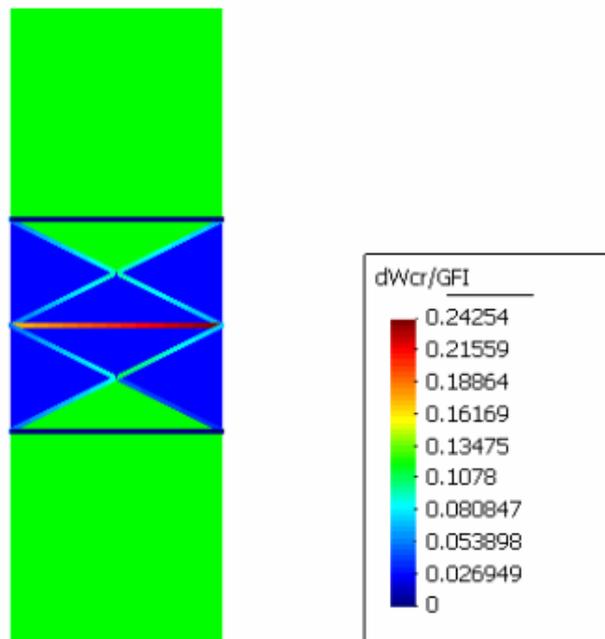


Figura 15: Disipación de energía Caso 4b

5. CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis a nivel mesomecánico de diversos casos que combinan modelos constitutivos diferentes para la representación de las interfases mortero-mortero y mortero-agregado en una parcela de elementos finitos con diversas configuraciones posibles a nivel mesomecánico. Los resultados obtenidos combinando las teorías de la viscoelasticidad, elastoplasticidad y viscoplasticidad indican que la mayor dependencia de la deformación diferida en el tiempo corresponde a la situación en que se combinan juntas tiempo-dependientes tanto en las interfases agregado-mortero como en las mortero-mortero. La respuesta global y en particular el tiempo transcurrido a la rotura, definida aquí como el tiempo para el cual se produce el inicio de la rama de creep terciario, depende fuertemente de la configuración interna de la malla, en particular, de la disposición geométrica de las interfases a las que se asigna la ley de junta basada en la viscoplasticidad. Esta configuración de las juntas incide en la formación del patrón de falla y por ende en el nivel de acoplamiento que pueda generarse entre el proceso de deformación diferida y el proceso de fractura que se produce en las juntas que componen la parcela. Como se ha observado en los resultados numéricos presentados, si bien la rotura diferida se alcanza en todos los casos estudiados, el tiempo transcurrido para el desarrollo de la rama de creep terciario es menor en el caso en que las interfases se someten a tracción directa. Desde el punto de vista cualitativo, los resultados obtenidos son consistentes con diversos ensayos experimentales que indican que el hormigón normal tiende a fallar a tiempos menores bajo estados directos de tracción sostenida. Los resultados obtenidos indican que la ley viscoplastica de junta puede emplearse para simular procesos de falla diferida en tracción directa bajo estados tensionales que incursionan en el rango no-lineal, dado que sus características permiten una correcta representación del proceso de fisuración de los elementos de hormigón.

6. REFERENCIAS

- 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., Bai S.P. and Gettu, R., "Fracture of Rock: Effect of loading rate". *Engrg. Fracture Mechanics*, 45, Págs. 393-398, (1995).
- Bazant, Z.P., Jirasek, M. "R-Curve Modeling of Rate and Size Effects in Quasi-Brittle Materials". *Int. Journal of Fracture*, 62, pags. 355-373, (1993).
- 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).
- Carol, I., Murcia, J., "A Model for Non-Linear Time Dependent Behavior of Concrete in Compression Based on a Maxwell Chain with Exponential Algorithm". *Materials and Structures*, 22, pags. 176-184, (1989).
- 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).
- Chen, Z. and Wang, M.L., "A partitioned - solution method with moving boundaries for nonlocal creep damage for concrete". Proc. Creep and shrinkage of concrete, *Fifth international RILEM symposium*, Barcelona-London, Págs. 393-398, (1993).
- Collins, T.M., "Proportioning high-strength concrete to control creep and shrinkage". *ACI Materials Journal*, 86, (6), Pags. 576-580, (1989).
- 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).
- Etse, G., Willam, K., "Failure Analysis of Elastoviscoplastic Material Models". *Journal of Engrg. Mechanics*, (125), 1, pp. 60-69, (1999).
- Ishai, O., "Influence of sand concentration on deformation of mortar beams under low stresses". *ACI Journal*, (58), Págs. 611- 622, (1962).
- Karihaloo, B.L., Santhikumar, S., "Application of visco-elastic tension-softening constitutive model to cracked and ageing concrete. *Construction and Building Materials*, 13 (1), pags. 15-21, (1999).
- 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).
- 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).
- Mazzotti C., Savoia, M. and Tralli, A., "An Isotropic Model for Non-linear Creep of Concrete in Compression. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, De Borst & al. (Eds), pags. 255-262, (2001).
- Neville, A. (1972), "Properties of concrete". *North Holland Publishing Company*, Amsterdam. The Netherland.

- Neville, A. (1996), "Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed". *North Holland Publishing Company*, Amsterdam. The Netherland.
- 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).
- Rossi, P., "Une nouvelle approche concernant le fluage et la relaxation propres du beton". *Bull. Liais. Lab. Ponts et Chaussees*, 153, Págs. 73-76, (1988).
- Rusch, H., "Researchs toward a general flexural theory for structural concrete". *ACI Journal*, Vol 32, 1, Págs. 1-28, (1960).
- Tandon, S., Faber K.T., Bazant, Z.P. and Li, Y.N., "Cohesive crack modeling of influence of sudden changes in loading rate on concrete fracture". *Engrg. Fracture Mechanics*, 52(6), págs. 987-997, (1995).