

ESTUDIO MESOMECAÁNICO DE LA FRACTURA DEL HORMIGÓN PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE CARGA

Ricardo Lorefice*, Guillermo Etse**, Carlos M. López***, Ignacio Carol***

*Grupo de Mecánica Computacional de la UNSE
Universidad Nacional de Santiago del Estero
Av. Belgrano (s) 1912, 4200 Santiago del Estero, Argentina

**Centro de Métodos Numéricos y Computacionales en Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

***E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, C/ Jordi Girona Salgado 1-3, Campus Nord, Universitat Politècnica de Catalunya, 08034 Barcelona, España.

Resumen. En este artículo se analiza el comportamiento del hormigón a un nivel mesomecánico de observación bajo cargas de tracción uniaxial dependientes del tiempo. Como punto de partida se ha empleado un modelo mesoestructural en 2D para materiales heterogéneos basado en elementos junta de espesor nulo, desarrollado dentro del grupo de investigación de la ETSECCPB-UPC. En este modelo, la estructura interna del material se representa explícitamente y las interfases se insertan a priori entre los elementos estándar del medio continuo, a lo largo de las principales potenciales trayectorias de fisuración. A partir de una ley constitutiva de junta elastoplástica, se ha incorporado una formulación viscoplástica continua basada en la teoría de Perzyna, lo que permite tener en cuenta la influencia del tiempo en el comportamiento mecánico de los elementos de interfase. Con el modelo mesoestructural se analiza el comportamiento de falla del hormigón bajo velocidades de cargas diferenciadas. Los resultados obtenidos reflejan en forma precisa la sobrerresistencia del hormigón cuando es sometido a acciones mecánicas que trascienden el régimen cuasi-estático de carga.

Abstract. In this paper, concrete behaviour at mesomechanical level of observation under rate-dependent uniaxial tensile loads is studied. As starting point, we use a 2D mesostructural model for heterogeneous materials based on zero -thickness finite elements developed at the research group of the ETSECCPB-UPC. In this model, the internal structure of the material is explicitly represented, and interfaces are inserted a priori between the standard continuum elements, along the main potential crack trajectories. An elastoplastic constitutive law had been enhanced by a rate-dependent continuous viscoplastic formulation based on the viscoplastic theory formulated by Perzyna, which allows to capture the influence of rate effects in the mechanical behavior of the interface elements. The failure behaviour of concrete under different velocities of loading is analyzed by the mesostructural model. The obtained results match very well the observed over-strength under load histories beyond the quasi-static regime.

1. INTRODUCCIÓN

Como es conocido, el hormigón es un material que presenta un comportamiento mecánico altamente complejo, dominado en gran medida por fenómenos de fisuración y fractura. En general, la mayoría de modelos desarrollados para simular y reproducir el comportamiento observado experimentalmente, se basan en un enfoque macroscópico, de tipo fenomenológico, que supone que el material es un medio homogéneo. Sin embargo, una de las características fundamentales que determinan la compleja respuesta mecánica del hormigón, y de los materiales cuasifrágiles en general, es su composición heterogénea.

Por esta razón, desde hace aproximadamente dos décadas, se comenzaron a desarrollar modelos del

material en los que la microestructura de primer nivel (mesoestructura) se representa explícitamente y se introducen leyes de comportamiento de sus componentes básicos. Este tipo de planteamiento resulta mucho más potente, y a pesar de sus limitaciones, permite investigar mecanismos más fundamentales subyacentes a muchos de los comportamientos macroscópicos observados.

Por otra parte, un aspecto fundamental que no ha sido suficientemente explorado hasta el presente es el relacionado con el comportamiento del hormigón frente a acciones de tipo dinámico. Esto es de suma importancia debido a que es muy común que las estructuras de hormigón se vean solicitadas por cargas de este tipo, por ejemplo durante la ocurrencia de sismos, impacto, vibraciones, etc. (Figura 1). Esencialmente, se pueden considerar dos tipos de

efectos tiempo-dependientes: por un lado la influencia de la tasa de deformación en el desarrollo del proceso de fractura, y, por otro lado, fenómenos de fluencia lenta y relajación, bajo carga constante o bajo una deformación sostenida, respectivamente.

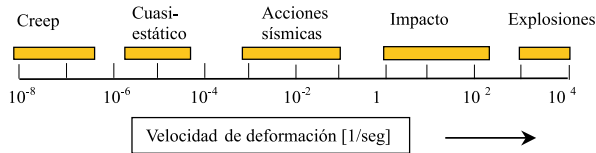


Fig. 1. Velocidad de deformación bajo diferentes acciones [1].

En este trabajo, la atención se centra en la respuesta mecánica relacionada con el incremento de la tasa de deformación y su influencia en el proceso de fractura para un rango moderado de velocidades de carga comprendidas entre $1.10^{-6} \text{ seg}^{-1}$ y 1.0 seg^{-1} , correspondientes a la mayoría de las cargas dinámicas consideradas por los reglamentos de construcciones (sismos, viento, acción vibratoria de máquinas, etc.).

Para el análisis numérico se emplea un modelo mesoestructural en el cual una probeta de hormigón se representa mediante piezas irregulares correspondientes a los áridos de mayor tamaño rodeadas por una matriz de mortero. A fin de posibilitar la no linealidad de comportamiento, mecanismos de rotura y fisuración, etc., la malla de elementos finitos (EF) incluye elementos junta sin espesor, que se distribuyen a lo largo de todos los contactos entre elementos árido-mortero (interfase) y entre algunos de los contactos de elementos de la matriz, con el objeto de representar las principales direcciones potenciales de fisuración.

Para modelizar el comportamiento de los elementos junta se ha utilizado la ley constitutiva que se describe brevemente en el apartado 3. Se ha adoptado una topología inicial de áridos obtenida según el procedimiento propuesto por Stankowski [2] para dos tipos de distribuciones, de 16 y 36 piezas de árido dispuestas aproximadamente en arreglos de 4×4 y 6×6 , respectivamente. La discretización de los elementos finitos de mortero, sin embargo, se ha planteado de una manera diferente, siguiendo la propuesta de Vonk [3], a fin de permitir una disposición menos intrincada de las juntas en el interior de la matriz.

En la Figura 2 se presenta un ejemplo de discretización para el arreglo de 36 áridos. Las figuras 1a y 1b muestran de manera diferenciada, la discretización correspondiente a la matriz de mortero y a los áridos, respectivamente. La figura 1c presenta la disposición de las juntas, mientras que en la figura 1d puede apreciarse de manera esquemática la disposición de nodos y elementos en una zona de la malla.

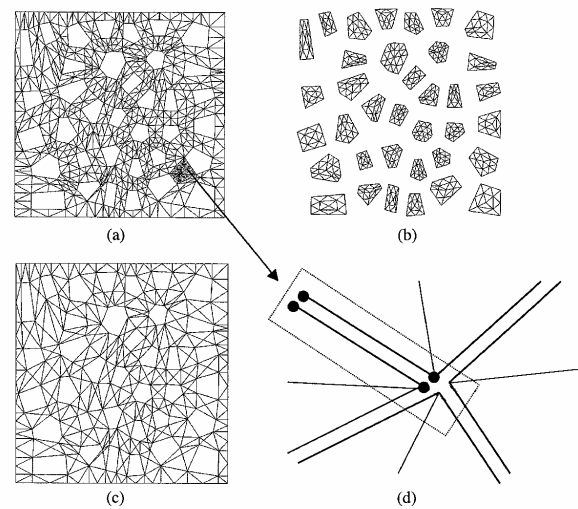


Fig. 2. Malla de EF para el arreglo de áridos de 6×6 : a) elementos de mortero, b) elementos de áridos, c) disposición de las juntas, d) detalle de la discretización.

2. COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN BAJO CARGAS DINÁMICAS

Existe en la literatura un amplio número de investigaciones experimentales desarrolladas con el objeto de comprender la respuesta dinámica del hormigón [4-9]. Cada clase de ensayo es válido para determinados rangos de velocidades de aplicación de la carga. La elección de uno u otro tipo de dispositivo de prueba es función del rango de velocidades en estudio en cada caso particular. En los ensayos experimentales con tasas de deformación entre 10^{-6} seg^{-1} y 1.0 seg^{-1} se han empleado dispositivos hidráulicos [7]. Para velocidades de carga mayores, entre 1 seg^{-1} y 10 seg^{-1} se han usado dispositivos de impacto tipo martillo [8], mientras que para ensayos experimentales con tasas de deformación mayores se emplea el dispositivo denominado barra de presión de Hopkinson (*Split Hopkinson Pressure Bar - SHPB*), [9].

En base a la amplia evidencia experimental disponible y, pese a la fuerte dependencia del método de ensayo en los resultados obtenidos por distintos autores, se pueden extraer algunas observaciones generales. En primer lugar, existe una amplia coincidencia con respecto a que el material experimenta una rigidización que es fuertemente dependiente de la velocidad de aplicación de la carga. En la Figura 3 se muestra la variación del factor de sobrerresistencia dinámica en ensayos de tracción en función de la tasa de deformación para un rango de la misma entre 10^{-6} seg^{-1} y 10^4 seg^{-1} . Como se puede apreciar, existe una fuerte dispersión entre los resultados obtenidos por los distintos investigadores, alcanzándose relaciones de hasta 10 veces el valor de la resistencia estática en algunos casos. En la misma figura, se muestra la relación de resistencia dinámica recomendada por el Comité Europeo del Hormigón (CEB) para hormigones

con una resistencia característica a compresión de 30 MPa.

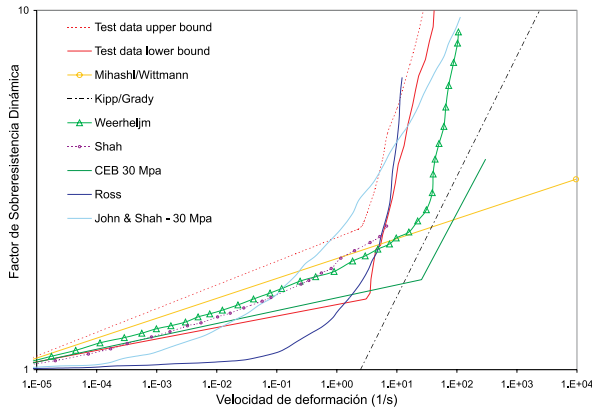


Fig. 3. Variación del factor de sobrerresistencia dinámica (FSD) en ensayos de tracción uniaxial.

Otro importante resultado obtenido de los ensayos es que la sobrerresistencia dinámica alcanzada es mayor en el caso de ensayos de tracción que en compresión, siendo de más del 200 % en el primer caso (figura 4) y de alrededor del 40 % en el segundo, para velocidades de deformación de hasta 1.0 seg^{-1} [4]. La rigidización experimentada por el hormigón ante el incremento de la velocidad de carga se atribuye generalmente a la influencia de los efectos inercial y viscoso en el proceso de microfisuración. En este trabajo se analiza la influencia del efecto viscoso mediante un análisis mesomecánico que emplea una formulación de junta elasto-viscoplástica.

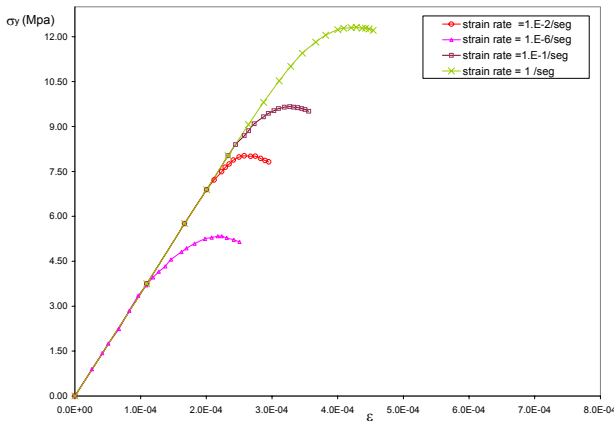


Fig. 4. Variación de la resistencia a tracción con la tasa de deformación en tracción [4].

3. MODELO ELASTO-VISCOPLASTICO DE JUNTA

Para el comportamiento de las interfases se utiliza una ley constitutiva no lineal formulada en términos de las tensiones en su plano medio y los desplazamientos relativos entre ambos lados de la junta. La ley constitutiva dependiente del tiempo empleada en este

trabajo, es una extensión de una formulación elastoplástica propuesta originalmente en [10] y desarrollada más detalladamente en [11-13]. Para este fin, a partir de la formulación clásica de la teoría viscoplástica de Perzyna [14,15], se ha adoptado una formulación continua que permite una generalización de la condición de consistencia para materiales viscoplásticos [16,17]. Este planteo consiste en incorporar un término dependiente de la tasa de deformación viscoplástica directamente en la expresión de la función de fluencia elastoplástica original, de modo que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\bar{F} = \sigma_n^2 - (c - \tau t g \phi)^2 + (c - \chi t g \phi)^2 - (\lambda \eta)^{1/N} \quad (1)$$

en la cual σ_n y τ son las componentes normal y tangencial de la tensión en la interfase, λ es el multiplicador viscoplástico, η representa la viscosidad y N es el denominador coeficiente de Perzyna, el cual determina la sensibilidad de la formulación con respecto a la velocidad de deformación ($N \geq 1$). Los parámetros χ , c y ϕ representan la resistencia a tracción (vértice de la hipérbola), la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna, respectivamente. La energía disipada durante el proceso de fractura se define como:

$$dW^{ver} = \sigma_n du_n^{ver} + \tau du_t^{ver} \text{ if } \sigma_n \geq 0 \quad (2)$$

$$dW^{ver} = \tau du_t^{ver} \left(1 - \left| \frac{\sigma_n t g \phi}{\tau} \right| \right) \text{ if } \sigma_n < 0 \quad (3)$$

donde u_n^{ver} y u_t^{ver} representan las componentes del desplazamiento relativo de apertura de fisura en la dirección normal y tangencial, respectivamente. El flujo viscoplástico se considera asociado en estados de tracción y no-asociado bajo estados de compresión [12,13]. La formulación constitutiva viscoplástica de la junta se completa con las ecuaciones siguientes:

$$\dot{\mathbf{u}} = \dot{\mathbf{u}}^e + \dot{\mathbf{u}}^{ver}, \quad \dot{\mathbf{u}}^e = (\mathbf{K}^0)^{-1} \dot{\boldsymbol{\sigma}} \quad (4)$$

$$\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbf{K}^0 (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}^{ver}) \quad (5)$$

donde $\dot{\mathbf{u}}$ es la tasa de desplazamientos relativos compuesta de una parte elástica $\dot{\mathbf{u}}^e$ y otra viscoplástica $\dot{\mathbf{u}}^{ver}$ y \mathbf{K}^0 la matriz de rigidez elástica (diagonal), con coeficientes de rigidez normal y tangencial $K_n^0 = K_t^0$. La condición de consistencia viscoplástica se plantea aquí en forma análoga a la teoría clásica:

$$\dot{\bar{F}} = \mathbf{n} \cdot \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \bar{r}_i \dot{q}_i - \frac{1}{N} \eta (\eta \lambda)^{1/N-1} \quad (6)$$

$$\bar{r}_i = \frac{\partial F}{\partial q_i} \frac{\partial q_i}{\partial W^{ver}} \quad (7)$$

$$\dot{q}_i = \frac{\partial W^{ver}}{\partial \mathbf{u}^{ver}} \mathbf{m} \dot{\lambda} \quad (8)$$

En la expresión (8), q_i representa el conjunto de variables internas o de historia que evolucionan

durante el proceso de carga viscoplástica. Una descripción más detallada de esta formulación tiempo-dependiente, incluyendo la obtención de la matriz tangente consistente puede consultarse en [18].

4. RESULTADOS

En esta sección se presenta la verificación del modelo de interfase viscoplástico para simular procesos de falla dinámica a nivel mesomecánico bajo estados de tracción pura. En primer lugar, se presentan una serie de ensayos numéricos con el fin de determinar la sensibilidad a la relación dinámica $\eta/\Delta t$ de diferentes estrategias de modelación para la mesoestructura del hormigón. Los casos considerados fueron los siguientes:

Caso 1) análisis a nivel macromecánico, empleando un modelo constitutivo elasto-viscoplástico de medio continuo formulado por Etse et al. [19-20].

Caso 2) análisis mesomecánico en el cual los elementos continuos representativos de los áridos se consideran elásticos, mientras que a los elementos correspondientes a la matriz de mortero se les asigna un comportamiento elasto-viscoplástico (sin juntas).

Caso 3) análisis mesomecánico en el que los elementos de medio continuo tienen las mismas características que el caso anterior, pero además se introducen elementos de interfase de espesor nulo (elementos de junta) entre los elementos continuos árido-matriz.

Caso 4) análisis mesomecánico, en el que los elementos continuos de árido y mortero se consideran elásticos, y se incluyen elementos junta a lo largo de todos los contactos entre elementos árido-mortero (interfase) y entre algunos de los contactos de elementos de la matriz. Para el comportamiento de las juntas de los casos 3 y 4 se utiliza la ley constitutiva viscoplástica presentada en la sección anterior. Las dos discretizaciones empleadas se muestran en la figura 5.

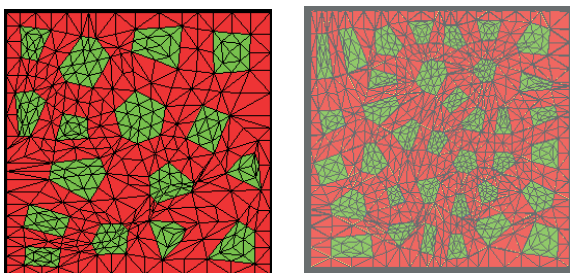


Fig. 5. Discretizaciones mesomecánicas para arreglos de árido de 4x4 y de 6x6 [12].

En las Figuras 6 y 7 se presentan los resultados del análisis para una relación $\eta/\Delta t = 0$ y $\eta/\Delta t = 100$, respectivamente, para los cuatro casos mencionados. El caso $\eta/\Delta t = 0$ corresponde a una simulación de muy baja velocidad (cuasi-estática). En el otro extremo, $\eta/\Delta t \rightarrow \infty$ nos sitúa en un estado de respuesta elástica, con una viscosidad infinita del dispositivo viscoso. La respuesta viscoelastoplástica se sitúa siempre entre

estos dos extremos. Se puede apreciar en las figuras que los casos 3 y 4 (con elementos junta) muestran respuestas más frágiles que los casos 1 y 2 (con no linealidad en los elementos de medio continuo), y que la respuesta post-pico de estos últimos resulta más sensible a la variación de la relación viscosidad / paso de tiempo, posiblemente debido a la influencia del efecto tamaño de los elementos continuos de la malla. En todas las simulaciones con $\eta/\Delta t = 100$ se han obtenido sobrerresistencias del orden de un 35 % superiores a la resistencia estática.

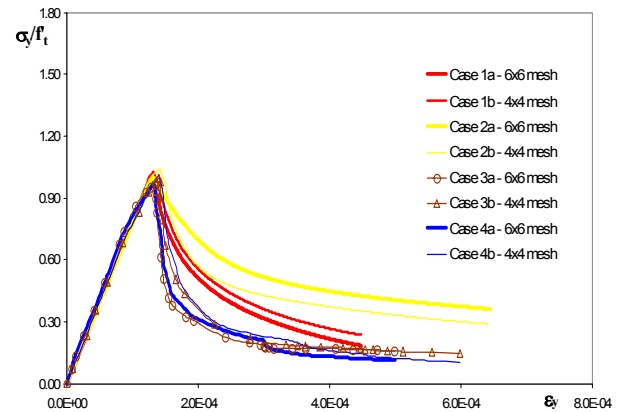


Fig. 6. Tracción uniaxial para $\eta/dt = 0$ (caso cuasi-estático, a) malla de 4x4 y b) malla de 6x6

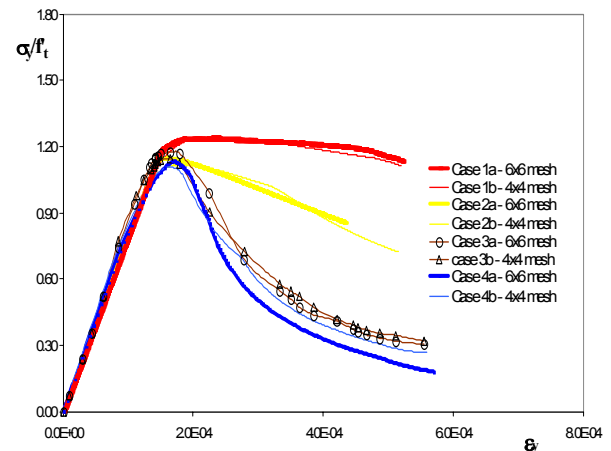


Fig. 7. Tracción uniaxial para $\eta/dt = 100$ (caso dinámico)

Finalmente, se han llevado a cabo ensayos numéricos de tracción a nivel mesomecánico con juntas viscoplásticas para diferentes tasas de velocidad, constantes para cada ensayo. El objetivo es reproducir la sobrerresistencia dinámica observada en ensayos experimentales de tracción simple. Previamente ha sido necesario realizar una calibración del modelo de junta con el objeto de lograr una evolución de la respuesta dinámica en función de la velocidad de deformación impuesta. El parámetro viscoso η no es independiente del proceso de carga. Esto puede verse claramente si se tiene en cuenta que la viscosidad es una función de la forma:

$$\eta = \eta(\sigma, \dot{\mathbf{u}}, T) \quad (9)$$

Es decir, la viscosidad depende del estado de tensión (nivel de tensión normal de confinamiento), de la velocidad de deformación y también de la temperatura. Para situaciones de tracción pura no existe presión de confinamiento y en nuestro caso la variación de la viscosidad con la temperatura no se considera. La calibración de la dependencia del parámetro viscoso con la variación de la tasa de deformación se ha llevado a cabo mediante un algoritmo de interpolación parabólica, obtenido a partir de una serie de simulaciones computacionales a nivel constitutivo en las que se ajusta el valor de la viscosidad para reproducir el valor pico observado en los ensayos experimentales. Este procedimiento tiene la ventaja de que a nivel de elementos finitos conduce a una mayor estabilidad del proceso numérico y evita los problemas de indeterminación que pueden producirse al emplear funciones analíticas.

En la Figura 8 se presentan los resultados obtenidos con el modelo de interfase viscoplástico para la discretización con arreglos de árido de 6x6. En la figura se incluyen los resultados experimentales presentados en [4] para un hormigón con una resistencia a tracción de $f'_t = 5.37$ MPa. Se puede apreciar una buena concordancia entre la respuesta numérica y la experimental para el rango de velocidades en estudio.

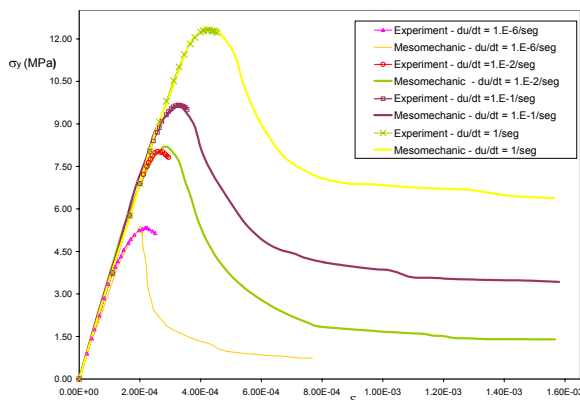


Fig. 8. Análisis mesomecánico en tracción pura vs. resultados experimentales de Suaris – Shah [4].

Desafortunadamente, los resultados experimentales disponibles sólo han permitido comparar el comportamiento hasta poco después de superado el valor de pico, sin proporcionar información acerca de la rama de post pico para las velocidades superiores a 10^{-6} seg^{-1} .

5. CONSIDERACIONES FINALES

Se ha presentado un análisis numérico a nivel mesomecánico del hormigón para diferentes velocidades de carga mediante el empleo de una

formulación constitutiva elasto-viscoplástica de junta desarrollada recientemente. El modelo está basado en el criterio de fisura cohesiva, combinado con una formulación material viscoplástica continua. Los resultados obtenidos han permitido reproducir el comportamiento observado experimentalmente en ensayos de tracción, en cuanto a la sobrerresistencia dinámica correspondiente a un rango moderado de velocidades de deformación. Actualmente estos estudios se extienden a cargas de compresión y ensayos biaxiales. También se está evaluando la capacidad del modelo para representar el otro extremo del espectro para tasas de velocidades muy bajas, correspondientes a problemas de fluencia básica del hormigón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los dos últimos autores agradecen al MEC (Madrid) la ayuda recibida a través del proyecto MAT2003-02481. Finalmente, se agradece a la ETSECCPB-UPC la bolsa de viaje concedida para asistir al XXII Encuentro del Grupo Español de Fractura.

7. REFERENCIAS

- [1] Bischoff P.H., Perry S.H., "Compressive behavior of concrete at high strain rates". *Materials and Structures* (24), pág. 425-450, (1991).
- [2] Stankowski T., "Numerical simulation of progressive failure in particle composites". PhD Thesis, University of Colorado, Boulder, Colorado, EE. UU (1990).
- [3] Vonk, R., "Softening of concrete loaded in compression". PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Postbus 513, 5600 MB Eindhoven, Netherlands (1992).
- [4] Suaris W., Shah S., "Rate-sensitive damage theory for brittle solids". *J. Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 110, N.6, pag. 985-997, (1984).
- [5] Reinhardt H.W., "Strain rate effects on the tensile strength of concrete as predicted by thermodynamics and fracture mechanics models". *Cement Based Composites: Strain Rate Effects on Fracture*, S. Mindess and S.P. Shah, editors, pag. 1-13, (1985).
- [6] Ross C.A., Tedesco J.W., Kuennen S.T., "Effects of strain rate on concrete strength". *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 1, January-February, pag. 37-47, (1995).
- [7] Bresler, B., Bertero V., "Influence of high strain rate and cyclic loading of unconfined and confined concrete in compression". *Proceedings of Second*

- Canadian Conference on Earthquake Engineering*. Hamilton, Ontario, págs. 1-13, (1975).
- [8] Watstein, D., "Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete". *ACI Journal*, 49 (8), pag. 729-744, (1953).
- [9] Ross C.A., Kuennen S.T., Tedesco J.W., "Effects of strain rate on concrete Strength". *ACI Spring Convention, Session on Concrete Research in the Federal Government*, Washington, D.C., March, (1992).
- [10] Carol I., Prat P.C., "Smearred analysis of concrete fracture using a microplane based multirack model with static constraint". J.G.M. van Mier, J.G. Rots and A. Bakker editors, *Fracture Processes in Concrete, Rock and Ceramics*, pag. 619-628, (1991).
- [11] Carol I., Prat P.C., López C.M., "Normal / shear cracking model: application to discrete crack analysis". *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 123 (8), pag. 765-773, (1997).
- [12] 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, España, (1999).
- [13] Carol, I., López C. M. y Roa, O., "Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements", *Int. J. Numer. Meth. in Engrg*, 52, 193-215 (2001).
- [14] Perzyna P., "The constitutive equations for rate sensitive materials". *Quarter of Applied Mathematics*, Vol. 20, pág. 321 - 332, (1963).
- [15] Perzyna P., "Fundamental problems in viscoplasticity". *Advances in Applied Mechanics*, 9, pag. 244-368, (1966).
- [16] Ponthot J.P., "Radial return extensions for viscoplasticity and lubricated friction". *Proc. International Conference on Structural Mechanics and Reactor Technology SMIRT-13*. Porto Alegre, Brazil, 2, pág. 711-722, (1995).
- [17] Carosio A., Willam K., Etse G., "On the consistency of viscoplastic formulations". *Int. J. of Solids and Structures*, Vol 37, pág. 7349-7369, (2000).
- [18] Etse G., Lorefice R., Carosio A., 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, pág. 301-305, (2004).
- [19] Etse, G., Willam K., "A fracture energy formulation for inelastic behaviour of plain concrete". *ASCE J. Mech. Div.*, 120(9), pag. 1983-2011, (1994).
- [20] Etse G., "Theoretische und numerische untersuchung zum diffusen und lokalisierten versagen in beton". Dr-Ing. Thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany (1992).