

ENSAYOS NUMERICO-COMPUTACIONALES DEL PROCESO DE FRACTURA DE HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

M. Ledesma^a, R. Lorefice^a y G. Etse^b

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

^b*CEMNCI, 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 – elementos de interfase – modelación mesomecánica

Resumen. Los avances de la tecnología de la construcción y la necesidad creciente de contar con estructuras cada vez más resistentes y esbeltas, acentúa la importancia del conocimiento del comportamiento de falla de los hormigones de alta performance (High Performance Concrete-HPC) o bien como se los conoce en nuestro medio HAR u Hormigones de Alta Resistencia. Este tipo de hormigones presenta una respuesta mecánica particularmente dependiente de diversos factores relativos a su mesoestructura como ser: calidad de los agregados, tipo de aditivos, características de cemento y relación agua-cemento. En este trabajo, se presenta un estudio computacional del comportamiento de falla de probetas de hormigón de alta resistencia empleando un criterio de análisis a nivel mesomecánico. Se analiza la incidencia de los parámetros de resistencia al corte y a la tracción en el comportamiento de falla bajo condiciones de compresión uniaxial. El modelo mesomecánico considera un comportamiento lineal elástico para los elementos finitos de medio continuo que componen las fases agregado y mortero. El proceso de fractura se captura mediante la inclusión de elementos finitos de interfase o juntas de espesor nulo equipados con una ley constitutiva viscoplástica, los cuales se disponen tanto en la matriz mortero, en los agregados y en las interfases mortero-agregado, permitiendo de este modo captar la incidencia de la configuración mesomecánica sobre el comportamiento de falla del conjunto.

1- INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de estructuras de hormigón cada vez más esbeltas y con formas arquitectónicas complejas, los requisitos de economía y espacio aun más exigentes, impulsa el empleo de los denominados “Hormigones de Alta Performance” en forma significativa. Si bien el término “performance” comprende propiedades esperables en este tipo de hormigones, como ser, alta resistencia inicial, durabilidad al congelamiento y deshielo, resistencia a la penetración al cloro, baja permeabilidad, etc., su elevada resistencia es la principal y más requerida característica. A principios de los años cincuenta, un hormigón de 35 MPa de resistencia a la compresión uniaxial era considerado de alta resistencia (HAR). Recientemente se han alcanzado resistencias de hasta 139 MPa en la construcción de edificios. Actualmente diversos investigadores lograron resistencias a compresión de 200 MPa, (Graybeal and Marshal, 2008), se ha construido ya en Canadá el 1^{er} Puente de una resistencia promedio a la compresión de 152 MPa (Perry, V.H., and Zakariassen, D., 2004) y está proyectado construir un puente que cruza el estrecho de Bakar, Croacia, con una resistencia de 200 MPa (Čandrlíe, V., Mandić, A. & Bleiziffer, J., 2001).

A pesar de la amplia difusión actual en el empleo de este tipo de hormigones, el conocimiento de su comportamiento mecánico bajo diversos tipos de acciones es aún precario, disponiéndose sólo de datos experimentales aislados y algunos ensayos sobre modelos numéricos dirigidos principalmente a evaluar solo alguna de las características de este tipo de material y bajo determinadas condiciones de ensayo. Diversos investigadores realizaron numerosos ensayos sobre hormigones normales para este tipo de sollicitación, los cuales pueden compararse con resultados disponibles de HAR. Zia et al (1993) realizaron ensayos sobre probetas en laboratorio y las compararon con probetas de pastones elaborados en obra, encontrando que las tres clases de hormigones consideradas en su investigación pueden ser producidas exitosamente en campo. Estos tipos de Hormigones fueron de resistencia muy temprana (Very Early Strength - VES), alta resistencia inicial (High Early Strength - HES) y muy alta resistencia (Very High Strength - VHS). De estas tres clases, los hormigones equivalentes a los considerados en este análisis son los denominados (VHS). Aún así, las tres clases descritas se consideran como hormigones de alta performance (HPC) debido a las características mecánicas particulares que se les confiere por la incorporación de aditivos, tales como escoria granulada, humo de sílice, fibras, ceniza volátil o combinación de los mismos. Hanson et al. (1977) ensayaron hormigones de alta resistencia y hormigones normales sometidos a compresión uniaxial, con el propósito de comparar sus comportamientos mecánicos, ver Figura 1. Los resultados de estos investigadores indican que la rama de pre-pico de la curva se presenta lineal y con mucha más rigidez que la del hormigón de resistencia normal. La deformación para la tensión máxima es más elevada y la respuesta de pos-pico tiende a ser más frágil en el hormigón de alta performance que en el caso del hormigón normal. Wee, Chin y Mansur (1996) realizaron ensayos de compresión uniaxial dentro del rango de resistencia entre 50 y 120 MPa. Estos autores analizaron la composición de las mezclas a fin de determinar su incidencia en la respuesta de falla. Los resultados de estos ensayos indican que aún para mezclas con diversos aditivos, las resistencias y comportamientos de pos-pico se encuentran todas dentro de una estrecha franja mostrando gran semejanza entre ellas. La Figura 2 ilustra las curvas para el grupo de resistencia de 90 MPa.

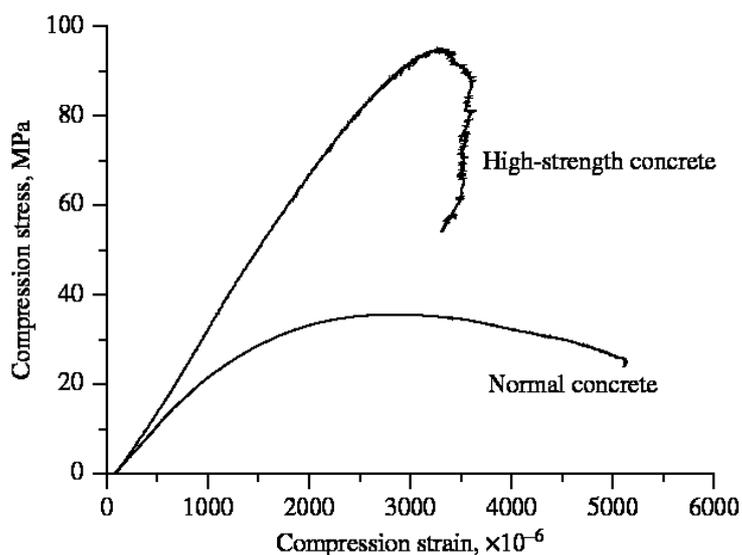


Figura 1– Resultados experimentales de Hanson et al. (1977)

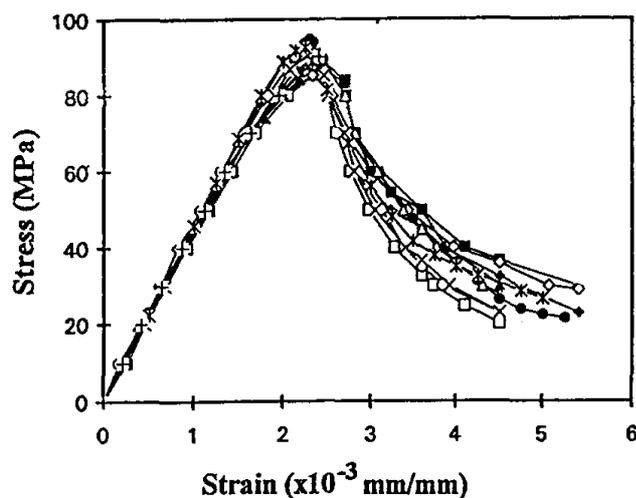


Figura 2 – Series experimentales de Wee, Chin y Mansur (1996)

Xianyu Jin y Zongjin Li (2000) realizaron ensayos de tracción directa con cargas de hasta 250 KN sobre HAR utilizando un nuevo método disponiendo cuatro LVDT's (Linear Variable Differential Transformer) con un rango de trabajo de ± 0.635 mm ubicados a los lados del espécimen que aseguran la estabilidad de la medición de la respuesta en la rama de pospico. Las curvas correspondientes a estos ensayos para las distintas edades se muestran en la Figura 3. La FHA (Federal Highway Administration) de los Estados Unidos presenta curvas obtenidas con el software BEAM BUSTER que calcula las tensiones y deformaciones que satisfacen el equilibrio de fuerzas en una sección, en la sección de una viga compatibles con las deformaciones en esa sección transversal. La resistencias a la compresión considerada para este estudio se encontraban entre 41 y 83 MPa, ver Figura 4. En estas últimas se aprecia cierta similitud de forma con las curvas experimentales. Se evidencia nuevamente la característica de fractura frágil debido a lo empinado de la rama de descenso (ablandamiento).

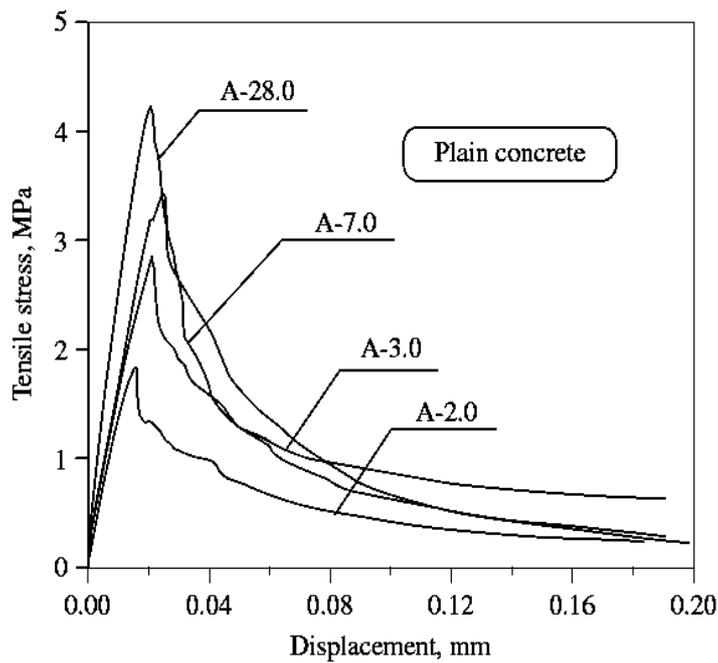


Figura 3– Curvas experimentales Carga-Desplazamiento, Xianyu y Zonjin (2001)

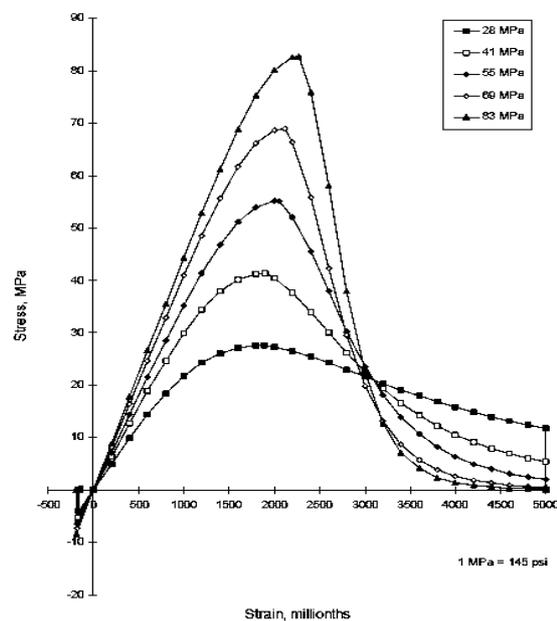


Figura 4 – Curvas de la FHA obtenidas con el software Beam Buster (2006)

Nuevamente se manifiesta una rama de ablandamiento más pronunciada cuanto mayor es la resistencia del hormigón. Contrariamente, la energía disipada es menor. Xiao y Chin (2005), emplearon modelos numéricos basados en el MEF a nivel macromecánico y contrastaron las curvas obtenidas por los modelos EMIS (Enhanced Multilinear Isotropic Softening) y TSM (Tension Softening Material), Estos modelos fueron desarrollados por el

empleo de software de elementos finitos ANSYS® en el Civil & Computational Centre, School of Engineering en Wales, Swansea, y están dirigidos a determinar las características del softening en tracción para hormigón convencional y reforzados con fibra y luego contrastarlos con los obtenidos experimentalmente para diferentes formas de las probetas. Los resultados de estos autores se presentan en la Figura 5, apreciándose que la forma de la rama de ablandamiento depende del modo de fisuración, con un mayor grado de fragilidad cuando predomina el modo I. El ablandamiento es menos pronunciado cuando el patrón de fisuración corresponde al modo II de falla que reúne una combinación de apertura de fisura y de deslizamiento.

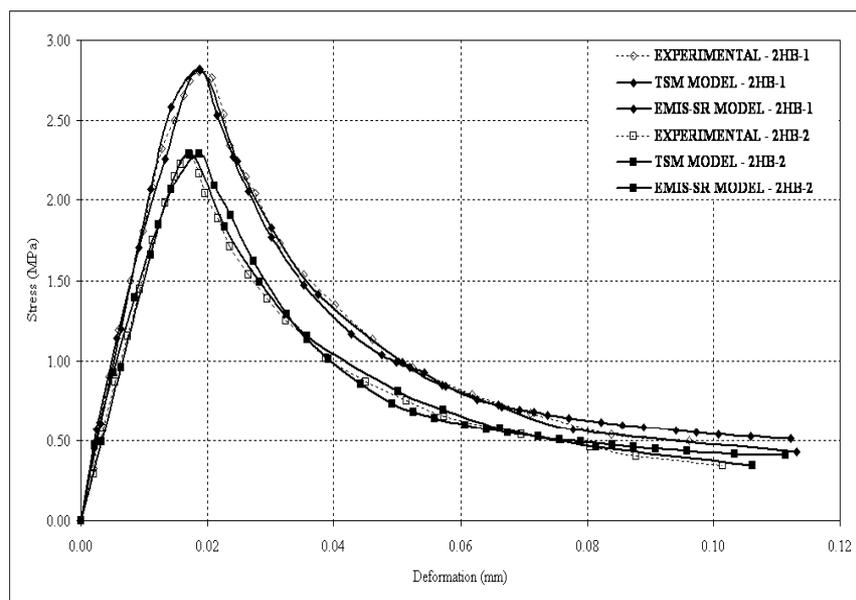


Figura 5- Curvas de Xiao y Chin con los modelos EMIS y TSM.

2- ESTUDIO NUMERICO DE FALLA DE HAR EN COMPRESION UNIAXIAL

2.1. Modelación Mesomecánica

El criterio de modelación mesomecánica posibilita el análisis de simulaciones computacionales del comportamiento de falla de hormigones permitiendo evaluar la incidencia de las fases constituyentes de su mesoestructura. El proceso de fisuración se plantea siguiendo los lineamientos del modelo de fisura discreta o “discrete crack approach”, Ngo y Scordelis (1967), Hillerborg (1976), entre otros. Este tipo de modelos de fisura fija permite captar el patrón de rotura en forma explícita debido a la inclusión de elementos finitos de interfase de espesor nulo (elementos de junta), los cuales se disponen entre los elementos finitos convencionales de la fase mortero e interfase entre agregados y mortero. En el caso particular de las simulaciones computacionales de falla de hormigones de alta resistencia, los elementos de interfase se disponen además en el interior de los agregados (fase agregado) debido a que en este tipo de hormigones la experiencia indica que en función de la resistencia relativa mortero-agregado, pueden presentarse fallas que se inician en la rotura del agregado. El estudio numérico de falla se plantea entonces considerando el Método de los Elementos Finitos a nivel mesomecánico, con la mesoestructura de la probeta de hormigón indicada en la Figura 6 generada por un procedimiento numérico de discretización especialmente diseñado

para lograr determinadas distribuciones entre las fases agregado y mortero, ver Stankowski (1993), Lopez (1999).

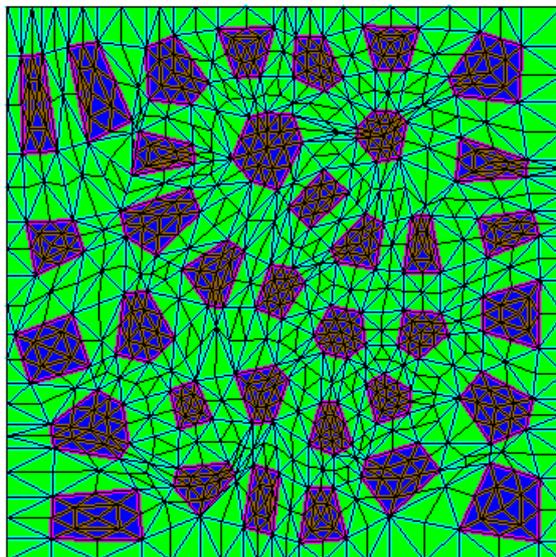


Figura 6 – Mallas mesomecánicas con distribución de 6x6 agregados

2.2- Parámetros materiales de la mesoestructura

Uno aspecto crucial de la modelación computacional de falla de un material complejo como el hormigón a nivel mesomecánico es la correcta adopción de los valores de los parámetros materiales que rigen el comportamiento mecánico. Esto es debido a que, a diferencia de los modelos macromecánicos, el modelo planteado requiere como datos de entrada valores tales como la cohesión aparente, ángulo de fricción interna y resistencia a tracción de las diferentes interfases involucradas. Por lo tanto, la calibración del modelo debe realizarse mediante sucesivas pruebas numéricas y posteriores ajustes estadísticos de parámetros a fin de lograr al final del proceso la definición de un conjunto de parámetros representativos de un tipo específico de mesoestructura a fin de alcanzar una determinada resistencia. Desde el punto de vista constitutivo, cada fase sigue una ley determinada. Los elementos de medio continuo obedecen una ley constitutiva elástica lineal, mientras que las juntas o interfases de agregados, interfase mortero-agregado y mortero-mortero se asignan en función de las características mecánicas particulares de las mismas. En este sentido, las interfases agregado-agregado obedecen una ley elastoplástica de falla sin comportamiento viscoso, mientras que las juntas restantes (mortero-mortero y mortero-agregado) siguen una ley elasto-viscoplástica basada en la Teoría Viscoplastica de Perzina con la función de fluencia viscoplastica de ec. (1), ver Lorefice et al. (2004, 2006, 2007, 2008).

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

Con las siguientes definiciones:

σ : tensión normal en la interfase

τ : tensión tangencial en la interfase

ϕ : Angulo de fricción interna

η : viscosidad aparente

χ : resistencia a la tracción

c: cohesión aparente

$\dot{\lambda}$: multiplicador viscoplástico.

Las constantes elásticas para las fases mortero y agregado son: $E_{mor} = 8 \times 10^7$ MPa y para los agregados $E_{ag} = 5 \times 10^7$ MPa. El módulo de Poisson para ambos elementos de continuo es $\mu = 0.2$. El resto de los parámetros materiales de los elementos de la configuración mesomecánica de la malla de 6x6 se presentan en la Tabla 1. De acuerdo con diversos autores, en los HAR las interfases más resistentes son las mortero-mortero, seguidas de las mortero-agregado. Las interfases más débiles corresponden a las juntas agregado-agregado. Con esta distribución se supone que la fractura del espécimen comience en el interior de los agregados, atravesase la interfase agregado-mortero y se propague a la matriz cementicia. En dicha tabla se consignan también las energías de fractura asociadas a estas interfases en modos de falla I y II, las cuales determinan la cantidad de energía liberada durante el proceso de fisuración.

Interfase	Resistencia a Tracción Directa	Cohesión	Energía de Fractura Modo I	Energía de Fractura Modo II	Viscosidad aparente
Mortero/ Mortero	16MPa	50MPa	2×10^{-4} MPaxm	2×10^{-3} MPaxm	2×10^5 MPa.seg
Mortero / Agregado	13MPa	40MPa	1.6×10^{-4} MPaxm	1.6×10^{-3} MPaxm	2×10^5 MPa.seg
Agregado / Agregado	10MPa	30MPa	1.2×10^{-4} MPaxm	1.2×10^{-3} MPaxm	-

Tabla 1 – Parámetros materiales de los elementos de interfase.

2.3- Análisis computacional

En Figura 7 se ilustra las curva tensión-deformación en compresión uniaxial obtenida con el criterio descrito para un hormigón de alta resistencia de 70 MPa. La rama de pre-pico presenta un comportamiento inicial elástico lineal hasta alcanzar aproximadamente el 80 % del valor máximo, evidenciando a partir de dicho valor una reducción de rigidez hasta alcanzar el valor del pico (máxima resistencia), seguido de la rama de ablandamiento o softening originada por la degradación de la mesoestructura debido al inicio del proceso de fisuración. La respuesta mecánica obtenida para los parámetros adoptados muestra una buena concordancia con los resultados experimentales y numéricos presentados por diversos autores, lográndose captar el comportamiento global del material a nivel macromecánico. Para los parámetros adoptados, el proceso de falla se inicia en las juntas agregado-agregado, transmitiéndose luego a las restantes interfases. Debido a la fragilidad de la respuesta, el comportamiento de pos-pico es de difícil captura numérica a pesar del empleo de técnicas de aceleración de convergencia tales como el método de búsqueda en línea y el de longitud de arco.

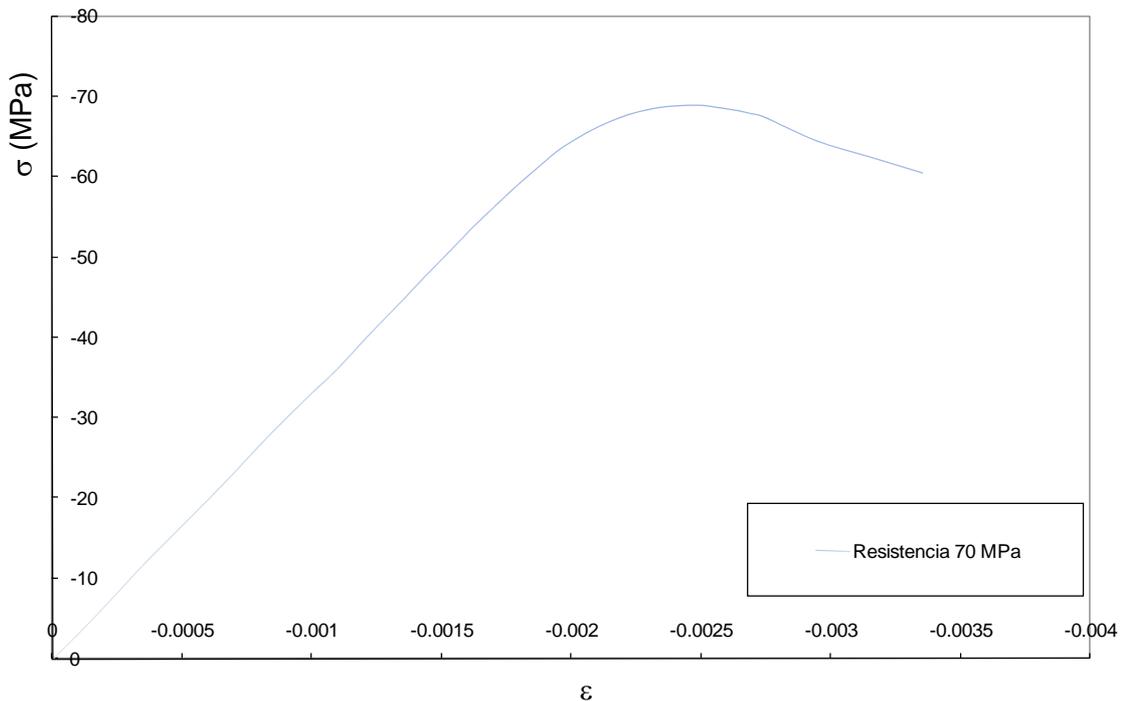
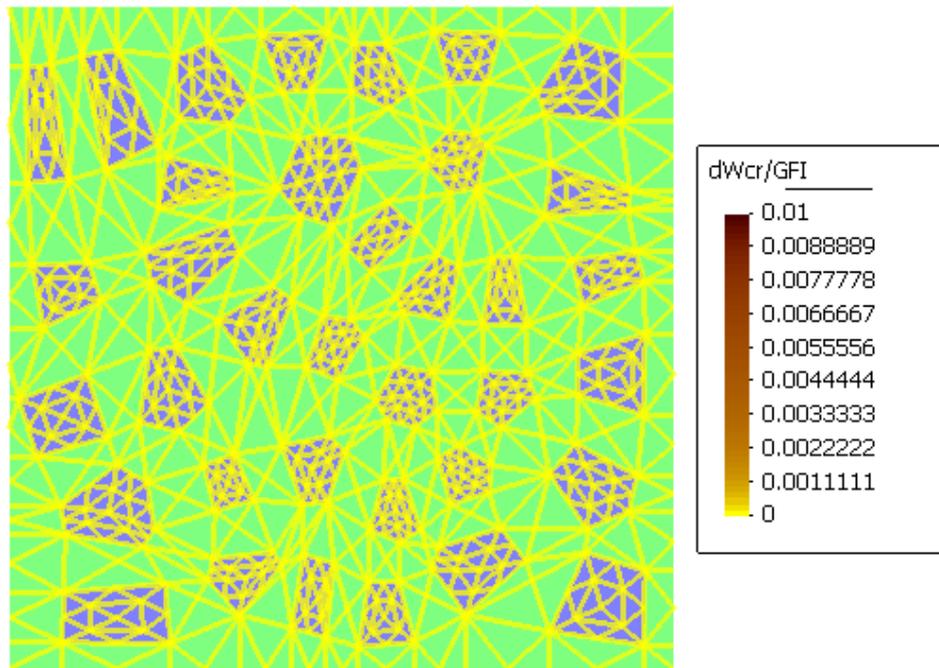


Figura 7 – Modelo mesomecánico - curvas Tensión deformación

Las Figuras 8 a 16 presentan imágenes del postproceso del análisis computacional para el pre-pico (al 85 % de la tensión máxima), pico (valor máximo de resistencia) y pos-pico (rama de ablandamiento) de la curva de respuesta con las distribuciones de energía disipada, tensiones normales y tensiones cortantes en las juntas para la configuración de malla de 6x6. La distribución de energía manifiesta el inicio de la disipación en las juntas ubicadas en el interior de los agregados, ver Figuras 8 a 10. El mapeo de tensiones en las juntas ilustra la variación y evolución de los esfuerzos en las juntas en concordancia con el patrón de fisuración descrito, permitiendo apreciar la complejidad del fenómeno de rotura en materiales compuestos a nivel mesomecánico.

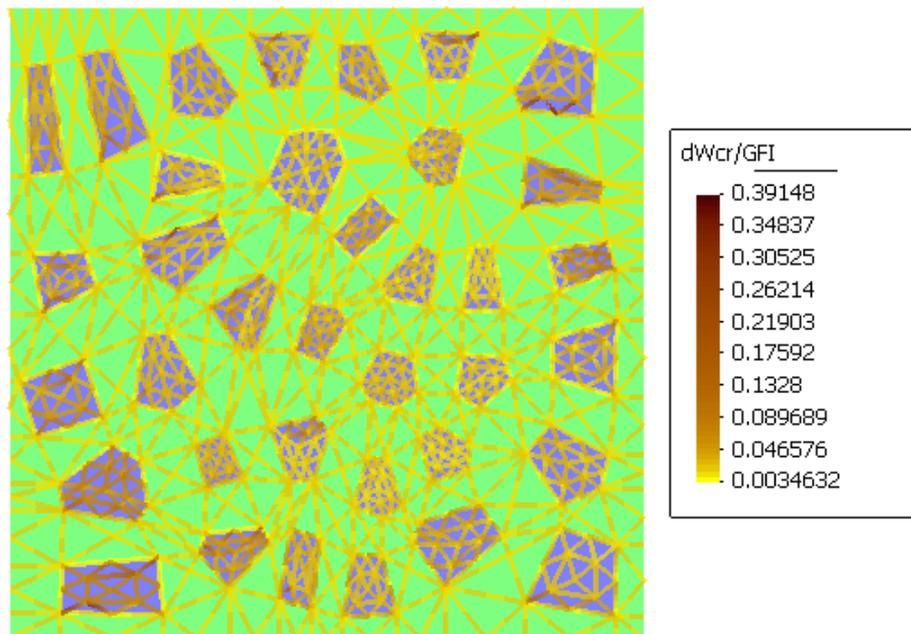
3. CONCLUSIONES

Se ha presentado el análisis computacional a nivel mesomecánico del proceso de falla de una probeta de hormigón de alta resistencia. El modelo numérico así planteado muestra resultados prometedores, permitiendo captar no solo la característica de resistencia de este tipo de hormigones, sino también la incidencia de la configuración mesomecánica y los parámetros materiales que caracterizan la resistencia de cada una de las fases, condicionando de este modo el desarrollo del proceso mismo de fractura y la forma de la curva de respuesta a nivel macromecánico. Esto último, afecta directamente al comportamiento estructural, por lo que es claro que debe profundizarse en los ensayos numéricos a fin de determinar claramente el rol de cada fase y los valores de los parámetros más adecuados para representar adecuadamente la respuesta mecánica global del material.



step 10190
Contour Fill of ACUMULATE ENERGY.

Figura 8 – Mapeo de energía disipada previo al pico



step 10290
Contour Fill of ACUMULATE ENERGY.

Figura 9 – Mapeo de energía disipada al pico

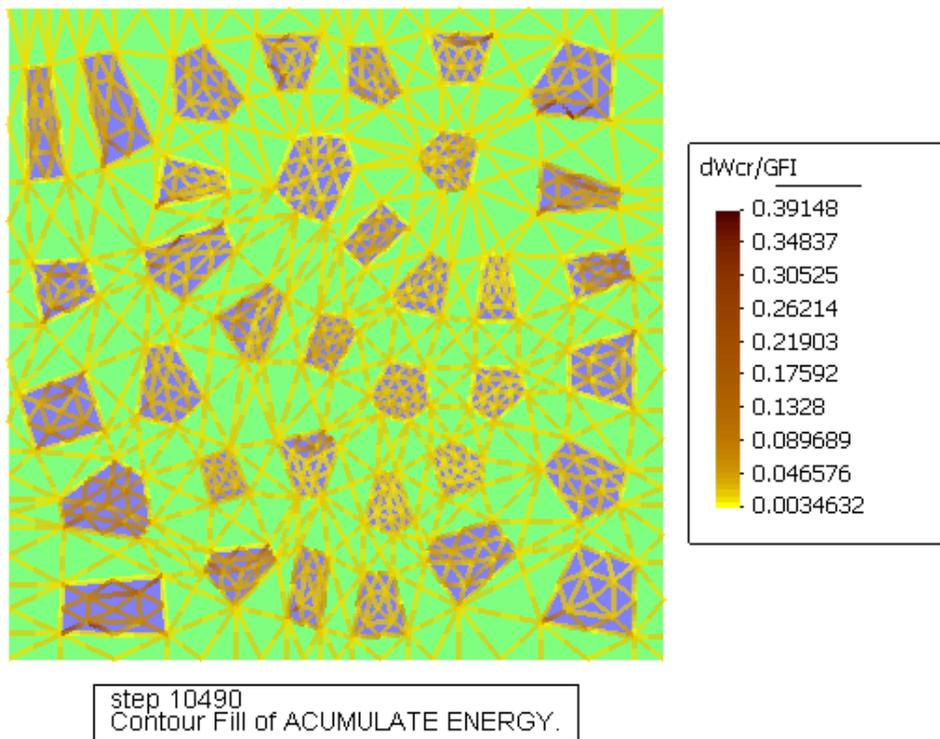


Figura 10 – Mapeo de energía disipada en ablandamiento

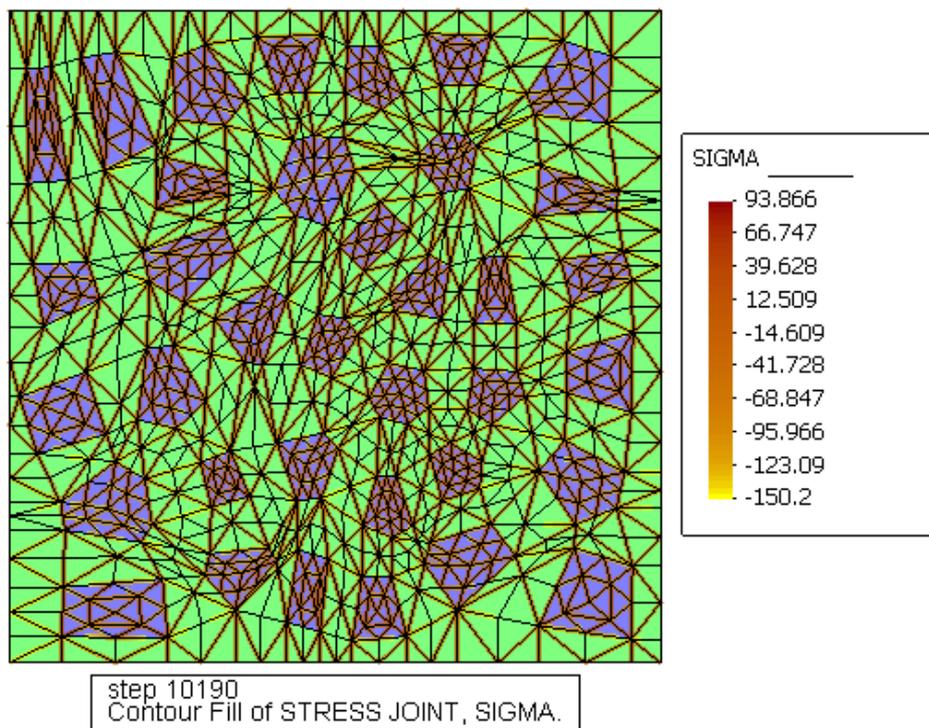


Figura 11 – Distribución de tensiones normales en juntas (pre-pico)

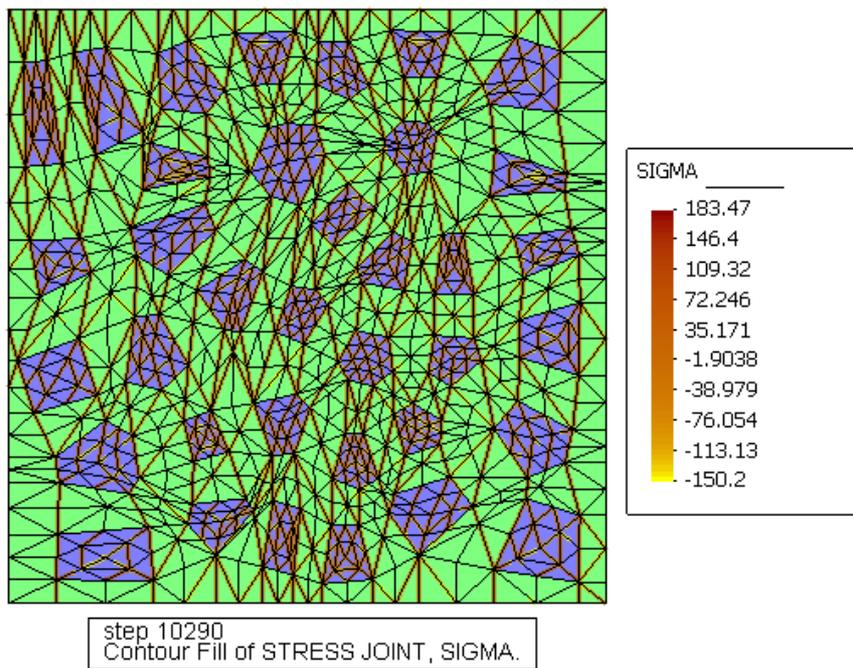


Figura 12 – Distribucion de tensiones normales en juntas al pico

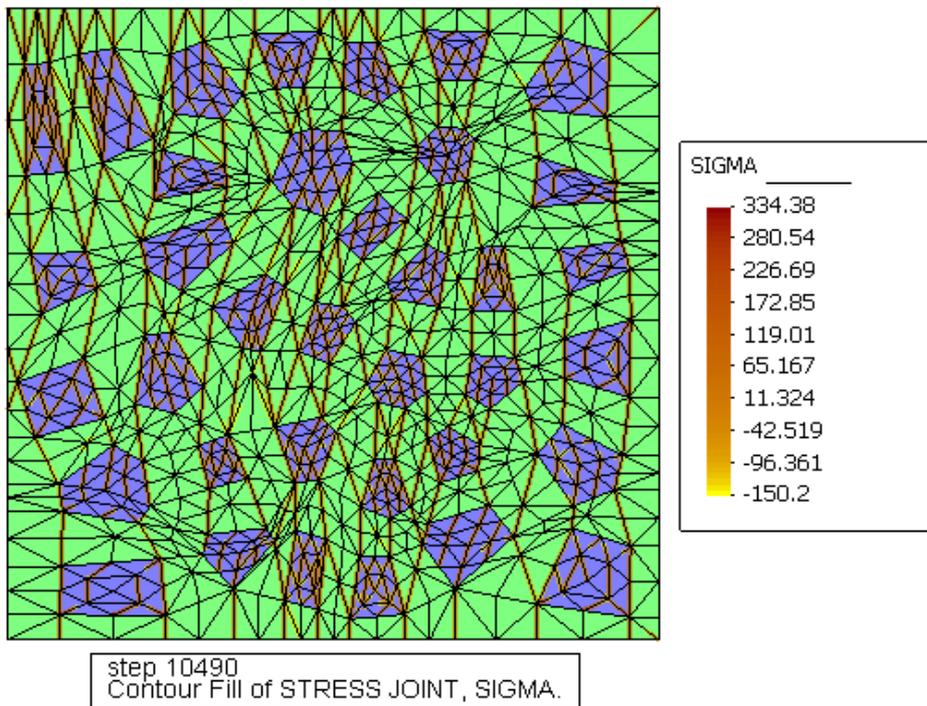


Figura 13 – Distribucion de tensiones normales en juntas en pos-pico

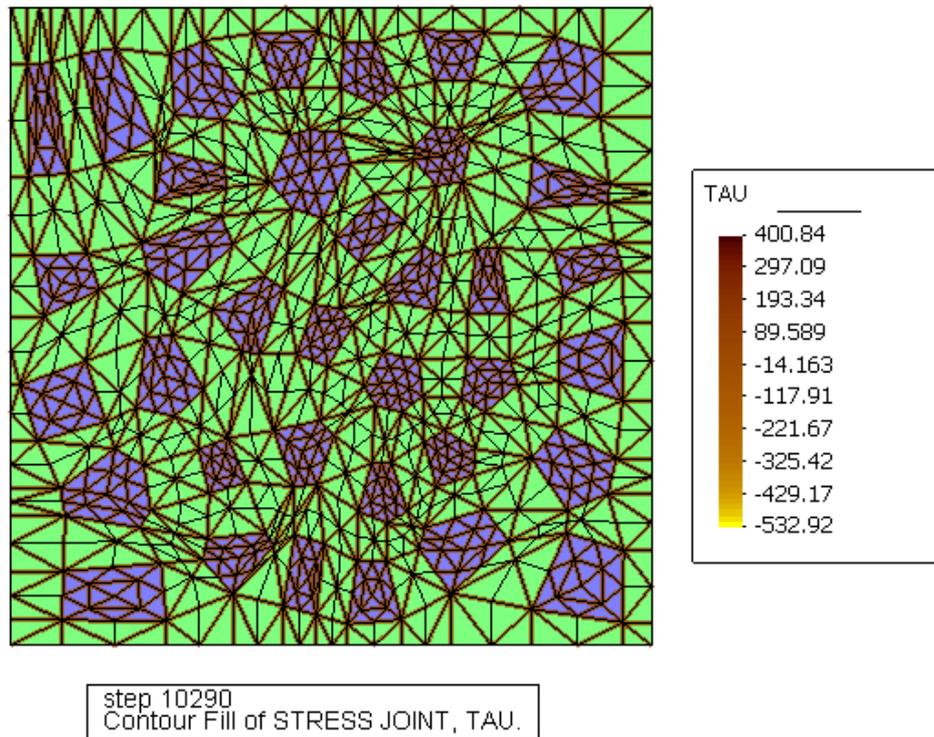


Figura 14 – Distribución de tensiones cortantes en juntas en pre-pico

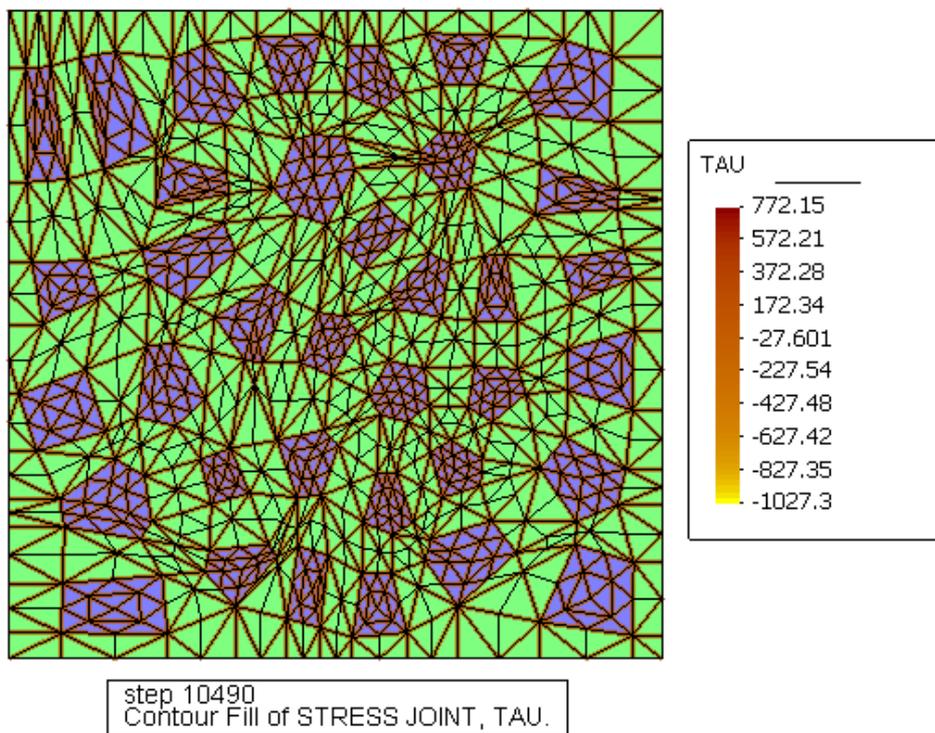


Figura 15 – Distribución de tensiones cortantes en juntas al pico

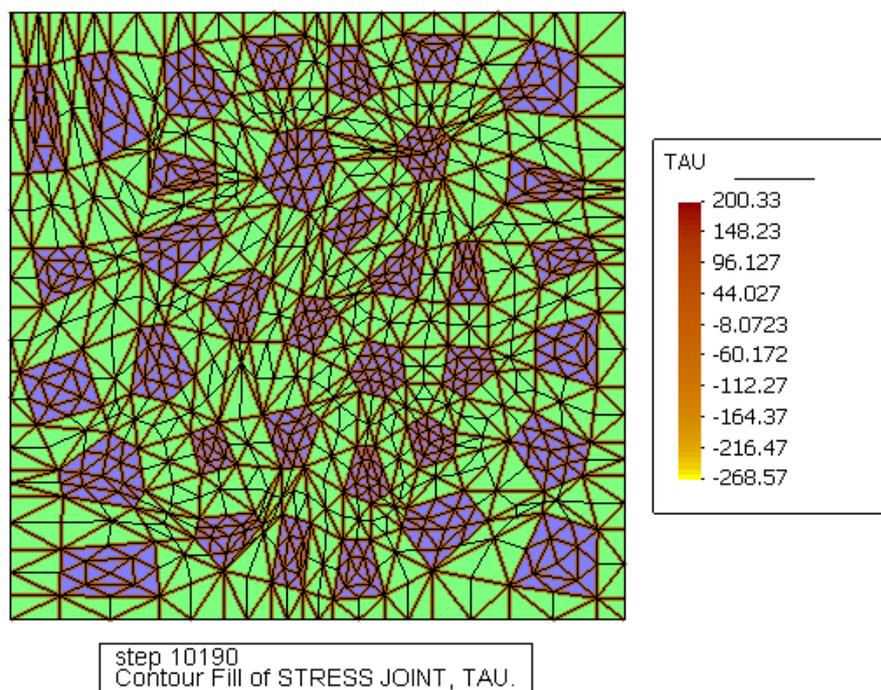


Figura 16 – Distribución de tensiones cortantes en juntas en pos-pico

4. REFERENCIAS

- American Concrete Institute - *State of Art Report* - ACI 363R-92 (Reapproved 1997) - 363R-1 - 363R-55 – 1997
- Čandrlí, V., Mandí, A. & Bleiziffer, J., “The Largest Concrete Arch Bridge Designed of RPC200 – *Strait Crossings 2001: Proceedings of the Fourth Symposium on Strait Crossings*. Krokenborg(ed) Swets& Zeitinger Publisher Lisse- ISBN-90-2651-845-5.- 2001
- 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).
- 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 Engng. Mechanics*, (125), 1, pp. 60-69, (1999).
- Goodspeed C., Vanikar S.& Cook R.- United States Department of Transportation - Federal Highway Administration –<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/hpcdef.htm> - 2006.
- Graybeal, B., and Davis, M., “Cylinder or Cube: Strength Testing of 80 to 200 MPa (11.6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete” *ACI Materials Journal*,

- Nov/Dec 2008 - http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5360/is_200811/ai_n31110936/ . 2008
- Hanson N.W, Kaar P.H. & Capell H.T. Stress-Strain Characteristics of High Strength Concrete. *Portland Cement Association*. 11pp -1977.
- Hillerborg A., Modeer M., and Peterson P., Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cement Concrete Research*. N° 6, Pàgs. 773-782. 1976.
- 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).
- Lorefice, R., "Modelación de la Respuesta Dinámica del Hormigón mediante los criterios Meso y Macromecánicos". *Tesis Doctoral, CEMNCI - Univ. Nac. de Tucuman*, 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 (2008) 2686–2705.
- Lorefice, R., Etse, G., & Carol, I., Viscoplastic Approach for Rate-Dependent Failure Analysis of Concrete Joints and Interfaces. *International Journal of Solids and Structures* 45 2686–2705 – 2008
- 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 2686–2705. 2008
- Ngo, D., Scordelis, A.C.. "Finite element analysis of reinforced concrete beams", *Journal. of the American Concrete Institute*. Vol. 64, No. 3, pp. 152-163. 1967
- Perry, V.H., and Zakariassen, D., "First Use of Ultra- High Performance Concrete for an Innovative Train Station Canopy". *Concrete Tecnology Today- Portland Cement Association*. Vol. 25 –N° 2 -. www.concretetechnologytoday.org. Agosto 2004
- Perzyna, P., "Fundamental Problems in Viscoplasticity". *Advances in Applied Mechanics*, 9, pp. 244-368, (1966).
- Rusch, H., "Researchs toward a general flexural theory for structural concrete". *ACI Journal*, Vol 32, 1, Págs. 1-28, (1960).
- Stankowski T., Numerical simulation of progressive failure in particle composites, *Ph.D. thesis, Phd. Dissertation*, University of Colorado, Boulder, U.S.A., 1990.
- United States Department of Transportation - Federal Highway Administration - Optimized Sections for High-Strength Concrete Bridge Girders -- Effect of Deck Concrete Strength – *Publicación N° HWA-HRT-05-058* . Pàg 37-39-2006.
- 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.
- Wee T. H., Chin M. S. & Mansur M. A. Stress-Strain Relationship of High-Strength Concrete in Compresion – *Journal of Materials in Civil Engineering*. Vol 8 – ASCE . 70 – 76 . 1996
- Zia P., Leming M. L., Ahmad S. H., Schemmel J. J., and Elliott R. P.. 1993b. Mechanical Behavior of High Performance Concretes, Volume 2: Production of High Performance

- Concrete. *Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C., xi, 92 pp. (SHRP-C-362)*
- Zia P., Leming M. L., Ahmad S. H., Schemmel J. J., Elliott R. P., and Naaman A. E... - Mechanical Behavior of High-Performance Concretes, *Summary Report. SHRP-C-361, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Vol 1 - Washington, D.C., xi, 98 pp-1993*
- Zongjin Li & Yunsheng Zhang, *Handbook of Structural Engineering*, Chen & Liu Editores - ISBN 0-8493-1569-7 - USA.15.1 -15.58, 2005.