

ANÁLISIS MESO/MACRO-ESCALA DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN SOMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS

MESO/MACRO-SCALE ANALYSIS OF ELEMENTS OF CONCRETE SUBJECTED TO HIGH TEMPERATURES

Marcia Rizo Patrón^a, Ricardo H. Lorefice^a y Gustavo A. Pérez^b

^a Instituto de Materiales, Estructuras y Construcciones (IMEC), Universidad Nacional de Santiago del Estero. rizopatron@gmail.com; rlorefice@gmail.com, <https://imec.unse.edu.ar/>

^b Instituto de Estructuras “Ing. Arturo Guzmán”, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. gperez@herrera.unt.edu.ar, <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

Palabras clave: hormigón, modelación constitutiva, cargas térmicas

Resumen. En este trabajo se presenta el análisis termo-mecánico acoplado de elementos de hormigón simple a niveles meso y macromecánico con el fin de estudiar la distribución de tensiones y temperaturas bajo diferentes escenarios de cargas térmicas. A tal fin se considera un modelo constitutivo termo-elasto-viscoplástico capaz de captar diferentes aspectos del problema. Los criterios de enfoque meso y macromecánico en el ámbito del Método de los Elementos Finitos se basan en distribuciones geométricas de mallas específicamente diseñadas por la técnica de Delauney-Voronoi la cual permite representar la distribución espacial de las fases agregado y pasta de cemento o mortero en probetas cuadradas de dimensiones (10x10 cm²). Las simulaciones numéricas se realizan con el software FEAP v8.4 en condiciones de tensión plana cubriendo un amplio rango de temperaturas a fin de captar el proceso de degradación del material para las diferentes etapas del proceso y su consecuencia en la respuesta estructural. Este criterio de análisis permite comparar las ventajas y desventajas de cada nivel de estudio del problema y determinar la conveniencia del uso de éstos para la predicción de la respuesta de falla de estructuras reales de hormigón sometidas a altas temperaturas.

Keywords: concrete, constitutive modeling, thermal loads

Abstract. This paper presents the thermo-mechanical coupled analysis of plain concrete specimens at macro and mesomechanical levels in order to analyze temperature and stress distribution originated by several fire scenarios. A thermo-elasto-viscoplastic constitutive model is applied at both, macro and mesomechanical levels in order to capture several aspects of this complex coupled process. The meso and macro mechanical analysis are carried out by using a Delauney-Voronoi mesh configuration specifically designed to consider the spatial distribution and proportion of aggregates and cement paste in plain concrete specimens of square meshes: 10x10 (cm²). The numerical simulations were performed using an enhanced version of FEAP v8.4 program under plane-stress conditions covering the critical temperature range to capture material degradation and structural response. The numerical simulations at both levels of analysis allows to find fully temperature and stress distribution at each phase of the meso and macro mechanical specimens (mortar and aggregates phases) at different stages of the coupled process, in order to compare the computational performance and the advantages and disadvantages when used to predict real structures failure responses under different fire scenarios. The proposed criteria allow to study coupled thermo-mechanical problems in concrete and cementitious materials by using an alternate methodology to those based on complex techniques involving computational fluid mechanics.

1 INTRODUCCIÓN

El fuego representa una de las condiciones ambientales más severas a las que pueden estar sujetas las estructuras. La provisión de medidas de seguridad contra incendios es un aspecto muy relevante en el diseño de edificios de gran altura y en obras de gran envergadura. En los últimos años, los incendios se han convertido en una preocupación creciente en todo el mundo debido al mayor número de edificios cada vez más altos, a la introducción de nuevos materiales de construcción y de formas seccionales esbeltas con la consiguiente reducción de resistencia. En general, las estructuras de hormigón normal (HN) han tenido un buen desempeño en caso de incendios. Debido a que el hormigón no es combustible y tiene una conductividad térmica relativamente baja, siempre que el recubrimiento de la armadura permanezca en su lugar durante el calentamiento (es decir, que no se produzca el descascaramiento), el flujo de calor hacia el interior de un elemento de hormigón armado se produce lentamente. Por lo tanto, se supone que estas estructuras poseen buena “resistencia al fuego” ya que el HN es un material de construcción que preserva satisfactoriamente sus propiedades por un tiempo razonable cuando es expuesto a temperaturas elevadas. La seguridad se garantiza en el diseño mediante la prescripción de dimensiones generales adecuadas y recubrimientos mínimos para cada elemento estructural.

En el caso de hormigones de alta resistencia (HAR) la situación es distinta, debido a su baja relación agua-cemento, incorporación de aditivos (tales como superplastificantes, humo de sílice, relleno de piedra caliza), entre otros. Los HAR se caracterizan en general por una resistencia a la compresión superior a 60 MPa, y su empleo suele estar motivado principalmente por la búsqueda de alta resistencia inicial a la compresión, mayor durabilidad y la posibilidad de diseño de secciones más esbeltas. De todos modos, tanto para el estudio de hormigones normales como para los de alta resistencia, la exposición a altas temperaturas implica complejas reacciones físico-químicas en la matriz cementicia del material alterando las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. El fenómeno involucra el acoplamiento de procesos físico-químicos, flujo intersticial de vapor y agua ocluida en los poros del hormigón y la interacción mecánica de dichos procesos en simultáneo en la interfase mortero-agregado, lo cual puede inducir a un proceso de fisuración temprana con la consiguiente pérdida de integridad física y resistencia del material, ver Kodur et al (2009). Los ensayos realizados por diversos autores muestran que los cambios en la resistencia del hormigón en función de la temperatura están relacionados, entre otros factores, a la composición misma de la mezcla, el tipo de agregados (calcáreos / silíceos), a la relación agua/cemento, la presencia de aditivos puzzolánicos, etc. Otros factores importantes son la tasa de aumento de temperaturas (gradiente térmico), el tiempo total de exposición a la temperatura y en hormigón armado se debe considerar además el recubrimiento y la cuantía y disposición de armaduras. La predicción de falla de este tipo de materiales implica el empleo de modelos de análisis numéricos multifase, que permitan resolver problemas acoplados de múltiples variables, con condiciones de borde dinámicas y múltiples fases interactuando simultáneamente. Esta alta complejidad impide en general que se apliquen dichos métodos a problemas reales en los cuales se pretenda determinar la capacidad soporte de estructuras típicas en el ámbito de la ingeniería civil, por lo que es necesario contar con procedimientos alternativos que permitan analizar este tipo de problemas de manera práctica y realista.

El criterio que aquí se presenta apunta a generar un modelo de análisis termo-mecánico acoplado que permita determinar con buen grado de precisión la respuesta estructural de un material complejo como el hormigón frente a escenarios de incendio, abordando la resolución no lineal del problema de valores de borde en el marco del Método de los Elementos Finitos (MEF). Este planteo permite la simulación numérica de problemas reales a niveles meso y

macromecánicos mediante una adecuada calibración del modelo constitutivo elasto-viscoplástico, permitiendo captar fenómenos tiempo/tasa dependiente asociados a la duración de las cargas, temperaturas y su acoplamiento. El criterio es apto para modelar problemas termo mecánicos acoplados a niveles local o global (seccional/estructural), incorporar formas arbitrarias de la sección transversal y consideración de armadura de refuerzo con suficiente precisión y mediante un costo computacional aceptable para su aplicación en la ingeniería práctica.

2 MODELO CONSTITUTIVO DE DRUCKER PRAGER VISCOPLÁSTICO

Se plantea un modelo constitutivo para hormigones maduros sometidos a altas temperaturas, apto para la simulación de casos de incendio a nivel macromecánico que puede emplearse tanto en elementos de hormigón como de hormigón armado. El criterio base del modelo lo constituye la teoría de la elasto-viscoplasticidad de Perzyna (1963, 1966) quien introduce una modificación del criterio invíscido de Drucker-Prager (1952). Los parámetros de resistencia a tracción/compresión se calibran a partir de la evolución de dichas resistencias en función de la temperatura (Rizo Patrón et al, 2017). Debido a que los procesos en los que las estructuras se someten a altas temperaturas son dependientes del tiempo de exposición, y teniendo en cuenta que el hormigón sufre fenómenos reológicos durante la exposición a temperaturas elevadas (fenómeno conocido como *transient creep*), esta formulación permite tener en cuenta el efecto tiempo-tasa dependiente por medio de la consideración de la teoría de la viscoplasticidad propuesta por Perzyna, considerando además la variación de los parámetros de viscosidad con la temperatura, integrando de manera natural la historia de tensiones y de deformaciones bajo carga, acción de la temperatura y fenómenos reológicos. El criterio de máxima resistencia se plantea como (Rizo Patrón et al, 2017):

$$F = F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}) = F(J_2, I_1, \mathbf{q}) \quad (1)$$

$$F = J_2 + \alpha(T)I_1 - \beta(T) + \chi_j(\mathbf{q}, T) \quad (2)$$

En la ecuación (1), $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q})$ representa la función de fluencia del material, dependiente del tensor de tensiones y del tensor de variables internas \mathbf{q} , las cuales representan la degradación de la estructura interna del material.

A partir de la descomposición aditiva del tensor de tensiones en sus partes volumétrica y desviadora, es posible expresar el criterio de Drucker-Prager (ver ec. (2)) en términos de los invariantes del tensor de tensiones, invariante desviador J_2 y del primer invariante I_1 o traza de $\boldsymbol{\sigma}$, y de la fuerza de endurecimiento termo-mecánica, $X_j(\mathbf{q}, T)$, ver Coussy et al.(2004).

Los parámetros de resistencia $\alpha = \alpha(f^c, f^t, T)$ y $\beta = \beta(f^c, f^t, T)$ son dependientes de las resistencias a compresión f^c y a tracción f^t del material las cuales, a su vez, dependen de la temperatura como se ilustra en las figuras 1 a) y 1 b):

$$\alpha(T) = \frac{f_c'(T) - f_t'(T)}{3} \quad (3)$$

$$\beta(T) = \frac{f_c'(T) + f_t'(T)}{3} \quad (4)$$

La superficie de fluencia del modelo así planteado origina las curvas que se ilustran en la

Figura 2, en las que se aprecia la contracción del dominio encerrado bajo la curva de máxima resistencia a medida que se incrementa la temperatura de exposición del material, desde el valor inicial a una temperatura de referencia de 20°C, la cual evoluciona gradualmente y conlleva a la reducción de la resistencia mecánica tanto en tracción como en compresión uniaxial.

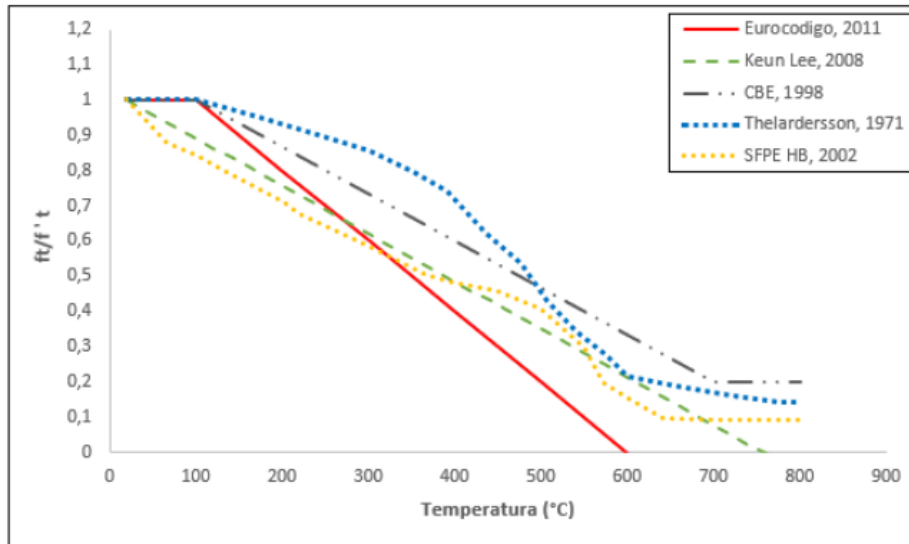


Figura 1: a) Evolución de $f't$ con la temperatura;

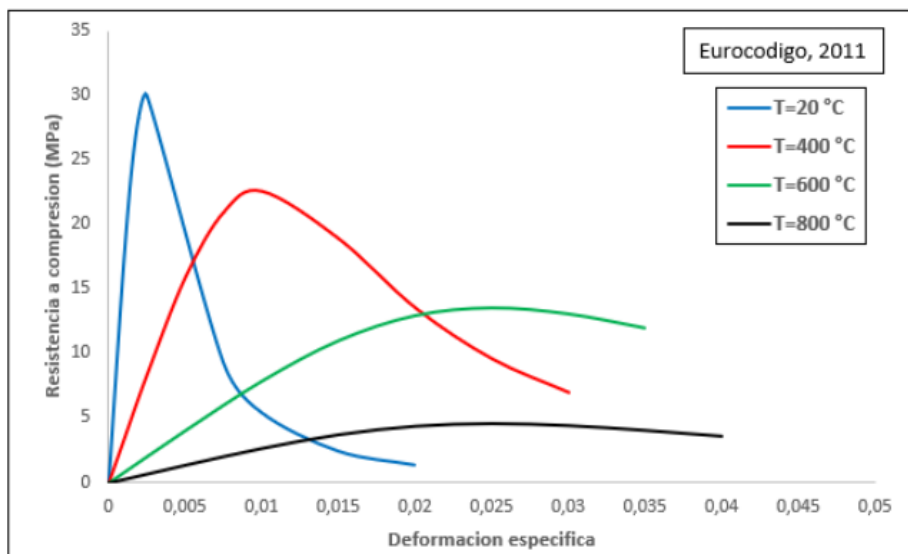


Figura 1: b) Evolución de $f'c$ con la temperatura

Si se tiene en cuenta que el tensor de deformaciones se puede descomponer en una parte elástica, otra plástica o irreversible y la componente debida a la temperatura, de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_T \quad (5)$$

Asumiendo $Q = F$ (flujo plástico asociado, el cumplimiento de la condición general de consistencia plástica incluyendo el acoplamiento termo-mecánico toma la forma de la ecuación (6)

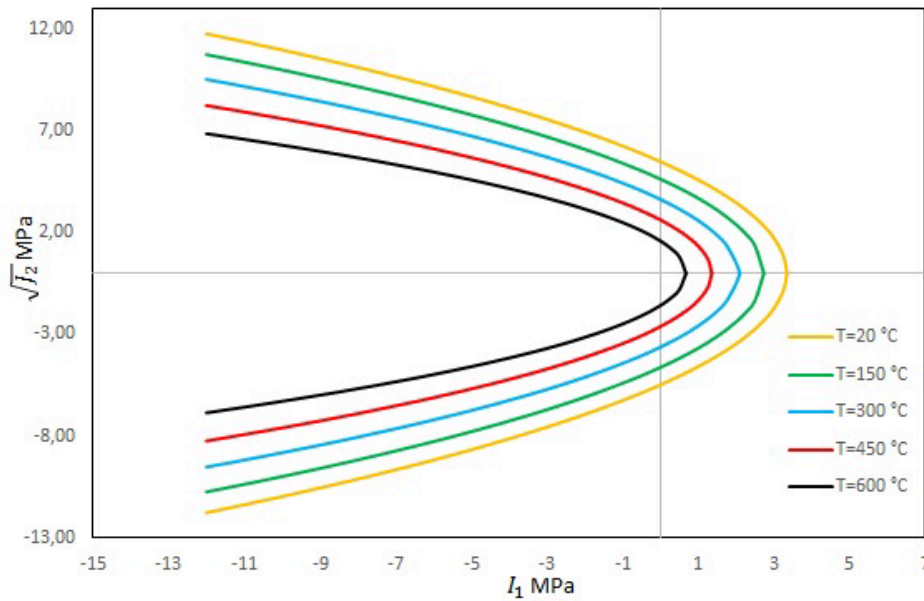


Figura 2: Evolución criterio de resistencia (σ , q , $T^\circ\text{C}$)

$$d\dot{F} = \frac{\partial F}{\partial \sigma} : d\dot{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial q} : d\dot{q} + \frac{\partial F}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial T} dT \tag{6}$$

Expresando la condición de consistencia en términos de la variable plástica de endurecimiento/ablandamiento y operando se obtiene la expresión del multiplicador plástico

$$d\lambda = \frac{1}{H_{pl}} \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} - H_T dT \right] \tag{7}$$

con

$$H_{pl} = \frac{\partial F}{\partial \chi_j} \frac{\partial \chi_j}{\partial \kappa_j} \frac{\partial \kappa_j}{\partial \lambda} \tag{8}$$

siendo κ_j y χ_j las variables internas de endurecimiento y la fuerza de endurecimiento interna conjugada, respectivamente. H_{pl} se denomina módulo de endurecimiento y H_T es el módulo térmico. A fin de introducir la dependencia en el tiempo/tasa, se plantea la modificación de la superficie de máxima resistencia de Drucker-Prager (1952) siguiendo la propuesta de Perzyna (1963) quien formula la existencia del potencial viscoplástico $G(\psi, F, \sigma)$, ver Rizo Patrón et al (2017). El potencial viscoplástico se plantea en términos del flujo plástico invíscido el cual se afecta por la viscosidad aparente η y la función de sobre-resistencia $\psi(F)$ que a su vez depende de la función de fluencia elastoplástica original $F(\sigma, q)$ y de F_0 , que representa en general un parámetro de normalización de la función, que se adopta aquí igual al límite de resistencia o umbral inicial de fluencia del modelo invíscido. En base a lo anterior, el criterio de máxima resistencia se expresa como:

$$\bar{F} = \underbrace{J_2 + \alpha(T)I_1 - \beta(T)} + \underbrace{\chi_j(q, T)} - \underbrace{\dot{\lambda} \cdot \eta(T)} = 0 \tag{9}$$

En la ec (9), los términos en la primera llave dependen del tensor de tensiones y las variables mecánicas del modelo (función de la temperatura), el segundo representa las variables de estado termo-mecánicas y el tercero la dependencia temporal que introduce el efecto viscoso. La nueva condición de consistencia elasto-viscoplástica conduce a:

$$\bar{F} = \mathbf{n} : \dot{\sigma} + \bar{r}\dot{q} + \bar{s}\dot{\lambda} = 0 \tag{10}$$

Reemplazando y resolviendo las derivadas se obtiene

$$\bar{r} = \frac{\partial \bar{F}}{\partial q} = \frac{\partial F}{\partial q} \quad (11)$$

$$\bar{s} = -\eta \quad (12)$$

El modelo constitutivo así planteado sigue el concepto de viscoplasticidad continua (Ponthot, 1995), permitiendo una transición suave entre la situación $\eta=0$ (sin efecto viscoso o estado de plasticidad inviscida), lo cual conduce a la condición elastoplástica clásica $F(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{q}) = 0$. El otro caso extremo ocurre cuando η tiende a infinito, lo cual conduce al estado de tensión $F < 0$ para todo estado de tensión posible, indicando un estado elástico. La solución del planteo numérico desde el punto de vista constitutivo se realiza combinando el criterio de proyección al punto más cercano (CPPM o Closest Point Projection Method) conjuntamente con el Método de Retorno de Euler (Backward Euler Method - BEM), mientras que a nivel de problema de valores de borde se resuelve en el marco del Método de los Elementos Finitos No Lineal. La implementación computacional del modelo se realiza como subrutina de usuario en el entorno del software FEAP v8.4, con capacidad de resolver problemas planos y tridimensionales (estado de deformaciones planas / tensiones planas / 3D).

3 ENSAYOS NUMÉRICOS

Se presentan en esta sección diversos análisis de la respuesta del modelo constitutivo teniendo en cuenta dos criterios: macromecánico y mesomecánico. Se considera nivel macromecánico al que obedece las leyes del continuo de Boltzmann (fase única), mientras que el nivel mesomecánico considera al hormigón como material bifásico (fases mortero y agregado), respetando la composición de la mezcla y propiedades mecánicas.

3.1 Modelo macromecánico

A nivel macromecánico se analiza una probeta de elementos finitos de 4 nodos, con una disposición simétrica $b \times b = 20 \times 20 \text{ cm}^2$, representando hormigón simple con una resistencia de 30 MPa. La grilla presenta (10x10) elementos cuadriláteros en estado plano de tensiones, ver Figura 3a).

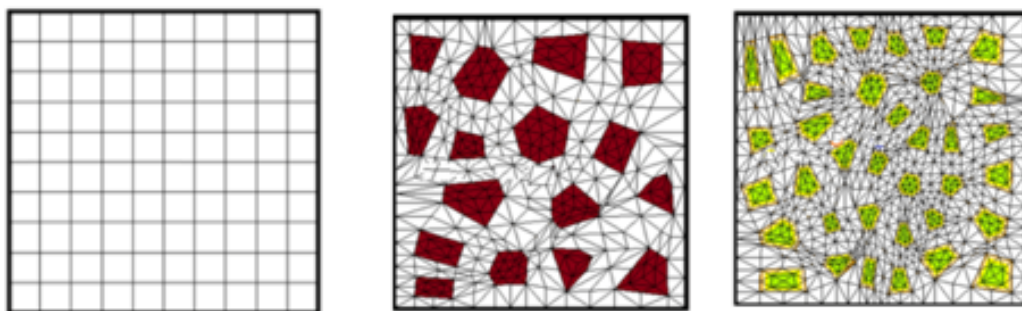


Figura 3: a) Malla macromecánica b) Malla mesomecánica (4x4) c) Malla mesomecánica (6x6)

3.2 Modelo mesomecánico

Este criterio permite la observación del material como bifásico, a través de elementos finitos representativos de los agregados y de la matriz de mortero. Las mallas mesomecánicas se generan mediante un proceso estocástico, en el cual primeramente se subdivide la superficie de la probeta en polígonos de Voronoi, sobre cuya base se aplica una perturbación Monte Carlo

que permite obtener una distribución aleatoria de los sectores mortero-agregado, ver Stankowski (1990), Vonk (1992). Mediante este proceso se genera la topología que permite asignar en el espacio del dominio delimitado por el contorno global de la malla los sectores que corresponden a cada fase, debiéndose luego realizar en general una corrección específica para eliminar sectores de la geometría que presenten zonas de alta distorsión de los elementos triangulares que luego pueden presentar problemas numéricos (proceso conocido como *suavizado*). Finalmente, sobre la base de los polígonos se generan los elementos finitos planos triangulares, ver Figuras 3 b) y 3 c).

3.3 Ensayos numéricos

Para analizar la incidencia del tipo y configuración de la malla en los resultados, se presentan algunos resultados en términos de distribución de tensiones mediante los criterios enunciados. En la figura 4 se compara la evolución de la temperatura en el tiempo, en cuatro puntos distintos, considerando las mallas macro y mesomecánica más fina (6x6). En la figura 5 se comparan el valor de las tensiones $\sigma_{xx}(t)$ obtenidas en dos puntos correspondientes al mortero en la malla mesomecánica vs los mismos puntos en la malla macro y en la figura 6, se hace lo propio con dos puntos correspondientes al agregado. En figura 7, se comparan las tensiones $\tau_{xy}(t)$ para un punto en el mortero y otro en el agregado vs los mismos puntos en la malla macro.

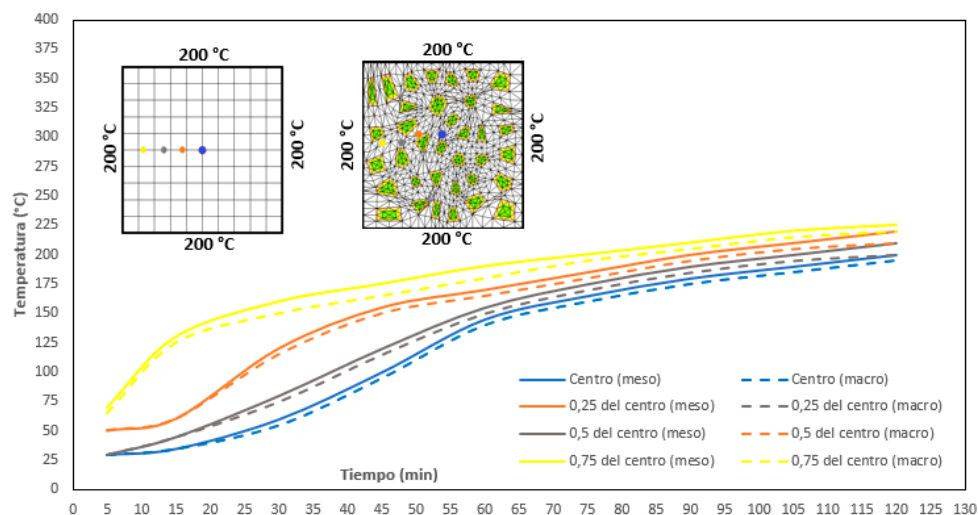


Figura 4: Evolución temperatura en el tiempo. Criterio macro vs meso (6x6)

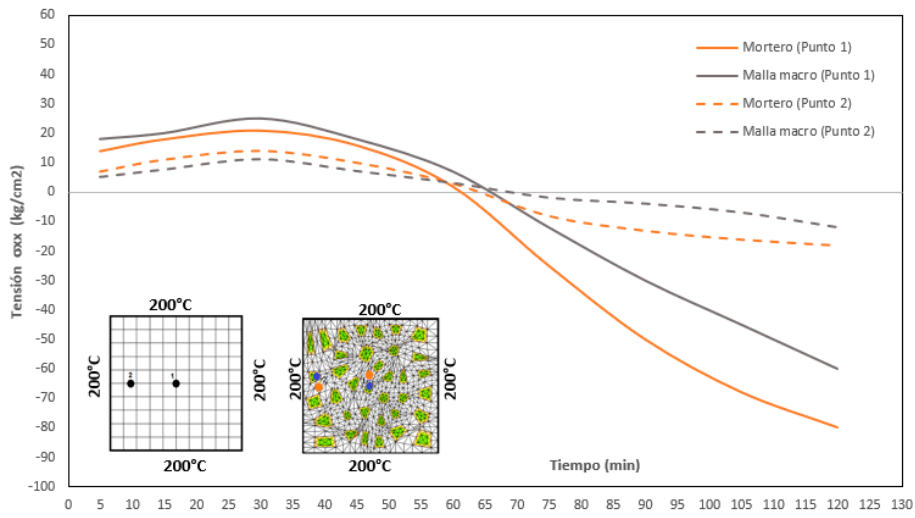


Figura 5: Evolución σ_{xx} vs. Tiempo. Criterio macro y meso (6x6)

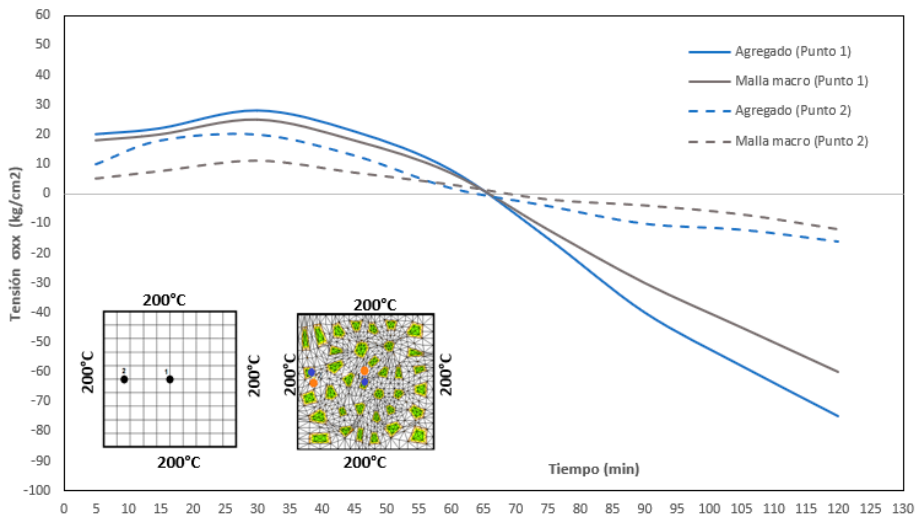


Figura 6: Evolución σ_{xx} vs Tiempo. Criterios Macro y meso (6x6)

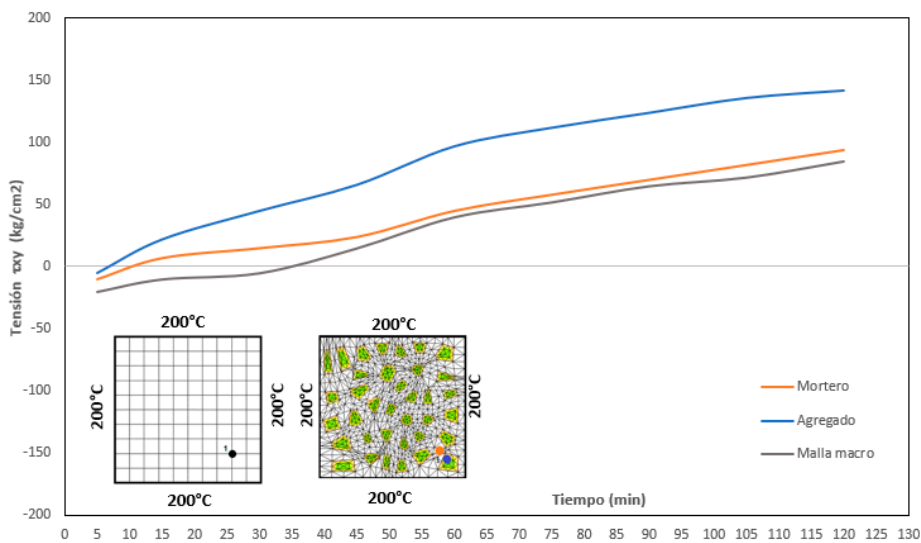


Figura 7: Evolución de τ_{xy} vs Tiempo. Criterios macro vs meso (6x6)

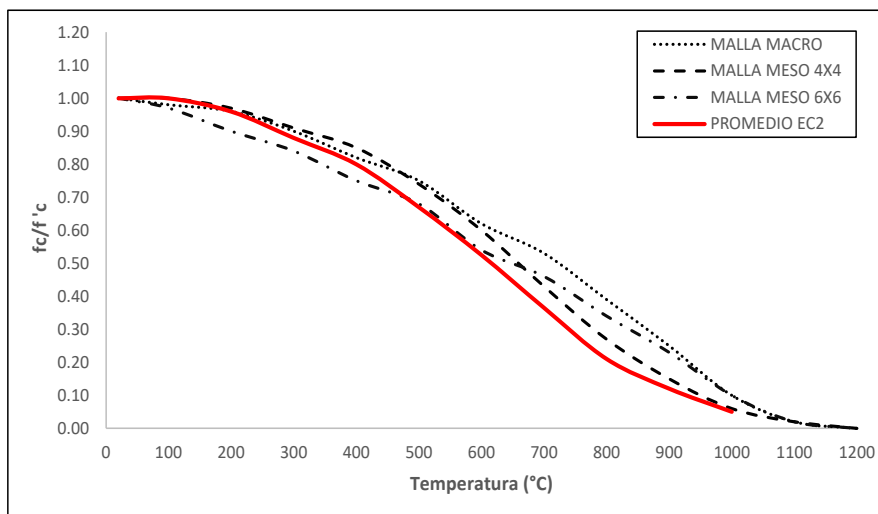


Figura 8: Evolución resistencia a compresión vs Temperatura

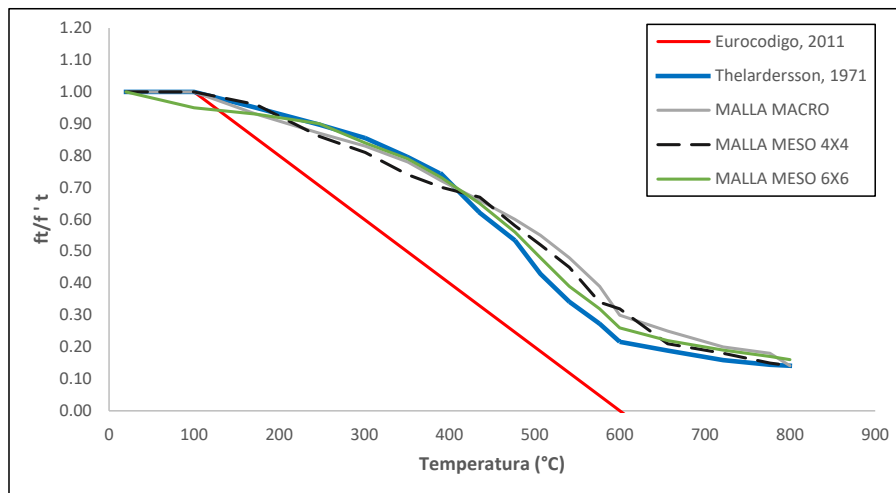


Figura 9: Evolución resistencia a tracción vs Temperatura

Finalmente, en Figuras 8 y 9 se ilustran las curvas de respuesta de los ensayos numéricos a niveles macro y mesomecánicos comparando la evolución normalizada de la capacidad de carga de las mallas para ensayos de compresión y tracción simple a diferentes temperaturas (f_c/f_c y f_t/f_t) en función de temperaturas elevadas, incluyendo a modo de referencia las curvas propuestas por el EC2 (2011). En figura 8 se comparan las respuestas mecánicas de las configuraciones macro y mesomecánicas con la curva promedio obtenida en base a las previsiones del EC2 para agregados calcáreos y silíceos. Los resultados obtenidos muestran que los modelos numéricos sobre estiman ligeramente los valores de tensiones para casi todo el rango de análisis, mostrando una respuesta algo más dúctil en términos de la caída de resistencia para altas temperaturas. En figura 9 se ilustran las respuestas a tracción, incorporando a modo de comparación las curvas de referencia provistas por el EC2 (2011) y los resultados obtenidos por Thelardersson (1971) para el caso de tracción uniaxial. Todos los ensayos numéricos presentan una respuesta de ablandamiento térmico menor a la curva de referencia del EC2, lo cual tiene como origen la incidencia de las condiciones de borde mecánicas en el ensayo uniaxial, lo cual genera distribuciones de tensiones espurias en los bordes de la malla y en los bordes de los encuentros entre elementos que delimitan las zonas mortero-agregado.

4 CONCLUSIONES

El análisis numérico empleando criterios a niveles macro y meso mecánicos permite explorar cuales son las variables que inciden en la respuesta mecánica de un material tan complejo como el hormigón mediante la comparación de criterios de modelación que asumen la configuración de medio continuo ideal (el modelo macromecánico) y un modelo bifásico con generación de topología aleatoria que simula la mesoestructura del hormigón. El modelo mesomecánico aporta resultados por fase, permitiendo analizar la incidencia de la configuración y proporciones de la mezcla, así como el aporte de cada una de las fases a los distintos aspectos que determinan la respuesta de falla del material durante el proceso de degradación térmica, ampliando las posibilidades de estudio de un fenómeno tan complejo como lo es el de un material bifásico sometido a acciones termo mecánicas acopladas.

5 AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado con fondos del Proyecto de Investigación 23/C162 perteneciente al Instituto de Materiales, Estructuras y Construcciones (IMEC) de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, aprobado por el Consejo de Investigaciones de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Santiago del Estero (CICYT-UNSE).

REFERENCIAS

- Coussy, O., *Poromechanics*, John Wiley & Sons Ltd., England, 2004.
- Drucker, D.C., Prager, W, Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Quarterly of Appl Math*, Vol 10, 157-165, 1952.
- Kodur V., Dwaikat, M., Raut, N., Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures, *Engineering Structures*, Vol 31, 2368-2379, 2009.
- Lorefice, R., Etse, G., Lopez, C, Carol, I., Mesomechanic analysis of time dependent concrete Behavior, EURO-C, *Computational Modelling of Concrete Structures*, Austria, 2006.
- Lorefice, R, Etse, G., Viscoplastic approach for rate-dependent failure analysis of concrete joints and interfaces. *Int. Journal of Solids and Structures*, Vol 45, 2686-2705, 2008.
- Perzyna, P., The constitutive equations for rate sensitive materials, *Quarterly of Appl Math*, Vol 20, 321-332, 1963.
- Rizo Patrón, M., Pérez, G.A., Lorefice, R. H., Análisis de estructuras de hormigón sometidas a acciones térmicas elevadas, *III Congreso Arg. de Ingeniería (CADI)*, Chaco, 2016.
- Rizo Patrón, M., Lorefice, R.H., Pérez, G.A., Análisis del comportamiento estructural de columnas de hormigón armado a temperaturas elevadas, *24° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (AIE)*, Bs. As., 2016.
- Rizo Patrón, M., Pérez, G.A., Lorefice, R.H., Modelo constitutivo macromecánico para hormigones a temperaturas elevadas, *Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Valencia, España, 2017.
- Rizo Patrón, M., Lorefice, R.H., Pérez, G.A., Diseño de secciones de hormigón armado considerando escenarios de incendio, *25° Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (AIE)*, Resistencia, Chaco, 2018.
- Stankowski, T., Numerical simulation of progressive failure in particle composites. PhD Thesis, Dept. CEAE, University of Colorado, Boulder, USA, 1990.
- Thelandersson, S. Modelling of combined thermal and mechanical action in concrete. ASCE J. Engrg. Mech., 1987.
- Vonk, R., Softening of concrete loaded in compression. PhD Thesis, Technische Universitat Eindhoven, Postbus, Netherlands, 1992.