

AVANCES DEL MODELADO DE MORTERO CEMENTICIO REFORZADO CON FIBRAS NATURALES

MODELLING NATURAL FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS MORTAR

Gonzalo Ruano^a, Facundo Bellomo^a, Sergio Oller^b y Liz G. Nallim^a

^aICMASa, INIQUI (CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Salta, Avda. Bolivia
5150, 4400 Salta, Argentina, <http://www.ing.unsa.edu.ar>

^bCIMNE. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, Universidad
Politécnica de Cataluña, Campus Norte UPC, Gran Capitán S/N, 08034 Barcelona, España,
sergio.oller@upc.edu, <http://www.cimne.upc.es>

Palabras clave: Fibras naturales, mortero reforzado con fibras.

Resumen. Las fibras naturales son un recurso renovable que puede aprovecharse para generar materiales compuestos que satisfagan requisitos de costo y resistencia. Estas fibras presentan características geométricas y mecánicas muy variadas, incluso para un mismo tipo de fibra. En este trabajo se presentan los avances en el modelado del comportamiento mecánico de compuestos de mortero cementicio y fibras de bagazo y cáñamo. Se tiene en cuenta la variación de las propiedades mecánicas y se comparan los resultados numéricos obtenidos con resultados experimentales propios.

Keywords: Instructions, AMCA style, Computational Mechanics, article.

Abstract. Natural fibers are a renewable resource with interesting possibilities for the reinforcement of composites materials with a good cost-performance ratio. The fibers mechanical and morphological characteristics present a wide scattering, even along fibers of the same origin. In this work the advances on the numerical modeling of a cementitious matrix composite reinforced with hemp fibers are presented. The scattering of the mechanical properties of the components are considered and the numerical results are compared with experimental results.

1 INTRODUCCIÓN

Existe un creciente interés en la utilización de materiales compuestos reforzados con fibras naturales de origen vegetal. Esto se debe fundamentalmente a consideraciones sobre sustentabilidad e impacto ambiental. Estas fibras se han utilizado como refuerzo tanto en matrices poliméricas como cementicias. Una particularidad de las fibras vegetales es que presentan en general una variabilidad muy alta, tanto en su morfología como en sus propiedades mecánicas. Además en el caso particular de los materiales compuestos de matriz cementicia la matriz también presenta variabilidad en sus propiedades mecánicas. En este trabajo se explora mediante un análisis numérico el efecto de considerar en el modelo la variabilidad de las propiedades mecánicas de la fibra y la matriz. Para ello se consideró una distribución aleatoria de los valores de rigidez y tensión máxima para los materiales componentes que se incorporó en un modelo basado en la teoría de mezclas obteniéndose un método tipo Montecarlo. El comportamiento no lineal de los materiales se considera en forma fenomenológica a través de un modelo constitutivo elasto-plástico. En particular se estudió el caso de morteros reforzados con fibras cortas de cáñamo.

El modelo utilizado estima el comportamiento del compuesto considerando el aporte de la matriz y el de las fibras. Sin embargo, en general la fibra no es capaz de transmitir toda su resistencia al compuesto debido a su longitud, a su estructura interna y a las características de la interfaz. Para considerar estos efectos no se utiliza directamente la resistencia de la fibra a tracción sino que el aporte de la misma al compuesto se estima a través de ensayos de pull-out. En este trabajo se consideró en forma simplificada la variación de las propiedades de la matriz y del aporte de las fibras en forma independiente. Para la matriz se consideró en forma directa la distribución estadística de resistencia media a tracción correspondiente mientras que para el aporte de las fibras se realizó un análisis estadístico de la resistencia máxima y la pendiente obtenida en una campaña de ensayos experimentales de pull-out. En ambos casos se adoptó una distribución normal.

2 METODOLOGÍA

Para considerar la variación de las propiedades de los materiales constituyentes del compuesto es necesario conocer un valor de la posición y un indicador de la dispersión de cada propiedad. Particularmente se definen los parámetros valor promedio m y la desviación estándar s . Es decir que además del valor medio usualmente empleado en las simulaciones deterministas se considera la dispersión aleatoria que se registra en los ensayos de caracterización de cada componente. Se supone además que las propiedades responden a una distribución normal o gaussiana. Se genera un conjunto de números aleatorios comprendidos en el intervalo $(0,1)$, representativos de la probabilidad de ocurrencia de un valor, y con los parámetros m, s y usando la inversa de la función de distribución (Abramowitz y Stegun, 1964) se obtiene un conjunto de valores representativo de la propiedad.

$$\Phi_{m,s}^{-1}(p) = m + s\Phi^{-1}(p) = m + s\sqrt{2}\text{erf}^{-1}(2p - 1), p \in (0,1) \quad (1)$$

Siendo p la probabilidad. Estos valores representativos son asignados a cada elemento de la malla de manera aleatoria. Con este procedimiento se genera una malla de EF en la cual cada elemento posee un material distinto pero que en conjunto responden a una distribución normal con parámetros m, s .

De esta manera se puede considerar la dispersión o variación de las propiedades de los diferentes componentes del compuesto. Particularmente para la matriz cementicia se tiene en cuenta la variación de la resistencia máxima a compresión y el módulo de elasticidad varía con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión de manera similar a lo que sucede con el

hormigón.

$$E_c = 4700 \sqrt{\sigma'_c} \quad (2)$$

Para las fibras se considera que tanto la resistencia máxima σ_t como el módulo de elasticidad E_t varían de igual manera.

3 MODELOS UTILIZADOS

El mortero reforzado con fibras puede ser considerado como un material compuesto por una matriz de mortero y refuerzo de fibras con distintas orientaciones dispersas en el volumen. Una forma simple de modelar el comportamiento de materiales compuestos es mediante la teoría de mezclas. En este trabajo se utiliza la teoría de mezclas de materiales ortótropos para obtener el comportamiento del mortero con fibras simulando lo que ocurre en el mortero y en las fibras. En particular, se considera la anisotropía y el posible deslizamiento de las fibras cortas de manera simplificada (Luccioni, et al., 2012).

3.1 Material compuesto

Se usa la teoría de mezclas de sustancias básicas en su forma clásica (Truesdell & Toupin, 1960). Para el mortero se utiliza el modelo de daño plástico modificado y para las fibras de cañamo un modelo elastoplástico ortótropo en el que se considera el comportamiento de las fibras de manera simplificada (Luccioni, et al., 2012), (Ruano, et al., 2017).

En este caso se considera al compuesto formado por matriz de mortero y fibras en tres direcciones (x, y, z). No se considera explícitamente la interfaz fibra/matriz.

Es sabido que el deslizamiento de las fibras respecto de la matriz juega un papel importante en el comportamiento del compuesto. Para tener en cuenta este deslizamiento sin modelar la interfaz, se modifica el modelo de las fibras. Se supone que la deformación total de las fibras está compuesta por la deformación elástica $(\varepsilon_{ij}^e)_{Fi}$, una deformación plástica $(\varepsilon_{ij}^p)_{Fi}$ y la debida al deslizamiento relativo a la matriz $(\varepsilon_{ij}^s)_{Fi}$.

$$(\varepsilon_{ij})_{Fi} = (\varepsilon_{ij}^e)_{Fi} + (\varepsilon_{ij}^p)_{Fi} + (\varepsilon_{ij}^s)_{Fi}; \quad i = x, y, z \quad (3)$$

Las dos últimas componentes constituyen la deformación inelástica del conjunto fibra+interfaz. Sólo las dos primeras componentes ocurren estrictamente en las fibras, de manera que la deformación de las fibras mismas no coincide con la de la matriz.

3.2 Modelo constitutivo del mortero

Para el mortero se utiliza el modelo de daño plástico modificado (Luccioni y Rougier, 2005) (Rougier y Luccioni, 2007) que permite simular el comportamiento de materiales friccionales del tipo hormigón sometidos a altos niveles de confinamiento.

Es un modelo que deriva de una generalización de la teoría clásica de la plasticidad (Oller, 1988) (Lublinter, et al., 1989) (Luccioni, et al., 1996).

La Tabla 1 condensa las propiedades de la matriz de mortero cementiceo utilizadas en las simulaciones. Estas fueron calibradas del ensayo de mortero simple y extraídas de los ensayos experimentales. Para el mortero se consideró una resistencia media $\sigma_{uc} = 40MPa$ y una desviación estándar $s = 1.6MPa$.

Propiedades	Mortero
Módulo de elasticidad E [MPa]	30000
Coefficiente de Poisson ν	0.19
Resistencia última a compresión σ_{uc} [MPa]	40.0
Umbral fluencia uniaxial en comp. σ_{fc} [MPa]	20.0
Relación de resistencia inicial (umbral comp./trac.) R^{0p}	18.0
Energía de fractura G_f [MPa.mm]	0.04

Tabla 1. Propiedades deterministas del mortero simple.

3.3 Modelo constitutivo de las fibras de cáñamo (cortas)

Una forma de simular aproximadamente el comportamiento del mortero con fibras utilizando la teoría de mezclas es modificar las ecuaciones constitutivas de las fibras (Oller, 2001) (Car, 2000) (Car, et al., 2000) (Luccioni y López, 2002) (Luccioni, et al., 2005) (Isla Calderón y Luccioni, 2008) (Luccioni, et al., 2012) (Ruano, et al., 2017). Teniendo en cuenta que en este caso las fibras se deslizan antes de romper, se reduce la tensión de fluencia en la dirección axial de las fibras. De esta manera, el umbral de plasticidad en esta dirección representa, en realidad, el umbral de deslizamiento de las fibras respecto del mortero. El endurecimiento en esa dirección depende de los distintos mecanismos que se desarrollan en el proceso de arrancamiento.

Partiendo de las consideraciones anteriores, para las fibras de cáñamo se utiliza un modelo elastoplástico para materiales ortótropos. De esta manera, se pueden tener en cuenta, no sólo la ortotropía elástica propia de la geometría de la fibra que sólo contribuye a resistir tensiones en la dirección axial, sino también la ortotropía en los umbrales de comportamiento inelástico que surge cuando se introduce el umbral de deslizamiento, menor a la tensión de rotura, en la dirección axial de las fibras.

Para definir el umbral de deslizamiento y flujo de deslizamiento de las fibras se utilizó el criterio de von Mises en el espacio isótropo ficticio. Para especificar el endurecimiento de las fibras en la dirección axial se utilizaron curvas carga-desplazamiento obtenidas de ensayos de extracción de fibras. Para las fibras se consideró una resistencia media $\sigma_{fm} = 61\text{MPa}$ y una desviación estándar $s = 17\text{MPa}$.

Propiedades	Cáñamo
Módulo de elasticidad E_{xx} [MPa]	25000
Coefficiente de Poisson $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{zy} = \nu_{yz}$	0.19
Módulo de elasticidad $E_{yy} = E_{zz}$ [MPa]	2.5
Coefficiente de Poisson $\nu_{yx} = \nu_{zx}$	0.0019
Tensión Máxima σ_{fm} [MPa]	61

x es la dirección axial de las fibras

Tabla 2. Propiedades deterministas de las fibras de cáñamo.

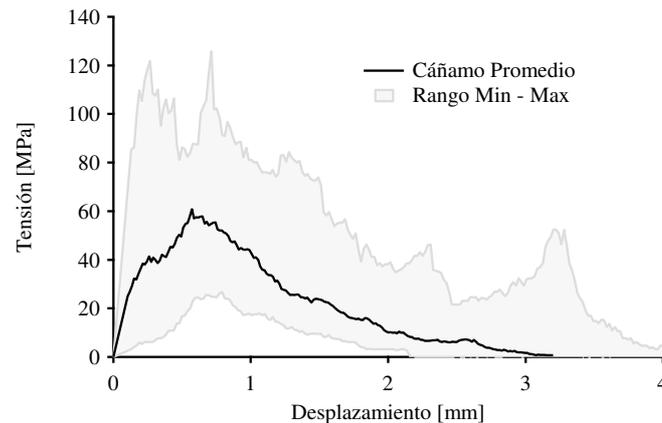


Fig. 1. Respuesta promedio pull-out de cáñamo.

4 EJEMPLO NUMÉRICO

En Fig. 2 se observa la malla de elementos finitos. La misma consta de 1377 elementos de cuatro nodos con cuatro puntos de Gauss de 5mm x 5mm. Corresponde a una viga de sección 100mm x 100mm, luz 350mm y entalla central de altura 15mm y ancho 5mm sometida a flexión de tres puntos. Todas las simulaciones se hicieron con la misma malla. Se discretizó con elementos de igual tamaño para permitir que cada propiedad tenga la misma posibilidad de ser asignada a cada elemento. En Fig. 2 se presenta además un mapa en escala de grises que muestra con la misma escala la ubicación del factor que modifica la resistencia de la matriz (A) y la resistencia del refuerzo fibras (B). Se destaca que matriz y fibras no coinciden en ubicación ni rango, pues responden a distribuciones diferentes e independientes, siendo la dispersión de la matriz menor a la del refuerzo. En la dosificación las fibras corresponden a un 2% del volumen total y en las simulaciones se consideró en primera instancia que un 40% estaba orientado en dirección horizontal y un 40% en vertical. En forma aproximada esto equivale a considerar el aporte de las fibras con una alineación de $\pm 38^\circ$ respecto del eje longitudinal de las probetas (Ren et al 2010).

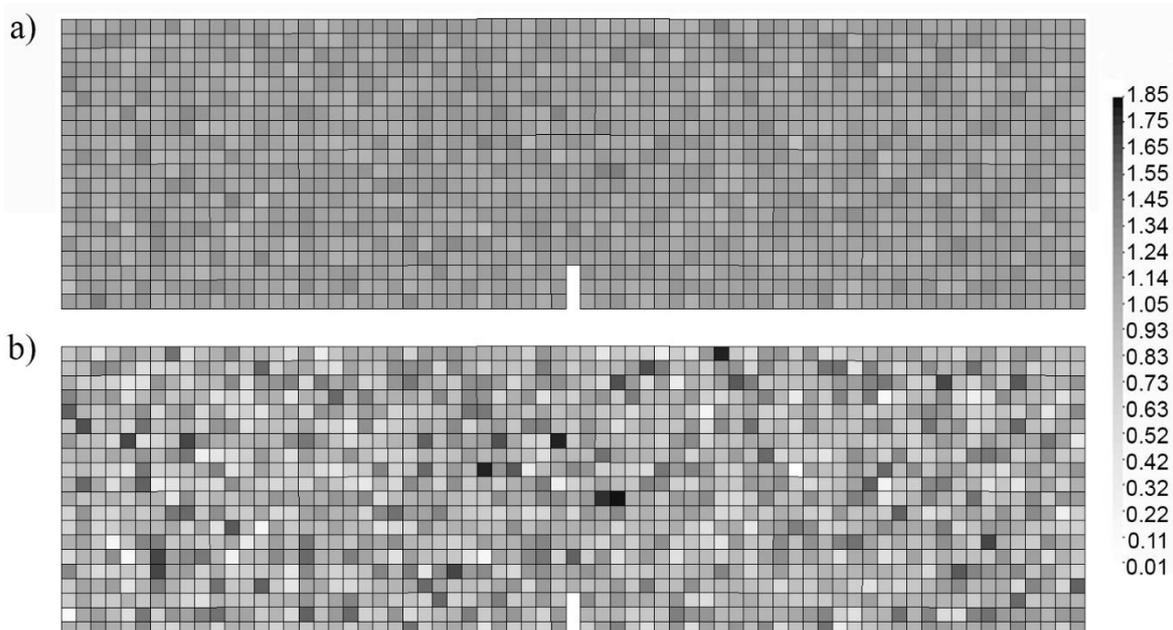


Fig. 2. Malla de EF. Distribución de propiedades. a) Matriz, a) Fibras.

La Fig. 3 muestra la variable plástica del mortero en el estado final de algunas de las simulaciones Monte Carlo. Se puede observar que a diferencia de lo que sucede en el caso determinista donde la plasticidad se concentra en la banda central de elementos, en estos casos la plasticidad puede desarrollarse por caminos variados dependiendo de la ubicación de los materiales que haya tocado en la malla. El caso d) es similar al determinista mientras que los casos a), b) y c) evidencian la posibilidad de diferentes caminos para la zona fisurada en función de la distribución espacial aleatoria de las propiedades.

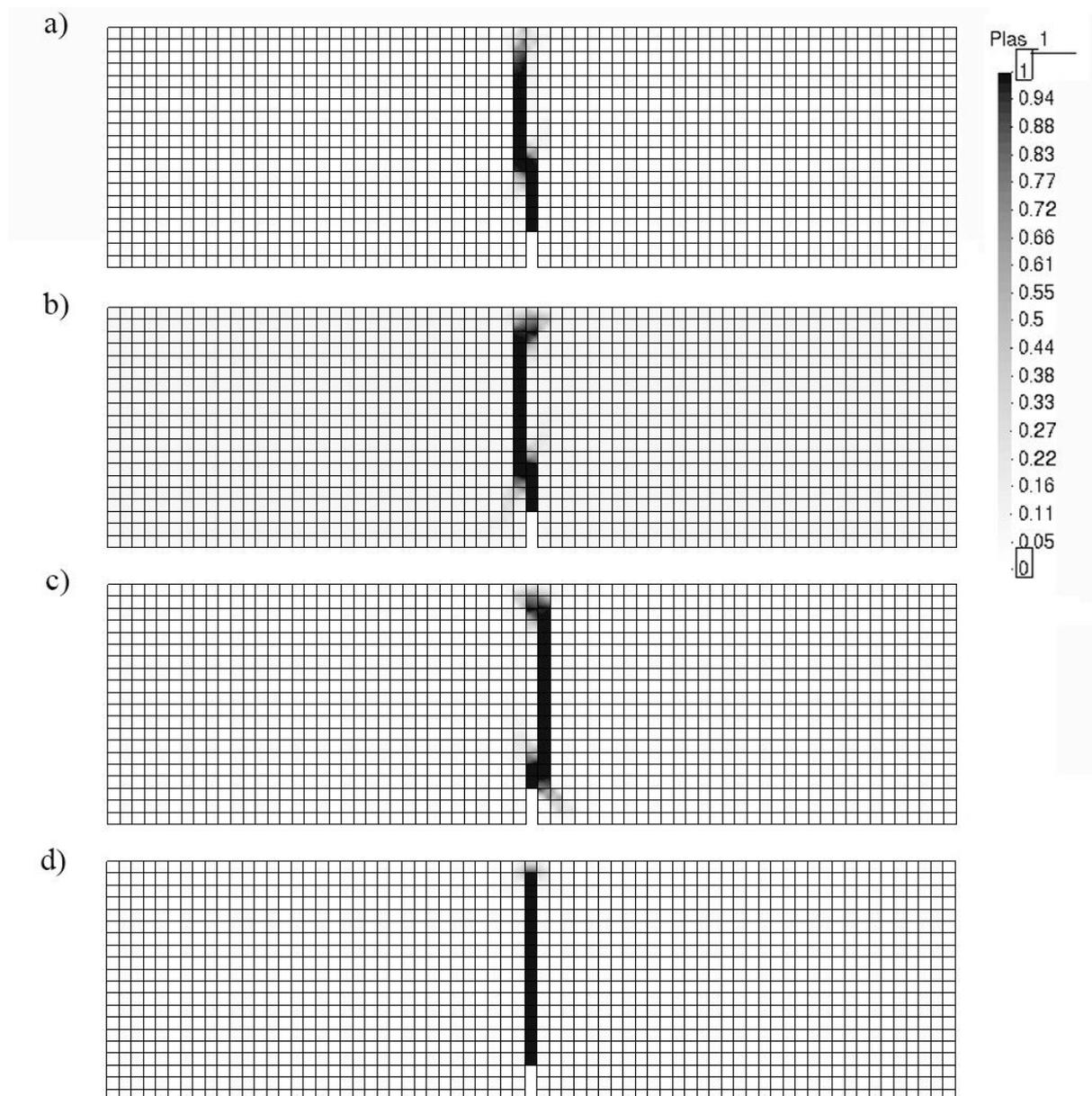


Fig. 3. Variable interna plasticidad, ejemplos de diferentes respuestas a), b), c) y d).

En Fig. 4 se comparan todas las respuestas numéricas Monte Carlo con las experimentales del mortero reforzado con fibras de cáñamo en flexión. Se incluye además la respuesta numérica determinista de la matriz. Experimentalmente estas vigas mostraron un incremento de carga hasta formar un plafón y luego ablandamiento suave. Se puede observar que la *nube*

de resultados experimentales se superpone con el *corredor* de simulaciones numéricas en gran parte. Las simulaciones numéricas presentan variedad en su respuesta. No se generan curvas paralelas más bien se cruzan entre ellas. El comportamiento cercano al pico también varía desde los que reproducen un plafón hasta los que poseen un pico.

La respuesta determinista, es decir que considera las propiedades promedio de los materiales, presenta un pico un tanto mayor que el promedio experimental seguido de un pequeño plafón y luego la etapa de ablandamiento. La posición superior del pico del resultado numérico determinista coincide aproximadamente con el patrón, siendo el resto de la curva la porción dominada por la contribución de las fibras.

En Fig. 4 se muestra además la curva promedio de los resultados experimentales. Esta curva se asemeja en el pico a la simulación determinista. Presenta muy poco plafón pero sí se nota una disminución de pendiente, luego la cola de la curva es similar a la determinista.

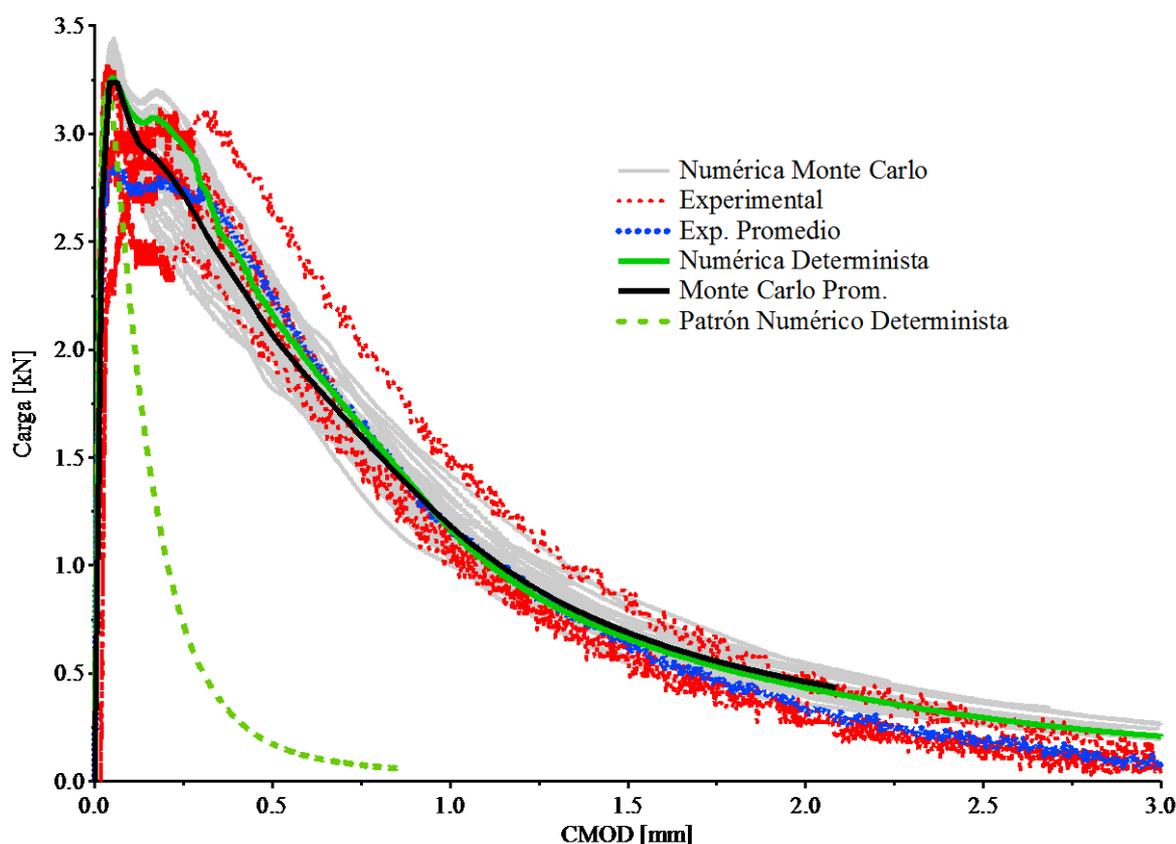


Fig. 4. Respuestas experimentales y numéricas de mortero reforzado con fibras de cáñamo.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se simula el comportamiento de vigas entalladas de mortero y mortero reforzado con fibras de cáñamo ensayadas a flexión de tres puntos. De manera simplificada se tiene en cuenta la variación de las propiedades mecánicas de los materiales constituyentes considerando que poseen una distribución normal y ubicación aleatoria dentro del sólido.

Se pueden destacar los siguientes aspectos:

Considerar la variación de las propiedades puede activar caminos de falla que no es posible obtener en el caso determinista. Además existen diferencias entre la respuesta obtenida considerando propiedades medias para los materiales (sin dispersión, es decir determinista) y

la curva media de respuesta obtenida con el método Monte Carlo.

Las curvas del método Monte Carlo barren un rango amplio de respuestas esperables a pesar de tener una cantidad limitada de simulaciones numéricas. Además en general presentan un buen ajuste respecto de los ensayos aunque en un sector post-pico subestiman ligeramente el rango de respuestas posibles. Esta falencia en las simulaciones probablemente obedezca a una mayor dispersión del aporte del refuerzo. En los próximos trabajos se estudiará en más detalle la forma de considerar la variación del aporte de las fibras.

REFERENCIAS

- Abramowitz, M. y Stegun, I. A., *Handbook of Mathematical Functions*, New York: Dover, 1964.
- Betten, J., Application of tensor functions to the formulation of yield criteria for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*, Issue 4, 29-46, 1988.
- Car, E., Modelo Constitutivo para el Estudio del Comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos, *Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña - Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería*, 2000.
- Car, E., Oller, S. y Oñate, E., An Anisotropic Elasto Plastic Constitutive Model for Large Strain Analysis of Fiber Reinforced Composite Materials, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 185(2-4), 245-277, 2000.
- Isla Calderón, A. y Luccioni, B., Modelo para hormigones reforzados con fibras, *ENIEF* 2008.
- Lubliner, J., On the Thermodynamic Foundations of Non-Linear Mechanics, *Int. Journal Non Linear Mechanics*, Volume 7, 237-254, 1972.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. y Oñate, E., A plastic damage model for concrete, *Int. J. Solids Struct.*, 3(25), pp. 299-326, 1989.
- Luccioni, B. y López, D. E., Modelo para materiales compuestos con deslizamiento de fibras, *Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos*, Junio. 411-431, 2002.
- Luccioni, B. M., López, D. E. y Danesi, R. F., Bond-Slip in Reinforced Concrete Elements, *Journal of structural engineering*, november, 131(11), 1690-1698, 2005.
- Luccioni, B., Oller, S. y Danesi, R., Coupled plastic damage model, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Issue 129, 81-89, 1996.
- Luccioni, B. y Rougier, V., A plastic damage approach for confined concrete, *Computer y Structures*, Issue 83, 2238-2256, 2005.
- Luccioni, B., Ruano G., Isla F., Zerbino R., Giaccio G., A simple approach to model SFRC. *Construction y Building Materials*, 37, 111-124, 2012.
- Oller, S., *Un modelo de Daño Continuo para materiales Friccionales*, Ph.D. Thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, Escola Técnica Superior D'Ingenyrs de Camins, Canals I Ports, 1988.
- Oller, S., *Fractura mecánica, Un enfoque global*, CIMNE - Edicions UPC, Barcelona, 2001.
- Ren B., Noda J., y Goda K., Effects of Fiber Orientation Angles and Fluctuation on the Stiffness and Strength of Sliver-Based Green Composites, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 59, 7, 567-574, July 2010.
- Rougier, V. C. y Luccioni, B. M., Numerical assessment of frp retrofitting systems for reinforced concrete elements, *Engineering Structures*, Issue 29, 1664-1675, 2007.
- Ruano, G., Oller, S., Nallim, L. y Vera, J., Modelo numérico para el análisis del comportamiento de materiales cementicios reforzados con fibras naturales, *Mecánica Computacional, Volumen XXXV*, 1977-1988, 2017.
- Truesdell, C. y Toupin, R., *The classical field theories*, Handbuch der Physik, 1960.