

PARAMETROS QUE DEFINEN EL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Facundo Isla^a, Bibiana Luccioni^a

^a*Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina; CONICET, Av. Rivadavia 1917, Cdad de Bs. As.;*
<http://www.herrera.unt.edu.ar/iest>, fisla@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar

Keywords: Hormigón, Fibras, Acero, Deslizamiento, Compuesto, Rotura.

Resumen. En este trabajo se presenta un modelo para compuestos que permite predecir el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras de acero (HRF). El modelo de compuesto está basado en la teoría de mezclas generalizada y permite tener en cuenta la proporción, distribución y orientación de las fibras. Para el hormigón se utiliza un modelo de plasticidad previamente desarrollado por el grupo de investigación. Para las fibras se propone un modelo elastoplástico ortótropo con deslizamiento, que representa conjuntamente el comportamiento de la fibra y de la interfaz fibra-matriz. Para su calibración se utiliza una serie de ensayos experimentales de extracción de fibras.

El modelo completo es implementado en un programa de elementos finitos para reproducir el comportamiento mecánico de elementos de HRF. Una vez calibradas las propiedades mecánicas de los materiales componentes del HRF, se realizan simulaciones de vigas de HRF entalladas apoyadas en tres puntos y placas circulares de HRF apoyadas en cuatro puntos. Los resultados numéricos se comparan con los experimentales. Se estudia la influencia que tienen en la respuesta del HRF obtenida numéricamente, la forma de considerar la orientación de las fibras dentro del compuesto, la longitud embebida considerada dentro del modelo de arrancamiento y la consideración de la inclinación de las fibras. Se analiza, además, la diferencia entre considerar el aporte de todas las fibras que atraviesan una fisura o sólo el de las fibras eficaces (fibras que evidencian deformación del gancho). A partir de allí, se extraen conclusiones sobre la forma más adecuada de modelar la orientación de la fibra en el compuesto, la longitud embebida que se debe considerar y la proporción de fibras.

1 INTRODUCCIÓN

Los últimos avances tecnológicos en el hormigón estructural permiten alcanzar hormigones con altas resistencias, pero el material se torna muy frágil. La incorporación de fibras en este tipo de hormigón permite que el mismo se comporte como un material dúctil. Las fibras actúan interceptando las fisuras, retardando su propagación. Si hay suficiente cantidad y están uniformemente distribuidas, evitan que las microfisuras se unan aumentando la resistencia aparente de la matriz. La principal diferencia en el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras (HRF) respecto al del hormigón sin refuerzo se obtiene en tracción. Las mejoras están fundamentalmente relacionadas con el proceso de transferencia de carga de la matriz a las fibras a través de las fisuras. El arrancamiento de fibras es el principal mecanismo que contribuye a la alta tenacidad del material por su habilidad para redistribuir las tensiones.

En los últimos años se han desarrollado muchos modelos para HRF que se pueden clasificar en macro o meso modelos, según la escala en que se derivan.

En los macro-modelos el material compuesto se representa como un único material con propiedades promedio. Generalmente son modelos fenomenológicos basados en resultados experimentales ([Barros et al. \(2004\)](#), [Özcan et al. \(2009\)](#), [Hung y Li \(2013\)](#)). La mayor desventaja es la necesidad de gran cantidad de resultados experimentales que resultan costosos y la imposibilidad de representar los fenómenos que ocurren en cada componente.

Estos problemas se pueden evitar usando modelos derivados en la meso-escala lo cual permite además diseñar el material para la aplicación y predecir el comportamiento del material diseñado ([Li et al. \(1991\)](#)). El desarrollo de estos modelos involucra dos puntos importantes: (1) la derivación de las fuerzas de las fibras que cosen las fisuras y (2) la derivación del comportamiento del compuesto para una dada distribución de fibras ([Geng y Leung \(1997\)](#)). Los modelos difieren fundamentalmente en la forma en que se desarrollan y se combinan estos pasos. La derivación de los modelos para las fuerzas de las fibras cosiendo las fisuras puede hacerse experimentalmente o derivarse meso-mecánicamente. Algunos autores han desarrollado modelos para reproducir el arrancamiento de fibras rectas o con distintas geometrías de una matriz de hormigón ([Naaman et al. \(1991\)](#), [Chanvillard \(1999\)](#), [Laranjeira et al. \(2010\)](#), [Soetens et al. \(2013\)](#)). Si bien todos los enfoques meso-mecánicos tienen en cuenta las distintas componentes del HRF: matriz de hormigón, fibras e incluso interfaz fibra-matriz, algunos lo hacen mediante una discretización explícita de la geometría de las fibras como elementos discretos ([Cunha et al. \(2012\)](#), [Fang y Zhang \(2013\)](#)). Algunos de estos modelos usan además un enfoque multi-escala ([Gal y Kryvoruk \(2011\)](#), [Ren y Li \(2013\)](#)) para representar el comportamiento del compuesto en la macro-escala. Otros autores usan modelos de homogeneización más sencillos como Mori Tanaka ([Pasa Dutra et al. \(2010\)](#)) o la teoría de mezclas clásicas ([Oliver et al. \(2012\)](#), [Caggiano et al. \(2012a\)](#), [Caner et al. \(2013\)](#)) que le permiten modelar el compuesto en función de la proporción de fibras, orientación y características, sin modelar explícitamente la geometría de las mismas.

En este trabajo se considera al hormigón reforzado con fibras (HRF) como un material compuesto formado por una matriz frágil de hormigón con fibras cortas dispersas en la misma que pueden despegarse y deslizarse. El compuesto se modela usando información de la mesoescala a través de la teoría de mezclas. Esta teoría permite obtener el comportamiento del

compuesto a partir del comportamiento de los materiales componentes que pueden tener distintas leyes constitutivas. La principal hipótesis de la teoría de mezclas es la compatibilidad de deformaciones de las componentes. Para el hormigón se utiliza el modelo elasto-plástico isótropo (Luccioni y Rougier (2005)) y para las fibras un modelo elasto-plástico ortótropo. Este modelo describe en forma conjunta los fenómenos inelásticos que se desarrollan en las fibras y en la interfaz fibra+matriz. De esta forma se salva la limitación de la teoría de mezclas clásicas de compatibilidad de deformaciones entre fibras y matriz que impediría simular el deslizamiento fibra/matriz. Si bien el acero del cual están hechas las fibras puede considerarse como un material isótropo, la geometría de las fibras y la posibilidad de deslizarse sólo en la dirección axial de las mismas hacen que el comportamiento de las fibras sea marcadamente ortótropo. Por esa razón, se utiliza un modelo elastoplástico ortótropo para describir su comportamiento.

2 MODELO DE HRF

2.1. Tratamiento de la ortotropía de las fibras

La formulación ortótropa que se utiliza en este trabajo se basa en el concepto de mapeo de espacios (Oller et al. (1995)) que parte de la hipótesis de que existen dos espacios (Betten (1988), Luccioni et al. (1995)): un espacio ortótropo real y un espacio ficticio isótropo. El planteo consiste en transportar el estado de tensiones y las variables internas desde un espacio real ortótropo a otro espacio ficticio isótropo. Dicho espacio es isótropo en cuanto a umbrales de comportamiento inelástico, pero no necesariamente respecto a otras propiedades, como la rigidez elástica. En el espacio isótropo ficticio se pueden utilizar funciones desarrolladas originalmente para materiales isótropos para definir el límite del comportamiento elástico y la evolución del mismo. Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados mediante una transformación del tipo:

$$\tau_{kl} = A_{klij}(\sigma_{mn}, \kappa)\sigma_{ij} \quad (1)$$

donde τ_{kl} y σ_{ij} son los tensores de tensión en los espacios isótropo ficticio y ortótropo real respectivamente. A_{klij} es un tensor de cuarto orden, que contiene la información sobre la ortotropía del material y en el caso más general depende del endurecimiento a través de la variable de endurecimiento κ . En este trabajo se lo define en forma simplificada a través de un tensor diagonal de cuarto orden (Toledo et al. (2008)) constante:

$$A_{klij} = \delta_{im}\delta_{jn}\delta_{km}\delta_{ln} \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}_{mn}} \quad (2)$$

donde $\bar{\tau}$ es el umbral de comportamiento inelástico en el espacio isótropo ficticio (idéntico en todas direcciones) y $\bar{\sigma}_{mn}$ es el valor de dicho umbral en la dirección m en el plano de normal n en el espacio ortótropo real.

2.2. Modelo elastoplástico para las fibras

La ecuación constitutiva secante de las fibras se escribe como:

$$(\sigma_{ij})_f = (C_{ijkl})_f \left((\varepsilon_{kl})_f - (\varepsilon_{kl}^{pd})_f \right) \quad (3)$$

donde $(C_{ijkl})_f$ es la rigidez elástica y $(\varepsilon_{kl}^{pd})_f$ representa la deformación inelástica de la fibra que incluye deformaciones plásticas de la fibra y el deslizamiento fibra-matriz.

Para definir el umbral de comportamiento inelástico se usa una función de discontinuidad similar a la función de fluencia de la teoría de la plasticidad definida en el espacio isótropo ficticio:

$$F \left((\sigma_{ij})_f, \kappa^{pd} \right) = \bar{F} \left((\tau_{ij})_f, \bar{\kappa}^{pd} \right) = \bar{f} \left((\tau_{ij})_f \right) - \bar{K}(\bar{\kappa}^{pd}) = 0 \quad (4)$$

\bar{F} es la función que define el umbral de plasticidad-deslizamiento en el espacio isótropo ficticio y debe ser una función convexa (Maugin (1992)). $\bar{K}(\bar{\kappa}^{pd})$ representa la tensión de arrancamiento en función de una variable de endurecimiento inelástica, que se obtiene a partir de curvas de arrancamiento de fibras generadas mediante el modelo de arrancamiento de fibras y \bar{f} es la tensión equivalente en el espacio isótropo ficticio que en este trabajo se define a través de la función de fluencia de Von Mises.

La evolución de las deformaciones inelásticas fibra/matriz se obtiene a través de una regla de flujo, similar a la regla de flujo de la plasticidad, definida en el espacio isótropo ficticio.

$$(\dot{\varepsilon}_{ij}^{pd})_f = \lambda \frac{\partial F((\sigma_{mn})_f)}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial \bar{f}((\tau_{mn})_f)}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial \bar{f}((\tau_{mn})_f)}{\partial \tau_{kl}} \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial \bar{f}((\tau_{mn})_f)}{\partial \tau_{kl}} A_{klij} \quad (5)$$

2.3. Modelo de arrancamiento de fibras

El modelo de arrancamiento se desarrolla a partir de los modelos de Naaman et al. (1991) y Chanvillard (1999), a los que se les agrega la consideración del efecto del estado tensional de la matriz, de la deformación axial del eje de la fibra, de fuerzas residuales de arrancamiento, del efecto de la inclinación de las fibras respecto al plano de fisuración, de la rotura de la matriz y de la rotura de la fibra.

En el planteo se consideran dos procesos, en el primero se genera el despegue o rotura de la interfaz fibra-matriz y en el segundo el deslizamiento de la fibra. La resistencia al deslizamiento de las fibras depende, además de las características de la interfaz fibra-matriz, de la geometría de las fibras. En fibras lisas, la resistencia al deslizamiento es aportada únicamente por la fricción generada en la interfaz durante el deslizamiento. En el caso de las fibras de eje curvo, la resistencia al deslizamiento tiene una componente mecánica adicional.

A partir del balance de energía mecánica, durante el desplazamiento de una fibra con deformación axial (Isla (2014)), se establece que el trabajo realizado por las fuerzas externas es igual a la energía de deformación a partir de lo cual se obtiene el modelo de deslizamiento para fibras de eje curvo que con deformación axial. El modelo permite simular el deslizamiento de fibras tanto alineadas como inclinadas. Una fibra se considera alineada cuando la dirección de arrancamiento en el punto de salida de la matriz coincide con la dirección de la fibra inmersa

en la matriz y en el caso contrario se trata de fibras inclinadas. En la Figura 1a y Figura 1b, se muestra la forma de una fibra inclinada antes y después de una apertura de fisura $\tilde{\delta}$, respectivamente. En las mismas se define también el ángulo de inclinación φ de la fibra respecto de la normal al plano de fisura. En la Figura 1c, se muestra una ampliación del punto de salida de la fibra desde la matriz y los distintos efectos que se producen en él.

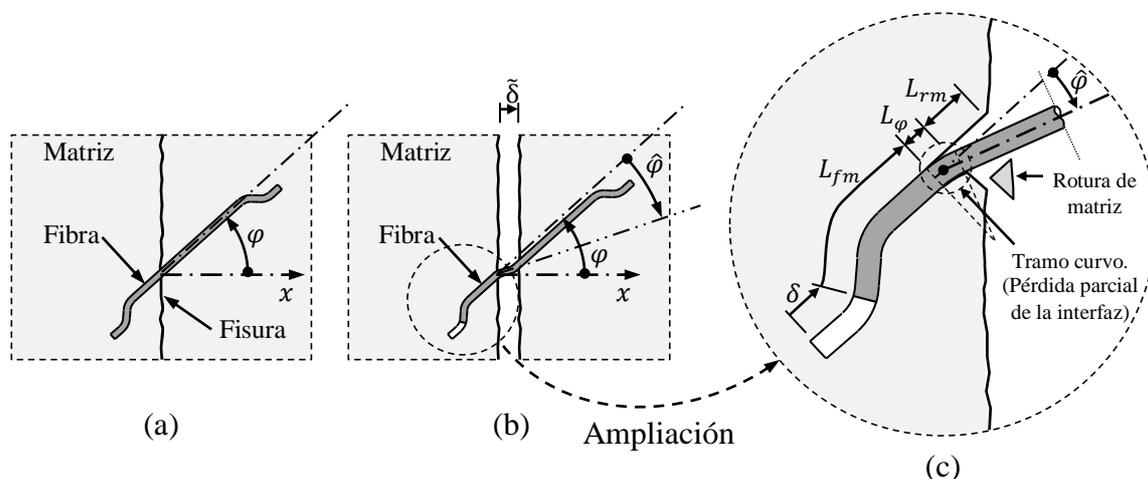


Figura 1: Geometría de fibra inclinada. (a) Sin apertura de fisura, (b) Con apertura de fisura. (c) Punto de salida de la fibra desde la matriz

El modelo supone que la matriz se rompe en una longitud L_{rm} y que además se genera en la fibra un tramo curvo de longitud L_{φ} , ver Figura 1c. En este tramo curvo se pierde parte del contacto entre la fibra y la matriz, en la zona convexa de la fibra. El tramo adyacente al tramo curvo hacia el lado de la fisura, pierde completamente el contacto con la matriz y además, se lo considera recto. La longitud de la interfaz fibra-matriz que no resulta afectada por la rotura de la matriz y el cambio de dirección de la fibra, se designa con L_{fm} . La rotura de la matriz y la generación del tramo curvo, producen que el desplazamiento normal a la fisura $\tilde{\delta}$ sea mayor que el deslizamiento δ indicado en la Figura 1c. Teniendo en cuenta estas consideraciones se obtiene finalmente el modelo de deslizamiento de fibras inclinadas:

$$P \begin{cases} = F_{fm}(f, \hat{\varphi},) \int_0^{L_{fm}} \left(\frac{dC}{d\delta} M + T_{fm} \right) ds & \tilde{\epsilon}_{sp} = 0 \\ = N_p & \tilde{\epsilon}_{sp} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

donde $\tilde{\epsilon}_{sp}$ es la deformación plástica del eje de la fibra, f es el coeficiente de fricción, $\hat{\varphi}$ es el ángulo cambio de dirección de la fibra, M es el momento flector evaluado en la sección de fibra de coordenada s , T_{fm} es la resultante de las fuerzas tangenciales que actúan en interfaz fibra-matriz, $dC/d\delta$ el el cambio de curvatura respecto del deslizamiento, N_p es el esfuerzo normal plástico de la sección y, F_{fm} es una función que relaciona el deslizamiento de la fibra alineada, con el deslizamiento de la fibra inclinada y se define como:

$$F_{fm}(f, \hat{\varphi},) = \{1 - [2 f \text{sen}(\hat{\varphi}/2)]/[1 + f \text{tg}(\hat{\varphi}/2)]\}^{-1} \quad (7)$$

El modelo de fibra inclinada de Ec.(6) se resuelve en forma simultánea con un modelo de rotura de fibra y un modelo de rotura de matriz (Isla (2014)). Para determinar la rotura de

la fibra, se usa el *trabajo plástico* generado en la sección de fibra en estudio, ya que este tiene en cuenta el estado de deformación, tensión y la forma de la sección. En la evaluación del estado de tensiones y deformaciones, se considera como aproximación que, el material de las fibras tiene un comportamiento elasto-perfectamente plástico. El modelo de rotura de matriz se basa en el equilibrio de fuerzas sobre la porción de matriz que se desprende en la rotura y establece una relación entre la fuerza e arrancamiento P y la longitud de rotura de la matriz L_{fm} y, depende principalmente de la resistencia a tracción de la matriz.

2.4. Estimación de fibras eficaces

Las fibras eficaces son las fibras presentes en el compuesto que realmente trabajan en la transferencia de fuerzas a través de las fisuras. Actualmente no se cuenta con modelos que permitan determinar la fracción volumétrica de fibras eficaces, pero experimentalmente se las puede identificar como aquellas fibras que poseen el gancho enderezado una vez que las partes de un espécimen divididas por una fisura son separadas completamente.

En los resultados obtenidos por Barragán (2002) las fibras eficaces están en el orden del 56% y 73% de las totales en especímenes ensayados a tracción directa y flexión de vigas entalladas respectivamente. En este caso, la diferencia se debe a la orientación de las fibras condicionada por el efecto pared. Torrijos (2008) obtuvo resultados similares de fibras eficaces en ensayos de flexión con vigas entalladas (50% a 73%), en estos resultados se destaca la influencia de la relación entre la longitud de la fibra y el tamaño máximo del agregado. A igual tamaño máximo de agregado, las fibras más largas tienen un porcentaje de fibras eficaces mayor. En general, las fibras eficaces son aproximadamente el 60% del volumen total de fibras.

2.5. Distribución en posición

Las fisuras no se producen necesariamente en el medio de la longitud de las fibras y además, debido a la distribución aleatoria de las fibras en el compuesto de HRF, las fibras que atraviesan una fisura pueden tener diferentes longitudes embebidas L . Esta longitud L puede variar desde 0, hasta la mitad de la longitud de la fibra $L_f/2$. Asumiendo una distribución uniforme de la posición de la fibra respecto de la fisura o longitud embebida L (Li et al. (1991)), se tiene que el valor promedio de L es igual a la cuarta parte de la longitud de la fibra $L_f/4$.

En los ejemplos de aplicación se estudia la influencia de la longitud embebida considerada en la respuesta mecánica del HRF obtenida numéricamente.

3 APLICACIONES

Se presentan simulaciones numéricas de elementos de HRF, donde se utiliza fibra de acero de sección circular con ganchos en los extremos, de 1mm de diámetro, 50mm de longitud y una resistencia a tracción de 860MPa. En primer lugar se calibran los parámetros del modelo de arrancamiento a partir de ensayos de arrancamiento de fibras lisas, luego se predice el comportamiento del arrancamiento de la fibra con ganchos desde una matriz de hormigón y se compara con resultados experimentales (Isla (2014)). En segundo lugar se simula el comportamiento mecánico de vigas de HRF entalladas sometidas a flexión, donde se estudia la

influencia de la longitud embebida de la fibra y el efecto que se genera cuando algunas fibras se rompen o cortan. Por último, se simula el comportamiento mecánico de placas circulares de HRF en flexión, donde se estudia la influencia del modelado de la orientación de la fibra y el criterio para definir la fracción volumétrica de fibra que contribuye en la respuesta mecánica del HRF. Las vigas corresponden a un hormigón H80 con 30 y 60kg/m³ de fibra, mientras que las placas a un hormigón H50 con 40kg/m³ de fibra.

3.1. Calibración y simulación numérica de arrancamiento de fibras

Se calibran los parámetros del modelo de arrancamiento de fibras, para una fibra alineada sin gancho, desde una matriz de hormigón H80. En la Figura 2 se muestra la simulación numérica de arrancamiento de fibras junto a la envolvente de resultados experimentales (Isla (2014)). Los parámetros calibrados son: Tensión tangencial máxima de adherencia $\tau_{max} = 6,00\text{N/mm}^2$; Tensión tangencial friccional $\tau_f = 5,00\text{N/mm}^2$; Módulo de adherencia $\kappa = 1500(\text{N/mm}^2)/\text{mm}$; Coeficiente de roce $f = 0,40$; Parámetro $\eta = 0,20$; Carga pico correspondiente a fibras lisas $P_{pic} = 320\text{N}$; Desplazamiento correspondiente a carga pico $\delta_{pic} = 0,05\text{mm}$.

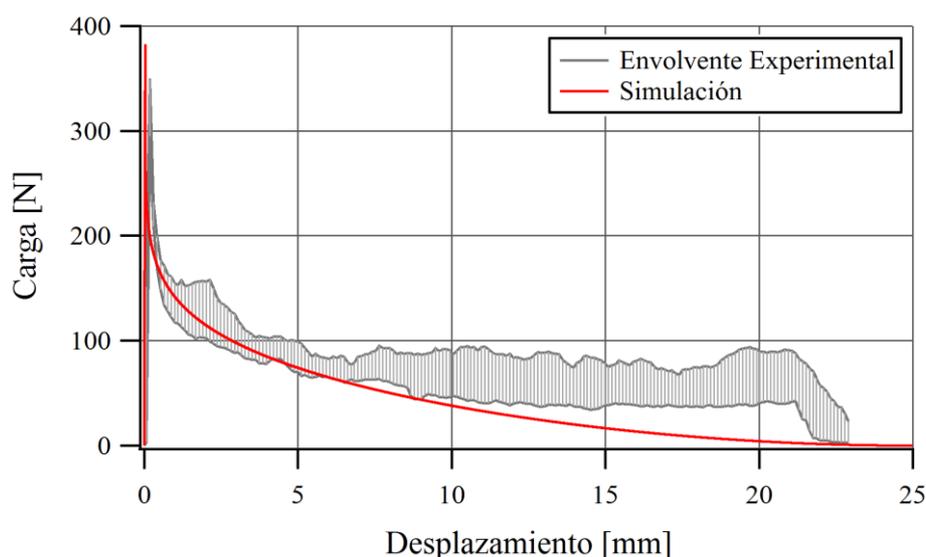


Figura 2: Curvas de arrancamiento de fibras de matriz H80. Fibra sin gancho, calibración.

De igual forma se calibran los parámetros del modelo de arrancamiento de fibra para una matriz de hormigón H50, obteniendo: Tensión tangencial máxima de adherencia $\tau_{max} = 5,50\text{N/mm}^2$; Tensión tangencial friccional $\tau_f = 4,50\text{N/mm}^2$; Módulo de adherencia $\kappa = 1300(\text{N/mm}^2)/\text{mm}$; Coeficiente de roce $f = 0,38$; Parámetro $\eta = 0,20$; Carga pico correspondiente a fibras lisas $P_{pic} = 300\text{N}$; Desplazamiento correspondiente a carga pico $\delta_{pic} = 0,06\text{mm}$.

En la Figura 3 se presenta la simulación de arrancamiento de fibra con gancho desde una matriz de hormigón H80, con los parámetros calibrados anteriormente. La simulación se compara con la envolvente de resultados experimentales (Isla (2014)), donde se puede observar

un buen ajuste. A partir de esta simulación de arrancamiento de fibras con gancho se define la evolución del umbral de comportamiento inelástico de las fibras $\bar{K}(\bar{K}^{pd})$ en el modelo de HRF.

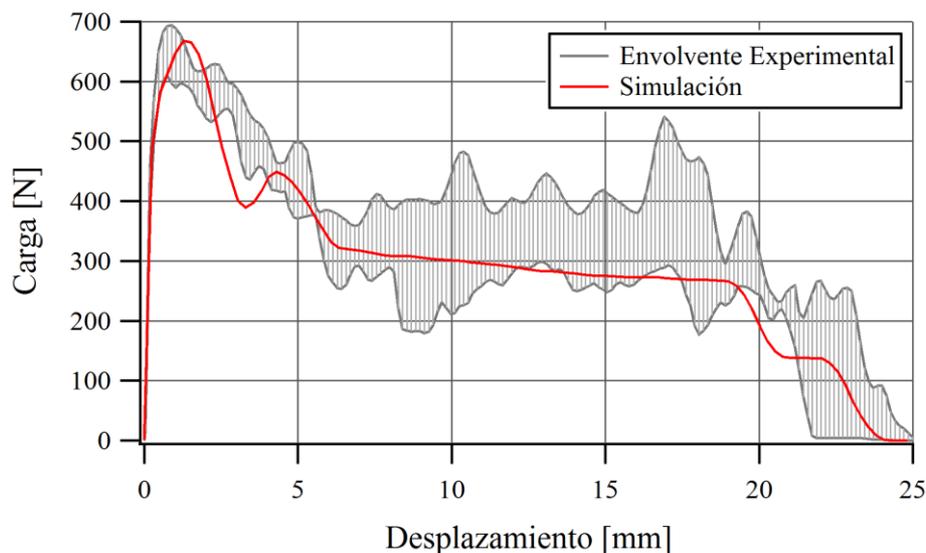


Figura 3: Curvas de arrancamiento de fibras de matriz H80. Fibra con gancho, predicción.

En coincidencia con los ensayos de arrancamiento en estas simulaciones se consideró una longitud embebida de $L_f/2$, es decir, 25mm la mitad de la longitud total de la fibra.

3.2. Ensayos de flexión de vigas entalladas de HRF

Se simulan a flexión vigas entalladas de HRF, para estudiar la influencia de la longitud embebida de la fibra considerada en el modelo de arrancamiento de fibras. Las vigas son de hormigón H80 con 30kg/m^3 de fibra. La geometría de la viga, las condiciones de apoyo y la malla de elementos finitos utilizada, se indican en la Figura 4. La viga se modela en dos dimensiones considerando estado plano de tensiones y se considera toda su longitud. La malla está formada por elementos cuadriláteros de cuatro nodos y 2×2 puntos de integración y, tiene un total de 406 elementos y 452 nodos. Se aplican desplazamientos verticales en el centro del borde superior y se registra la apertura de la fisura central (CMOD).

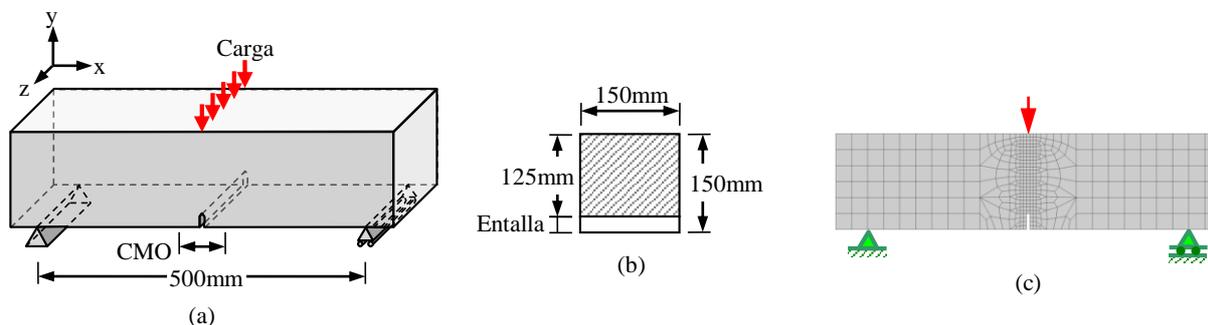


Figura 4: (a) Esquema de carga, (b) sección central y (c) malla.

Las propiedades del hormigón previamente calibradas con los resultados de caracterización del mismo son: Módulo de elasticidad = 41000MPa ; Resistencia a compresión = 90MPa ; Coeficiente de Poisson = 0.2 ; Límite elástico = 60MPa ; Resistencia a tracción =

2.73MPa; Criterio de fluencia y potencial de Lubliner-Oller; Curva de endurecimiento-ablandamiento en compresión, exponencial con máximo; Curva de ablandamiento a tracción, exponencial; Energía de aplastamiento = 8.0Nmm/mm²; Energía de fractura = 0.2Nmm/mm²; Fracción de volumen de hormigón = 0.99618.

Las propiedades de las fibras en el modelo de HRF son: Modulo de elasticidad = 210000MPa; Coeficiente de Poisson = 0.2; Criterio de fluencia y potencial de Von Mises; Curva de endurecimiento-ablandamiento en tracción, definida mediante un curva de arrancamiento de fibra para una longitud embebida adoptada; Relación entre los módulos de elasticidad en dirección transversal y longitudinal de la fibra 1/210000; Relación entre umbral de deslizamiento en dirección longitudinal y umbral de deslizamiento en dirección transversal 1/10000.

Se definen tres componentes materiales de fibra, cada una orientada según la dirección de deslizamiento, con los ejes x,y,z. Teniendo en cuenta el proceso de llenado de las vigas y resultados de [Torrijos \(2008\)](#) se adoptan las siguientes fracción de volumen de fibras en esas direcciones: en x = 0.00184, en y = 0.00184, en z = 0.00014.

Se plantean cuatro longitudes embebidas diferentes ($L_f/2$, $3L_f/8$, $L_f/4$ y $L_f/8$) y para cada una se resuelve previamente el modelo de arrancamiento de fibras, obteniendo la curva de arrancamiento.

En la Figura 5 se presentan las curvas carga-apertura de fisura obtenidas numéricamente para una viga teniendo en cuenta cuatro longitudes embebidas diferentes y se las compara con resultados experimentales ([Ruano \(2013\)](#)). Se observa que la variación de la respuesta carga-apertura de fisuras, al modificar la longitud embebida de la fibra, es baja. Esto se debe a que el aporte principal en el arrancamiento, se concentra en el gancho de la fibra y las aperturas de fisuras alcanzadas, no superan la longitud de dicho gancho (aproximadamente 5mm).

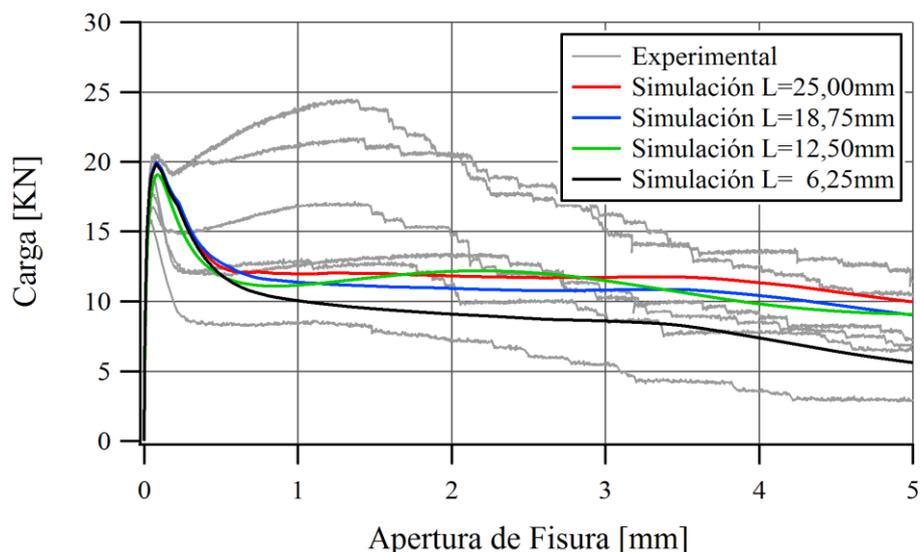


Figura 5: Curva carga-apertura de fisura. Hormigón H80 con 30kg/m³ de fibra. Efecto de la longitud embebida.

Otro caso de estudio, son vigas entalladas de HRF correspondientes a un hormigón H80 con 60kg/m³ de fibras. Se puede observar en los resultados experimentales ([Ruano \(2013\)](#))

presentados en la Figura 6, que las curvas presentan saltos o escalonamientos después del pico de carga, lo cual corresponde a la rotura de las fibras. Cuando la longitud embebida de las fibras es $L_f/2$ están trabajando al límite de su resistencia, entonces un pequeño aumento de la resistencia de la matriz produce la rotura de las mismas durante el arrancamiento. Para lograr reproducir este efecto se modificaron levemente los parámetros de la interfaz fibra-matriz. Se plantea un caso con longitud embebida $L_f/4$ con fracción volumétrica de fibra en $x = 0.0036$ y, otro caso con dos longitudes embebidas combinadas, $L_f/4$ con fracción volumétrica de fibra en $x = 0.0018$ y $L_f/2$ con fracción volumétrica de fibra en $x = 0.0018$. En el modelo de HRF se usan los mismos parámetros materiales del hormigón y la fibra del caso anterior, pero con las curvas de arrancamiento modificadas.

En la Figura 6 se presentan las curvas carga-apertura de fisura obtenidas numéricamente para una viga teniendo en cuenta los dos casos mencionados y se las compara con resultados experimentales. Se puede observar que el caso más representativo es cuando se considera rotura de fibra, reproduciendo en forma cualitativa el escalonamiento presente en los resultados experimentales. Mientras que el caso que no contempla rotura de fibra, a partir de los 2.5mm de apertura de fisura sobrevalora la resistencia del HRF.

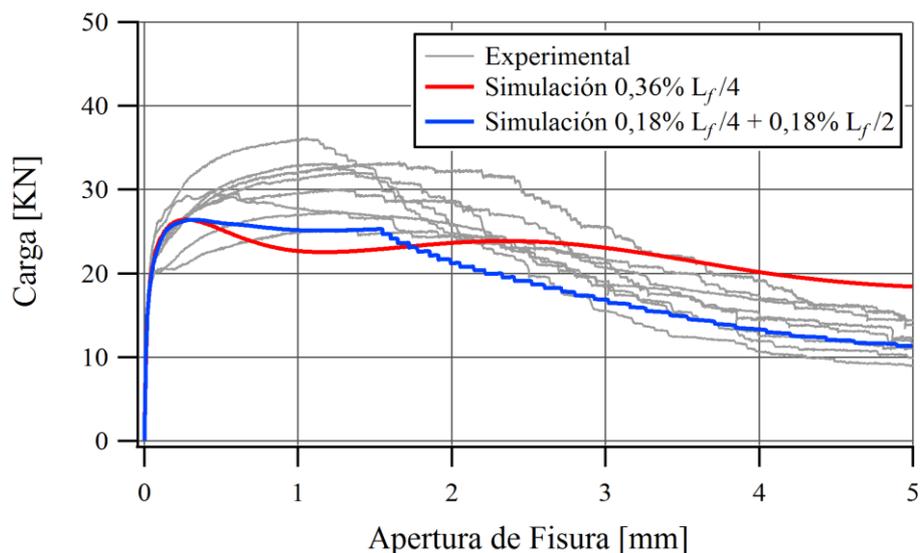


Figura 6: Curva carga-apertura de fisura. Hormigón H80 con 60kg/m^3 de fibra. Considerando rotura de fibras.

3.3. Ensayos de Flexión en Placas Circulares de HRF apoyadas en 4 puntos

La norma ASTM C1550-05 propone un ensayo de caracterización que consiste en ensayar placas circulares apoyadas en 4 puntos a flexión. Ensayos similares fueron realizados por [Isas Pedraza y Sfer \(2013\)](#), en los cuales se modificó el diámetro y el espesor respecto al ensayo descrito en la norma, adoptando un diámetro de $0,60\text{m}$ y un espesor de $0,06\text{m}$ (en lugar de $\text{Ø}0,80 \times 0,08\text{m}$). Los especímenes fueron construidos con hormigón H50 con un contenido de 40kg/m^3 de fibra.

En la Figura 7 se muestra la geometría del espécimen y las condiciones de apoyo. La carga se aplica en el centro de la placa y en la cara opuesta a la aplicación de la carga se mide

la flecha δ . Los tres apoyos puntuales se ubican en un diámetro de 0,54m, distribuidos a 120° entre sí, siendo el cuarto punto de apoyo el correspondiente a la aplicación de la carga. La malla de elementos finitos utilizada se muestra en la Figura 7c y Figura 7d. Está formada por 1152 elementos hexaédricos de 8 nodos y 8 puntos de integración en total.

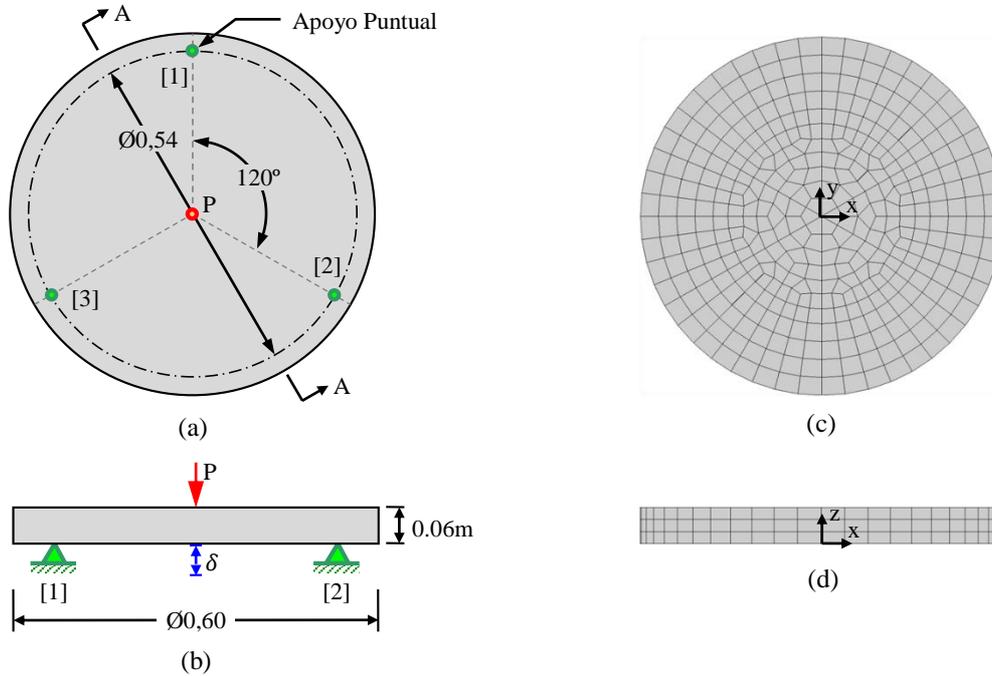


Figura 7: Geometría y condiciones de apoyo de placa circular: (a) vista superior y (b) corte AA. Malla: (c) vista superior y (d) vista lateral.

En la Figura 8 se muestran los casos de orientación de fibras en la placa de HRF modelados. Se propone un caso simple con fibras en dos direcciones ortogonales y, un caso más representativo donde se separa la placa en sectores y se disponen fibras aproximadamente en dirección radial y tangencial, ya que este último caso es la orientación preferencial de la fibra cuando el colado del HRF es desde el centro de la placa.

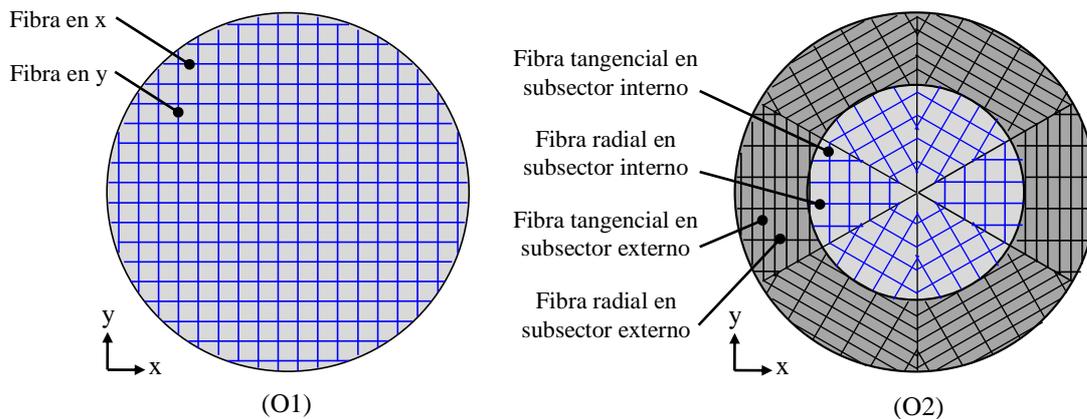


Figura 8: Orientación de fibras en el HRF. (O1) Fibra en 2 direcciones. (O2) Zonificación de orientación con fibras en 2 direcciones por zona.

En el caso O1, se dispone una fracción volumétrica de fibra de 0,00202 en la dirección x e y, mientras que en z una fracción de fibra de 0,00106. Mientras que en el caso O2, la placa

es dividida en seis sectores y a su vez, cada sector es subdividido en una parte interna y otra externa. En el subsector interno se dispone una fracción de fibra de 0.00202 en dirección radial y tangencial. En el subsector externo se dispone una fracción de fibra de 0.00121 y 0.00283, en dirección radial y tangencial respectivamente, adoptado según estudios de Kang y Kim (2012a).

Previamente se calibraron los parámetros materiales del hormigón H50 ajustando los ensayos de caracterización y se obtuvo: Modulo de elasticidad = 35900MPa; Resistencia a compresión = 55MPa; Coeficiente de Poisson = 0.2; Limite elástico = 36MPa; Resistencia a tracción = 2.40MPa; Criterio de fluencia y potencial de Lubliner-Oller; Curva de endurecimiento-ablandamiento en compresión, exponencial con máximo; Curva de ablandamiento a tracción, exponencial; Energía de aplastamiento = 4.0Nmm/mm²; Energía de fractura = 0.17Nmm/mm²; Fracción de volumen de hormigón = 0.99490.

Para modelar las fibras en el HRF se usan las mismas propiedades materiales utilizadas en las vigas por tratarse del mismo tipo de fibras, pero con la curva de arrancamiento de fibras correspondiente a un hormigón H50, ya que los parámetros de la interfaz fibra-matriz son diferentes. Se adopta una longitud embebida de fibra de $L_f/4$ por ser un valor promedio y que además, como se observa en el caso de las vigas brinda resultados representativos de la respuesta mecánica del HRF.

En la Figura 9, se muestran las curvas carga-flecha obtenidas para las placas modeladas con diferentes orientaciones de fibras y su comparación con los resultados experimentales. Se puede observar que hay poca diferencia entre los dos casos. Esto muestra que en este caso no es necesario adoptar una configuración compleja de la orientación de fibras para obtener buenos resultados.

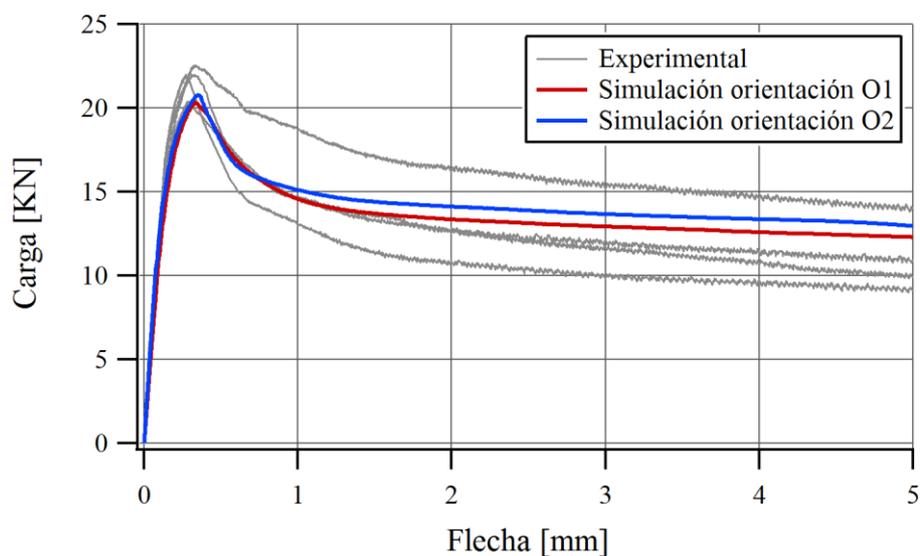


Figura 9: Curva carga-flecha de placa de HRF. Estudio de orientación de las fibras.

En la Figura 10 se presentan simulaciones de la placa modelada con distribución de fibras O1 con tres criterios para definir la proporción de fibras que contribuye en la resistencia del HRF. En el primer criterio se asume que todas las fibras contribuyen, en el segundo criterio se supone que sólo las fibras eficaces contribuyen (corresponden aproximadamente al 60% del total de fibras, según definición de gancho enderezado) y el tercer criterio es un caso intermedio,

donde se considera que el 80% del total de fibras contribuye. Comparando las simulaciones según los tres criterios, con los resultados experimentales, se puede observar que el primer criterio sobrevalora la resistencia del HRF y, en el otro extremo el segundo criterio subvalora la resistencia del HRF. El tercer criterio (80% del total) es más representativo del valor medio de los resultados experimentales.

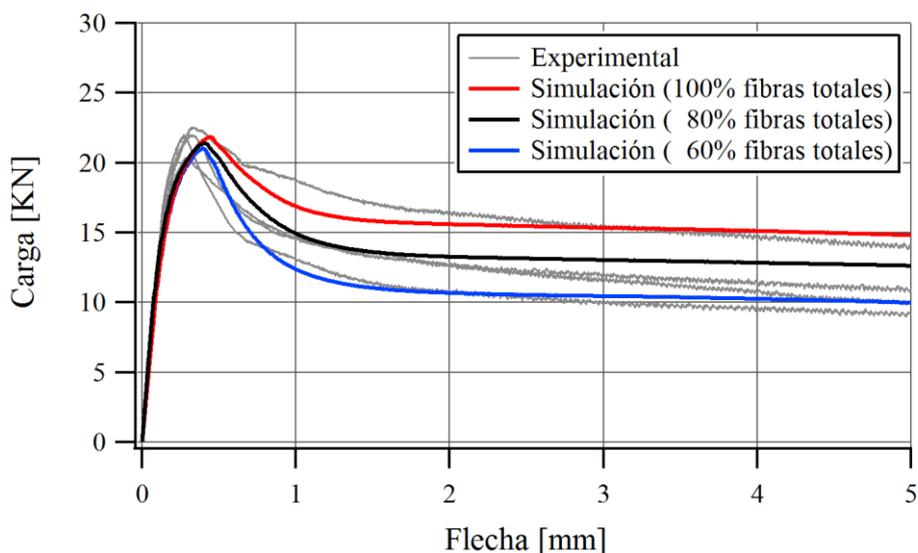


Figura 10: Curva carga-flecha de placa de HRF. Comparación de casos con diferente criterio en la fracción de fibras que trabajan de fibras.

4 CONCLUSIONES

Se presentó un modelo numérico con el cual se reprodujeron ensayos experimentales de vigas entalladas y placas circulares de HRF. En general se observa un buen ajuste de los resultados numéricos a los experimentales, teniendo en cuenta la gran variabilidad de estos últimos.

Al considerar todo el volumen de fibras para modelar el comportamiento mecánico del HRF, se puede observar que la contribución de la misma está sobrevalorando la resistencia del HRF. Mientras que al considerar la proporción de fibras eficaces, se tiene que se está subvalorando la contribución de las fibras. En la definición utilizada en este trabajo se consideran fibras eficaces a aquellas que muestran deformación del gancho, evidenciando que las mismas se han deslizado y se consideran no eficaces a aquellas con gancho no deformado y por lo tanto se desprecia su aporte. Pero también en el proceso de despegue se generan cargas de arrancamiento importantes, es decir un gancho no deformado, no implica que no haya existido transferencia de carga. Es por ello que, es necesario proponer un criterio más amplio para establecer qué fibras trabajan realmente en la transferencia de carga a través de las fisuras. Un caso intermedio entre considerar el volumen total de fibras y el volumen de fibras eficaces, es adoptar que el 80% del volumen total de fibras trabajaran. Este criterio, si bien es aproximado y muy simplificado, brinda buenos resultados.

La influencia de la longitud embebida de fibras en la respuesta al arrancamiento y los resultados numéricos de HRF en flexión analizados en este trabajo no es importante. Esto se

debe a que las aperturas de fisuras alcanzadas, no superan la longitud del gancho y por lo tanto el comportamiento del arrancamiento de la fibra, depende fundamentalmente del gancho.

Una modelación más representativa de la fibra dentro del compuesto, es considerar fibras con diferentes longitudes embebidas. Esto toma importancia cuando se puede alcanzar la rotura o corte de la fibra.

Al tratar la fibra como un material ortótropo, se pueden definir direcciones discretas en cuanto a la orientación de las fibras dentro del compuesto. Se observa que, a partir de un número mínimo de direcciones de fibra los resultados no mejoran significativamente, lo cual simplifica la modelación del elemento estructural, con el gran beneficio de reducir los tiempos de cálculo.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, CIUNT y a la Universidad Nacional de Tucumán por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- Barragán, B., 2002. Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España*, p. 151.
- Barros, J., Gettu, R. & Barragán, B., 2004. Material nonlinear analysis of steel fiber reinforced concrete beams failing in shear. In: *RILEM PRO 39 - Sixth RILEM Symposium on Fibre Reinforced Concrete (FRC) - BEFIB*. Varenna, Italy: p. 711-720.
- Betten, J., 1988. Application of tensor functions to the formulation of yield criteria for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*, Volumen 4, p. 29-46.
- Caggiano, A., Etse, G. & Martinelli, E., 2012a. Zero-thickness interface model formulation for failure behavior of fiber-reinforced cementitious composites. *Computers and Structures*, Volumen 98-99, p. 23-32.
- Caner, F. C., Bazant, Z. P. & Wendner, R., 2013. Microplane model M7f for fiber reinforced concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 105, p. 41-57.
- Chanvillard, G., 1999. Modelos the pullout of wire-draw steel fibers. *Cement and Concrete Research*, Issue 29, p. 1027-1037.
- Cunha, V. M. C. F., Barros, J. A. O. & Sena-Cruz, J. M., 2012. A finite element model with discrete embedded elements for fibre reinforced composites. *Computers and Structures*, Volume 94-95, p. 22-33.
- Fang, Q. & Zhang, J., 2013. Three-dimensional modelling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading. *Construction and Building Materials*, Volume 44, p. 118-132.
- Gal, E. & Kryvoruk, R., 2011. Meso-scale analysis of FRC using a two-step homogenization approach. *Computers & Structures*, Volume 89, p. 921-929.
- Geng, Y. P. & Leung, C. K. Y., 1997. Micromechanics-based fem simulation of fiber-reinforced cementitious composite components. *Computers & Structures*, 64(516), p. 973-982.
- Hung, C.-C. & Li, S.-H., 2013. Three-dimensional model for analysis of high performance fiber reinforced cement-based composites. *Composites: Part B*, Volumen 45, p. 1441-1447.
- Isas Pedraza, D. R. & Sfer, D., 2013. *Diseño y caracterización de hormigones autocompactantes reforzados con fibras - Informe interno, Instituto de Estructuras UNT*.

- Isla, F., 2014. *Modelo para hormigón reforzado con fibras. Tesis Doctoral, Director: Dr. Bibiana Luccioni*. Tucuman.
- Kang, S.-T. & Kim, J.-K., 2012a. Numerical simulation of the variation of fiber orientation distribution during flow molding of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPC). *Cement & Concrete Composites*, Volumen 34, p. 208-217.
- Laranjeira, F., Molins, C. & Aguado, A., 2010. Predicting the pullout response of inclined hooked steel fibers. *Cement and Concrete Research*, Volumen 40, p. 1471-1487.
- Li, V., Wang, Y. & Backers, S., 1991. A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 39(5), p. 607-625.
- Luccioni, B. M. & Rougier, V. C., 2005. A plastic damage approach for confined concrete. *Computers and Structures*, Volumen 83, p. 2238-2256.
- Luccioni, B., Oller, S. & Danesi, R., 1995. Plastic damaged model for anisotropic materials. *Applied Mechanics in the Americas*, Volumen 1, p. 124-129.
- Maugin, G., 1992. The thermomechanics of plasticity and fracture. *Cambridge, UK: Cambridge University Press*.
- Naaman, A. E. y otros, 1991. Fiber pullout and bond slip. I: Analytical Study. *Journal of Structural Engineering. ASCE*, 117(9).
- Naaman, A. E. y otros, 1991. Fiber pullout and bond slip. II: Experimental Validation. *Journal of Structural Engineering. ASCE*, 117(9).
- Oliver, J., Mora, D. F., Huespe, A. E. & Weyler, R., 2012. A micromorphic model for steel fiber reinforced concrete. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 49, p. 2990–3007.
- Oller, S., Botello, S., Miquel, M. & Oñate, E., 1995. An anisotropic elasto-plastic model based on an isotropic formulation. *Eng Comput*, 12(3), p. 245–262.
- Özcan, D. M. et al., 2009. Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior. *Construction and Building Materials*, Volume 23, p. 1064–1077.
- Pasa Dutra, V., Maghous, S., Campos Filho, A. & Pacheco, A., 2010. A micromechanical approach to elastic and viscoelastic properties of fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, Issue 40, p. 460-472.
- Ren, X. & Li, J., 2013. Multi-scale based fracture and damage analysis of steel fiber reinforced concrete. *Engineering Failure Analysis*, Volume 35, p. 253–261.
- Ruano, G., 2013. *Refuerzo de elementos estructurales de hormigón con hormigón reforzado con fibras. Tesis Doctoral, Director: Dr. Bibiana Luccioni*.
- Soetens, T., Van Gysel, A., Matthys, S. & Taerwe, L., 2013. A semi-analytical model to predict the pull-out behaviour of inclined hooked-end steel fibres. *Construction and Building Materials*, Volumen 43, p. 253-265.
- Toledo, M., Nallim, I. & Luccioni, B., 2008. A micro-macromechanical approach for composite laminates. *Mechanics of Materials*, p. 885-906.
- Torrijos, M. C., 2008. Mesoestructura, comportamiento mecánico y propiedades de transporte en hormigón. *Tesis presentada para el grado de doctor en ingeniería*, Septiembre.