

EFFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN Y ORIENTACION DE LAS FIBRAS EN LA RESPUESTA DEL HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS

EFFECT OF FIBER DISTRIBUTION AND ORIENTATION ON THE RESPONSE OF FIBER-REINFORCED CONCRETE

Alejandra Diaz Fontdevila^a, Facundo Isla^a y Bibiana Luccioni^a

^a CONICET, Instituto de Estructuras “Arturo M. Guzmán”, FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina,
madiazfontdevila@herrera.unt.edu.ar, fisla@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar,
<http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras, deslizamiento de fibras, modelo de compuesto, orientación y distribución de fibras.

Resumen. El aumento de la resistencia residual y control de fisuración producido por el agregado de fibras de acero al hormigón se debe al deslizamiento de las fibras que actúan cosiendo las fisuras y depende, en gran medida, del tipo de fibra, contenido, distribución y orientación dentro del volumen de hormigón. Los dos últimos factores dependen, a su vez, de los dos primeros y adicionalmente, del tamaño y forma de llenado del molde, de la fluidez de la matriz, entre otros factores, y resultan difíciles de predecir. El objetivo de este trabajo es evaluar numéricamente el efecto de la distribución y orientación de las fibras en la respuesta a flexión a los efectos analizar la validez las simplificaciones que normalmente se hacen en el análisis. Se utiliza para ello un meso-modelo para hormigón reforzado con fibras de acero que tiene en cuenta la orientación inicial y la reorientación de las fibras en la dirección de la apertura de fisura.

Keywords: Fiber reinforced concrete, fibers pull-out, composite model, fiber orientation and distribution.

Abstract. The increase in residual strength and crack control by the addition of steel fibres to concrete is due to the slip of the fibres that sew the cracks, and depends largely on the type, content, distribution, and orientation of the fibres in the concrete volume. The last two factors, in turn, depend on the first two and additionally, on the size and shape of the mould filling, the flowability of the matrix, and other factors, and are difficult to predict. The aim of this work is to numerically evaluate the effect of fibre distribution and orientation on the flexure response in order to analyse the validity of the simplifications usually made in the analysis. A meso model is used for steel fiber reinforced concrete. The model takes into account the direction and reorientation of the fibres in the direction of the crack opening.

1 INTRODUCCIÓN

La incorporación de fibras en la matriz de hormigón, sobre todo de alta resistencia, permite aumentar su ductilidad, proporcionando una alta capacidad de absorción de energía mediante el efecto de cosido de las fibras. El comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA) está muy influenciado por las características de las fibras, como la forma, cantidad, distribución y orientación. Incluso, para el mismo contenido de fibras de acero, se ha probado experimentalmente que la variación en la distribución de la orientación de las fibras tiene un fuerte impacto en su comportamiento a tracción (Huang et al. 2021; Kang y Kim, 2012; Zhang et al. 2020), tanto mayor cuanto mayor es el contenido de fibras (Yu et al. 2022). Es por ello indispensable conocer la orientación de las fibras para poder interpretar los resultados de caracterización de un hormigón reforzado con fibras (HRF), para el diseño y predicción de la respuesta estructural mediante modelos analíticos o numéricos.

La orientación de las fibras puede verse influenciada por diferentes factores como la fluidez y reología de la mezcla (Teng et al. 2021), el método de colado y extrusión de la mezcla, la vibración (Islam et al. 2022 y Medeghini et al. 2022), el tamaño del molde (Tao et al. 2025) y el efecto pared de los encofrados (Zhang et al. 2020). Por otro lado, las metodologías para la determinación de la orientación y distribución de las fibras son diversas. La más sencilla es el recuento manual pero también se puede usar análisis de imágenes (sobre la superficie de fractura o en una superficie cortada), rayos X, mediciones eléctricas, inducción electromagnética, tomografía computarizada, entre otras técnicas. Sin embargo, la mayor desventaja (Medeghini et al. 2024) es que estos métodos no se correlacionan entre sí ni tampoco se relacionan con los parámetros mecánicos obtenidos.

A pesar de los considerables avances en la investigación experimental y teórica sobre el HRF, los modelos numéricos aún presentan deficiencias. Esto se debe principalmente a que el efecto atribuido al comportamiento de extracción de las fibras, a menudo se simplifica demasiado y normalmente se incorpora solo como parte del modelo constitutivo del hormigón simple (Alshahrani et al. 2025). Los enfoques meso mecánicos y multiescala (Yu et al. 2022) han sido más desarrollados para fibras lisas y, en general, consideran el efecto de orientación de las fibras respecto de un sistema fijo, cuando realmente depende de la dirección de apertura de las fisuras (Isla et al. 2022b). Algunos de estos modelos incluyen la consideración de una distribución aleatoria de fibras que no es real (Alshahrani et al. 2025).

En este trabajo se estudia numéricamente el efecto de la distribución y orientación de las fibras en el comportamiento a flexión del HRFA. Para ello, se extiende un meso-modelo previamente desarrollado (Isla et al. 2022a), considerando que las fibras se reorientan en la dirección principal de deformación inelástica de la matriz. Su contribución tiene en cuenta el ángulo que forma dicha dirección con la inclinación original de las fibras y puede variar a lo largo del proceso de carga. Estas simulaciones resultan útiles para estudiar hasta qué punto influye la distribución de fibras en la respuesta a flexión que normalmente se usa para caracterizar el HRFA, así como la validez de las simplificaciones que normalmente se hacen en el diseño y en el análisis.

2 MODELO PARA HRFA

Se considera que el HRFA es un compuesto constituido por una matriz frágil en la cual se introducen fibras dispersas. Como aproximación, se supone que las fibras se encuentran orientadas en un número discreto de direcciones respecto de los ejes de referencia y, además, en este trabajo, se propone que, una vez fisurada la matriz, la parte de la fibra que atraviesa la fisura es capaz de reorientarse siguiendo aproximadamente la dirección principal de deformación inelástica (Isla et al. 2022b).

2.1 Modelo de compuesto

Para modelar el compuesto se utiliza una modificación de la teoría de mezclas (Oller et al. 1996), la cual considera el deslizamiento de las fibras respecto de la matriz (Luccioni et al. 2012) e incluye la ortotropía, su orientación original y reorientación.

La teoría de mezclas clásica supone que todas las componentes del compuesto experimentan la misma deformación $\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_H = (\varepsilon_{ij})_{F_k}$ y las tensiones se escriben como:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi(\varepsilon, \alpha)}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{m=1}^{n+1} k_m \frac{\partial \Psi_m(\varepsilon, \alpha_m)}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{m=1}^{n+1} k_m (\sigma_{ij})_m \quad (1)$$

donde $\Psi(\varepsilon, \alpha)$ y $\Psi_m(\varepsilon, \alpha_m)$ densidades de energía libre por unidad de volumen del compuesto y de cada una de las componentes m respectivamente, $k_m = \frac{dV_m}{dV}$ es la correspondiente proporción volumétrica, α_m es un conjunto de variables internas, $(\sigma_{ij})_m$ es la tensión en la componente m que se obtiene a partir de la correspondiente ecuación constitutiva, ε_{ij} y $(\varepsilon_{ij})_m$ son las deformaciones en el compuesto y cada una de las componentes. El subíndice H refiere al hormigón mientras que F_k refiere a las fibras en la dirección k con $k = 1, \dots, n$ direcciones. Las tensiones en cada una de las componentes se obtienen de sus correspondientes ecuaciones constitutivas.

A los efectos de poder aplicar esta teoría al HRFA, se agrega el deslizamiento fibra-matriz al modelo constitutivo de las fibras y se evita tener en cuenta de forma explícita la interfaz fibra-matriz. Así, la deformación total de las fibras se considera compuesta por una deformación elástica ε_{ij}^e , una deformación plástica ε_{ij}^p y una deformación debida al deslizamiento ε_{ij}^s

$$(\varepsilon_{ij})_{F_k} = (\varepsilon_{ij}^e)_{F_k} + (\varepsilon_{ij}^p)_{F_k} + (\varepsilon_{ij}^s)_{F_k} \quad k = 1, \dots, n \quad (2)$$

Los dos primeros términos de la Ec. (2) corresponden a las fibras, mientras que el tercero se desarrolla en la interfaz fibra-matriz. Como consecuencia, la deformación en la fibra misma difiere de la correspondiente a la matriz de hormigón.

2.2 Modelo plástico para el hormigón

Para la matriz de hormigón se utiliza el modelo de daño plástico modificado (Luccioni y Rougier, 2005) que es un modelo elasto-plástico en el cuál el límite elástico está definido por el criterio de Lubliner Oller modificado (Oller et al. 1988).

La variable de endurecimiento plástico, κ^p , se obtiene normalizando la disipación plástica a la unidad y varía entre 0 para el material virgen y 1 cuando el material ha disipado la totalidad de la energía que puede disipar. La nueva regla de evolución propuesta (Isla et al. 2022b) tiene en cuenta el comportamiento diferenciado en tracción y compresión, desacoplando el trabajo plástico en una parte debida a las tensiones principales de tracción y otra debida a las tensiones principales de compresión. Adicionalmente, tiene en cuenta de manera automática el endurecimiento del compuesto, aun cuando la matriz ablande (Luccioni e Isla, 2016).

2.3 Modelo para las fibras

La deformación plástica de las fibras, en conjunto con el deslizamiento fibra – matriz, se simulan mediante un modelo elasto-plástico para materiales ortótropos. Para tener en cuenta la ortotropía en el comportamiento, se utiliza el enfoque de mapeo de espacios, el cual supone que existen dos espacios de tensiones, uno es el espacio ortótropo real y otro el espacio isótropo ficticio. Los tensores de tensión de ambos espacios se relacionan a través de un tensor de transformación diagonal $A_{kl ij}$ que vincula ambos espacios y contiene la información de

ortotropía del material (Toledo et al. 2008). El problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio usando la teoría de plasticidad con endurecimiento clásica, con función de fluencia definida por criterio $J2$ y flujo plástico asociado. Luego, al pasar al espacio de tensiones reales, se verifica que la fibra experimenta deformaciones permanentes orientadas en la dirección axial de las fibras. Esta dirección es constante y coincidente con la inicial mientras la matriz no se fisura. Pero, cuando se abre una fisura, las fibras tienden a alinearse con la dirección principal de deformación inelástica de la matriz en las zonas donde las fibras atraviesan la fisura (Barros y Foster, 2018), ver Figura 1.



Figura 1: Cambio de orientación de una fibra en la fisura

Para definir la función de endurecimiento plástico de las fibras se utiliza el modelo de arrancamiento desarrollado por Isla et al. (2022a) que permite obtener la curva de arrancamiento para fibras de acero con diversas geometrías extraídas de distintas matrices cementíceas. El modelo considera la contribución a la resistencia al arrancamiento provista por las fuerzas de fricción en la interfaz fibra/matriz y por el anclaje de las partes curvas. Cuando la fibra está inclinada respecto de la dirección de apertura de la fisura, se supone que, al aumentar la apertura de fisura δ , se produce un cambio $\hat{\varphi}$ en la inclinación de las fibras (ver Figura 2). Esto genera un incremento de la resistencia al arrancamiento y produce tensiones adicionales en la matriz que pueden provocar la rotura de la fibra y de la matriz, alterando la geometría inicial. La resistencia al arrancamiento, entonces, se determina con siguiente ecuación:

$$P = F_{fm}(f, \hat{\varphi}) \int_0^{L_{fm}} \left(\frac{dC}{d\delta} M + t_{fm} \right) ds \quad (3)$$

donde M es el momento flector en la fibra, δ es el deslizamiento del extremo de la fibra, C es la curvatura, s es una coordenada local a lo largo de la fibra, L_{fm} es la longitud de interfaz reducida respecto a la longitud embebida original de la fibra debido a la rotura de la matriz, t_{fm} es la resultante de las fuerzas tangenciales en la interfaz, f es el coeficiente de fricción dinámica y F_{fm} es la función de inclinación definida como:

$$F_{fm}(f, \hat{\varphi}) = \left\{ 1 - \frac{2f \sin(\hat{\varphi}/2)}{1+f \tan(\hat{\varphi}/2)} \right\}^{-1} \quad (4)$$

El cambio de inclinación $\hat{\varphi}$ puede obtenerse mediante relaciones geométricas y la reducción de la longitud embebida se calcula a partir de ecuaciones de equilibrio al alcanzar la resistencia a rotura de la matriz (Isla et al. 2022a).

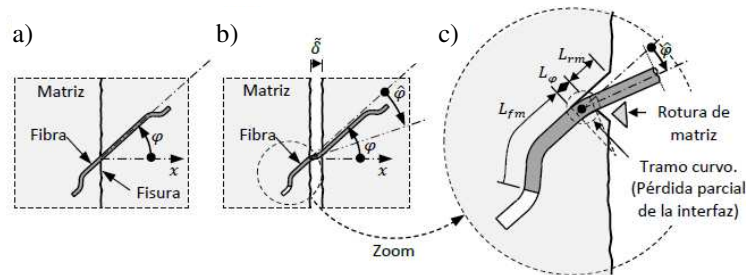


Figura 2: Geometría de la fibra inclinada. a) Fisura cerrada; b) con apertura de fisura; c) punto de salida de la fibra desde la matriz.

2.4 Implementación numérica

El modelo numérico se implementa en un programa de elementos finitos no lineal explícito desarrollado para tal fin, que permite resolver problemas estáticos y dinámicos en pequeñas y grandes deformaciones. Si bien el programa puede trabajar en 3D, en esta etapa la implementación del modelo con la reorientación de las fibras se ha realizado sólo en la versión 2D y será luego extendido a 3D.

Por una cuestión de eficiencia computacional, para la implementación del modelo se utiliza un enfoque jerárquico. En primer lugar, partiendo de las características geométricas y mecánicas de las fibras y de la matriz, se generan las curvas de arrancamiento para un número finito de orientaciones de la dirección de arrancamiento respecto de la fibra que cubren ángulos desde -90° a 90° y para longitudes embebidas que varían entre 0 y la mitad de la longitud de la fibra $L_f/2$. Para cada orientación se obtiene la curva correspondiente al promedio de las longitudes embebidas.

Luego se pasa a la resolución del problema. Con Ec. (1) y Ec. (2) se puede obtener de manera sencilla el comportamiento del compuesto a partir de la integración de las ecuaciones constitutivas de las componentes que comparten la misma deformación.

Para el caso de las fibras, el enfoque de mapeo de espacios requiere resolver el problema en el espacio isótropo ficticio. Se mapean las tensiones al espacio isótropo ficticio en el cual se integra la ecuación constitutiva de las fibras, considerando que la resistencia de las fibras depende del ángulo que forma la dirección original de las fibras con la dirección de la deformación plástica mayor de la matriz. Se utilizan como curvas de endurecimiento las curvas de arrancamiento antes generadas. Luego, se llevan las deformaciones y tensiones al espacio real. Al aplicar la Ec. (1) se debe tener en cuenta la reorientación de las fibras en las fisuras. Por una cuestión de practicidad en la definición de los tensores de mapeo y rotación, las tensiones y deformaciones de las fibras se almacenan en coordenadas locales (direcciones principales de ortotropía correspondientes a la posición original de las fibras).

3 SIMULACIONES NUMÉRICAS

En esta sección se presentan ejemplos de aplicación resueltos con el modelo descrito que muestran la incidencia de la orientación de las fibras en la respuesta a flexión. Se utilizan como comparación, los resultados de la campaña experimental presentada en el trabajo de [Diaz Fontdevila et al. \(2024\)](#).

3.1 Descripción de los ensayos

Se ensayaron 3 tipos de hormigones: hormigón simple (HS), y dos HRFA, con contenidos nominales de fibras 40 kg/m^3 y 80 kg/m^3 (0.5% y 1% en volumen), que se denominan HRF40 y HRF80 respectivamente. Todos los hormigones se prepararon utilizando la misma matriz de hormigón de alta resistencia. Se usaron fibras de acero con ganchos en sus extremos, de 30 mm de largo y 0.38 mm de diámetro, con una resistencia mínima a la tracción de 3000 MPa.

Se realizaron ensayos de compresión para determinar resistencia y módulo de elasticidad y ensayos de flexión de 3 puntos según la norma [EN14651](#). Las probetas de flexión eran de $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$, con 350mm de luz entre apoyos y entalla de 16mm de altura. Terminados los ensayos, se procedió al conteo manual de las fibras en la superficie de falla, ver [Figura 3](#). No se determinaron las inclinaciones de las fibras. Las propiedades de la matriz medidas en los ensayos de compresión se presentan en [Tabla 1](#), mientras que la carga máxima y el conteo de fibras de las vigas ensayadas a flexión se presentan en la [Tabla 2](#). Los contenidos obtenidos presentaron variaciones, resultando muy por debajo al nominal incorporado para el HRF80.

Propiedades medidas		Propiedades calibradas	
Resist. compresión f_c [MPa]	127.8	Resist. tracción f_t [MPa]	4.5
Módulo de elasticidad [GPa]	45.7	Energía de fractura G_f [N/mm]	0.1
Coefficiente de Poisson ν	0.2		

Tabla 1: Propiedades del hormigón bajo carga cuasi estática.

Hormigón	V_f mín. [%]	V_f máx. [%]	V_f prom. [%]	Pmax [N]
HS	-	-	-	7710
HRF40	0.28	0.59	0.38	13864
HRF80	0.57	0.68	0.64	20750

Tabla 2: Resistencia a flexión y contenidos de fibras.



Figura 3: Fibras en la superficie de falla.

3.2 Arrancamiento de las fibras

Para calibrar los parámetros del modelo de arrancamiento (Isla et al. 2022a) se simularon los ensayos de arrancamiento de fibras alineadas con la mitad de la longitud embebida. Los resultados se muestran en la Figura 4a. Con los parámetros calibrados, se obtuvieron las curvas de arrancamiento de las fibras en distintas direcciones para un promedio de longitudes embebidas ($0.5L_f$, $0.4L_f$, $0.3L_f$ y $0.2L_f$). A modo ilustrativo, se presentan esas curvas en la Figura 4b. Al considerar longitudes embebidas menores, la resistencia al arrancamiento disminuye. Se observa también que el modelo predice un aumento en la resistencia al arrancamiento hasta un ángulo de 30° y luego una disminución para ángulos mayores, lo cual está en correspondencia con los resultados experimentales (Isla et al. 2022a, Tarifa et al. 2020).

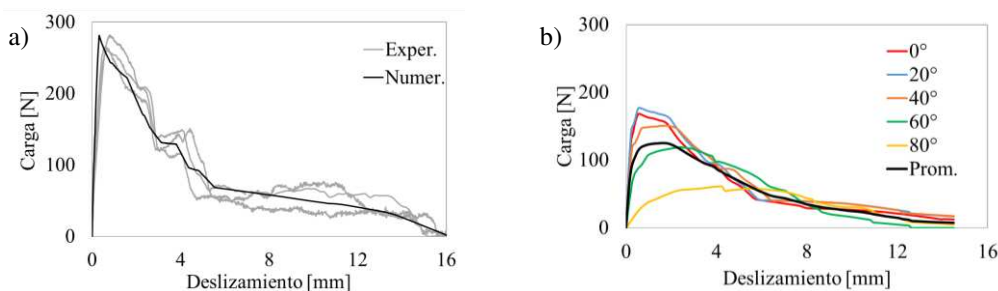


Figura 4: Curvas de arrancamiento cuasi-estáticas. a) Fibra alineada con la mitad de la longitud embebida; b) Distintas inclinaciones y promedio de inclinaciones.

3.3 Calibración de las propiedades a tracción del HS

La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad son datos experimentales, mientras que la resistencia a tracción y la energía de fractura se obtienen ajustando numéricamente la respuesta experimental en flexión del hormigón simple. En la Figura 5a se muestran las dimensiones de las vigas ensayadas y la malla de elementos finitos utilizada con elementos de 4 nodos y de 2×2 puntos de integración. Para el hormigón se considera ablandamiento exponencial en tracción. En la Tabla 1 se presentan las propiedades obtenidas.

3.4 Simulación de los ensayos de flexión de HRFA.

Si bien, se cuenta con los resultados de conteo manual de fibras (Tabla 2), no se tienen registros de las inclinaciones de las fibras. La Figura 3 muestra que las fibras no se encuentran perpendiculares a la superficie de falla, aunque puede haberse modificado su orientación al terminar de arrancarlas para contarlas. Es claro que el conteo incluye fibras que prácticamente no colaboran debido a que se encuentran aproximadamente paralelas a la superficie de falla ($|\theta| > 80^\circ$). Es por ello que una práctica normal es considerar que sólo el 90% de las fibras contadas colaboran a la resistencia a flexión y que se tiene un promedio de orientaciones. Esto se adoptó en el HRF40 y, teniendo en cuenta la dispersión en los contenidos de fibras medidos para este hormigón, se simularon los porcentajes extremos de la Tabla 2. Para el HRF80 se consideró el 100% del máximo porcentaje medido, siendo menor que el nominal del 1%.

Con el objetivo de evaluar el efecto de la orientación de las fibras en la respuesta a flexión, se consideraron las diferentes alternativas que se presentan en Tabla 3. En el caso (i) se considera una única curva de arrancamiento, mientras que en los casos (ii) al (vii) el programa elige automáticamente la curva de *pull-out* según el ángulo que forma la dirección original de las fibras con la dirección principal de apertura de la fisura de la matriz. Las distribuciones de orientaciones en los casos (v) y (vi), utilizadas en simulaciones del HRF40 y HRF80 respectivamente, están tomadas del trabajo de Faustmann et al. (2024). Los casos (i) a (vi) corresponden a una distribución uniforme de fibras, mientras que el caso (vii) tiene en cuenta una distribución de fibras diferenciada en altura de la zona central de la viga para tener en cuenta el efecto de alineamiento de las fibras producido por el encofrado (Zhang et al. 2020) en una altura del orden de $L_f/2$, ver Figura 5b.

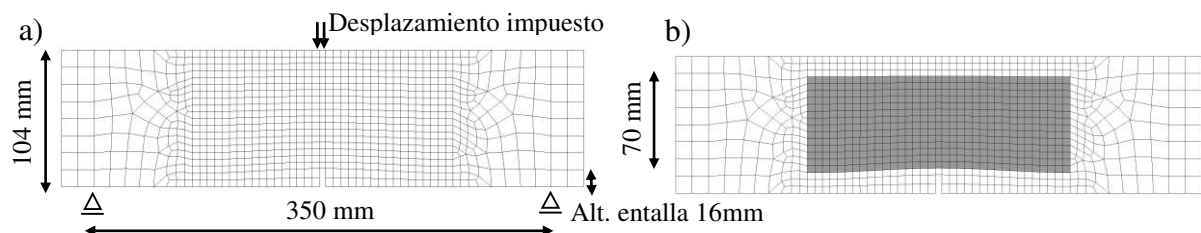


Figura 5: Malla de elementos finitos: a) Casos (i) a (vi); b) caso (vii).

Caso	Descripción
(i)	Curva promedio (direcciones utilizadas: 80° , 60° , 40° , 20° , 0° , -20° , -40° , -60° , -80°)
(ii)	0°
(iii)	Uniformemente distribuidas 40° , 0° , -40°
(iv)	Uniformemente distribuidas 60° , 40° , 0° , -40° , -60°
(v)	14.78% a 55° , 25.40 a 45° , 9.81 a 35° , 9.81 a -35° , 25.40 a -45° , 14.78% a -55°
(vi)	4.125% a 65° , 11.46% a 55° , 20.30 a 45° , 11.42 a 35° , 2.69% a 25° , 2.69% a -25° , 11.42 a -35° , 20.30 a -45° , 11.42% a -55° , 4.125 a -65°
(vii)	Zona central (Uniformemente distribuidas 40° , 0° , -40°), cerca de los encofrados 0°

Tabla 3: Orientaciones de fibras analizadas.

En las Figura 6 y Figura 7 se presentan los resultados de la simulación de las vigas de HRF40 y HRF80 con las distintas alternativas de orientaciones de fibras y su comparación con resultados experimentales. Al comparar los casos (i) y (ii), donde las fibras se disponen originalmente en la dirección longitudinal de la viga (0°), se puede notar que, para bajos porcentajes de fibras, la diferencia es muy marcada (Figura 6a). Sin embargo, al aumentar el porcentaje de fibras, esta diferencia tiende a cero e incluso el promedio supera el caso (ii), en

HRF80 (Figura 6a y Figura 7a).

La curva de endurecimiento de las fibras depende del ángulo que forma la dirección original de las fibras con la dirección principal de apertura de la fisura de la matriz. La Figura 8a muestra que para bajos porcentajes de fibras esta dirección es 0° y, por lo tanto, la contribución de las fibras corresponde a la curva de *pull-out* de 0° que tiene mayor resistencia que el promedio (Figura 4b). Al aumentar el porcentaje de fibras, la zona de fisuración se extiende y las direcciones principales de deformación plástica del compuesto giran hacia ambos lados de la entalla (Figura 4b). Así, para 0.54% de fibras, la resistencia incluye la contribución de las curvas de *pull-out* en distintas orientaciones. Por ello, la respuesta en el caso (ii) resulta similar a la obtenida con la curva de *pull-out* promedio, caso (i).

Este razonamiento puede aplicarse también para explicar las diferencias entre lo observado por Yu et al. 2022 para tracción uniaxial, donde las direcciones se alinean con la dirección de tracción, y los resultados de Figura 6 y Figura 7 que muestran que la influencia de la orientación de las fibras, decrece al aumentar el porcentaje de fibras.

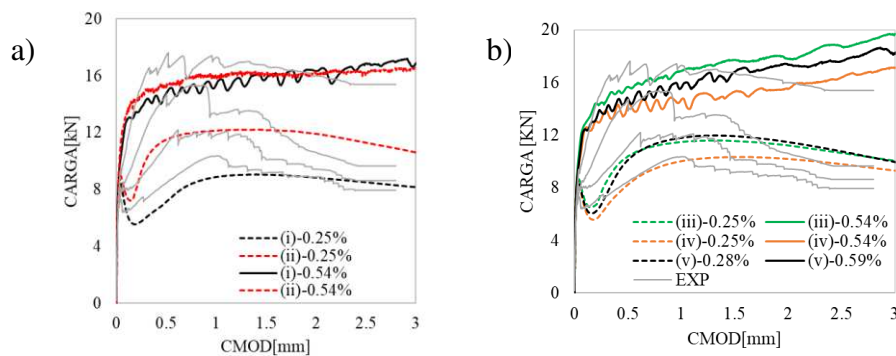


Figura 6: Curvas Carga vs CMOD HRF40. a) Casos (i) y (ii); b) Casos (iii), (iv) y (v).

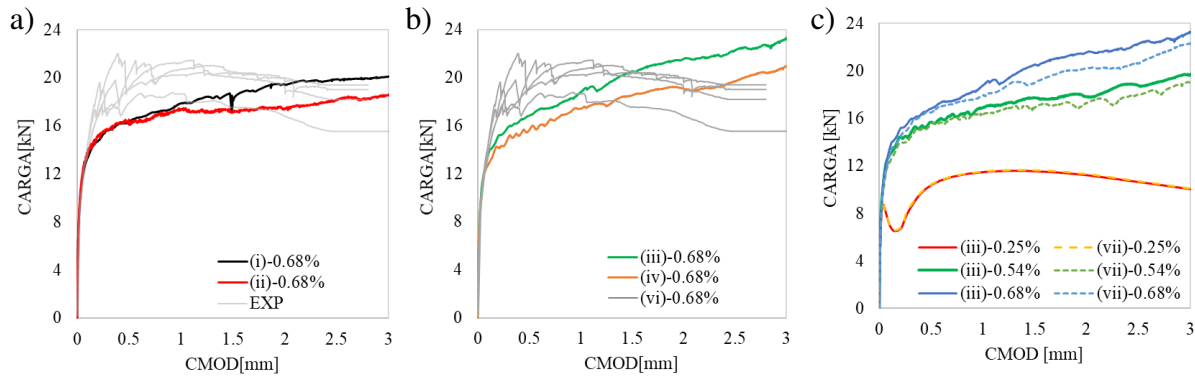


Figura 7: Curvas Carga vs CMOD. a) HRF80 casos (i) y (ii); b) HRF80 casos (iii) y (iv); c) HRF40 y HRF80 - Comparación de los casos (iii) y (vii)

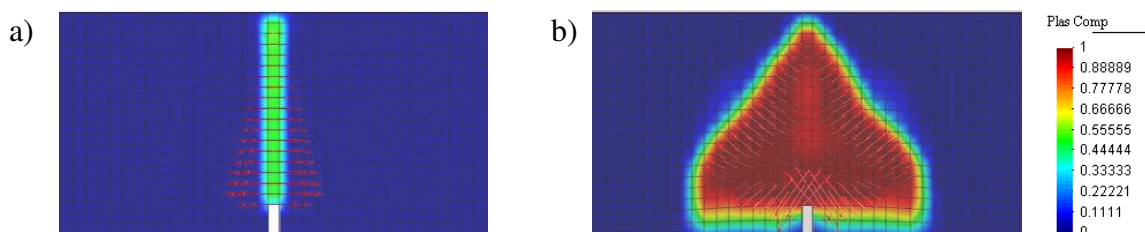


Figura 8: Mapa κ^p y dirección principal de deformación plástica 1, zona central de la viga. a) 0.25%; b) 0.54%

Los casos correspondientes a distribuciones uniformes de fibras, (iii) y (iv), dan respuestas más cercanas a los resultados experimentales, más próximas cuantas más orientaciones de fibras se agregan. Las distribuciones de orientaciones medidas en el trabajo de Faustmann et al. (2024), que no incluyen fibras a 0° , son más realistas ya que, tomando el 100% de los contenidos de fibras medidos conducen a resultados similares a los experimentales en el caso del HRF40.

Para bajos porcentajes de fibras, la consideración de zonas con orientaciones diferenciadas, prácticamente no cambia la respuesta de las vigas, debido a que la zona cercana a los encofrados las fibras prácticamente no aportan al comportamiento porque la fisura se localiza arriba de la entalla y la colaboración de las fibras en compresión es despreciable (ver Figura 8a).

4 CONCLUSIONES

Las simulaciones presentadas permiten predecir el comportamiento en flexión del HRFA para distintos contenidos y orientaciones de fibras y evaluar las hipótesis simplificativas que se hacen el cálculo. El contenido real de fibras puede ser menor que el nominal por lo que en el cálculo debe considerarse una disminución y, si se consideran las fibras a 0° , se debe reducir aún más el porcentaje de las mismas. Las orientaciones reales conducen a resultados más conservadores aun tomando el 100% del contenido de fibras medido. En el caso de estas vigas que se hormigonan volcadas sobre un lateral y luego se giran, el efecto de alineación de las fibras en la zona cercana a los encofrados no afecta prácticamente la respuesta si los contenidos son bajos y las fisuras se localizan. Las orientaciones obtenidas experimentalmente permiten simulaciones más precisas y es posible extrapolarlas a hormigones similares.

Los resultados obtenidos en este trabajo se refieren a vigas en las que, salvo alrededor de la entalla, la dirección principal en la zona de fisuración de las vigas, coincide prácticamente con la dirección longitudinal, como ocurre en tracción uniaxial, pero no pueden ser extrapolados a otros tipos de solicitaciones. Se recomienda realizar estudios similares para ensayos de corte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (PIP 11220200101621), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2020 1810) y a la UNT (PIUNT CX-E727) por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

- Alshahrani, A., Kulasegaram, S., y Kundu, A. Utilisation of simulation-driven fibre orientation for effective modelling of flexural strength and toughness in self-compacting concrete. *Constr Build Mater*, 359 (139767), 2025. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139767>
- Barros, J. A., y Foster, S. J., Fibras as shear reinforcement in RC beams: an overview on assessment of material properties and design approaches. ACI, 2018. <https://doi.org/10.35789/fib.BULL.0095>
- Díaz Fontdevila, A., Isla, F., Luccioni, B., Torrijos, C., Giaccio, G., Hours, F., y Vivas, C. Comportamiento a impacto de Hormigones Reforzados con Fibras previamente expuesto a altas temperaturas. *Mec Comput*, Vol XXXXI:527-536, 2024. <https://doi.org/10.70567/mc.v41i10>
- EN 14651. Precast concrete products-test method for metallic fibre concrete – measuring the flexural tensile strength. *European Standard*, 2005.
- Faustmann, S., Kronau, M. y Fischer, O., Direct tensile test on steel fiber reinforced concrete with focus on wall effect and fiber orientation. *Mater Struct*, 57:185, 2024. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02463-2>
- Huang, H., Gao, X., y Teng, L., Fiber alignment and its effect on mechanical properties of

- UHPC: An overview. *Constr Build Mater*, 296: 123741, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123741>
- Isla, F., Argañaraz, P. y Luccioni, B., Numerical modelling of steel fibers pull-out from cementitious matrixes. *Constr Build Mater*, 332: 127373, 2022 (a) <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127373>
- Isla, F., Luccioni, B. y Diaz Fontdevila, A., Modelación de elementos de hormigón reforzado con fibras bajo solicitaciones de corte. *Mec Comput*, Vol XXXIX:717-726, 2022(b)
- Islam, M., Zhang, Q. y Jin, Q., A review of existing codes and standards on design factors for UHPC placement and fiber orientation. *Constr Build Mater*, 345: 128308, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128308>
- Kang, S. T., y Kim, J. K., Investigation on the flexural behavior of UHPCC considering the effect of fiber orientation distribution. *Constr Build Mater*, 28(1): 57-65, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.003>
- Luccioni, B., Ruano, G., Isla, F., Zerbino, R. y Giaccio, G., A simple approach to model SFRC. *Constr Build Mater*, 37:111-24, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.027>
- Luccioni, B. y Rougier, V., A plastic damage approach for confined concrete. *Comput Struct*, 83:2238-56, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.03.014>
- Luccioni, B. e Isla, F., Simulación de Hormigones de Alta Resistencia Reforzados con Fibras bajo Cargas Cuasiestáticas. *Mec Comput*, XXXIV 2583-2598, 2016.
- Medeghini, F., Guhathakurta, J., Tiberti, G., Simon, S., Plizzari, G. A., y Mark, P., Steered fiber orientation: correlating orientation and residual tensile strength parameters of SFRC. *Mater and Struct*, 55(10), 251, 2022. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02082-9>
- Medeghini, F., Tiberti, G., Guhathakurta, J., Simon, S., Plizzari, G. A., y Mark, P., Fiber orientation and orientation factors in steel fiber-reinforced concrete beams with hybrid fibers: A critical review. *Struct Concr*, 26:481-500, 2024. <https://doi.org/10.1002/suco.202400461>
- Oller, S., Oliver, J., Lubliner, J. y Oñate, E., Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. Parte I: variables fundamentales, funciones de fluencia y potencial. *Rev. Int. de Método Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 4:397-428, 1988.
- Oller, S., Oñate, E., Miquel, J. y Botello, S., A plastic damage constitutive model for composite materials. *Int. J. Solids and Structures*, 33 (17):2501-18, 1996. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(95\)00161-1](https://doi.org/10.1016/0020-7683(95)00161-1)
- Tao, Z., Qiu, M., Wille, K., Zhu, Y., Pan, R., Li, Z., y Shao, X., Effects of specimen thickness and fiber length on tensile and cracking behavior of UHPFRC: Uniaxial tensile test and micromechanical modeling. *Cem Concr Compos*, 155:105828, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105828>
- Teng, L., Huang, H., Du, J., y Khayat, K. H., Prediction of fiber orientation and flexural performance of UHPC based on suspending mortar rheology and casting method. *Cem Concr Compos*, 122:104142, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104142>
- Tarifa, M., Poveda, E., Cunha, V. M., y Barros, J. A., Effect of the displacement rate and inclination angle in steel fiber pullout tests. *Int J. Fract.*, 223(1):109-122, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10704-019-00398-2>
- Toledo, M., Nallim, L. y Luccioni, B., A micro-macromechanical approach for composite laminates. *M Mater*, 885-906, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2008.05.004>
- Yu, J., Zhang, B., Chen, W., y Liu, H., Multi-scale analysis on the tensile properties of UHPC considering fiber orientation. *Compos Struct*, 280:114835, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114835>
- Zhang, Y., Zhu, Y., Qu, S., Kumar, A., y Shao, X., Improvement of flexural and tensile strength of layered-casting UHPC with aligned steel fibers. *Constr Build Mater*, 251:118893, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118893>