

ANÁLISIS NUMÉRICO DE ENSAYOS DE CORTE DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

NUMERICAL ANALYSIS OF FIBER REINFORCED CONCRETE SHEAR TESTS

Alejandra Diaz Fontdevila, Facundo Isla y Bibiana Luccioni

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/>

CONICET, Godoy Cruz 2290, C1425FQB CABA, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar/>

Palabras clave: Hormigón reforzado con fibras, deslizamiento de fibras, modelo de compuesto, corte, configuraciones de ensayo.

Resumen. El agregado de fibras de acero al hormigón mejora su comportamiento postfisuración, incrementando la ductilidad del material y previniendo la falla frágil en piezas sometidas a corte. Los mecanismos que contribuyen a la capacidad al corte no son conocidos en su totalidad. Por otro lado, si bien se desarrollaron diferentes configuraciones de ensayo, no existe un método estandarizado que permita evaluar directamente el comportamiento a corte. Los estados tensionales en la zona de falla de las probetas no son uniformes e incluyen otras componentes de tensión. En este trabajo se analiza numéricamente el comportamiento de diferentes tipologías de ensayos encontradas en la bibliografía empleando un modelo compuesto para el hormigón reforzado con fibras, basado en una modificación de la teoría de mezcla que permite el deslizamiento de las fibras respecto de la matriz. A modo de validación, se compara la respuesta estructural obtenida numéricamente con la medida en los ensayos. Adicionalmente se analiza la distribución de tensiones y los tipos de estados tensionales que conducen a la falla. Con ello es posible explicar la diferencia de los valores de resistencia al corte obtenidos en forma simplificada utilizando cada una de las configuraciones de ensayos estudiadas.

Keywords: Fiber reinforced concrete, fibers pull-out, composite model, shear, test setups.

Abstract. The addition of steel fibers to the concrete improves its postcracking behavior increasing the material ductility and preventing brittle failure. The mechanisms that contribute to the shear capacity of fiber-reinforced concrete are not fully known. On the other hand, although different test configurations were developed, there is no standardized method that allows direct evaluation of shear behavior. The stress states in the failure zone of the specimens are not uniform and include other stress components. The behavior of different types of tests found in the bibliography is numerically analyzed in this paper a composite model based on a modification of the mixing theory that allows the sliding of the fibers with respect to the matrix is used for fiber reinforced concrete. As model validation, the numerical response is compared with that measured in the tests. Additionally, the distribution of stresses and the combination of stress leading to failure are analyzed. In this way, the differences between the shear strength values obtained from different test setups using simplified form can be justified.

1 INTRODUCCIÓN

Los estudios experimentales existentes muestran que la incorporación de fibras al hormigón mejora el comportamiento posterior a la fisuración incrementando la ductilidad del material. Esto permite cambiar el modo de falla de los elementos, pasando de una rotura frágil a una dúctil. Se obtienen patrones de fisuración mas dispersos y con fisuras de menor apertura. Las fibras evitan la apertura de las grietas favoreciendo los mecanismos de fricción entre las superficies del hormigón a lo largo del plano de corte. Si bien dichos esfuerzos dependen principalmente de los agregados y de la matriz, las fibras limitan el ancho de las fisuras y controlan el deslizamiento, lo que redundo en una mayor capacidad resistente. (Amin et al. 2016, Barragan et al. 2006, Cuenca et al. 2020, Soetens et al. 2017)

Los elementos de hormigón bajo cargas fallan cuando las tensiones principales alcanzan la resistencia correspondiente. La contribución de las fibras a los mecanismos resistentes depende del modo en que falla la pieza analizada. Los esfuerzos de corte en el plano no producen solo el deslizamiento sino también la apertura de la fisura. Ello conduce a un modo de falla mixto, en donde la contribución de las fibras se obtiene de descomponer su fuerza en una componente axial y otra transversal, generando a su vez una fricción adicional entre las dos interfaces.

La incorporación de los hormigones reforzados con fibras (HRF) al fib Model Code 2010 (FIB 2013), donde se propone un criterio para su caracterización y clasificación según la resistencia a flexión, constituye un gran avance lo mismo que la inclusión de fórmulas para poder reemplazar la armadura mínima por fibras. Sin embargo, hasta el momento no se establece un procedimiento estandarizado para poder evaluar la capacidad al corte de los diferentes elementos estructurales.

A lo largo de los años se han propuesto diferentes configuraciones de ensayos para evaluar la resistencia al corte del hormigón y el HRF. Entre las mismas se encuentran la muestra en forma de Z, el método de la sociedad japonesa de Ingeniería civil (JSCE) y el ensayo de la federación internacional de pretensado (FIP), ver Figura 1. La primera conocida también como prueba de Hoffbeck o doble L, se ha utilizado ampliamente tanto para hormigón armado como para HRF. No hay un procedimiento estándar para realizar el ensayo y en estudios anteriores se han utilizado diferentes tamaños de especímenes. La mayoría de ellos tienen en común la generación de entallas en las muestras, de manera tal que la falla se produzca dentro dicho plano. Sin embargo, como los resultados varían de un procedimiento a otro no se puede establecer una resistencia de diseño al corte.

El estado tensional en la interface no es uniforme, incluso cuando se plantean configuraciones experimentales complejas, debido a la irregularidad de las caras de las fisuras y la dificultad de generar corte puro sin que aparezcan momentos flectores indeseados. Además, la distribución y orientación de las fibras en la interfaz también están sujetas a variaciones. Por lo tanto, los resultados de las pruebas están sujetos a una dispersión considerable (Soto y Kaufmann, 2021).

En los estudios experimentales llevados a cabo por Soto y Kaufmann (2021) se ensayaron 3 configuraciones diferentes, tipo Z, JSCE y FIP para evaluar la resistencia al corte. No se logró obtener un valor único de la resistencia al corte y se observó la intervención de otros mecanismos de falla del material en la rotura de los especímenes. Para los ensayos con 40 kg/m^3 de fibras los valores de tensión tangencial máxima fueron 7.9 MPa en la configuración JSCE y 5.7 MPa en la configuración FIP respectivamente, es decir que en el segundo caso la resistencia al corte obtenida es 72% del valor de la otra prueba.

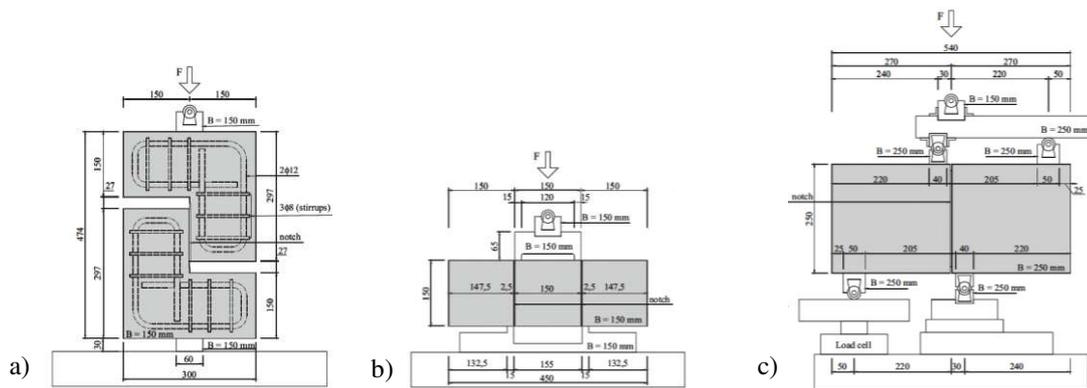


Figura 1: Ensayo de corte en HRF. Configuraciones y geometría de los especímenes. a) Tipo Z; b) JSCE; c) FIP. (Soto y Kaufmann, 2021).

Por otro lado, si bien los efectos beneficiosos de las fibras en el comportamiento del HRF son conocidos, su aplicación en las obras civiles sigue siendo limitada y esto se debe en gran medida a la falta de modelos apropiados para reproducir su comportamiento bajo diferentes tipos de solicitaciones y modos de falla. A modo de ejemplo, Barros et al. (2020) muestran la incapacidad de la mayoría de los modelos existentes para poder reproducir los mecanismos resistentes a los esfuerzos de corte.

Para una adecuada y eficiente utilización de los HRF se debe contar con herramientas de cálculo que permitan diseñar adecuadamente el material y los elementos estructurares. Los modelos disponibles en la bibliografía para la simulación de los hormigones reforzados con fibras se pueden clasificar en macro-modelos y meso-modelos. Los primeros proponen simular el compuesto como un todo, un único material definido por las propiedades promedio obtenidas de ensayos. Es simple de formular a partir de información relevante a nivel estructural, sin embargo, cualquier cambio deriva en una campaña experimental para su funcionamiento. Los meso-modelos plantean la modelación de varias componentes: matriz, fibras y, en algunos casos, la interfaz fibra-matriz. Este tipo de modelos ayuda a entender mejor el comportamiento del compuesto. Se utiliza un meso-modelo que se describe en la siguiente sección y que se encuentra desarrollado de forma completa en Isla et al. (2022b).

2 MODELO PARA HRF

2.1 Modelo de compuesto

Se puede interpretar al HRF como un material constituido por una matriz frágil de hormigón en la cual se incluyen fibras dispersas de manera aleatoria, condicionada por la forma de llenado y el molde. El compuesto se modela con una modificación de la teoría de mezclas (Oller et al. 1996) que considera el deslizamiento de las fibras respecto de la matriz (Luccioni et al. 2012) e incluye la ortotropía de las fibras.

La hipótesis de partida de la teoría clásica de mezclas clásica es la compatibilidad de deformaciones de las distintas componentes del compuesto que el HRF en pequeñas deformaciones se expresa como:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_H = (\varepsilon_{ij})_{F_k} \quad (1)$$

donde 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. La tensión se obtiene de la siguiente manera:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\alpha})}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{m=1}^{n+1} k_m \frac{\partial \Psi_m(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\alpha}_m)}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{m=1}^{n+1} k_m (\sigma_{ij})_m \quad (2)$$

Donde $\Psi(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\alpha})$ y $\Psi_m(\boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\alpha}_m)$ son las densidades de energía libre por unidad de volumen del compuesto y de cada una de las componentes m respectivamente, $k_m = dV_m/dV$ es la correspondiente proporción volumétrica, $\boldsymbol{\alpha}_m$ es un conjunto de variables internas y $(\sigma_{ij})_m$ es la tensión en la componente m que se obtiene a partir de la correspondiente ecuación constitutiva.

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

$$(\varepsilon_{ij})_{F_k} = (\varepsilon_{ij}^e)_{F_k} + \underbrace{(\varepsilon_{ij}^p)_{F_k} + (\varepsilon_{ij}^s)_{F_k}}_{(\varepsilon_{ij}^{ps})_{F_k}} \quad k = 1, \dots, n \quad (3)$$

Los dos primeros términos de la Ec. (3) 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.

2.2 Modelo plástico para el hormigón

El comportamiento de la matriz de hormigón se describe mediante el modelo de daño plástico modificado (Luccioni y Rougier, 2005), pero se redefine la variable de endurecimiento plástico para simular más adecuadamente el comportamiento bajo esfuerzos cortantes, (Isla et al. 2022b). Se trata de un modelo elasto-plástico que usa como función de fluencia y de potencial la función de Lubliner Oller (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.

2.3 Fibras

Para la modelación de las fibras se utiliza un modelo elasto-plástico para materiales ortótropos, basado en el concepto de mapeo de espacios. El mismo propone que existen dos espacios, el isótropo ficticio en el cual se resuelve el problema para luego pasar al espacio ortótropo real. Ambos espacios se encuentran vinculados por medio de un tensor de transformación diagonal que contiene la información de la ortotropía del material, (Toledo et al. 2008). Con esta teoría se puede simular las deformaciones plásticas en conjunto con el deslizamiento fibra-matriz. Adicionalmente, para poder tener en cuenta los diferentes modos de fallas del HRF, se considera que la orientación de las fibras puede variar localmente cuando se encuentra atravesando la fisura, ya que la componente resistente tiende a orientarse en la dirección del desplazamiento relativo entre ambas caras de la fisura (Isla et al. 2022b, Soto y Kaufmann, 2021).

2.4 Implementación numérica

La implementación del modelo numérico se realiza en un programa de elementos finitos no lineal explícito que admite resolver problemas en pequeñas y grandes deformaciones y desplazamientos. La consideración que plantea la teoría de mezclas es una forma sencilla para poder resolver el problema, ya que todas las componentes poseen la misma deformación. Además, la interfaz fibra/matriz se incluye en el comportamiento de las fibras y se evita una componente adicional.

Para la resolución del problema, la ecuación constitutiva de las fibras se plantea en el espacio isótropo ficticio, para luego pasar las tensiones y deformaciones al espacio real. Se supone que las fibras se orientan en la dirección de la deformación plástica principal mayor de la matriz y esta orientación se va actualizando y guardando en coordenadas locales para cada paso de carga.

3 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Descripción de los ensayos

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones de ensayos de flexión y corte en HRF empleando el modelo descripto. Se comparan con la campaña experimental realizada por [Cuenca et al. \(2020\)](#), en la cual se realizan ensayos de flexión y corte según la tipología JSCE.

Los hormigones presentan una resistencia a compresión cúbica promedio de 53MPa (resistencia cilíndrica a la compresión: 46MPa), incorporan fibras de acero con gancho en los extremos en cantidades nominales de 25 y 40 kg/m³ (0.32% y 0.51% del volumen). Estas tienen 50 mm de largo, diámetro de 0.80 mm y una resistencia a tracción superior a 1100MPa. Luego de realizar los ensayos, los autores procedieron al conteo de las fibras en la superficie de falla. Este procedimiento es aproximado y tiene un margen de error alto ya que depende mucho del observador. Los contenidos obtenidos siempre estuvieron muy por debajo del porcentaje nominal incorporado.

El ensayo de flexión se realizó según la norma [EN14651](#), o ensayo de flexión de 3 puntos para una luz de apoyo de 500 mm. Para el ensayo de corte JSCE, los investigadores buscaron tener una distribución de fibras similar a la de flexión, para así relacionar la respuesta al corte con las resistencias residuales. Se utilizaron prismas de 150x150x450, los cuales fueron entallados todo alrededor del perímetro 20 mm de profundidad, resultando 3 bloques.

3.2 Simulación de los ensayos de flexión de HRF

La simulación de los ensayos de flexión de HRF permiten calibrar indirectamente el comportamiento en tracción de la matriz de hormigón. La viga entallada se modela por medio de una malla de elementos finitos planos (2D), de 4 nodos y de 2x2 puntos de integración, [Figura 2a](#).

Para el hormigón se utiliza una curva de endurecimiento en compresión que tiene una zona de endurecimiento y otra de ablandamiento, en cambio, en el caso de tracción se usa una curva de ablandamiento. La resistencia a compresión es dato mientras que la resistencia a tracción y la energía de fractura del hormigón se obtienen ajustando la respuesta experimental en flexión del hormigón simple (HS), lo cual conduce 3MPa y 0.12N/mm respectivamente. Como la respuesta no es sensible al valor de la energía de aplastamiento, se supone es 100 (R_0^2) veces la energía de fractura calibrada en flexión, 12N/mm. Donde R_0 es la relación entre el límite elástico en compresión y el correspondiente a tracción uniaxial. Para obtener la curva de

endurecimiento de las fibras que, en realidad, corresponde a la curva de arrancamiento de las mismas, se utiliza el modelo de pull-out desarrollado por los autores (Isla et al. 2022a) que tiene en cuenta la geometrías y propiedades mecánicas de las fibras y de la matriz. Los porcentajes de fibras introducidos al modelo se corresponden con los medidos experimentalmente.

En la Figura 2b se presentan las curvas tensión-apertura de fisura (CMOD), donde se compara la respuesta experimental promedio con los valores obtenidos numéricamente. Se observa que el modelo reproduce correctamente el comportamiento en flexión, tanto para 25 como 40 kg/m³ de fibras.

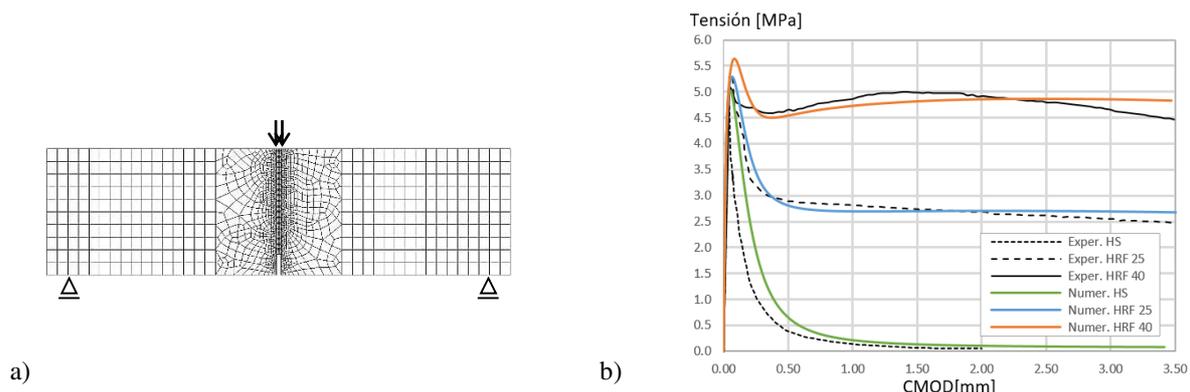


Figura 2: Ensayo de flexión de 3 puntos en vigas de HRF con entalla. a) Malla de elementos finitos; b) Curva Tensión-apertura de fisura.

3.3 Ensayos de corte JSCE en HRF

Con las propiedades de los materiales calibradas se simula el ensayo de corte JSCE. La Figura 3 muestra la configuración utilizada (Cuenca et al. 2020) y el modelo correspondiente. La carga se aplica con control de desplazamiento, solicitando al corte de forma simétrica dos planos entallados y transmitiendo los esfuerzos hacia los apoyos metálicos del lado externo de la muesca. Para intentar reducir y controlar efectos indeseados como son la fricción y las rotaciones, que alejan al estado tensional del corte puro, en los ensayos se colocan láminas de teflón en los puntos de apoyo y se implementa un sistema de fijación formado por tensores y bloques de acero para impedir giros, Figura 3a. En ella también se distinguen con flechas los dispositivos con los cuales se midieron desplazamientos verticales hacia ambos lados de cada entalla, ($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$). En la Figura 3b se muestra la malla de elementos finitos 2D, de 4 nodos y 2x2 puntos de integración utilizada.

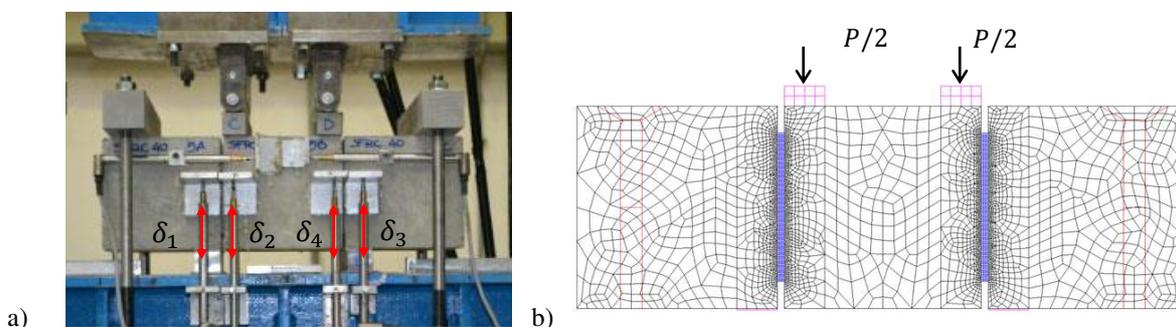


Figura 3: Ensayo de Corte JSCE. a) Configuración experimental (Cuenca et al. 2020); b) Malla de elementos finitos.

El promedio de los deslizamientos relativos entre caras de una misma entalla se calcula

como:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_{2i-1} - \delta_{2i})}{n}. \text{ Para el caso de } n = 2 \text{ queda } \delta = \frac{(\delta_1 - \delta_2) + (\delta_4 - \delta_3)}{2} \quad (4)$$

En la **Figura 4** se muestran las curvas carga-desplazamiento vertical de la sección δ , donde se compara la carga alcanzada en los ensayos de probetas de HRF con dos contenidos de fibras y las obtenidas numéricamente con el modelo descrito para los mismos materiales y para HS. Para el caso del HS solo se cuenta con el valor de la carga pico obtenida experimentalmente ya que, debido a la fragilidad del material, no se pudo registrar la curva en los ensayos. La carga aplicada se evalúa como la suma de las reacciones en los puntos donde se aplica el desplazamiento (ver **Figura 3b**). Se puede ver que en el caso del HRF, el modelo numérico reproduce de manera aproximada el comportamiento experimental, marcándose una mayor diferencia hacia el final de los ensayos. Se hace notar que las máximas cargas son muy similares, sin embargo, se puede observar que la respuesta numérica no presenta el re-endurecimiento que se observa en las curvas experimentales. La diferencia podría atribuirse a la incapacidad del modelo continuo para simular el acomodamiento y fricción que se generan entre los bloques a ambos lados de la entalla una vez que pierden continuidad entre sí.

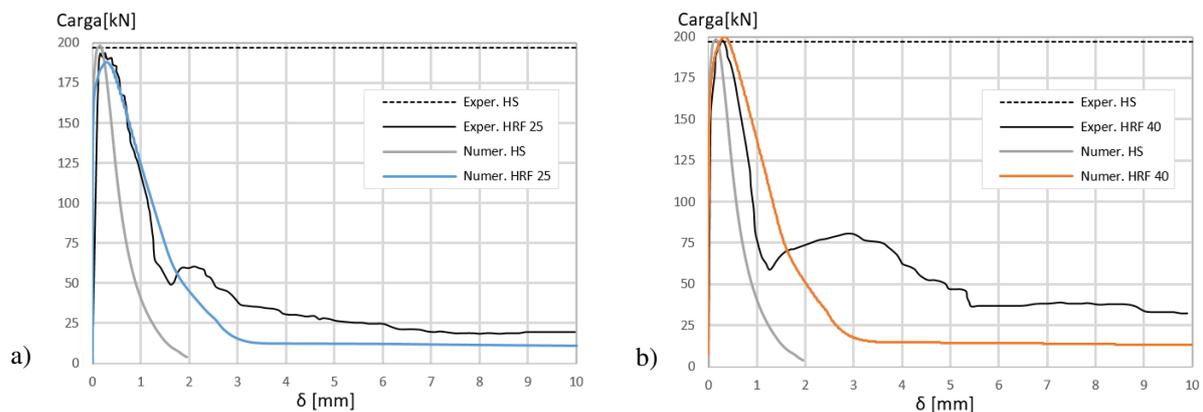


Figura 4: Curvas carga-desplazamiento vertical. a) HRF 25 kg/m³; b) HRF 40 kg/m³.

En general, en los trabajos experimentales la resistencia al corte se obtiene suponiendo una distribución uniforme de tensiones tangenciales en ambas entallas y se calcula como:

$$\tau = \frac{P/2}{A} \quad (5)$$

Donde $P/2$ es la carga aplicada en el plano de corte y A el área de la sección transversal descontando la entalla. La Ec.(5) da un valor aproximado de resistencia y solo se utiliza en este trabajo a los efectos de comparación. Para analizar los estados tensionales en cada una de las entallas (izquierda y derecha), se miden las tensiones de corte en 10 puntos de Gauss uniformemente distribuidos en la altura. Se calcula los promedios para cada entalla y luego un promedio de ellos. Para el caso del HS, la tensión de corte de fisuración calculada con la carga experimental resulta 6.71MPa, superior al límite elástico en corte que proporciona la función de fluencia, 4.3MPa. En la **Figura 5** se presentan las curvas tensión de corte-desplazamiento vertical obtenidas de la forma descrita, HRF 25 y HRF 40. Se debe notar que las tensiones calculadas con la Ec.(5) son, durante todo el ensayo, mayores que el promedio de las dos entallas. Sin embargo, las tensiones promedio alcanzadas en la entalla izquierda, superan a todas las otras. Los picos de tensiones coinciden con los valores picos de las cargas aplicadas.

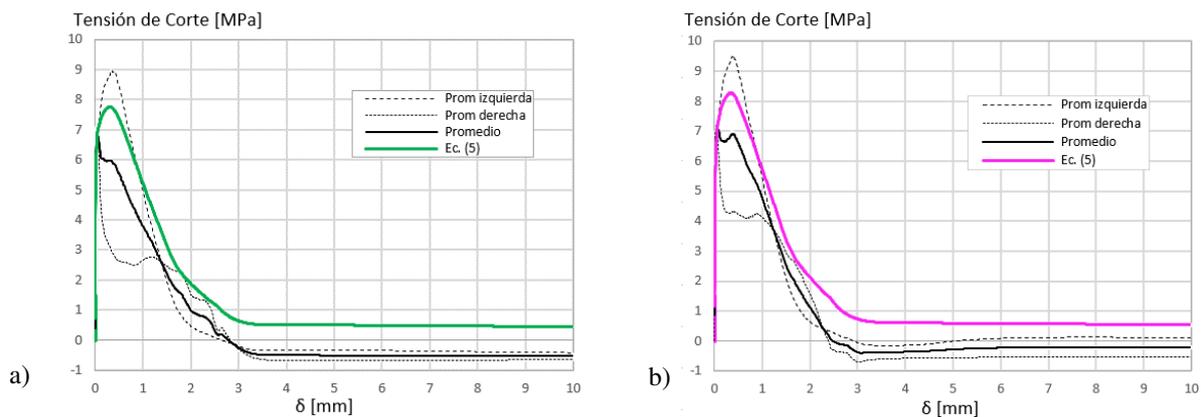


Figura 5: Curvas Tensión de corte en entallas-desplazamiento vertical. a) HRF 25 kg/m³; b) HRF 40 kg/m³.

En la [Figura 6](#) se muestra la distribución de tensiones de corte en altura de la sección transversal para distintos desplazamientos aplicados en el caso de HRF con 40 kg/m³ de fibras. A partir de los de 3,5 mm de desplazamiento impuesto no se observan cambios en el valor de las tensiones a lo largo de ambas entallas. Además, los valores alcanzados no son uniformes y la Ec.(5) sólo representa un promedio de lo que realmente sucede en el interior del material.

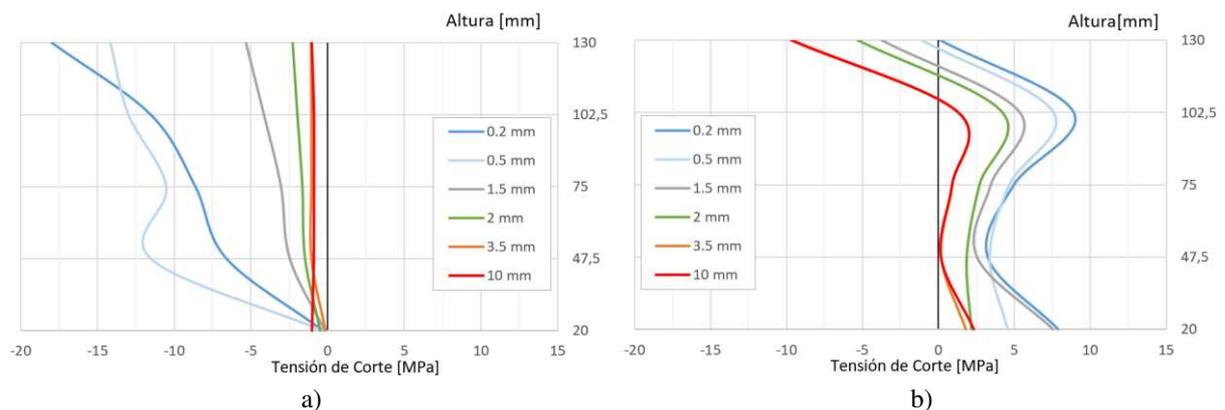


Figura 6: Curvas Tensión de corte-altura en la sección transversal para diferentes desplazamientos aplicados. Ensayo de corte JSCE, HRF 40. a) Entalla izquierda; b) Entalla derecha.

4 SIMULACIÓN DE ENSAYO FIP

En esta sección se simula numéricamente el ensayo FIP para el HRF 40 calibrado en el apartado 3 a los efectos de comparar los estados tensionales y la resistencia al corte calculada aproximadamente a partir de ambos ensayos. En la [Figura 7a](#) se muestra la malla de elementos finitos utilizada, de 4 nodos y 2x2 puntos de integración. La tensión de corte se calcula con la Ec.(5), siendo en este caso la carga en el plano de corte un 76% de la carga P aplicada, determinada con un análisis de equilibrio. Los desplazamientos se miden en 5 alturas a ambos lados de la entalla, indicados con puntos en [Figura 7a](#), y se aplica la Ec.(4) para $n=5$. En la [Figura 7b](#) se presentan las curvas tensión de corte-desplazamiento vertical. Es notable la diferencia entre las curvas correspondientes a ambos ensayos al comienzo, pero luego tienden al mismo valor residual de resistencia al corte para desplazamientos superiores a 3mm. El valor pico de tensión tangencial obtenido en el ensayo FIP resulta un 68% del obtenido en el ensayo JSCE, porcentaje similar al encontrado por [Soto y Kaufmann \(2021\)](#) experimentalmente.

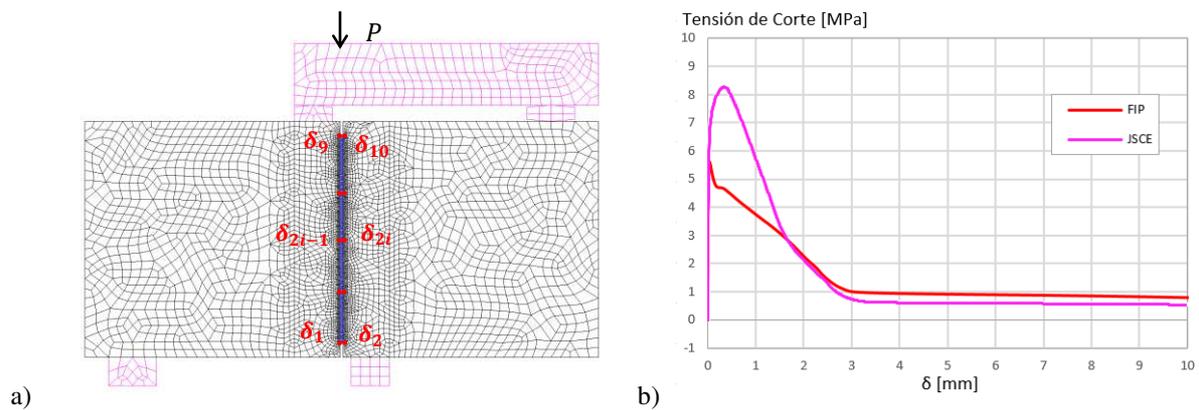


Figura 7: Ensayo de corte FIP. a) Malla de elementos finitos; b) Simulación para las configuraciones JSCE y FIP.

En la [Figura 8](#) se presentan la distribución de la variable de endurecimiento obtenidas en las simulaciones de los apartados 3 y 4 en conjunto con los especímenes ensayados por [Soto y Kaufmann \(2021\)](#) en las configuraciones según JSCE y FIP. Como el HRF calibrado en las simulaciones difiere del usado por [Soto y Kaufmann \(2021\)](#), la comparación debe tomarse a nivel cualitativo. Se observa que la falla se produce en las entallas. Sin embargo, también dejan ver fenómenos de flexión en zonas un poco más alejadas de las entallas, siendo el modelo propuesto capaz de reproducirlos.

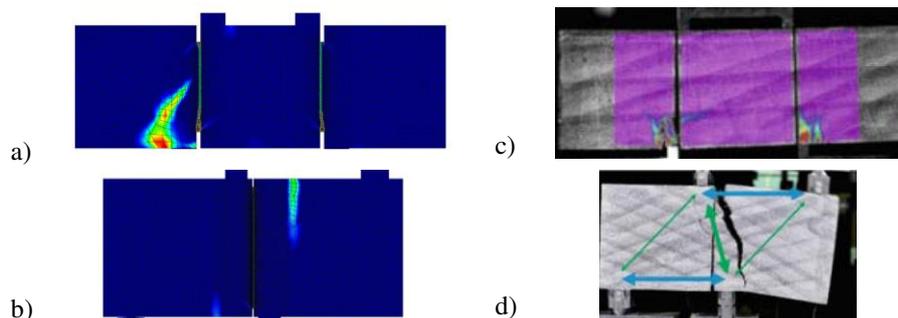


Figura 8: Ensayos de corte. a) Variable de endurecimiento (numérico), ensayo JSCE; b) Variable de endurecimiento (numérico), ensayo FIP; c) Probeta post-ensayo JSCE; d) Probeta post-ensayo FIP. ([Soto y Kaufmann, 2021](#)).

5 CONCLUSIONES

Si bien todavía no hay un ensayo estándar para poder evaluar la resistencia al corte del HRF, el análisis de los ensayos disponibles permite conocer los mecanismos que actúan dentro de los materiales e interpretar los valores de tensiones calculados a partir de los mismos que no coinciden con los del modelo constitutivo.

El modelo descrito aproxima globalmente los resultados experimentales, siendo importante para ello la reorientación de las fibras en dirección de la deformación plástica principal mayor una vez que se fisura el hormigón.

Se logran reproducir los valores de carga pico y los fenómenos que se observan en las diferentes configuraciones de ensayos desarrolladas. Sin embargo, todavía el modelo muestra cierta incapacidad por parte de las fibras para poder captar los mecanismos generados luego de la fisuración del material. La resistencia residual es inferior a la obtenida en los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Proyecto PICT 2020 1810), al CIUNT (Proyecto 26E623) y a la UNT por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

- Barros, J., Sanz, B., Kabele, P., Yu, R.C., Meschke, G., Planas, J., Cunha, V., Caggiano, A., Ozyurt, N., Gouveia, V., van den Bos, A., Poveda, E., Gal, E., Cervenka, J., Neu G., Rossi, P., Dias-da-Costa, D., Juhasz, P., Cendon, D., Ruiz, G., Valente, T., Blind competition on the numerical simulation of steel-fiber-reinforced concrete beams failing in shear. *Structural Concrete*, 1–29, 2020.
- Amin, A. and Foster, S.J., Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Engineering Structures* 111:323–332, 2016.
- Barragán, B., Gettu, R., Agulló, L. and Zerbino, R., Shear failure of steel fibre-reinforced concrete based on push-off test. *ACI Materials Journal*, 103:251-257, 2006.
- Cuenca, E., Conforti, A., Monfardini, L. and Minelli, F., Shear transfer across a crack in ordinary and alkali activated concrete reinforced by different fibre types. *Materials and Structures*; 56:24, 2020.
- EN 14651. Precast concrete products-test method for metallic fibre concrete – measuring the flexural tensile strength. *European Standard*, 2005.
- Fédération Internationale du Béton, *fib Model Code for Concrete Structures 2010*, Ernst & Sohn, Berlin, Germany 2013.
- Isla, F., Argañaraz, P. and Luccioni, B., Numerical modelling of steel fibers pull-out from cementitious matrixes. *Construction & Building Materials*, 332: 127373, 2022 (a)
- Isla, F., Luccioni, B. and Diaz Fontdevila, A., Modelación de elementos de hormigón reforzado con fibras bajo solicitaciones de corte. *Mecánica computacional*, Vol XXXIX:717-726, 2022(b)
- Luccioni, B., Ruano, G., Isla, F., Zerbino, R. and Giaccio, G., A simple approach to model SFRC. *Construction and Building Materials*, 37:111-24, 2012.
- Luccioni, B. and Rougier, V., A plastic damage approach for confined concrete. *Computers and Structures*, 83:2238-56, 2005.
- Soetens, T. and Matthys, S. Design Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 82:1-13, 2017.
- Oller, S., Oliver, J., Lubliner, J. and 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. and Botello, S., A plastic damage constitutive model for composite materials. *Int. J. Solids and Structures*, 33 (17):2501-18, 1996.
- Soto, A. and Kaufmann, W., Effect of test setups on the shear transfer capacity across cracks in FRC. *RILEM Bookseries 30*, 163-1756, 2021.
- Toledo, M., Nallim, L. and Luccioni, B., A micro-macromechanical approach for composite laminates. *Mechanics of Materials*, 885-906, 2008.