

Evaluación de los mecanismos de transferencia a corte en una fisura de hormigón reforzado con fibras de polipropileno

Study of shear transfer mechanism in a crack of polypropylene fibre reinforced concrete

Francisco Ortiz Navas^a, Juan Navarro Gregori^b y Pedro Serna Ros^c

^a Doctorando. Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Universitat Politècnica de Valencia.

^b Profesor titular de Universidad. Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de Valencia.

^c Catedrático. Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de Valencia

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio sobre la transmisión de esfuerzos cortantes en una fisura de hormigón reforzado con fibras (FRC). El modelo desarrollado incluye mecanismos como las pre-compresiones y confinamiento, el engranamiento de áridos, y el efecto de las fibras. Este último introducido en función de las propiedades a tracción del FRC. El modelo es comparado con 16 resultados experimentales de probetas Push-off de hormigón tradicional (PC) y hormigón reforzado con fibras de polipropileno (PFRC). Se evidencia que las propiedades a tracción del FRC son capaces de describir la contribución de las fibras en una fisura de cortante.

ABSTRACT

This paper studies the shear transfer mechanism in a crack of fibre reinforced concrete (FRC). In this context, a model that incorporate parameters like pre-compression, confinement, aggregate interlock and fibre contribution is developed. Fibre is incorporated as a function of the tensile behaviour of FRC obtained by means of inverse analysis. Results of the rhetorical model are compared with experimental result of 16 push-off specimens manufactured with plain concrete (PC) and polypropylene fibre reinforced concrete (PFRC). Results shows that tensile behaviour of FRC is capable of describe the contribution of fibres in the shear transfer mechanism in a FRC crack.

PALABRAS CLAVE: engranamiento de áridos, cortante, fibras de polipropileno.

KEYWORDS: aggregate interlock, shear transfer, polypropylene fibre reinforced concrete.

1. Introducción

La transmisión de esfuerzos a través de una fisura de cortante en un elemento de hormigón tradicional, es un problema complejo que ha sido estudiado por más de 50 años. Se conoce que

uno de los mecanismos más importantes de transferencia de cortante es el engranamiento de áridos. Este mecanismo, describe la capacidad del hormigón de transferir tensiones normales y

tangenciales a través de una fisura debido al engranaje y contacto de los áridos de ambas caras de una fisura. Varios autores han desarrollado modelos teóricos que explican desde un enfoque físico-mecánico este fenómeno[1–4]. Sin embargo, este mecanismo de transferencia se ve afectado cuando nuevos componentes, como las fibras, interactúan dentro de una fisura.

Se ha evidenciado la efectividad de las macro fibras para mejorar la ductilidad y resistencia a cortante de elementos de hormigón con y sin refuerzo transversal cuando estas son dosificadas en proporciones adecuadas en la matriz[5]. Estas mejoras se deben principalmente al efecto de puente que proporcionan las fibras al coser ambas caras de una fisura[6]. En la última década, además de las fibras de acero, se han incorporado en aplicaciones estructurales las fibras de polipropileno[7,8]. No obstante, muchos de los modelos que explican la contribución de las fibras en el cortante han sido creados utilizando fibras de acero[9]. En este contexto, el presente trabajo exhibe la posibilidad de introducir el comportamiento de las fibras en la transmisión de esfuerzos de una fisura de cortante en función de las propiedades a tracción de un hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Para esto se desarrolla una campaña experimental de 16 probetas Push-off fabricadas con hormigón tradicional y hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Las probetas han sido previamente fisuradas para emular diferentes condiciones de aberturas iniciales en la fisura. Posteriormente, se genera un modelo teórico que reproduce el ensayo y que involucra todos los mecanismos que influyen en la transferencia de tensiones. En el modelo, además del aporte de las fibras, se incluye el efecto del confinamiento, engranamiento de áridos y pre-compresión inicial.

El engranamiento de áridos ha sido incluido mediante modelos teórico físico existentes en la literatura[1–3].

2. Campaña experimental

Dieciséis especímenes Push-off fueron ensayados a corte directo, ocho de hormigón tradicional y ocho con hormigón reforzado con fibras de polipropileno. En Figura 1 se muestra la geometría de los especímenes utilizados en el presente estudio. Los especímenes fueron fabricados en laboratorio bajo condiciones controladas de temperatura empleando encofrados metálicos dispuestos horizontalmente. El plano de corte, 260x100mm, fue realizado durante el vertido del hormigón, mediante dos platinas metálicas dispuestas en el encofrado. Estas platinas, moldean en el hormigón dos entallas con forma trapezoidal en cada uno de los lados del espécimen como se puede ver en la Figura 1. Para prevenir roturas indeseadas por flexión durante el ensayo, dentro de cada espécimen se utilizó armadura tradicional con diámetros de 8 y 12 mm dispuesta en forma de L en ambos bloques (activo y pasivo). Finalmente, con el objetivo de sujetar el espécimen y el marco de confinamiento, cuatro barras roscadas de 10mm de diámetro fueron embebidas en cada uno de los bloques de hormigón durante la fabricación.

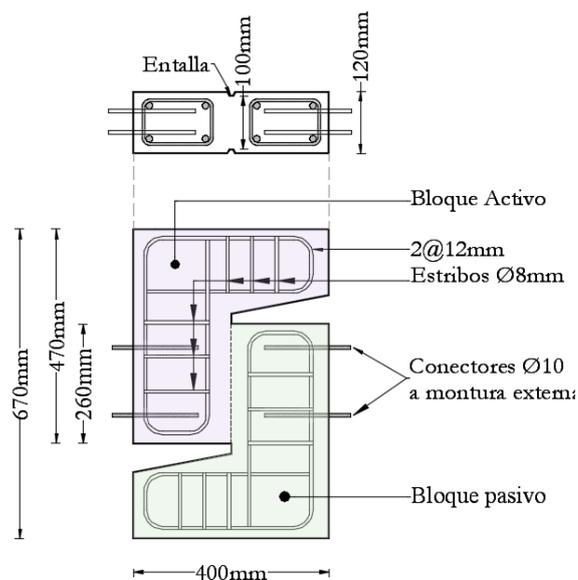


Figura 1. Geometría de probetas Push-off

Hormigón tradicional y hormigón reforzado con fibras de polipropileno fueron elaborados para la fabricación de los especímenes. Un tipo de arena, filler calizo, dos tipos de grava y cemento tipo CEM I 42.5N fueron utilizados en la producción de los dos tipos de hormigones. El tamaño máximo de árido fue de 12mm. Finalmente se empleó plastificante para conservar la trabajabilidad y mantener una relación agua cemento de 0.5.

Las fibras sintéticas empleadas fueron macro fibras de polipropileno dosificadas en la matriz a razón de 12kg/m³. Las fibras tipo monofilamentos poseen un diámetro equivalente de 0.85mm y una longitud de 48mm. Su resistencia a la tracción, así como también módulo de elasticidad es de 400MPa y 4700MPa respectivamente.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de PC y PFRC.

Push-off	f_c [MPa]	f_{ct} [MPa]	f_{cs} [MPa]	f_c [MPa]
0/0.22/1.83	-	-	-	46.20(0.05)
0/0.25/1.84	-	-	-	46.20(0.05)
0/0.36/1.22	-	-	-	46.88(0.03)
0/0.20/0.97	-	-	-	46.88(0.03)
0/0.33/0.64	-	-	-	42.15(0.02)
0/0.30/1.15	-	-	-	42.15(0.02)
0/0.19/0.07	-	-	-	41.21(0.02)
0/0.38/0.03	-	-	-	41.21(0.02)
12/0.25/1.58	4.55(0.05)	1.96(0.08)	2.86(0.03)	39.21(0.02)
12/0.28/1.56	4.55(0.05)	1.96(0.08)	2.86(0.03)	39.21(0.02)
12/0.28/1.13	4.55(0.05)	1.96(0.08)	2.86(0.03)	44.49(0.07)
12/0.27/0.93	4.55(0.05)	1.96(0.08)	2.86(0.03)	44.49(0.07)
12/0.24/0.70	4.68(0.04)	2.59(0.15)	3.73(0.16)	46.89(0.02)
12/0.18/0.37	4.68(0.04)	2.59(0.15)	3.73(0.16)	46.89(0.02)
12/0.19/0.44	4.68(0.04)	2.59(0.15)	3.73(0.16)	50.77(0.01)
12/0.31/0.81	4.68(0.04)	2.59(0.15)	3.73(0.16)	50.77(0.01)

Para caracterizar la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción residual de ambos hormigones, se fabricaron probetas de acompañamiento cilíndricas de 150x300mm y prismáticas de 150x150x600mm. Las resistencias a la compresión (f_c) y residuales (f_{ct}) fueron determinados bajo ensayos EN12390-3 [10] y EN14651 [11] respectivamente. En la Tabla 1 se puede observar las propiedades mecánicas de

cada una de los especímenes fabricados con su respectivo coeficiente de variación en paréntesis. La nomenclatura de las probetas indica como primer término la dosificación de fibras usada (0kg/m³) o (12kg/m³), el segundo término la abertura de la fisura inicial (w_0), y como tercer y último término la pre-compresión antes del inicio del ensayo de push-off (σ_0).

Con el propósito de controlar la abertura (w) y deslizamiento (s) de la fisura analizada, así como también poder medir las tensiones normales (σ_n) generados por cada uno de los mecanismos durante el ensayo de push-off, se ha empleado un marco de confinamiento de acero unido a cada espécimen mediante conectores roscados embebidos en el hormigón. El marco de confinamiento se encuentra constituido por cuatro barras de acero de 40mm, y dos placas de acero de 30mm de espesor. El ensayo consta de cuatro etapas, la primera etapa es el ajuste de las barras que conforman el marco de confinamiento y que a la vez proporcionan una pre-compresión (σ_{mi}) en el espécimen al momento de ajustar las barras. La segunda etapa consiste en la pre-fisuración del espécimen push-off con ayuda de dos cuchillas metálica como se muestra en la Figura 2. En esta etapa se genera una abertura de fisura y por el confinamiento también se genera una tensión normal adicional en la fisura (σ_p). La tercera etapa radica en el ajuste de abertura y confinamiento inicial después de la pre-fisuración. Esto se logra mediante el cierre o apertura de las barras que conforman el marco exterior. Las aberturas iniciales han sido seleccionadas con el propósito de no sobrepasar 0.40mm, abertura característica medidas en vigas a escala real de hormigón armado sin estribos ni fibras, antes de su fallo por cortante [8].

La cuarta etapa del ensayo, consiste en el ensayo tipo push-off de los especímenes, en donde con ayuda de un gato hidráulico de 500kN, se aplica carga en el bloque activo del espécimen y mediante captadores se monitoriza la abertura y deslizamiento de la fisura.

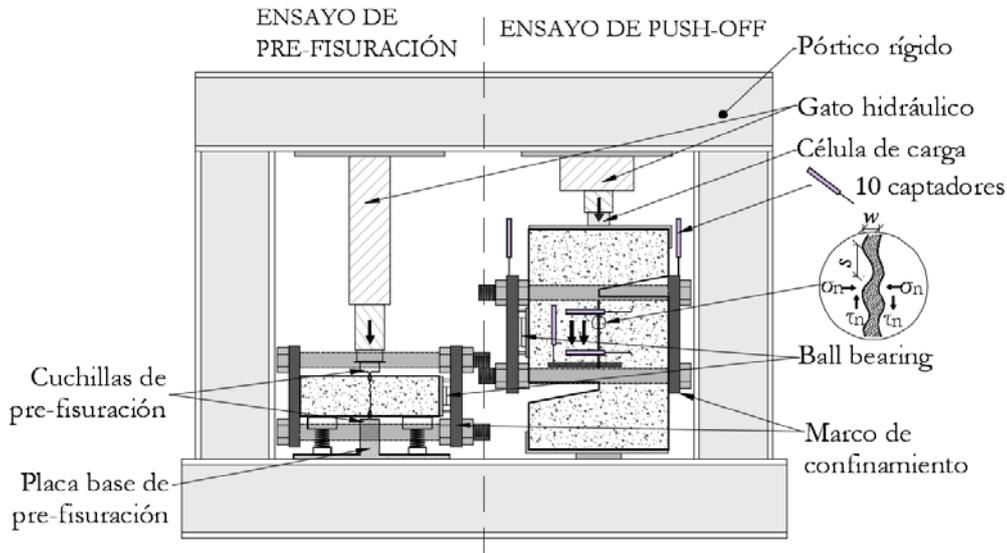


Figura 2: Configuración de ensayos

La carga aplicada, es medida mediante una célula de carga, mientras que las tensiones normales en el hormigón producto de los mecanismos de transferencia, son medidos indirectamente mediante 3 galgas extensométricas colocadas en cada una de las 4 barras del marco de confinamiento. El lector puede encontrar más detalles sobre el marco de confinamiento y metodología del ensayo en el siguiente artículo [12].

3. Modelo teórico

La formulación de una ecuación constitutiva de una fisura debe considerar tres estados según Feenstra [13]. El primer estado es antes de la fisuración, el segundo estado corresponde a la iniciación y desarrollo de la fisura discreta y el último estado se refiere al estado de la fisura abierta. La formulación del presente modelo se enfoca en este último estado.

El estado de una fisura puede ser definido por medio de desplazamientos de la fisura globales (ϵ), abertura de fisura (w), y desplazamiento de fisura (s). También es definido por las tensiones globales en la fisura (σ)

constituidos por tensiones normales (σ_n) y tangenciales (τ_n) como se muestra en la Figura 3 y ecuación (1).

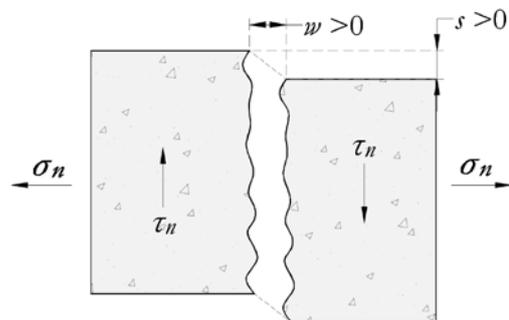


Figura 3. Estado de una fisura

$$\epsilon = \begin{bmatrix} w \\ s \end{bmatrix}; \sigma = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \tau_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Así también, el modelo constitutivo de una fisura debe establecer una relación entre tensiones y vectores de desplazamientos presentes. Siguiendo la teoría de deformaciones esto resulta en:

$$\sigma = \sigma(\epsilon) \quad (2)$$

La formulación del presente modelo teórico se basa en adicionar modelos en los cuales los mecanismos de transferencia, pre-

compresión, engranamiento de áridos, confinamiento, y aporte de las fibras (ver Figura 4), son tomados en cuenta. De esta manera la expresión (2) puede ser expresada como:

$$\sigma = \sigma_a(\varepsilon) + \sigma_c(\varepsilon) + \sigma_F(\varepsilon) + \sigma_0 \quad (3)$$

El efecto de la pre-compresión producto inicialmente del ajuste de las barras y del proceso de pre-fisuración, provoca una tensión normal en el hormigón antes del inicio del ensayo de push-off. Este esfuerzo normal, provocará variaciones de la tensión tangencial al momento que ambas caras de la fisura comiencen a deslizarse. Este efecto es tomado en cuenta en el modelo mediante parámetros de fricción como se muestra en la e.q.(4). En este modelo, el factor de rozamiento (μ) se ha considerado igual a 0.7 bajo recomendación del MC-2010 [14], tomando en consideración que es una superficie rugosa.

$$\tau_0 = \mu\sigma_0 \quad (4)$$

Referente al engranamiento de áridos (ver e.q. (5)), las siguientes ecuaciones constitutivas han sido tomadas en cuenta: modelo simplificado de Walraven-Reinhardt en MPa [1] e.q. (6) y (7), Gambarova- Karakoç en MPa [2] e.q. (8)(9) y finalmente Li-Maekawa en Kg/cm² [3] e.q (10)(11). Es importante mencionar, que el modelo de Walraven-Reinhardt emplea resistencia a la compresión del hormigón obtenidas a partir de probetas cúbicas, mientras que el resto de modelos, se remiten a probetas cilíndricas, por lo que se realizará una conversión.

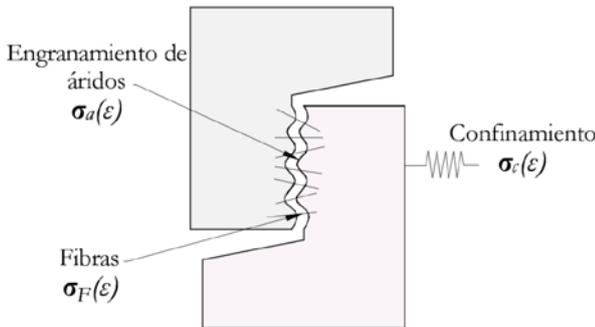


Figura 4: Mecanismos actuantes

$$\sigma_a = \begin{bmatrix} \sigma_a(\varepsilon) \\ \tau_a(\varepsilon) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\sigma_a = -\left(-\frac{f_{c,c}}{20} + 1.35w^{-.63} + (.191w^{-.552} - .15)\right)f_{c,c} \quad (6)$$

$$\tau_a = -\left(-\frac{f_{c,c}}{30} + 1.8w^{-.8} + (.234w^{-.707} - .20)\right)f_{c,c} \quad (7)$$

$$\sigma_a = -0.62\sqrt{w} \frac{\frac{s}{w}}{\left(1 + \left(\frac{s}{w}\right)^2\right)^{.25}} \tau_a \quad (8)$$

$$\tau_a = .2 f_c \left(1 - \sqrt{\frac{2w}{D_{max}}}\right) \frac{2.45}{.2 f_c} + 2.44 \left(1 - \frac{4}{.2 f_c}\right) \left|\frac{s}{w}\right| \frac{s}{w} \quad (9)$$

$$\sigma_a = 18f_c^{1/3} \left[\frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{w}{s} - \frac{w s}{w^2 + s^2}\right] \quad (10)$$

$$\tau_a = 18f_c^{1/3} \frac{s^2}{w^2 + s^2} \quad (11)$$

Con respecto al efecto del confinamiento, efecto introducido mediante mecanismos activos (acero de refuerzo convencional embebido en el hormigón) o pasivos (marco de confinamiento externo), restringe la apertura normal de la fisura. Este efecto, puede ser formulado por medio de solo una tensión normal a la fisura cuyo componente depende únicamente de la abertura de la fisura. Este efecto puede ser expresado como se muestra en la e.q. (12), y depende principalmente de la rigidez del marco de confinamiento exterior. La función del confinamiento $\sigma_c(w)$, puede ser expresada como una función lineal y puede ser añadida directamente a otros mecanismos (engranamiento de áridos y fibras), ya que es tomado en cuenta como un esfuerzo normal interno. De esta manera el confinamiento puede ser expresado como se presenta en la ecuación (13), en donde k_c representa la rigidez del marco exterior del confinamiento y σ_0 la pre-compresión inicial antes del ensayo push-off.

$$\sigma_c = \begin{bmatrix} \sigma_c(w) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\sigma_c(w) = k_c(w) + \sigma_0 \quad (13)$$

Finalmente, con respecto a las fibras, como se observa en la Figura 5, a pesar de que la cinemática de la matriz corresponde al modo

II, las fibras trabajan a tracción en cualquier dirección, es decir Modo I.

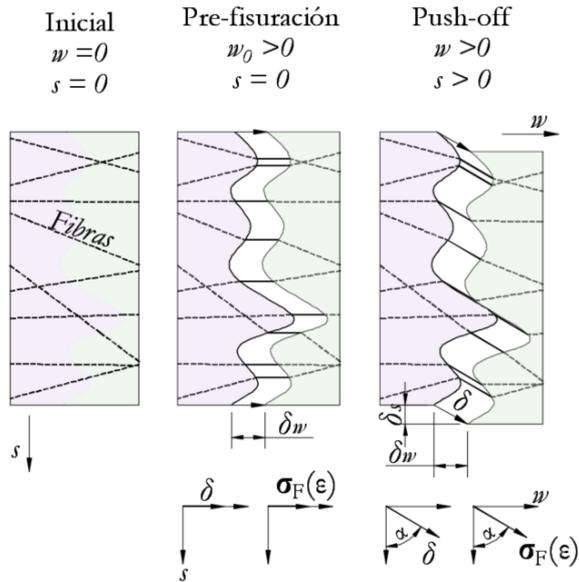


Figura 5. Comportamiento de las fibras en el hormigón

Las fibras son incluidas en el modelo a partir de las propiedades a tensión del hormigón con fibras obtenidos a partir de análisis inverso. El análisis inverso ha sido realizado empleando las probetas prismáticas ensayadas a flexo tracción bajo la norma EN14651 [11], en donde se han determinado las resistencias residuales a flexo tracción de las fibras (f_{η}).

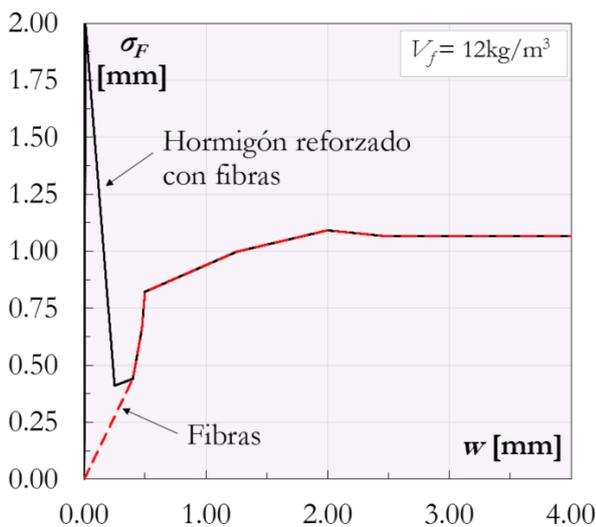


Figura 6. Modelo constitutivo de HRF a tracción

Debido a que las fibras actúan en dirección (δ) en función de (s) y (w) con un ángulo (α) ver e.q. (14) y (15), el aporte de las fibras tanto en dirección del deslizamiento (s) y de la abertura de fisura (w) puede ser descompuesto en las ecuaciones (16) a (18) [15].

$$\delta = \sqrt{\delta_s^2 + \delta_w^2} \quad (14)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\delta_w}{\delta_s} \quad (15)$$

$$\sigma_F = \begin{bmatrix} \sigma_f(\epsilon) \\ \tau_f(\epsilon) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\sigma_f = \sigma_F \sin \alpha^2 \quad (17)$$

$$\tau_f = \sigma_F \sin \alpha \cos \alpha \quad (18)$$

4. Implementación del modelo

En esta sección, la implementación del modelo es desarrollada (ver Figura 7) con el objetivo de reproducir el ensayo bajo condiciones de abertura de fisura controlada. El ensayo consta de dos partes importantes, la pre-fisuración y el ensayo de push-off. En la pre-fisuración los especímenes se someten a una carga transversal al plano de corte mediante cuchillas metálicas. En esta etapa se genera unos desplazamientos ($w > 0$ y $s = 0$) en la fisura. Estos desplazamientos a su vez generan tensiones normales internas (σ_0 y σ_{η}) que serán las condiciones iniciales antes del ensayo push-off. De esta manera, la estabilidad de la fisura, justo después de la pre-fisuración, estará gobernada exclusivamente por el confinamiento, pre-compresión y las fibras. Referente al ensayo tipo push-off, el ensayo es reproducido bajo condiciones de desplazamiento controlado. En estas condiciones cada incremento de desplazamientos en la fisura, generará un incremento de tensiones tangenciales. Por otra parte, el incremento de tensiones normales debe ser cero debido a que no existen fuerzas

horizontales externas influenciando al espécimen ver e.q. (19)(20).

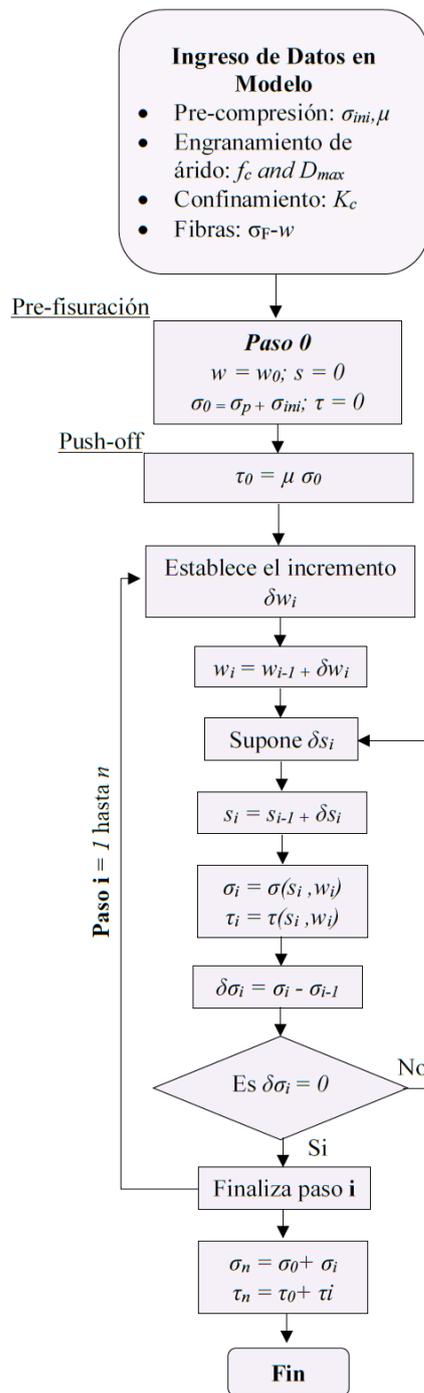


Figura 7. Implementación del modelo propuesto

$$\sigma = \sigma_a(\varepsilon) + \sigma_c(\varepsilon) + \sigma_F(\varepsilon) = 0 \quad (19)$$

$$\sigma_a(\varepsilon) + \sigma_F(\varepsilon) = -\sigma_c(\varepsilon) \quad (20)$$

Es necesario establecer un procedimiento numérico iterativo para resolver cada uno de los pasos. En cada uno de los pasos ($i > 1$), la fisura se estabiliza debido al efecto del sistema de confinamiento, y se debe cumplir el equilibrio de la e.q. (20).

5. Resultados

En esta sección se presentan parte de los resultados experimentales y su comparación con los resultados teóricos obtenidos a partir del modelo propuesto. Los especímenes que se muestran a continuación corresponden a 0/0.22/1.83 (sin fibra sintética) y 12/0.25/1.58 (con fibra sintética), cuyas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1.

En el modelo propuesto se analizan únicamente los modelos de engranamiento de árido, pre-compresión y confinamiento para el caso del espécimen 0/0.22/1.83, y engranamiento de áridos, fibras, pre-compresión y confinamiento para el caso del espécimen 12/0.25/1.58. En ambos especímenes la rigidez del confinamiento ha sido ajustado linealmente con una rigidez (k_c) de 3.30 y 3.49 MPa/mm respectivamente. Cabe destacar que la rigidez del confinamiento de ambos especímenes resulta parecida debido a que el marco de confinamiento empleado en los dos ensayos es el mismo.

En la Figura 8, se presentan los resultados tanto experimentales como teóricos del espécimen sin fibras, mientras que en la Figura 9, del espécimen con fibras de polipropileno. En ambos resultados se aprecia que el modelo de engranamiento de árido que más se ajusta a los resultados experimentales obtenidos es el de Walraven-Reinhardt (ver Figura 8a y Figura 9a). Sin embargo si comparamos las respuestas en términos de tensión normal y abertura de fisuras, el modelo que más precisión provee es el que corresponde a Gambarova- Karakoç (ver Figura 8b y Figura 9b).

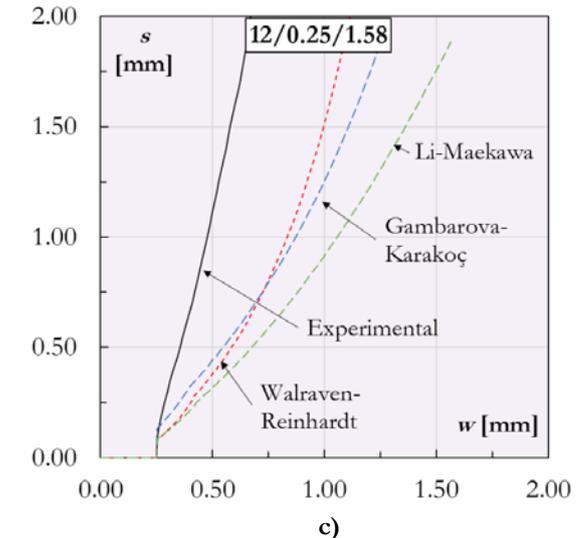
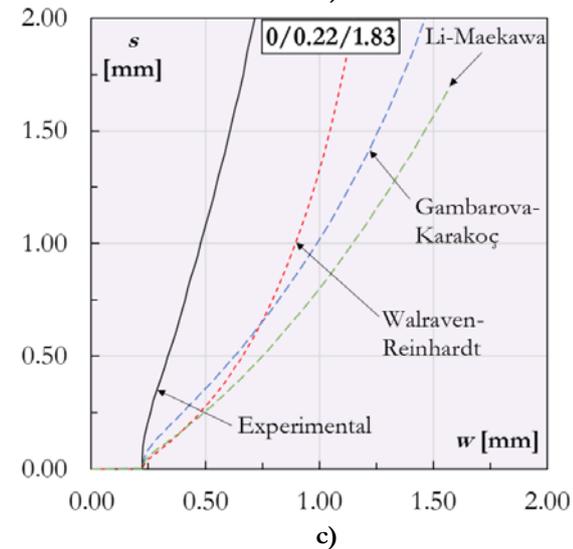
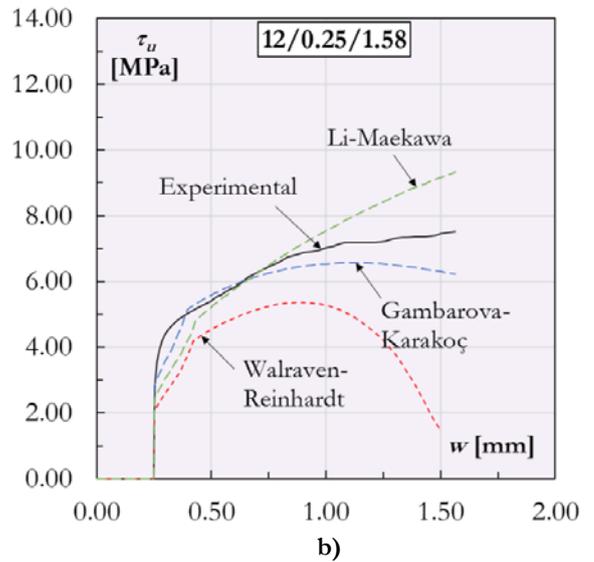
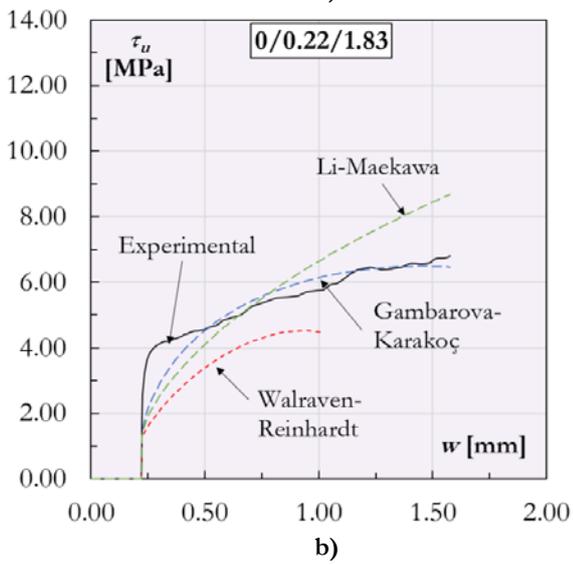
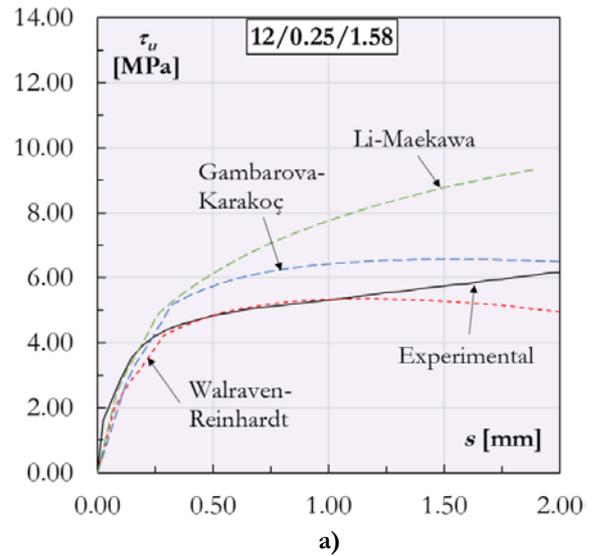
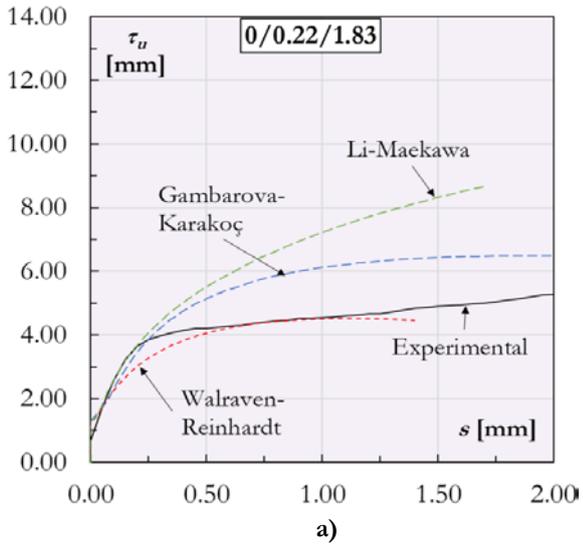


Figura 8. Resultados espécimen sin fibras 0/0.22/1.83

Figura 9. Resultados espécimen con fibras 12/0.25/1.58

Con relación a la predicción de la cinemática de la fisura (ver Figura 8c y Figura 9c), en todos los casos está se encuentra desplazada hacia la derecha. Este efecto se debe a que el modelo solo considera cinemáticamente los efectos de engranamiento de áridos, fibras y confinamiento. Mientras que el resultado experimental también toma en cuenta la pre-compresión inicial que restringe la abertura de la fisura.

Finalmente, si evaluamos el comportamiento de las fibras, se observa que introducir el efecto de las mismas en función de su comportamiento a tracción predice resultados bastante aceptables. Describir el comportamiento de las fibras de esta manera, ayuda a que parámetros de la fibra como, volumen, tipo de material, longitud, diámetro equivalente, esbeltez, resistencia a la tracción, módulo elástico y orientación no sean tomadas en cuenta al momento de valorar el aporte de las fibras en la fisura.

5. Conclusiones

En el presente artículo, se propone un modelo en el que abarca todos los mecanismos de transferencia que ocurren en una fisura a cortante de un hormigón tradicional y un hormigón reforzado con fibras de polipropileno. En este contexto, se mencionan a continuación las siguientes conclusiones generales:

- El modelo propuesto es capaz de representar de una manera robusta todos los mecanismos de transferencia actuantes en una fisura de cortante. Los mecanismos considerados fueron: pre-compresión, confinamiento, engranamiento de áridos y fibras.
- Basados en los resultados, el modelo de engranamiento de áridos que más se aproximó a los resultados obtenidos experimentalmente, tanto de hormigón

tradicional como de hormigón reforzado con fibras de polipropileno, fue el de Walraven-Reinhardt.

- Se evidencia que, en el caso del hormigón reforzado con fibras, es posible describir el aporte de las fibras en la mecánica de fractura de una fisura en Modo II, con resultados de esfuerzos-desplazamientos del hormigón con fibras obtenidos mediante fracturas de tipo Modo I.

Los resultados de este estudio, se encaminan en futuras líneas de investigación en la que se desarrollen metodologías y modelos que permitan caracterizar las ventajas de las fibras en cada uno de los mecanismos resistentes a cortante de un elemento estructural (engranamiento de áridos, efecto pasador de la armadura longitudinal, resistencias residuales, mejora de adherencia de armadura pasiva, etc), en función de parámetros que puedan ser medidos directamente en laboratorio a través de ensayos normalizados, como el ensayo EN14651 [11]. De esta manera, se puede elaborar expresiones más robustas que pronostiquen la resistencia a cortante de elementos de hormigón reforzado con fibra, que abarquen cada uno de los mecanismos resistentes del elemento.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto “BIA2016-78460-C3-1-R” financiado por la Agencia española de investigación.

Referencias

- [1] J.C. Walraven, Aggregate interlock: A theoretical and experimental analysis, Delft University, 1980.
- [2] P.G. Gambarova, C. Karakoc, A new approach to the analysis of the confinement role in regularly cracked concrete elements, North-Holland,

- Netherlands, 1983.
http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:15048850.
- [3] B. Li, K. Maekawa, Contact density model for cracks in concrete, IABSE Reports = Rapp. AIPC = IVBH Berichte. 54 (1987) 51–62.
- [4] Z.P. Bazant, P. Gambarova, Rough Cracks in Reinforced Concrete, J. Struct. Div. 106 (1980) 819–842. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockey=0009420>.
- [5] E. Cuenca, A. Conforti, F. Minelli, G.A. Plizzari, J. Navarro Gregori, P. Serna, A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading, Mater. Struct. Constr. 51 (2018). doi:10.1617/s11527-017-1130-7.
- [6] M. Di Prisco, G. Plizzari, L. Vandewalle, "MC2010: Overview on the shear provisions for FRC ", in: Work. SALO, 2010: pp. 61–76.
- [7] A. Conforti, F. Minelli, G.A. Plizzari, Shear behaviour of prestressed double tees in self-compacting polypropylene fibre reinforced concrete, Eng. Struct. 146 (2017) 93–104. doi:10.1016/j.engstruct.2017.05.014.
- [8] F. Ortiz Navas, J. Navarro-Gregori, G. Leiva Herdocia, P. Serna, E. Cuenca, An experimental study on the shear behaviour of reinforced concrete beams with macro-synthetic fibres, Constr. Build. Mater. 169 (2018) 888–899. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.023.
- [9] T. Sing Ng, S.J. Foster, M. Linn Htet, T. Htut, Mixed mode fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete, (2014) 67–76. doi:10.1617/s11527-013-0045-1.
- [10] European Committee for Standardization, EN 12390-3: Testing hardened concrete. Part 3: Compressive strength of test specimens, 2009.
- [11] European Committee for Standardization, EN 14651: Test method for metallic fibres concrete. Measuring the flexural tensile strength, 2005.
- [12] J. Echeagaray-Oviedo, J. Navarro-Gregori, E. Cuenca, P. Serna, Modified push-off test for analysing the shear behaviour of concrete cracks, Strain. 53 (2017) 1–17. doi:10.1111/str.12239.
- [13] P.H. Feenstra, Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and Reinforced Concrete, Delft university, 1993. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:faf2fd16-1c43-4711-b783-9e8e00d10c21>.
- [14] International Federation for Structural Concrete (fib), Model Code 2010, final drafts, Wilhelm Ernst & Sohn, 2013.
- [15] W. Kaufmann, A. Amin, A. Beck, M. Lee, Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete, Eng. Struct. 186 (2019) 508–524. doi:10.1016/j.engstruct.2019.02.027.