

SIMULACIÓN DE LA ROTURA DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS EN UN CÓDIGO LIBRE DE ELEMENTOS FINITOS (OOFEM)

F. Suárez^{1*}

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera, Universidad de Jaén, EPS de Linares
Campus Científico Tecnológico de Linares, Cinturón Sur, s/n 23700 Linares (Jaén), España.

* Persona de contacto: fsuarez@ujaen.es

RESUMEN

El uso del hormigón reforzado con fibras (HRF) ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años. Se ha realizado un notable número de investigaciones experimentales que permiten entender mejor cómo afectan los diferentes aspectos de su producción a sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido. Junto con estos trabajos experimentales, se han propuesto diferentes formas de reproducir numéricamente la rotura del HRF. De entre ellos, cabe destacar el uso de la fisura cohesiva mediante el uso de una función de ablandamiento trilineal, que ha demostrado ser efectivo y relativamente sencillo. En este trabajo se presenta un modelo de material que permite reproducir el comportamiento a rotura del HRF. A diferencia de modelos anteriores, desarrollados para el código comercial ABAQUS, el presente modelo está desarrollado en OOFEM, código libre de elementos finitos desarrollado en la Universidad Técnica Checa en Praga (República Checa) y la Universidad de Chalmers (Suecia), poniendo de esta manera a disposición del público general una herramienta que permite reproducir la rotura de elementos estructurales de hormigón reforzado con fibras. Desde el punto de vista matemático, el modelo reproduce el comportamiento mecánico del material mediante un parámetro de daño que varía de 0 a 1, proporcionando resultados muy similares a los obtenidos con el modelo de fisura embebida en el que se basa.

PALABRAS CLAVE: Hormigón reforzado con fibras, Método de los elementos finitos, OOFEM, Fisura cohesiva

ABSTRACT

The use of fibre-reinforced concrete (FRC) has experienced a big impulse in recent years. The increasing interest in FRC has produced a remarkable number of experimental studies that identify how diverse aspects of their production affect their properties, both in fresh state and hardened. Together with these experimental studies, several approaches have been proposed for numerically reproducing fracture in FRC. Of these approaches, it is worth mentioning the use of cohesive fracture by using a trilinear softening function, which has proven to be efficient and relatively simple. In this study, a material model is proposed for reproducing the fracture behaviour of FRC. Differently from previous models, developed for the commercial code ABAQUS, this model is developed in OOFEM, a free finite element code developed at the Czech Technical University in Prague (Czech Republic) and Chalmers University of Technology (Sweden), thus providing the general public with a tool that allows reproducing fracture in structural elements made with fibre-reinforced concrete elements. From the mathematical point of view, this model reproduces the mechanical behaviour of FRC by means of a damage parameter that ranges between 0 and 1, providing results that are very similar to those obtained with the embedded crack model on which it is based.

KEYWORDS: Fibre-reinforced concrete, Finite element method, OOFEM, Cohesive crack

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el hormigón reforzado con fibras (HRF) ha suscitado un gran interés en el mundo de la construcción, prueba de ello es la aparición de nuevas fibras en el mercado y las recomendaciones para su uso que, desde hace unos años, se incluyen en las normas estructurales [1–3]. El refuerzo con fibras no es una tecnología nueva, pues se utiliza desde hace décadas en el recubrimiento de túneles con hormigón gunitado, evitando la colocación de malla electrosoldada y en solados de hormigón sometido a grandes cargas, como

en aeropuertos o instalaciones industriales [4], por ejemplo. El tipo de fibras que pueden emplearse en el hormigón es muy variado y depende, fundamentalmente, del uso que desee darse al material, de modo que existen microfibras de polipropileno que permiten reducir la fisuración por retracción del hormigón [5, 6] y macrofibras de acero, poliméricas, y de otros materiales [7, 8], que permiten reforzar el hormigón sustituyendo, al menos en parte, la armadura de acero corrugado tradicional (ver Fig. 1). La aparición de nuevas fibras poliméricas permite extender el uso del HRF a ámbitos en los que el uso de fibras metálicas

puede estar desaconsejado, como es la prefabricación de traviesas de ferrocarril, en el que la capacidad conductora del acero puede afectar a los sistemas de seguridad y protección ferroviaria, o la fabricación de recubrimientos de fachada en edificios, donde la corrosión de las fibras metálicas afectaría a la estética del edificio de forma notable.

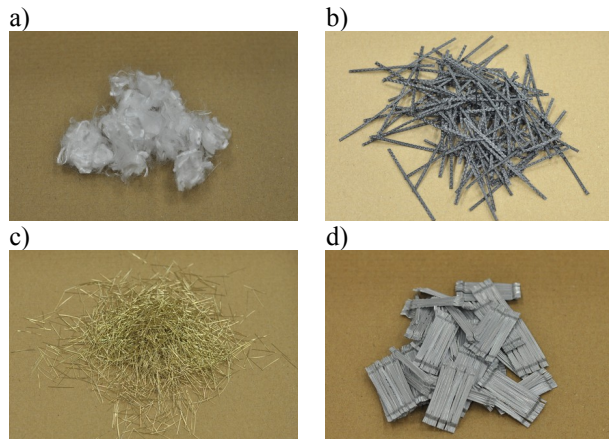


Figura 1. Algunas fibras empleadas como refuerzo en el hormigón: a) microfibras de polipropileno, b) macrofibras de poliolefina, c) microfibras de acero y d) macrofibras de acero.

Por otra parte, la reproducción numérica del comportamiento de estos nuevos materiales resulta de gran importancia, pues, entre otros motivos, es necesaria para la realización de proyectos de ingeniería que incorporen estas tecnologías. En este sentido, se han propuesto varios modelos para reproducir el comportamiento del HRF [9, 10]. Entre estos modelos, cabe destacar el de fisura embebida propuesto por Alberti et al. en el que, empleando un modelo ya existente y ampliamente contrastado en el campo del hormigón [10], se utiliza una función de ablandamiento trilineal que adapta el comportamiento del material para ajustarlo al observado con el refuerzo de fibras. Este modelo ha demostrado ser muy versátil y efectivo a la hora de simular el comportamiento del HRF, en concreto del hormigón reforzado con fibras de poliolefina (HRFP), bajo rotura en modo I [11] y en estados de tensión resultantes de la combinación de los modos I y II [12].

En este trabajo se presenta una adaptación del modelo de fisura cohesiva con curva de ablandamiento trilineal mencionado. En este modelo el proceso de rotura está dirigido por un factor de daño que varía de 0 (material no dañado) hasta 1 (completamente dañado). Además, este modelo se ha desarrollado en OOFEM [13], un código de elementos finitos *open source*, poniendo a disposición del público general una herramienta para simular la rotura de un material tan relevante como el HRF. En este trabajo se describe el modelo desarrollado y se comparan los resultados obtenidos con él respecto a

los obtenidos con el modelo desarrollado por Gálvez, Alberti y Enfedaque, en el que se inspira.

A continuación, en el apartado 2, se describen los aspectos más relevantes del modelo de fisura embebida propuesto por Alberti et al., posteriormente, en el apartado 3, se detalla la formulación del modelo que se propone. Finalmente, en el apartado 4, se comparan ambos modelos, para ello se reproduce un ensayo de flexión en tres puntos sobre probeta entallada, empleando la misma malla, los mismos parámetros del material y parámetros similares del algoritmo del cálculo, en concreto, empleando el método de la longitud de arco (*arc-length method*). Finalmente, el apartado 5 está dedicado a describir las conclusiones extraídas de este trabajo y proponer el trabajo futuro a desarrollar.

2. MODELO DE FISURA COHESIVA CON CURVA DE ABLANDAMIENTO TRILINEAL EXISTENTE

Dado que el modelo propuesto, que se describe en el apartado 3, se basa en el modelo de fisura embebida con curva de ablandamiento trilineal propuesto por Alberti et al., se considera adecuado describir en primer lugar y de forma breve los aspectos más relevantes del mismo. Este modelo está programado para ABAQUS mediante una subrutina de usuario UMAT.

2.1. Aspectos esenciales del modelo de fisura embebida

Nótese que aquí únicamente se hará referencia a los aspectos más relevantes de este modelo en relación con la comparación que se hará posteriormente entre éste y el modelo de fisura difusa propuesto en este trabajo. Por este motivo, aquí no se encontrará una descripción completa del mismo, para ello, el lector puede consultar [14] y [15].

Este modelo de fisura embebida se basa en el concepto de zona cohesiva desarrollado por Hillerborg, describiendo la rotura en el interior de un elemento triangular mediante una formulación de discontinuidad fuerte.

El modelo es un modelo de fuerzas centrales, pues asume, de forma simplificada, que el vector de tensiones t es constante a lo largo de la fisura y paralelo, a su vez, al vector de desplazamiento w (ver Fig. 2).

Este modelo permite la rotura únicamente en tres direcciones, paralelas a cada una de las caras del elemento, y calcula la tensión del elemento restando una contribución inelástica al comportamiento elástico a través de la siguiente expresión:

$$\sigma = \mathbf{E} : \left[\epsilon^a - (\mathbf{b}^+ \otimes \mathbf{w})^S \right] \cdot \mathbf{n} \quad (1)$$

donde \mathbf{E} es el tensor elástico tangente, ϵ^a el vector de deformación aparente, \mathbf{b}^+ el vector gradiente de la función de forma que corresponde al nodo solitario (el nodo de A^+ en la Figura 2), el superíndice S denota la parte simétrica del tensor y el producto \otimes el producto directo ($(\mathbf{a} \otimes \mathbf{b})_{ij} = a_i b_j$).

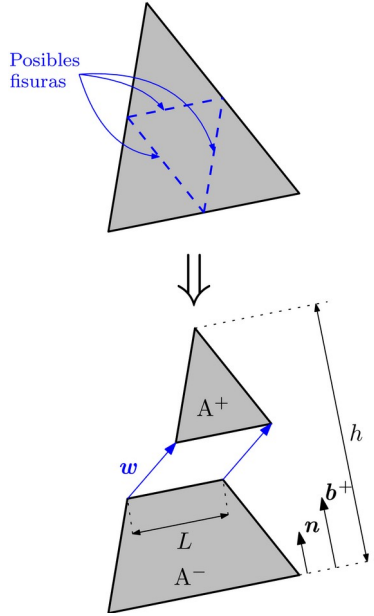


Figura 2. Modelo de fisura embebida con los caminos de fisuración permitidos (izda.) y los principales valores y vectores empleados en su formulación.

2.2. Curva de ablandamiento trilineal

El modelo de fisura embebida describe la degradación del material a medida que progresa la fisuración mediante una curva de ablandamiento, expresada en términos de tensión (σ) y apertura de fisura (w). Esta curva de ablandamiento adopta de forma tradicional expresiones lineales, bilineales y exponenciales cuando se desea reproducir el comportamiento a fractura del hormigón, pero puede definirse mediante un diagrama trilineal para reproducir el comportamiento del HRF, tal y como el mostrado en la Fig. 3. Este diagrama consta de cuatro puntos (t, k, r y f), cuyas coordenadas están relacionadas con características de la producción del hormigón reforzado con fibras, tales como las propiedades mecánicas del material de la fibra, la longitud de las fibras o la proporción de fibras añadida al hormigón [10]. Definidos los seis parámetros del diagrama trilineal (f_t, f_k, f_r, w_k, w_r y w_f), la tensión correspondiente a un valor de la apertura de fisura puede obtenerse tal y como se muestra en la expresión (2).

La definición de la curva de ablandamiento mediante esta curva trilineal permite reproducir el comportamiento observado en las probetas de HRF ensayadas a fractura, que presentan una caída de carga inicial, debida a la fisuración de la matriz de hormigón, una posterior recuperación de carga, debida al trabajo de las fibras que cosen el plano de fisuración, y una posterior pérdida de carga final, debida al deterioro de la interfaz fibra-matriz.

$$\sigma = \begin{cases} f_t + \left(\frac{f_k - f_t}{w_k} \right) \cdot w & \text{if } 0 < w \leq w_k \\ f_k + \left(\frac{f_r - f_k}{w_r - w_k} \right) \cdot (w - w_k) & \text{if } w_k < w \leq w_r \\ f_r + \left(\frac{-f_r}{w_f - w_r} \right) \cdot (w - w_r) & \text{if } w_r < w \leq w_f \\ 0 & \text{if } w > w_f \end{cases} \quad (2)$$

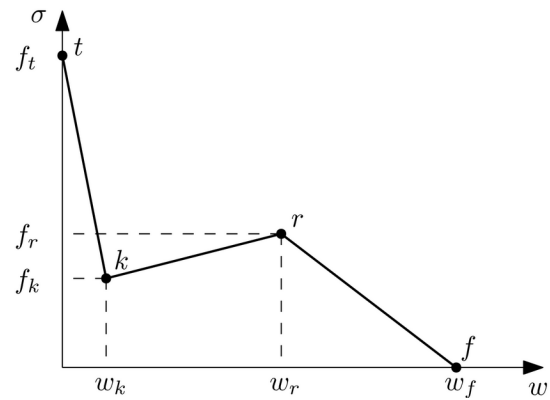


Figura 3. Curva de ablandamiento trilineal, empleada para reproducir la rotura en HRF.

3. MODELO DE FISURA COHESIVA CON CURVA DE ABLANDAMIENTO TRILINEAL PROPUESTO

Esta formulación corresponde a un modelo de fisura difusa que asume una degradación de rotura isótropa de modo que la matriz de rigidez del material dañado se obtiene como:

$$\mathbf{D} = (1 - \omega) \mathbf{D}_e \quad (3)$$

donde \mathbf{D}_e es la matriz de rigidez elástica y ω es un escalar que representa el daño producido, que adopta valores entre 0 (material no dañado) y 1 (material completamente dañado).

La evolución del daño se define relacionando la variable ω con el mayor nivel de deformación sufrido hasta el momento. Para calcular el nivel de deformación en cada instante se emplea un valor de deformación equivalente, ϵ_{eq} que se calcula a partir del tensor de deformación. El valor de ω puede obtenerse empleando varios criterios, en este caso se ha empleado el criterio de Rankine:

$$\varepsilon_{eq} = \frac{1}{E} \sqrt{\sum_{I=1}^3 \langle \bar{\sigma}_I \rangle^2} \quad (4)$$

donde E representa el módulo elástico de la matriz, $\bar{\sigma}_I$ representa las tensiones principales ($I = 1, 2, 3$), siendo $\langle \bar{\sigma}_I \rangle$ únicamente sus valores positivos.

La evolución del daño en este modelo, que es el responsable del comportamiento del material a través de la expresión (3), debe relacionarse con la deformación equivalente, calculada en este caso mediante el criterio de Rankine (expresión (4)). Para ello, se emplea la teoría de la banda de fisura (*crack band*) propuesto por Bazant y Oh [16], que analiza la fisura dentro de un elemento finito como una grieta de ancho w . En este contexto, la apertura de fisura w se puede expresar como la deformación inelástica (fisuración) ε_c multiplicada por el ancho efectivo h de la banda de fisura, que se estima proyectando el elemento finito en la dirección de la tensión principal máxima en el instante en que se inicia el daño. La deformación inelástica ε_c es la diferencia entre la deformación total y la deformación elástica σ/E de este modo:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{eq} - \frac{\sigma}{E} \quad (5)$$

Obteniendo la tensión σ a partir del parámetro de daño con la expresión (3):

$$\sigma = (1 - \omega) E \varepsilon_{eq} \quad (6)$$

Por lo tanto, la expresión (5) queda de la siguiente manera:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{eq} - \frac{(1 - \omega) E \varepsilon_{eq}}{E} \Rightarrow \varepsilon_c = \omega \varepsilon_{eq} \quad (7)$$

De este modo, la apertura de fisura puede expresarse de la siguiente manera:

$$w = h \varepsilon_c = h \omega \varepsilon_{eq} \quad (8)$$

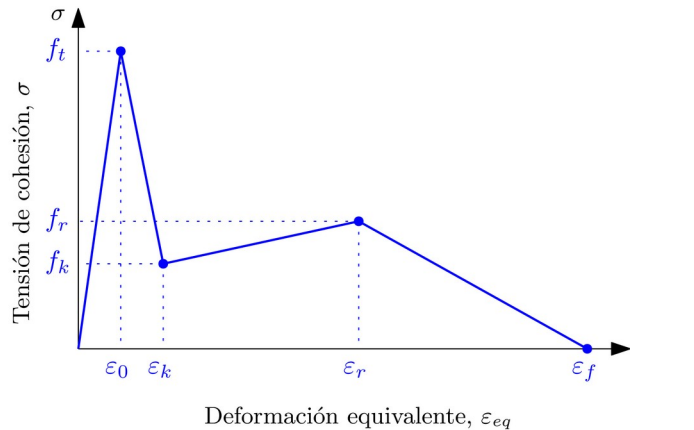
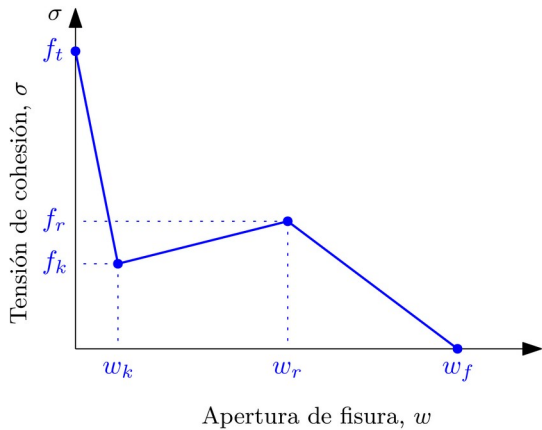


Figura 4. Diagrama trilineal expresado en términos de la apertura de fisura w (izda.) y expresado en términos de la deformación equivalente ε_{eq} (dcha.).

Con el fin de poder comparar los resultados de este modelo con los del modelo existente descrito en el apartado 2, a continuación se obtiene la expresión del parámetro de daño ω a partir del valor de deformación equivalente y de los parámetros que definen la curva de ablandamiento trilineal (f_t, f_k, f_r, w_k, w_r y w_f) para cada tramo de la misma. La Fig. 4 muestra el esquema del diagrama trilineal expresado en términos de la apertura de fisura w y su equivalente en términos de la deformación equivalente ε_{eq} . En las siguientes expresiones se emplea el símbolo ε_0 para identificar la deformación a la que se produce el inicio del daño, de modo que $f_t = E \varepsilon_0$. Sustituyendo las expresiones (6) y (8) en las funciones de cada tramo, definidas en la expresión (2), se obtiene la expresión del parámetro de daño en cada tramo:

Tramo t-k: $\varepsilon_0 \leq \varepsilon_{eq} < \varepsilon_k$

$$\omega = \frac{E}{E + h \left(\frac{f_k - f_t}{w_k} \right)} - \frac{1}{\varepsilon_{eq}} \frac{E \varepsilon_0}{E + h \left(\frac{f_k - f_t}{w_k} \right)} \quad (9)$$

Tramo k-r: $\varepsilon_k \leq \varepsilon_{eq} < \varepsilon_r$

$$\omega = \frac{E}{E + h \left(\frac{f_r - f_k}{w_r - w_k} \right)} + \frac{1}{\varepsilon_{eq}} \cdot \frac{w_k \left(\frac{f_r - f_k}{w_r - w_k} \right) - f_k}{E + h \left(\frac{f_r - f_k}{w_r - w_k} \right)} \quad (10)$$

Tramo r-f: $\varepsilon_r \leq \varepsilon_{eq} \leq \varepsilon_f$

$$\omega = \frac{E}{E + h \left(\frac{-f_r}{w_f - w_r} \right)} + \frac{1}{\varepsilon_{eq}} \cdot \frac{w_r \left(\frac{-f_r}{w_f - w_r} \right) - f_r}{E + h \left(\frac{-f_r}{w_f - w_r} \right)} \quad (11)$$

4. VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Con el fin de validar el modelo propuesto, a continuación se realiza la simulación de un ensayo de flexión en tres puntos con entalla empleando tanto el modelo existente, descrito en el apartado 2 y calculado con ABAQUS, como el propuesto en este trabajo, descrito en el apartado 3 y calculado con OOFEM. En ambos casos el modelo emplea la misma malla de elementos finitos y los mismos parámetros para definir el material. A continuación se detallan estos aspectos y se muestran los resultados obtenidos.

4.1 Modelo de elementos finitos

El modelo reproduce un ensayo de flexión en tres puntos con entalla, en concreto el correspondiente a la probeta de tamaño medio de la referencia [11]. La Fig. 5 muestra el modelo con sus dimensiones acotadas, que está apoyado en dos puntos en el paramento inferior y en el que se impone un desplazamiento del punto de aplicación de carga, situado en el paramento superior. El modelo reproduce el comportamiento de una probeta de espesor igual a 50 mm.

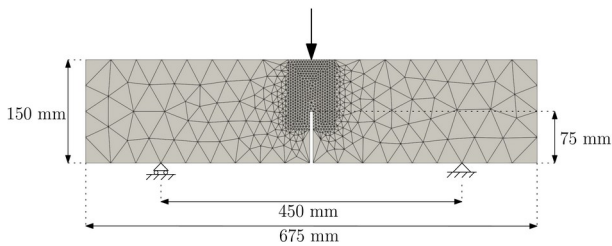
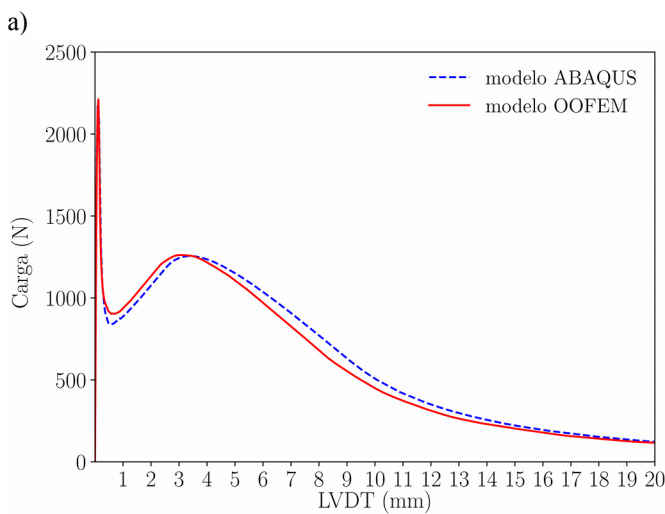


Figura 5. Modelo de elementos finitos empleado en ambas simulaciones.



La malla está refinada en la zona que conecta la entalla y la aplicación de la carga, que es donde se desarrolla el proceso de fisuración.

El comportamiento a rotura del material en ambos casos está definido por un módulo elástico (E) y seis parámetros que definen el diagrama trilineal mostrado en la Fig. 3: f_t , f_k , f_r , w_k , w_r y w_f . En la Tabla 1 se muestran los valores adoptados en estas simulaciones.

Tabla 1. Parámetros del material empleados en ambos modelos.

E (MPa)	f_t (MPa)	f_k (MPa)	f_r (MPa)	w_k	w_r	w_f
22569	3.2	0.568	1.18	0.07	1.65	6.0

4.2 Resultados

La Fig. 6 muestra las curvas carga-LVDT obtenidas con ambas formulaciones, siendo el desplazamiento del LVDT el correspondiente al punto de aplicación de la carga (punto central del paramento superior de la probeta). En la Fig. 6a se muestran las curvas hasta un desplazamiento del punto de aplicación de la carga de 20 mm y en la Fig. 6b un detalle de las mismas en el primer milímetro de desplazamiento de la carga. Se observa que el comportamiento del modelo es muy similar en ambos modelos, reproduciendo el comportamiento general de forma muy parecida, con valores coincidentes en los dos máximos de carga, tanto el inicial como el que se produce tras la recuperación de carga. El mínimo local en torno al valor de desplazamiento igual a 0.5 mm difiere algo entre ambos modelos, pero presenta también valores muy parecidos.

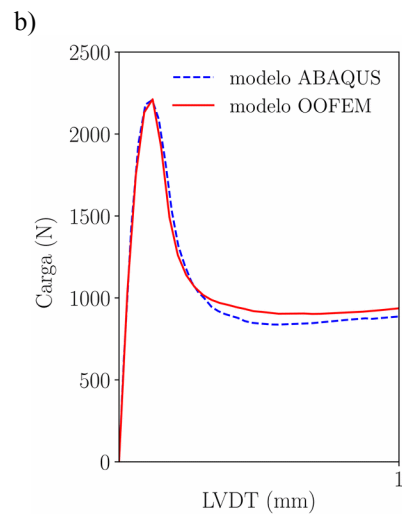


Figura 6. a) Curvas carga-LVDT obtenidas con ambos modelos y b) detalle de las curvas carga-LVDT en el máximo inicial de carga.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha propuesto una formulación de un modelo de rotura basado en el modelo de banda de fisura en el que la curva de ablandamiento se define mediante un diagrama trilineal que permite reproducir el comportamiento de rotura del HRF.

En la simulación realizada, en la que se reproduce la rotura de una probeta de HRF sometida a un ensayo de flexión en tres puntos con entalla, el modelo que se propone en este trabajo muestra un comportamiento muy similar al del modelo desarrollado por Gálvez, Alberti y Enfedaque, que ha demostrado su eficacia para diversas proporciones de fibras, diferentes tipos de puesta en obra y diferentes sollicitaciones de tensiones, incluyendo la carga en modo mixto (I+II).

Cabe destacar que el modelo se ha desarrollado para que puedan definirse los parámetros del material con los mismos valores que se definen en el modelo de Gálvez, Alberti y Enfedaque, de modo que pueda aprovecharse el conocimiento previo obtenido con éste.

El modelo propuesto se ha desarrollado en el código de elementos finitos OOFEM, software *open source* que pone a disposición del público general una herramienta para reproducir la rotura del HRF.

Dado que la validación del modelo sólo se ha realizado con un caso, queda como trabajo futuro ampliar la validación del mismo empleando más ejemplos disponibles en la literatura.

REFERENCIAS

- [1] EHE-08 - Instrucción de hormigón estructural. Ministerio de Fomento: Madrid, España, 2008.
- [2] Código estructural. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana: Madrid, España, 2021.
- [3] fib Model Code 2010. Fédération Internationale du Béton fib/International Federation for Structural Concrete: Paris, France, 2013..
- [4] Fernández Cánovas, M. (1982). Hormigones reforzados con fibras de acero. *Informes De La Construcción*, 34(342), 5–17. <https://doi.org/10.3989/ic.1982.v34.i342.2079>.
- [5] Wang, Y., Yang, D., & Zhou, M. (2004). The present research condition and trend of polypropylene fiber concrete. *Concrete*, 1, 24-26.
- [6] Das, C. S., Dey, T., Dandapat, R., Mukharjee, B. B., & Kumar, J. (2018). Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 649-659.
- [7] Serna, P., Arango, S., Ribeiro, T., Núñez, A. M., & García-Taengua, E. (2009). Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain. *Materials and structures*, 42(9), 1233-1246.
- [8] Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Gálvez, J. C. (2016). Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size. *Engineering Fracture Mechanics*, 154, 225-244.
- [9] Havlásek, P., & Kabele, P. (2017). A detailed description of the computer implementation of SHCC material model in OOFEM. CTU in Prague.
- [10] Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Reyes, E. (2017). Numerical modelling of the fracture of polyolefin fibre reinforced concrete by using a cohesive fracture approach. *Composites Part B: Engineering*, 111, 200-210.
- [11] Suárez, F., Gálvez, J. C., Alberti, M. G., & Enfedaque, A. (2021). Fracture and size effect of PFRC specimens simulated by using a trilinear softening diagram: A predictive approach. *Materials*, 14(14), 3795.
- [12] Suárez, F., Gálvez, J. C., Enfedaque, A., & Alberti, M. G. (2019). Modelling fracture on polyolefin fibre reinforced concrete specimens subjected to mixed-mode loading. *Engineering Fracture Mechanics*, 211, 244-253.
- [13] B. Patzák. OOFEM - an object-oriented simulation tool for advanced modeling of materials and structures. *Acta Polytechnica*, 52(6):59–66, 2012.
- [14] Sancho, J. M., Planas, J., Cendón, D. A., Reyes, E., & Gálvez, J. C. (2007). An embedded crack model for finite element analysis of concrete fracture. *Engineering fracture mechanics*, 74(1-2), 75-86.
- [15] Gálvez, J. C., Planas, J., Sancho, J. M., Reyes, E., Cendón, D. A., & Casati, M. J. (2013). An embedded cohesive crack model for finite element analysis of quasi-brittle materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 109, 369-386.
- [16] Bažant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et construction*, 16(3), 155-177.