

# Modelización numérica de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante mediante aleaciones con memoria de forma en base hierro

## *Numerical modelling of reinforced concrete beams with a shear external strengthening using iron based shape memory alloy*

Joaquín G. Ruiz-Pinilla<sup>\*, a</sup>, Luis A Montoya-Coronado<sup>b</sup>, Carlos Ribas<sup>a</sup>, Antoni Cladera<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Prof. Dr. Dept. of Physics, University of Balearic Islands, Palma (Mallorca), Spain

<sup>b</sup> Dr. Research Fellow, University of Balearic Islands, Palma (Mallorca), Spain

### RESUMEN

La aleación con memoria de forma en base hierro (Fe-SMA) es un material novedoso que cada vez se está utilizando más en el campo de refuerzo de estructuras dadas sus interesantes características mecánicas y a su capacidad particular de recuperación de forma, lo que permite que sea utilizada como técnica de refuerzo activo. Esta comunicación presenta el análisis mediante modelos de elementos finitos basados en dos campañas experimentales de vigas a distinta escala reforzadas externamente a cortante mediante flejes de Fe-SMA. Del análisis realizado se extraen algunas conclusiones de las modificaciones que esta tipología de refuerzo puede generar en el comportamiento de las vigas.

### ABSTRACT

The iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) is a novel material that is increasingly being used in structural strengthening due to its interesting mechanical characteristics and its particular capacity to recover its shape. This allows using the Fe-SMA for active strengthening techniques. This paper presents a finite element analysis based on two experimental campaigns on different scale RC beams externally strengthened on shear with Fe-SMA strips. The analyses performed allow to highlight some conclusions related to the behaviour of the beams and the influence on this active strengthening technique.

**PALABRAS CLAVE:** Fe-SMA, refuerzo, cortante, hormigón armado, modelo numérico, viga.

**KEYWORDS:** Fe-SMA, strengthening, shear, reinforced concrete, numerical model, beam.

## 1. Introducción

El refuerzo y la rehabilitación estructural es un campo estratégico en el sector de la construcción debido al envejecimiento de las infraestructuras existentes. Durante las últimas décadas se han desarrollado numerosas investigaciones sobre diferentes sistemas de refuerzo con el objetivo de controlar los mecanismos de fallo y así incrementar la seguridad y la vida útil de las estructuras existentes. Uno de los fallos más críticos en las estructuras de hormigón es la

rotura por cortante, dado su carácter frágil e instantáneo sin capacidad de redistribuir esfuerzos previamente al colapso. Por ello, es conveniente el refuerzo de estructuras frente a cortante en elementos estructurales de hormigón armado, especialmente cuando la estructura pueda verse sometida a acciones sísmicas importantes.

No obstante, la mayoría de las técnicas de refuerzo utilizadas en la actualidad son sistemas

de refuerzo pasivo, es decir, no comienzan a trabajar hasta que hay un cambio en el equilibrio de la estructura: nuevas cargas o deformaciones. En cambio, las aleaciones con memoria de forma pueden ser utilizadas como método de refuerzo activo gracias a su capacidad de recuperación de forma. Si pre-estiramos el material, lo colocamos sobre la superficie del elemento estructural convenientemente anclado, y realizamos la activación del material calentándolo a 160°C, éste tratará de recuperar su forma original generando así tensiones de confinamiento y/o pretensado en el elemento sobre el que se ha instalado sin necesidad de utilizar equipos hidráulicos auxiliares. Este fenómeno se conoce como “efecto de memoria de forma”. La activación del material puede conseguirse mediante el calentamiento y posterior enfriamiento del mismo.

El grupo de investigación ConStrut de la Universidad de las Islas Baleares lleva trabajando desde el año 2013 en aplicaciones de Ni-Ti, Ni-Ti-Nb y Fe-SMA con diferentes formatos para el refuerzo interno y externo a cortante de vigas de hormigón [1–3]. Otros autores han estudiado el uso de SMAs para el refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado [4] y para el refuerzo de columnas frente a cargas axiales [5]. Los resultados de estas investigaciones muestran un incremento de resistencia y de ductilidad de los elementos estructurales de hormigón armado.

El material usado para esta investigación ha sido suministrado por la empresa re-fer AG en forma de flejes enrollados de diferente espesor: 0.5 mm para la campaña de vigas rectangulares de escala reducida, y 1.5 mm para las vigas a escala real con sección en T.

Esta comunicación incluye los modelos numéricos de ambas campañas experimentales. Para cada una de las campañas, se ha modelado una viga de referencia sin reforzar, una viga reforzada sin la activación del material y otra viga reforzada realizando la activación del material. Finalmente, es preciso destacar que los autores no conocen ningún trabajo previo relativo a la

modelización numérica de vigas reforzadas a cortante mediante aleaciones con memoria de forma, tratándose por tanto de un trabajo pionero.

## 2. Descripción de las vigas

Las características de las vigas ensayadas se detallan en la Tabla 1. Las vigas de escala reducida son de sección rectangular de 80x150 mm y una longitud de 900 mm [3]; mientras que las vigas a escala real tienen sección en T de canto total 550 mm, ancho de alma 200 mm, ancho de la cabeza 600 mm y espesor de las alas 150 mm, con una longitud total de 5800 mm. El diseño de estas últimas vigas se realizó según la campaña experimental de otros autores en las que usaban polímeros reforzados con fibras para reforzar las vigas [6]. En la Tabla 1 también se muestra el esfuerzo cortante de rotura de cada viga y el valor del desplazamiento (bajo el punto de aplicación de la carga) en el instante en el que se alcanzaba la carga máxima.

Las vigas rectangulares se armaron únicamente con una barra longitudinal de diámetro Ø16 mm ( $f_y = 550$  MPa,  $f_u = 649$  MPa), sin ningún tipo de armado transversal. Mientras que las vigas con sección en T se armaron con 4 Ø20 ( $f_y = 519$  MPa,  $f_u = 649$  MPa) + 4 Ø16 ( $f_y = 525$  MPa,  $f_u = 623$  MPa), dispuestas longitudinalmente en dos capas en la parte inferior del alma de la viga y estribos Ø6/240 mm en la zona crítica de cortante, y una cuantía más alta de estribos (Ø8/120 mm) en el resto del alma para evitar el fallo en esa zona. Todas ellas de acero B500 SD.

El refuerzo de las vigas se realizó externamente. En las vigas de sección rectangular se colocaron los flejes en todo el perímetro anclados entre sí mediante el empleo de hebillas y clavos (Figura 1), mientras que en las vigas de sección en T el refuerzo se aplicó solo en el alma en forma de U anclados mediante dos anclajes mecánicos de diámetro Ø10 en cada cara de la viga Figura 2.

Tabla 1. Descripción de las campañas experimentales

Campaña	Ensayo	b [mm]	b <sub>w</sub> [mm]	h [mm]	a/d	f <sub>cm</sub> [MPa]	Separación nominal flejes [mm]	Ancho x espesor flejes [mm]	Estado Fe-SMA	V <sub>test</sub> [kN]	δ <sub>test at V<sub>test</sub></sub> [mm]
1: Sección rectangular. Escala reducida	R1	80	80	150	2.68	30.1	-	-	-	17.95	3.24
	R2	80	80	150	2.68	30.1	-	-	-	15.82	1.53
	SP1	80	80	150	2.68	30.1	90	25 x 0.5	No activado	29.51	7.88
	SP2	80	80	150	2.68	30.1	90	25 x 0.5	No activado	31.01	9.34
	SA1	80	80	150	2.68	30.1	90	25 x 0.5	Activado	31.69	6.52
	SA2	80	80	150	2.68	30.1	90	25 x 0.5	Activado	31.64	5.83
2: Sección en T. Escala real	1-1-R	600	200	550	3.02	33.1	-	-	-	227.9	15.4
	1-2-R	600	200	550	3.02	33.1	-	-	-	299.1	18.2
	3-1-A	600	200	550	3.02	33.5	120	30 x 1.5	Activado	363.4	20.1
	3-2-A	600	200	550	3.02	33.5	120	30 x 1.5	Activado	353.2	21.1
	4-1-P	600	200	550	3.02	33.5	120	30 x 1.5	No activado	358.9	19.2
	4-2-P	600	200	550	3.02	33.5	120	30 x 1.5	No activado	329.0	18.1



Figura 1. Colocación del refuerzo en las vigas rectangulares



Figura 2. Refuerzo en U colocado en el alma de las vigas de sección en T, anclado mediante dos anclajes mecánicos

La resistencia última del material de refuerzo Fe-SMA obtenida en las campañas de caracterización realizada fue de 950 y 940 MPa para los espesores de 0.5 mm y 1.5 mm respectivamente, y el límite elástico (según el método “off-set method”) fue de 475 MPa y 470 MPa.

La activación del material se realizó mediante decapador (pistola de calor) tras la instalación, con las que se incrementaba la temperatura del refuerzo hasta 160 °C y se dejaba enfriar posteriormente a temperatura ambiente. En este proceso, el material tiende a acortarse para recuperar su forma original, ya que éste había sido previamente estirado (hasta 4% como valor óptimo), generando tensiones de recuperación al estar las deformaciones impedidas por el anclaje del fleje en el hormigón. En la Figura 3 se muestran las curvas tensión-deformación del Fe-SMA activado y no activado.

### 3. Aplicación de la carga

Ambos tipos de vigas se ensayaron apoyadas en su base en dos puntos y sobre ellas se aplicaba un desplazamiento impuesto mediante un

actuador hidráulico, según el esquema mostrado en la Figura 4 y en la Figura 5.

Para las vigas a escala reducida, la luz libre entre apoyos era de 760 mm y la carga del actuador se transmitía a la viga a través de dos rodillos próximos separados entre sí 80 mm. Por tanto, la luz libre de cortante desde los bordes de la carga hasta los apoyos fue de 340 mm.

Las vigas a escala real también se ensayaron apoyadas en dos puntos, pero con un reparto de luces diferente, siendo la distancia desde el punto de aplicación de la carga hasta a los apoyos de 1477.5 mm (zona crítica a cortante) y 1822.5 mm, quedando el resto de la viga en voladizo. En este caso, se realizaba después un segundo ensayo, moviendo los apoyos, de forma que la zona crítica a cortante del segundo ensayo correspondiese a la zona en voladizo durante el primero.

#### 4. Modelización numérica de las vigas

Se ha realizado la modelización numérica de las vigas mediante elementos finitos en ATENA 2D [7], calibrada con los resultados de los ensayos experimentales [3]. Los modelos consideran las leyes constitutivas no lineales del hormigón, del armado y del Fe-SMA tanto activado como no activado. El software combina modelos de tracción [8] y de compresión [9] dependiendo del daño progresivo y las deformaciones plásticas alcanzadas, modelizando la fractura mediante fisuras distribuidas en bandas [10]. Además, ha tenido en cuenta las condiciones de adherencia entre el hormigón y el armado interior según la formulación de Jendele, L et al. [11]. Para el armado pasivo se ha utilizado una ley bilineal con endurecimiento, y para el Fe-SMA se han usado las curvas representadas en la Figura 3 implementándola en el software como una ley multilineal introducida por puntos.

Las vigas no reforzadas se han considerado como vigas de referencia para la calibración de los parámetros del hormigón armado, variando el tamaño de la malla y los

parámetros de plasticidad hasta obtener una aproximación razonable con la experimentación. Así, este modelo ha sido utilizado para analizar las otras vigas, en los que sí se utilizaba el refuerzo.

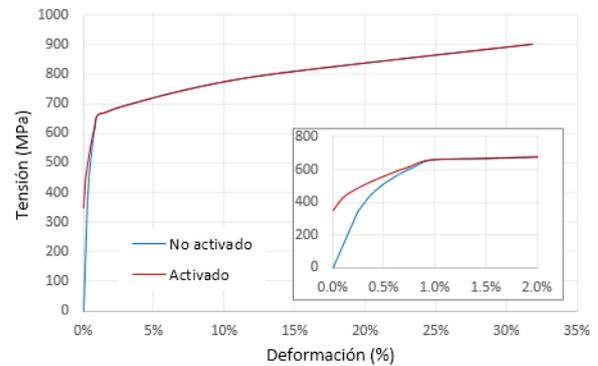


Figura 3. Curvas tensión-deformación de Fe-SMA, activado y no activado.

La armadura longitudinal y la armadura transversal de la región crítica de cortante se ha modelizado de forma discreta, mientras que la armadura transversal restante se ha introducido distribuida en la sección de hormigón. Por otro lado, los refuerzos de Fe-SMA se han modelizado como cables externos anclados fijamente en los extremos y sin adherencia de contacto con el hormigón.

Las vigas rectangulares se ensayaron con una carga puntual mediante deformación impuesta en el centro de luz, lo que ha permitido que solo se modele la mitad de la viga dada la simetría del ensayo, según la Figura 4. En cambio, en las vigas con sección en T la distancia desde el punto de aplicación de la carga hasta ambos apoyos no es la misma, por lo que se ha modelado la viga completa, según la Figura 5.

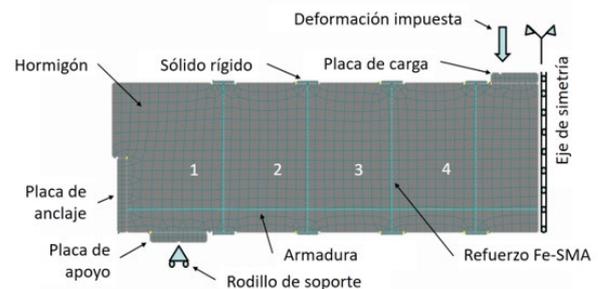


Figura 4. Modelo de vigas de sección rectangular

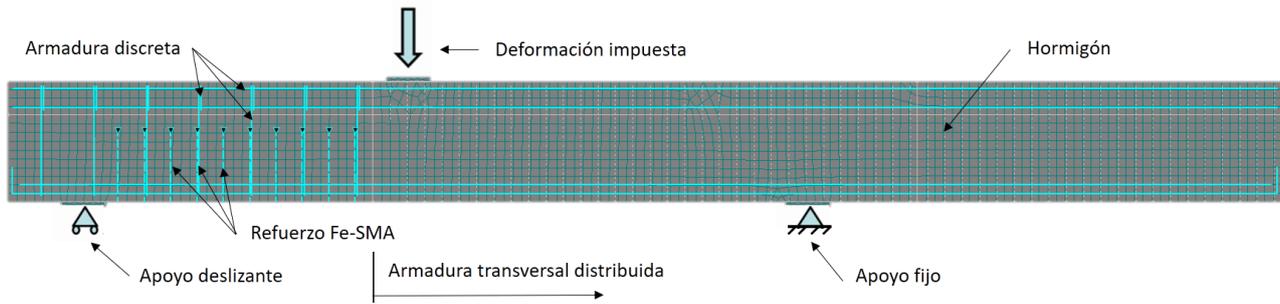


Figura 5. Modelo de vigas de sección en T

## 5. Resultados

En la campaña experimental se realizaron dos ensayos para cada tipo de viga, de modo que para cada modelo numérico hay dos ensayos experimentales con los que contrastarlos. A continuación, se presentan los resultados de los dos grupos de vigas: las vigas de sección rectangular de escala reducida y las vigas de sección en T de escala real.

### 5.1. Vigas de sección rectangular

La Figura 6 compara las curvas carga-desplazamiento obtenidas a partir de los modelos numéricos y los resultados experimentales, y en la Tabla 2 se muestran los valores de esfuerzo cortante máximo resistido. Puede apreciarse una buena aproximación entre las curvas experimentales y las numéricas, así como en los valores de cortante máximo, con un error entre el 3% y el 8% para todos los casos excepto para una de las vigas de referencia.

El fallo de la viga de referencia se produce por cortante de forma frágil, mientras que las vigas reforzadas consiguen soportar mayor carga y con mayor ductilidad. En estas últimas, puede apreciarse una rigidez diferente entre las vigas en las que el refuerzo fue activado y en las que no lo fue tras sobrepasar el valor de cortante soportado por la viga de referencia, debido al confinamiento que genera la activación del refuerzo.

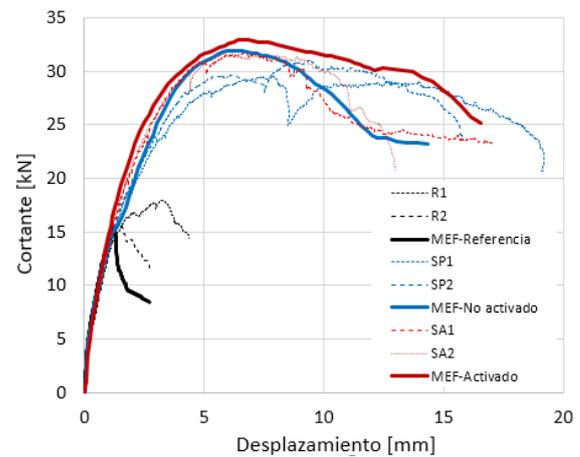


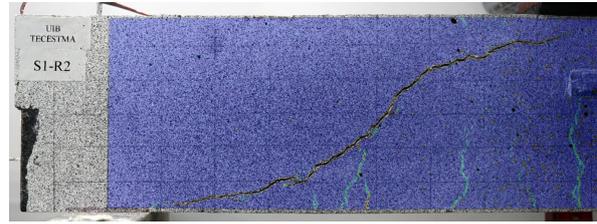
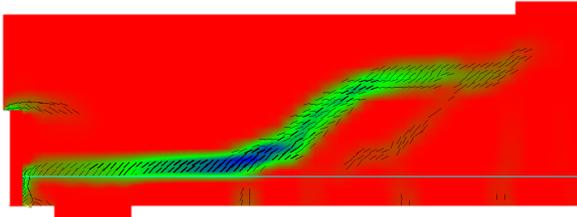
Figura 6. Curva cortante-desplazamiento para las vigas de sección rectangular. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales

Tabla 2. Valores de cortante máximo para las vigas de sección rectangular. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales

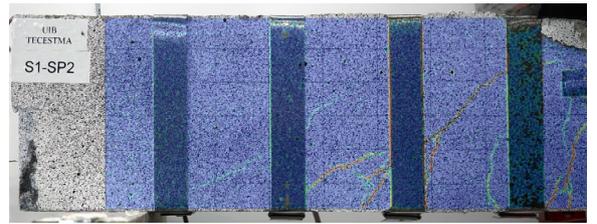
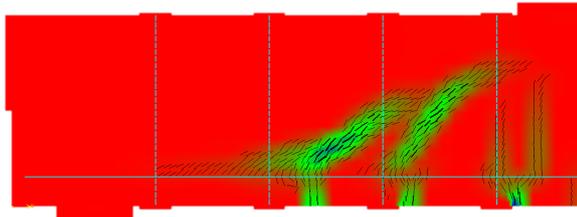
Viga de sección rectangular	Máximo cortante soportado [kN]		
	Experimental	MEF	MEF/EXP
R1	17.95	15.45	0.86
R2	15.82		0.98
SP1	29.51	31.92	1.08
SP2	31.01		1.03
SA1	31.69	32.91	1.04
SA2	31.64		1.04

Los resultados del modelo también han sido contrastados con los datos obtenidos a partir del tratamiento digital de imágenes (DIC). La Figura 7 compara el patrón de fisuras obtenido mediante DIC y los modelos numéricos.

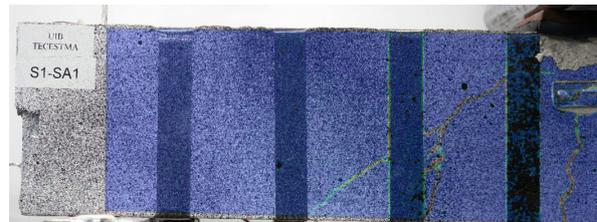
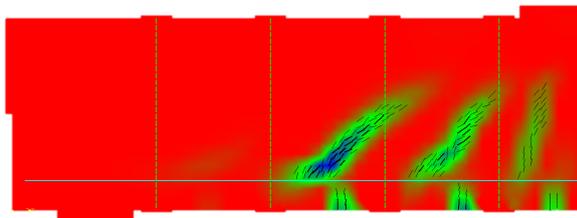
a)



b)



c)



**Figura 7. Patrón de fisuración de vigas de sección rectangular. Los colores representan las deformaciones de tracción en el hormigón. En la izquierda los modelos numéricos. En la derecha DIC. a) vigas de referencia, b) vigas con refuerzo no activado, c) vigas con refuerzo activado.**

Se aprecian dos familias de fisuras: fisuras de flexión y fisuras de cortante. En la viga de referencia se visualiza una fisura crítica de cortante y algunas más pequeñas de flexión bajo el punto de aplicación de la carga. En cambio, cuando las vigas estaban reforzadas, el patrón de fisuración cambia: el número de fisuras es mayor y más distribuidas, cambiando además el modo de fallo de cortante a flexión.

## 5.2. Vigas de sección en T

La Figura 8 muestra las curvas fuerza-desplazamiento obtenida tanto en los resultados

experimentales como en los numéricos para el caso de las vigas de sección en T, y en la Tabla 3 pueden verse los valores de carga la máxima alcanzada para cada viga. Los dos ensayos realizados en la viga de referencia presentaron una misma rigidez inicial pero la carga última alcanzada (Tabla 3) y el patrón de fisuración (Figura 9) fue diferente. El modelo numérico resultante presenta una curva y un patrón de fisuración más parecido al ensayo 1-2-R, donde la rigidez de las curvas es muy parecida y la carga máxima alcanzada está aproximada a un 8%, con un valor intermedio entre los dos ensayos experimentales de referencia.

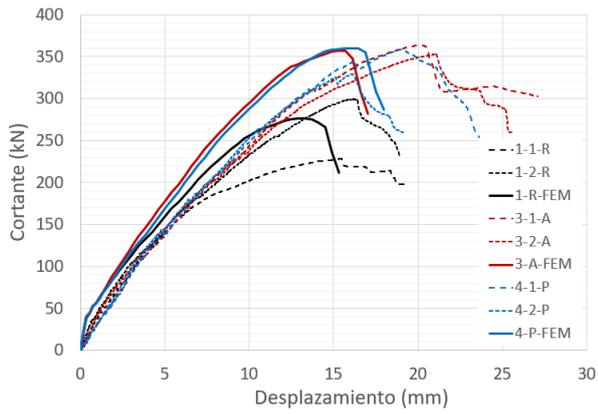
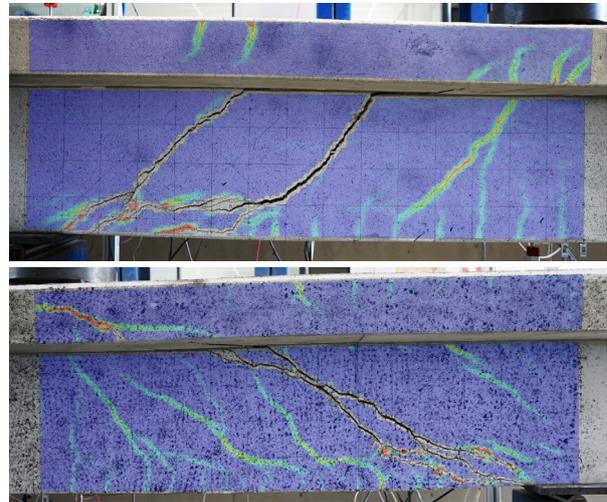
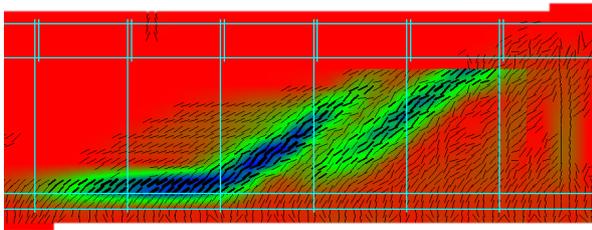


Figura 8. Curva cortante-desplazamiento para las vigas de sección en T. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales

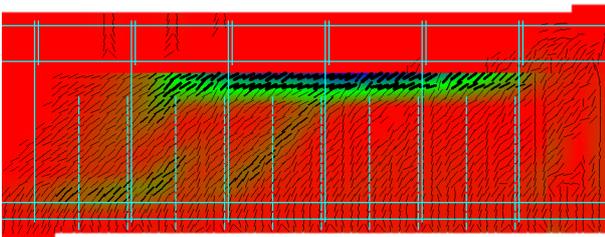
Tabla 3. Valores de cortante máximo para las vigas de sección en T. Comparación entre el modelo numérico y los ensayos experimentales

Viga de sección en T	Máximo cortante soportado [kN]		
	Experimental	MEF	MEF/EXP
1-1-R	227.91	276.60	1.21
1-2-R	229.10		0.92
3-1-A	363.38	357.20	0.98
3-2-A	353.21		1.01
4-1-P	358.89	360.20	1.00
4-2-P	328.96		1.09

a) 1-1-R (superior) y 1-2-R (inferior)



b) 3-1-A



c) 4-1-P

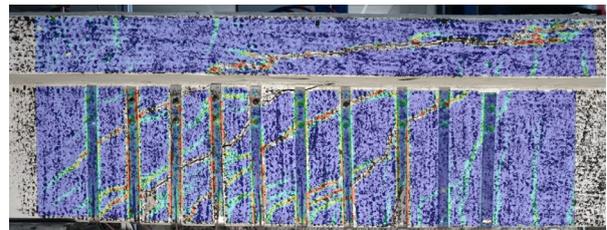
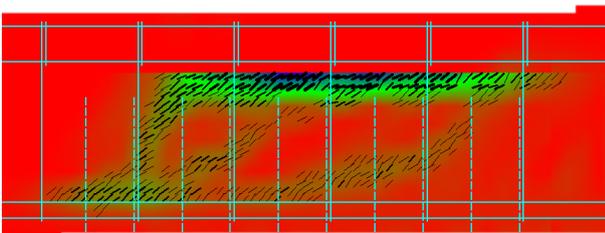


Figura 9. Patrón de fisuración de vigas de sección en T. Los colores representan las deformaciones de tracción en el hormigón. En la izquierda los modelos numéricos. En la derecha DIC. a) vigas de referencia, b) vigas con refuerzo activado, c) vigas con refuerzo no activado.

En cuanto a las vigas reforzadas, se observa un incremento del cortante resistido entre el 25 y el 35% aproximadamente respecto a las no reforzadas. Las curvas obtenidas de los modelos de estas vigas reforzadas presentan una rigidez mayor a las obtenidas experimentalmente. Dicha diferencia puede deberse a que los refuerzos se han modelado simplídicamente con un punto de anclaje fijo y una sección de fleje uniforme en toda la longitud, mientras que el anclaje real no era un punto de unión perfecto y el fleje quedaba perforado para poder introducir el anclaje mecánico. Por este motivo, el patrón de fisuración observado en las Figura 9b y Figura 9c es distinto. En los ensayos se producía una fisuración uniforme y distribuida en el canto del alma, mientras que en los modelos se producía una concentración de deformaciones verticales entre el punto de fijación de los flejes y la cara inferior de las alas de las vigas.

La diferencia entre las vigas con refuerzo activado y las vigas con refuerzo no activado se ha observado en este caso, únicamente, para cargas de servicio. En el futuro, se trabajará para refinar, si es posible, este modelo numérico. Hay que tener en cuenta, que en el caso del pretensado habitual en ingeniería estructural (pretensado a flexión), las diferencias más significativas se encuentran también en condiciones de servicio, siendo la variación de la fuerza de pretensado poco influyente en el comportamiento frente al estado límite último.

## 6. Conclusiones

Esta comunicación se centra en la modelización de dos tipologías de vigas reforzadas externamente con flejes de Fe-SMA, que fueron ensayadas en dos campañas experimentales previas. En una de las campañas el refuerzo se dispuso de forma cerrada en todo el perímetro

de la sección rectangular y en la segunda campaña el refuerzo se realizó en U fijados mediante anclajes mecánicos en el alma de las vigas con sección en T. Para ambas campañas se obtuvo un incremento de la carga última gracias al refuerzo aplicado, mayor en el caso de las vigas de sección cuadrada que en las vigas de sección en T.

Los resultados numéricos realizados presentan una buena aproximación a los resultados observados experimentalmente, sobre todo para las vigas pequeñas en las que no se dan las incertidumbres de anclaje del refuerzo como es el caso de las vigas con sección en T. No obstante, los resultados obtenidos con este modelo permiten resaltar la importancia no solo de garantizar un buen anclaje de los refuerzos en U, sino también darles continuidad a través de la cabeza comprimida para no generar las discontinuidades verticales que se observaban en las imágenes de los modelos numéricos de la Figura 9b y la Figura 9c.

## Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias a dos proyectos de investigación. Los ensayos a escala real con sección en T se han realizado con la Beca Leonardo a Investigadores y Creadores Culturales 2018 de la Fundación BBVA. La Fundación no se responsabiliza de las opiniones, comentarios y contenidos incluidos en el proyecto y/o los resultados obtenidos del mismo, los cuales son total y absoluta responsabilidad de sus autores. Los ensayos a pequeña escala de sección rectangular se realizaron en el marco del proyecto Horvital -sp2 (BIA2015-64672-C4-3-R) cofinanciado por la Agencia Estatal de Investigación y Fondos FEDER (UE). Los autores, además, desean agradecer a *re-fer AG Strengthening Solution Company* por el suministro de los flejes de SMA y a la empresa Labartec, por habernos permitir

ejecutar los ensayos a escala real en su laboratorio, gracias a un convenio con la UIB.

### **Referencias**

- [1] Cladera A, Weber B, Leinenbach C, Czaderski C, Shahverdi M, Motavalli M. Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview. *Constr Build Mater* 2014;63:281–93. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.04.032.
- [2] Rius JM, Cladera A, Ribas C, Mas B. Shear strengthening of reinforced concrete beams using shape memory alloys. *Constr Build Mater* 2019;200:420–35. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.12.104.
- [3] Montoya-Coronado LA, Ruiz-Pinilla JG, Ribas C, Cladera A. Experimental study on shear strengthening of shear critical RC beams using iron-based shape memory alloy strips. *Eng Struct* 2019;200. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109680.
- [4] Shahverdi M, Czaderski C, Annen P, Motavalli M. Strengthening of RC beams by iron-based shape memory alloy bars embedded in a shotcrete layer. *Eng Struct* 2016;117:263–73. doi:10.1016/j.engstruct.2016.03.023.
- [5] Shin M, Andrawes B. Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys. *Eng Struct* 2010;32:656–64. doi:10.1016/j.engstruct.2009.11.012.
- [6] Oller E, Pujol M, Marí A. Contribution of externally bonded FRP shear reinforcement to the shear strength of RC beams. *Compos Part B Eng* 2019;164:235–48. doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2018.11.065.
- [7] Červenka V, Jendele L, Prague JČ. ATENA Program Documentation Part 1 Theory Written by. 2018.
- [8] Hordijk DA. Thesis - Local approach to fatigue of concrete. 1991.
- [9] Ph Menetrey, Williamm KJ. Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization. *ACI Struct J* 1995;92:311–8. doi:10.14359/1132.
- [10] Bažant ZP, Oh BH. Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux*

*Constr* 1983;16:155–77. doi:10.1007/BF02486267.

- [11] Jendele L, Cervenka J. Finite element modelling of reinforcement with bond. *Comput Struct* 2006;84:1780–91. doi:10.1016/j.compstruc.2006.04.010.