

Continuidad activa en forjados de placa alveolar utilizando aleaciones con memoria de forma en base hierro: resultados experimentales y caso piloto

Active continuity of Hollow-Core Slab structural floors using Iron-based Shape Memory Alloys: experimental results and pilot case

Sandra del-Río-Bonnín^a, Joaquín G. Ruiz-Pinilla^b, Antoni Cladera^c, Carlos Ribas^d

^a Dra Arquitecta. Universitat de les Illes Balears. Profesora ayudante doctora. s.del-rio@uib.es

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat de les Illes Balears. Profesor titular de Universidad. joaquin.ruiz@uib.es

^c Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universitat de les Illes Balears. Catedrático de Universidad. antoni.cladera@uib.es

^d Dr. Arquitecto. Universitat de les Illes Balears. Profesor titular de Universidad. carlos.ribas@uib.es

RESUMEN

El objetivo de la investigación que se presenta en esta comunicación es comprobar la eficacia de utilizar barras corrugadas de aleación con memoria de forma en base hierro para dar continuidad activa a forjados de placa alveolar. Para ello, se presentan los resultados obtenidos en dos campañas experimentales, donde se evaluaron la resistencia a flexión y a cortante. Tras obtener resultados prometedores en el Estado Límite de Servicio, la solución se implementó en un caso piloto real, demostrando su viabilidad constructiva en obra.

ABSTRACT

The objective of the research presented in this paper is to assess the effectiveness of using Iron-based Shape Memory Alloy corrugated bars to provide active continuity to Hollow-Core Slab structural floors. To achieve this, results from two experimental campaigns, evaluating both flexural and shear strength, are presented. Following the promising results obtained for the Serviceability Limit State, this solution was implemented in a real pilot case, demonstrating its constructive feasibility on-site.

PALABRAS CLAVE: Continuidad activa, placa alveolar, Fe-SMA, campaña experimental, caso piloto

KEYWORDS: Active continuity, HCS, Fe-SMA, experimental campaign, pilot case

1. Introducción

Durante los últimos años, la utilización de aleaciones con memoria de forma en base hierro (Fe-SMA) para el refuerzo/prestresado de estructuras existentes, ha experimentado un gran aumento. Las más de 200 aplicaciones reales, llevadas a cabo especialmente en Centroeuropa, muestran la efectividad del material en este sector [1,2].

El potencial de las Fe-SMA como acero de pretensado radica en la capacidad de recuperar su forma original después de sufrir deformaciones gracias al proceso conocido como transformación martensítica [3]. La transformación martensítica tiene lugar mediante la aplicación de calor y el posterior enfriamiento, proceso también conocido como

activación del material. La aportación de calor se puede llevar a cabo con soplete [4] o con corriente eléctrica [5], entre otras alternativas.

El pretensado con Fe-SMA se efectúa mediante tres sencillos pasos [6]: 1) pre-estirar la barra de Fe-SMA, 2) anclar los extremos, 3) activar la Fe-SMA. Nótese que al tener la deformación impedida en el paso 2, se generan las tensiones de recuperación en la activación [7].

Por otro lado, desde la década de 1940, las estructuras de hormigón prefabricado en España han experimentado un gran crecimiento [8], debido a las ventajas que ofrecen frente a los hormigones *in situ*, entre las que destacan: la calidad, precisión, buena relación coste-eficacia y velocidad de construcción [9]. Entre las soluciones de forjado prefabricado existentes destacan las placas alveolares, que, por su propia geometría, permiten reducir considerablemente su peso propio [10].

En sus inicios, las placas alveolares se utilizaban como forjados simplemente apoyados, encontrándose ejemplos con y sin capa de compresión. Los estudios de [11,12] demostraron que, al introducir continuidad en la zona de momentos negativos, se podían soportar cargas mayores con el mismo canto de forjado. Además, la continuidad mejoraba el comportamiento frente al sismo, reducía la flecha y limitaba, o eliminaba, fisuras.

La mejora que supone esta continuidad viene dada por el tipo de refuerzo utilizado: acero pasivo [13–15], polímero reforzado con fibras de carbono (CFRP) [16,17] o con fibras de vidrio (GFRP) [17]. En todos los casos comentados, refuerzos sin pretensado, que entrarán en funcionamiento por las cargas actuantes una vez el hormigón *in situ* haya endurecido.

Plantear que este refuerzo pudiese estar pretensado, es decir, ofreciendo continuidad activa, podría incrementar las mejoras mencionadas, obteniendo una reducción del canto total del forjado y el consiguiente ahorro en el consumo de materiales [18].

La investigación que se presenta en esta comunicación se centra en evaluar la viabilidad del uso de Fe-SMA en formato de barra corrugada como armadura pretensada para garantizar la continuidad activa en forjados de placa alveolar. Por ello, se exponen los resultados obtenidos en dos campañas experimentales, donde se estudia la resistencia a flexión y a cortante respectivamente, y posteriormente la aplicación en un caso piloto.

2. Campañas experimentales

2.1 Primera campaña experimental: resistencia a flexión

Debido a las limitaciones de espacio en el laboratorio y con el fin de simplificar el comportamiento de la región de momento negativo se optó por invertir los especímenes y someterlos a un ensayo de flexión a tres puntos como muestra la Figura 1.

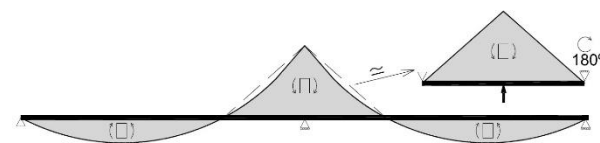


Figura 1. Simplificación de ensayo de la región de momento negativo.

2.1.1. Diseño de los especímenes

Se diseñaron un total de 8 especímenes para estudiar las siguientes variables que conducen a la nomenclatura de cada uno: el canto del forjado en cm (la suma de los valores numéricos), con y sin capa de compresión (+5/+0) y la activación o no del Fe-SMA (A/P). En esta comunicación se exponen los resultados de los siguientes pares de especímenes: 15+5 A/P, 20+5 A/P, 25+0 A/P, cuya geometría se muestra en la Figura 2.

Más información sobre esta campaña puede obtenerse en [19]. Cabe destacar que, durante la fabricación, los especímenes sin capa de compresión presentaron más dificultades constructivas que aquellos con capa de compresión por razones geométricas.

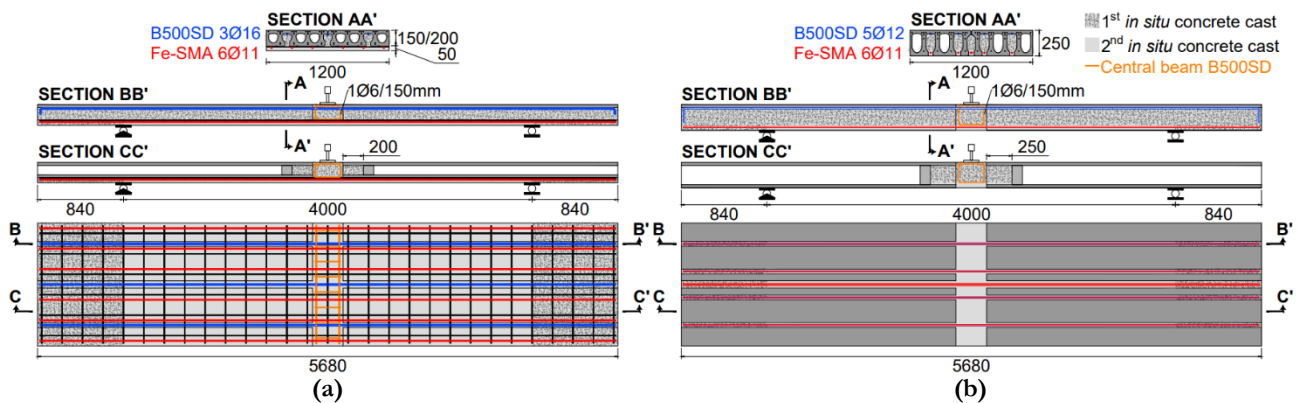


Figura 2. Geometría de los especímenes: (a) con capa de compresión, (b) sin capa de compresión.

2.1.2. Instrumentación

Cada espécimen activo se instrumentó dos veces: la primera durante el proceso de fabricación (ver Figura 3), justo antes de activar las barras de Fe-SMA, y la segunda en el momento del ensayo (ver Figura 4).

Nótese que en el proceso de fabricación las barras de Fe-SMA estaban en la cara superior de los especímenes, mientras que, en el momento del ensayo, estos se voltearon y, por lo tanto, estaban en la cara inferior.



Figura 3. Instrumentación dispuesta durante la activación del espécimen.



Figura 4. Instrumentación instalada en el ensayo.

Para monitorizar el comportamiento, se utilizaron transductores de desplazamiento lineal y rotativo, galgas extensométricas y célula de carga. Además, se instalaron cámaras de alta resolución para fotografiar el lateral del espécimen durante el ensayo para obtener el patrón de fisuración mediante un análisis de correlación de imágenes digital (DIC).

2.1.3. Resultados

La Tabla 1 muestra la contraflecha obtenida durante la activación (δ_{act}), la carga máxima en el ensayo a rotura (P_{test}), la correspondiente flecha (δ_{test}) y el momento máximo (M_{test}).

Tabla 1. Resultados de la activación y el ensayo.

Especímen	δ_{act} (mm)	P_{test} (kN)	M_{test} (kNm)	δ_{test} at P_{test} (mm)
15+5 P	-	91.19	91.19	57.10
15+5 A	13.89	81.45	81.45	34.57
20+5 P	-	109.78	109.78	44.61
20+5 A	5.59	121.27	121.27	45.21
25+0 P	-	83.18	83.18	70.39
25+0 A	4.48	79.27	79.27	89.81

La Figura 5 compara el comportamiento durante el ensayo de los pares de especímenes con geometrías idénticas, entre aquellos con pretensado, en rojo (A), y sin, en azul (P). El análisis de la carga con respecto de la flecha permite evaluar la resistencia a flexión, la rigidez inicial y el comportamiento una vez superada la carga máxima. Nótese que los especímenes A

empiezan con una flecha negativa, correspondiente a la contraflecha de activación.

En Estado Límite Último (ELU), al comparar la carga máxima entre los especímenes A y P, se obtiene una ratio media de 0,98, lo que indica que el pretensado no introduce mejoras significativas en ELU.

Se considera el Estado Límite de Servicio (ELS), como el correspondiente a una deformación de $L/300$. El ELS de deformación por apariencia, tiene en cuenta el efecto beneficioso de la contraflecha, mientras que el ELS de deformación por integridad no. Al comparar la carga entre los especímenes A y P correspondiente al ELS de deformación por apariencia (Figura 5) se obtiene una carga un 26% más elevada en los elementos A. Realizando la misma comparación para el ELS de deformación por integridad (Figura 5) el incremento es del 5% para los elementos A.

En la Figura 6 se representa la carga con respecto a la deformación de las barras en el centro del vano, tanto de la Fe-SMA (líneas continuas) como del acero B500SD situado en el

paramento opuesto (líneas discontinuas). Asimismo, se usa el color azul para los especímenes P y el rojo para los A. Al inicio del ensayo, nótese que las barras B500SD de los especímenes A comienzan con una deformación positiva, indicando las tensiones causadas por la activación. Al dar la vuelta a los especímenes y tras cierto nivel de carga en el ensayo, las deformaciones vuelven a 0, indicando que las barras se descargan. Seguidamente, las tensiones vuelven a aparecer debido al efecto local causado por su situación cercana al punto de carga y se incrementan hasta la rotura del elemento.

La Figura 7 muestra una comparación del patrón de fisuración entre los especímenes A y P obtenido mediante DIC para la carga correspondiente al instante en que el espécimen P llega al ELS. Los tonos rojos indican deformaciones positivas (apertura fisuras) y los azules, negativas (cierre de fisuras de activación, ver Figura 7a, c, e). Nótese que los especímenes A presentan menor cantidad de fisuras, además estas son más estrechas y menos profundas que los especímenes P.

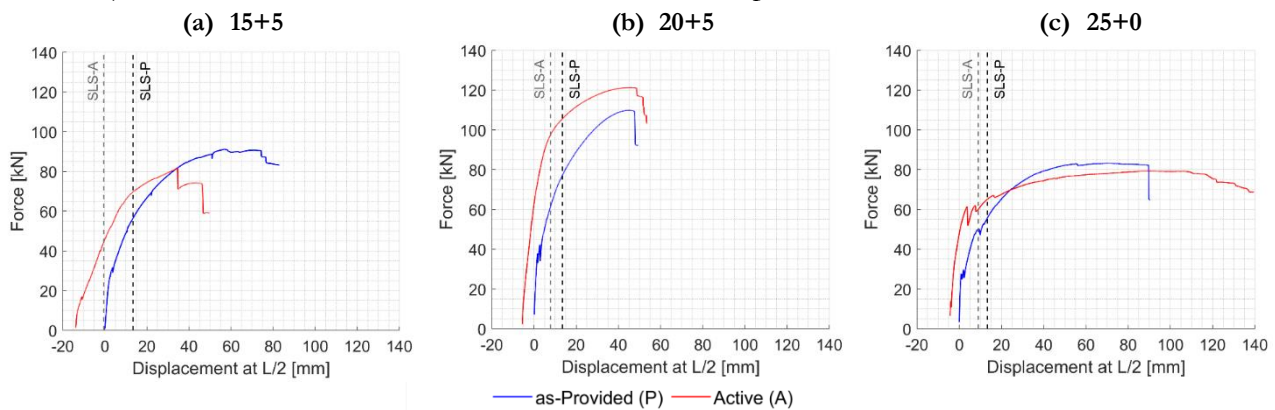


Figura 5. Carga – flecha.

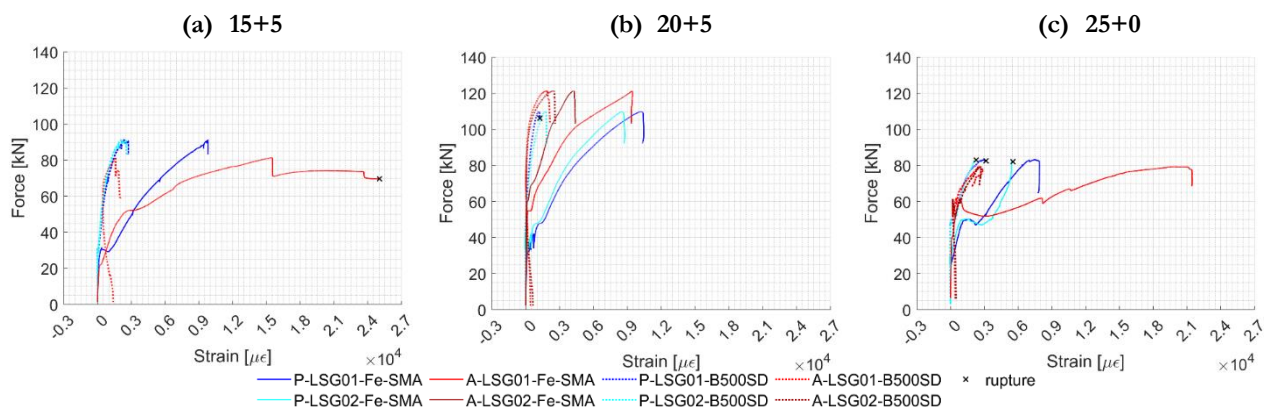


Figura 6. Carga – deformación de las barras en el centro del vano.

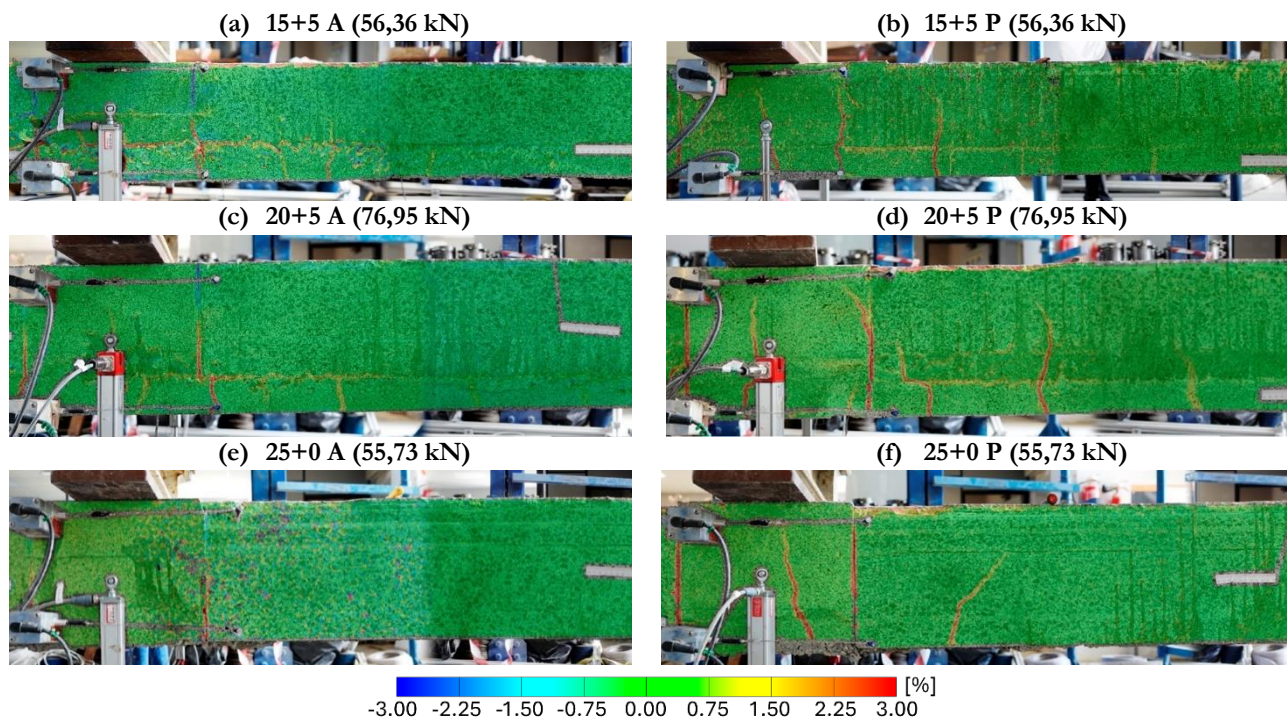


Figura 7. Patrón de fisuración mediante DIC.

2.2 Segunda campaña experimental: resistencia a cortante

En un primer lugar se diseñaron especímenes similares a la primera campaña experimental, pero se requería un número muy elevado de barras corrugadas de Fe-SMA, que dificultaban el correcto hormigonado de algunos especímenes, ya que en ese momento sólo había disponibles barras Ø11 (en la actualidad también se fabrican barras Ø16 de Fe-SMA). Por este motivo se optó por simplificar el comportamiento de las placas con el de un solo nervio, que finalmente por simplicidad se diseñó con geometría rectangular.

Además de la simplificación de ensayo tenida en cuenta en la primera campaña para la región de momento negativo, en esta campaña se optó por un ensayo de flexión a tres puntos con la carga descentrada a $1/3L$ (ver Figura 8).

2.2.1. Diseño de los especímenes

Se diseñaron un total de 8 vigas para estudiar las siguientes variables: canto de la viga (200/250 mm), número de barras de refuerzo de

Fe-SMA ($2/3\phi$) y si estaban activadas o no (A/P). En esta comunicación se exponen los resultados de los siguientes pares de vigas: 200_2ØA/P y 200_3ØA/P, cuya geometría se muestra en la Figura 9.

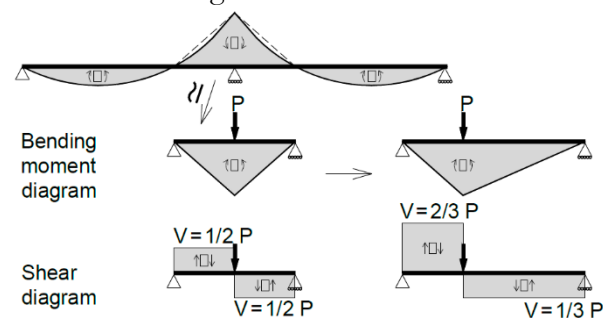


Figura 8. Simplificación de ensayo: carga descentrada.

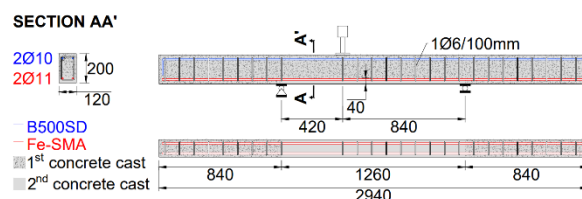


Figura 9. Geometría de las vigas.

2.2.2. Instrumentación

Las vigas activas se instrumentaron en dos ocasiones: la primera durante el proceso de fabricación (ver Figura 10), justo antes de activar

las barras de Fe-SMA dispuestas en la cara superior de la viga, y la segunda en el momento del ensayo (ver Figura 11) con las vigas volteadas y, por lo tanto, las Fe-SMA en la cara inferior.



Figura 10. Instrumentación durante la activación.



Figura 11. Instrumentación dispuesta en el ensayo.

La instrumentación utilizada se dispuso de forma análoga a la de la campaña de flexión, con el objetivo de obtener la misma información, por lo que no se comenta por brevedad.

2.2.3. Resultados

La Tabla 2 muestra la contraflecha obtenida bajo el punto de carga durante la activación ($\delta_{act, P}$), la carga máxima de ensayo (P_{test}), el cortante correspondiente (V_{test}) y la flecha bajo el punto de carga ($\delta_{test, P}$).

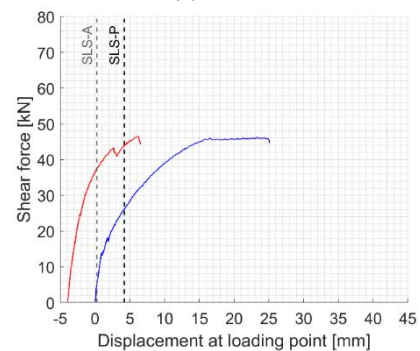
En la Figura 12 se comparan las curvas correspondientes al cortante respecto de la flecha bajo el punto de carga para las vigas A y P, mostrando la rigidez inicial, la resistencia a cortante y el comportamiento post-pico. La

deformación negativa del inicio de las vigas A corresponde a la contraflecha de activación.

Tabla 2. Resultados de la activación y el ensayo.

Espécimen	$\delta_{act, P}$ (mm)	P_{test} (kN)	V_{test} (kNm)	$\delta_{test, P}$ at P_{test} (mm)
200_2ØP	-	69.44	46.29	23.28
200_2ØA	3.95	69.78	46.52	6.20
200_3ØP	-	93.35	62.23	16.24
200_3ØA	4.84	108.75	72.50	9.31

(a) 200_2Ø



(b) 200_3Ø

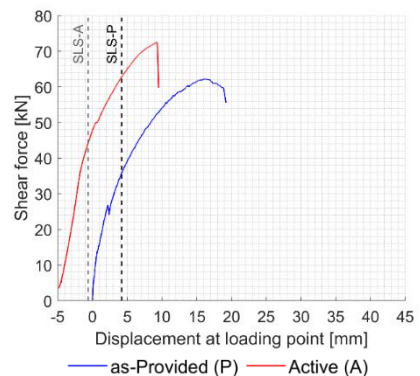


Figura 12. Cortante – flecha en punto de carga.

En ELU, comparando el cortante máximo entre las vigas A y P, se obtiene una ratio media de 1.08. En este caso, la gran excentricidad del pretensado exterior en el momento de activación, al llevarse este a cabo antes del hormigonado del recubrimiento, impidió probablemente que la resistencia a cortante aumentase, al no incrementar las compresiones en la cabeza comprimida de la viga.

En cambio, en ELS, considerando éste como $L/300$, al tener en cuenta el efecto beneficioso de la contraflecha (Figura 12) se obtiene un incremento de carga del 71% para el espécimen A. Si no se tiene en cuenta el efecto

beneficioso de la contraflecha, el aumento de carga para alcanzar el ELS es del 33%.

En la Figura 13 se observa el patrón de fisuración tanto del lateral de la viga en la zona crítica a cortante como de la parte superior de ésta. El código de colores utilizado es el mismo que en la primera campaña experimental.

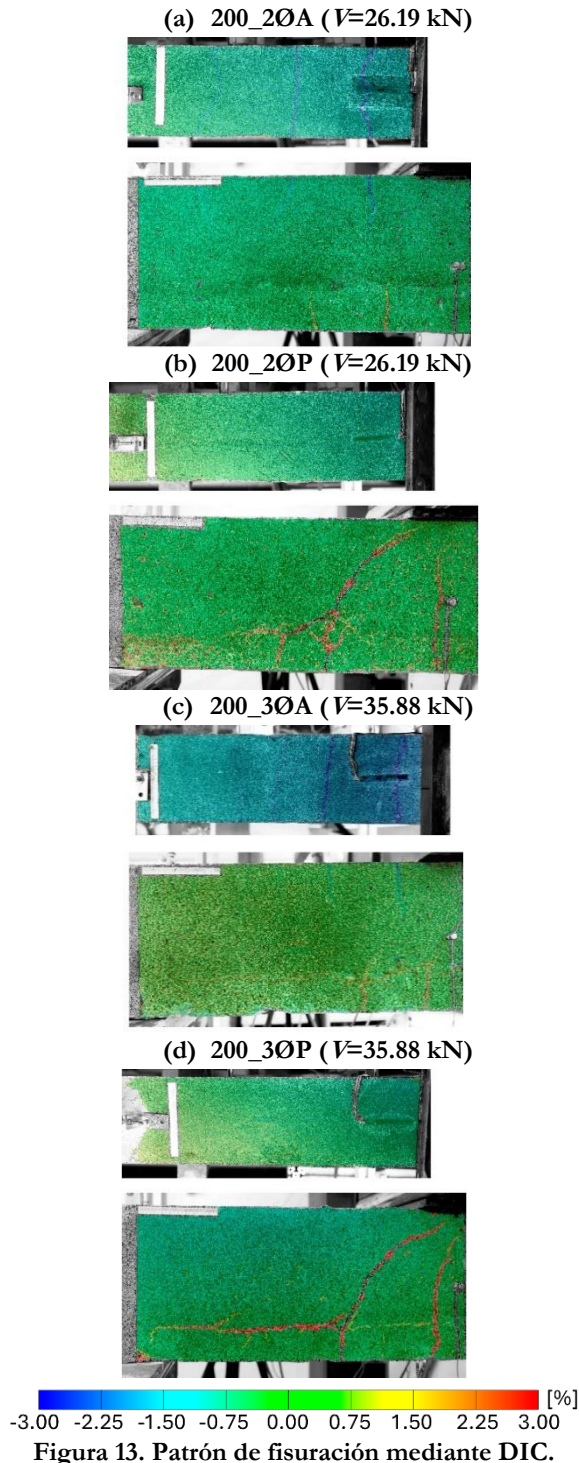


Figura 13. Patrón de fisuración mediante DIC.

Al comparar el estado de fisuración entre las vigas A y P para el cortante correspondiente

al instante en que la viga P llega al ELS, se observa que a pesar de soportar el mismo cortante, las vigas con pretensado (A) presentan menor cantidad de fisuras, estas son más estrechas y llegan a una profundidad menor. Al mismo tiempo, la fisura crítica a cortante todavía no se ha manifestado, mientras que, en las vigas sin pretensado (P) se pueden observar las dos ramas de la fisura crítica a cortante ya desarrolladas.

Si en ese mismo instante, se compara la deformación de las barras de Fe-SMA de las vigas A y P (Figura 14), se observa que las de las vigas con pretensado son del orden de menos de la mitad que las de las vigas sin pretensado.

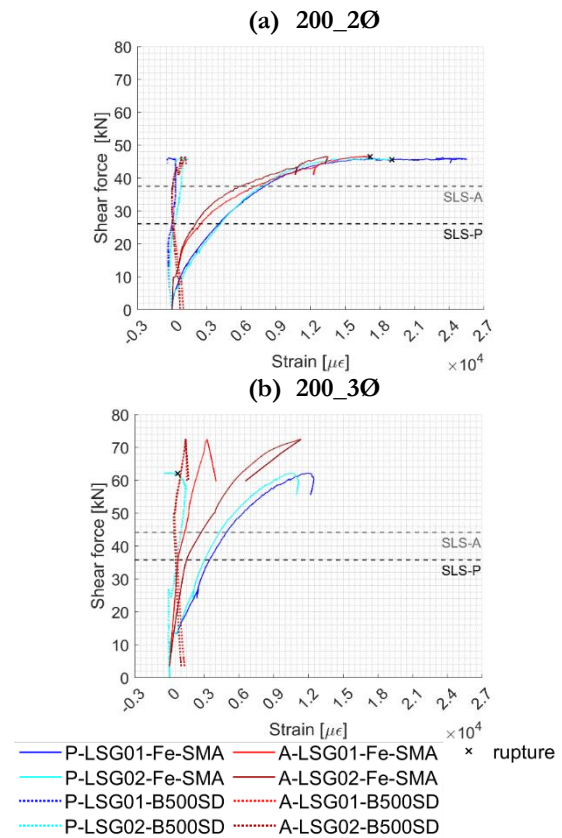


Figura 14. Cortante – deformación de las barras bajo el punto de carga.

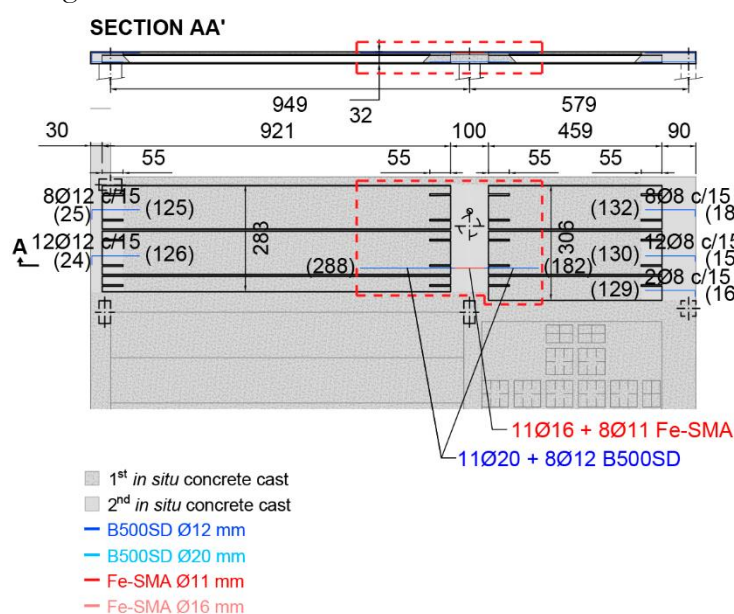
3. Aplicación práctica: caso piloto

Tras los resultados satisfactorios obtenidos, se llevó a cabo una aplicación práctica en un caso piloto. En concreto, en una parte del forjado de planta 1ª de una escuela situada en Mallorca.

3.1 Diseño

El forjado combinaba forjado reticular y placas alveolares. La continuidad activa a momento negativo se planteó para el extremo noroeste, donde las barras de Fe-SMA daban continuidad a dos vanos de 9.49 m y 5.79 m de luz (Figura 15). El ancho del forjado variaba entre 2.83 m y 3.06 m, y estaba compuesto por dos placas enteras y una cortada longitudinalmente. El canto total era de 32 cm, 25 cm de placa y 7 cm de capa de compresión. Se abrieron dos alveolos por placa en los extremos hasta una profundidad de 55 cm. La viga central que unía las placas medía 1 m de ancho.

El refuerzo a negativo combinaba barras de Fe-SMA de $\varnothing 11$ y $\varnothing 16$, dispuestas sobre la viga central, con acero B500SD de $\varnothing 12$ y $\varnothing 20$, sobre las placas, conectados mediante manguitos.



3.2 Instrumentación

Se instrumentó el forjado con transductores de desplazamiento y galgas extensométricas con el fin de medir la contraflecha de activación y la deformación de las barras B500SD en los extremos de conexión con las Fe-SMA.

3.3 Resultados

La contraflecha de activación medida en el centro del vano izquierdo fue de 0.595 mm y en el centro del vano derecho de 0.384 mm.

Las deformaciones medidas en las barras B500SD mostraron como, a 50 cm del manguito, la tensión introducida por la activación había sido transferida al hormigón en su totalidad.

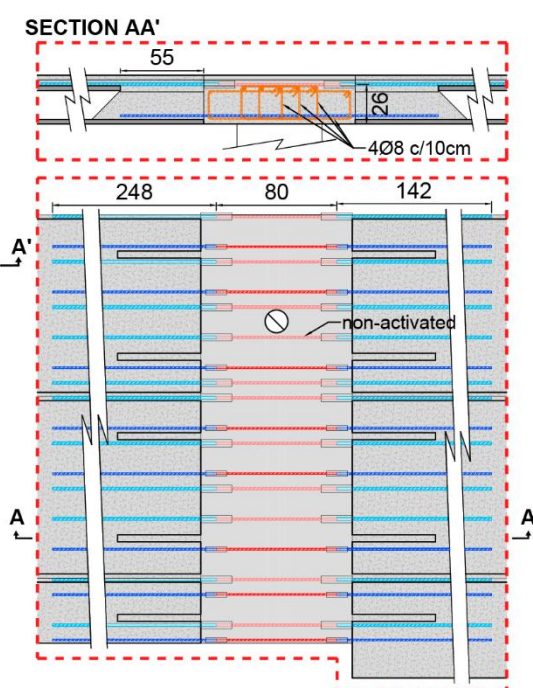


Figura 15. Geometría general y detalle refuerzo a negativo. Cotas en cm.

4. Conclusiones

El principal objetivo de la investigación era optimizar los forjados de placa alveolar mediante el uso de Fe-SMA como refuerzo activo a momento negativo, con el fin de mejorar el

Estado Límite de Servicio y analizar la viabilidad de disminuir el canto total del forjado. Las conclusiones obtenidas de ambas campañas experimentales y de la aplicación práctica del caso piloto son las siguientes:

- Es efectivo utilizar Fe-SMA como refuerzo activo a momento negativo por su capacidad de producir contraflecha.
- Por cuestiones geométricas, es más sencillo ubicar el refuerzo en la zona de negativos en forjados de placa alveolar con capa de compresión que sin ella.
- Se observan mejoras en Estado Límite de Servicio, tanto a flexión como a cortante, puesto que los forjados son capaces de soportar más carga para la misma deformación, tienen menor fisuración y se retrasa la aparición de la fisura crítica a cortante.
- Las mejoras en Estado Límite Último fueron insignificantes para la resistencia a flexión y a cortante.
- El uso de manguitos para unir las barras corrugadas de Fe-SMA y acero B500SD resultó en una forma fácil de conseguir continuidad activa con un ahorro material de Fe-SMA muy elevado.
- La distancia de anclaje de las barras de acero convencional que recibían la tensión de activación de las de Fe-SMA resultó ser menor a 50 cm.

Agradecimientos

Proyecto PRD2020/39-1 financiado por la *Comunitat Autònoma de les Illes Balears* a través del *Servei de Recerca i Innovació, Direcció General d'Universitats, Recerca i Ensenyaments Artístics Superior* y por la *Conselleria d'Educació i Universitats* con fondos de la Ley del Impuesto de estancias Turísticas ITS2017-006. Agradecer a re-fer AG strengthening solutions por el suministro de Fe-SMA, a Pastor S.A. por fabricar los especímenes y a Labartec S.L. por realizar los ensayos en su laboratorio. Gracias al Arq. Iván de la Fuente por la colaboración en la prueba piloto. Los autores agradecen la beca predoctoral FPI-CAIB concedida a la primera autora financiada por la *Conselleria d'Economia, Hisenda i Innovació* del *Govern de les Illes Balears* (FPI/2235/2019).

Referencias

- [1] M. Shahverdi, S. Raza, E. Ghafoori, C. Czaderski, J. Michels, M. Motavalli, Recent Advancements in Development and Application of an Iron-based Shape Memory Alloy at Empa, *Chimia (Aarau)* 76 (2022) 242–248. <https://doi.org/10.2533/chimia.2022.242>.
- [2] re-fer AG strengthening solutions. References, (n.d.). <https://www.re-fer.eu/en/references/> (accessed December 5, 2024).
- [3] A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi, M. Motavalli, Iron-based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview, *Constr Build Mater* 63 (2014) 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.032>.
- [4] J. Michels, F. Mamié, C. Czaderski, B. Schranz, Bending behavior of RC beams with Fe-SMA strip reinforcement, *Procedia Structural Integrity* 64 (2024) 368–375. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2024.09.265>.
- [5] B. Schranz, J. Michels, C. Czaderski, M. Motavalli, T. Vogel, M. Shahverdi, Strengthening and prestressing of bridge decks with ribbed iron-based shape memory alloy bars, *Eng Struct* 241 (2021) 112467. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112467>.
- [6] X. Qiang, Y. Wu, Y. Wang, X. Jiang, Research Progress and Applications of Fe-Mn-Si-Based Shape Memory Alloys on Reinforcing Steel and Concrete Bridges, *Applied Sciences* 13 (2023) 3404. <https://doi.org/10.3390/AP13063404>.
- [7] W.J. Lee, B. Weber, G. Feltrin, C. Czaderski, M. Motavalli, C. Leinenbach, Stress recovery behaviour of an Fe–Mn–Si–Cr–Ni–VC shape memory alloy used

- for prestressing, *Smart Mater Struct* 22 (2013) 125037.
<https://doi.org/10.1088/0964-1726/22/12/125037>.
- [8] M. Burón Maestro, D. Fernández-Ordoñez Hdez, Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de experiencia., *Informes de La Construcción* 48 (1997) 19–33.
- [9] K. Elliott, S. Kim, A. Tovey, B.C. Association, *Precast concrete frame buildings: design guide*, British Cement Association, 1992.
- [10] FIP Comission on Prefabrication, Working Group hollow core units, Working group structural connections, *Precast prestressed hollow core floors*, Thomas Telford, 1988.
- [11] fib Commission 6, Special design considerations for precast prestressed hollow core floors, *International Federation for Structural Concrete (fib)*, 2000.
- [12] G. Capuano, B. Della Bella, P. Ghittoni, P. Morandi, *The Hollow Core Floor Design and Applications*, Association of manufacturers of prestressed Hollow Core Floors, Verona, 2002.
- [13] I. Rosenthal, Full scale test of continuous prestressed hollow-core slab, *PCI Journal* (1978) 74–81.
https://www.pci.org/PCI_Docs/Publications/PCI%20Journal/1978/May-1978/Full%20Scale%20Test%20of%20Continuous%20Prestressed%20Hollow-Core%20Slab.pdf (accessed February 24, 2021).
- [14] K.-H. Tan, L.-X. Zheng, P. Paramasivam, Designing Hollow-Core Slabs for Continuity, *PCI* (1996) 82–91.
- [15] F. Gastal, R.A. Barbieri, R.S. Rezende, M.J. Ryall, G.A.R. Parke, J.E. Harding, Numerical and experimental analysis of jointless precast prestressed hollow-core beam slabs with cast-in-place continuity, *ICE Virtual Library* (2015).
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/full/10.1680/bm4.28548.0042>.
- [16] A. Hosny, E.Y. Sayed-Ahmed, A.A. Abdelrahman, N.A. Alhlaby, Strengthening precast-prestressed hollow core slabs to resist negative moments using carbon fibre reinforced polymer strips: an experimental investigation and a critical review of Canadian Standards Association S806-02, *Canadian Journal of Civil Engineering* 33 (2006) 955–967.
<https://doi.org/10.1139/L06-040>.
- [17] B. El-taly, Y. HasabElnaby, N. Meleika, Structural performance of precast–prestressed hollow core slabs subjected to negative bending moments, *Asian Journal of Civil Engineering* 19 (2018) 725–740.
<https://doi.org/10.1007/s42107-018-0061-0>.
- [18] S. del Río Bonnín, Active continuity of Hollow-Core Slab structural floors using Iron-based Shape Memory Alloys, 2024.
<http://hdl.handle.net/11201/166204> (accessed December 5, 2024).
- [19] S. del Río-Bonnín, A. Cladera, L.A. Montoya-Coronado, J.G. Ruiz-Pinilla, C. Ribas, Experimental study on the active continuity of HCS structural floors using Iron-based Shape-Memory Alloy rebars, *Eng Struct* 299 (2024) 117111.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUC T.2023.117111>.