



Received: 03/10/2021
Accepted: 14/10/2021

Anales de Edificación
Vol. 8, Nº2, 42-46 (2022)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2022.5041

Forjados de placa alveolar con continuidad activa mediante el uso de aleaciones con memoria de forma en base hierro

Hollow-core slab slabs with active continuity using iron-based shape memory alloys

Sandra Del Río Bonnín^a, Luís A. Montoya Coronado^a, Carlos R. Ribas González^a, Joaquín G. Ruiz Pinilla^a, Antoni Cladera Bohigas^a

^aUniversitat de les Illes Balears

Resumen-- Durante los últimos años se ha extendido exponencialmente el uso de aleaciones con memoria de forma en base hierro en el sector de la construcción, especialmente en rehabilitación en países de centro-Europa. Este innovador material se puede usar como pretensado en hormigón armado gracias a su efecto de memoria de forma, pudiendo generar tensiones de compresión en los elementos de hormigón sin necesidad de utilizar gatos hidráulicos, vainas, dispositivos de anclaje u otros accesorios. Estas aleaciones se encuentran actualmente disponibles en el mercado europeo en formato de barra corrugada o fleje. En este artículo se evalúan las bondades del uso de barras corrugadas de aleación con memoria de forma en base hierro como continuidad activa en forjados prefabricados de placa alveolar, más concretamente, su proceso constructivo y efectividad, en base a los resultados más relevantes de la campaña experimental. Finalmente, se presentan las mejoras en el Estado Límite de Servicio implementando la continuidad activa en comparación a una continuidad sin pretensado, es decir, con la aleación con memoria de forma en base hierro sin activar. Para concluir, queda demostrado que usando esta tecnología se retrasa el proceso de fisuración y se mejora la rigidez de los elementos.

Palabras clave— Placa alveolar; continuidad; Fe-SMA; Pretensado.

Abstract— In recent years, the use of iron-based shape memory alloys has grown exponentially in the construction sector, especially in rehabilitation in Central European countries. This innovative material can be used as prestressing in reinforced concrete due to its shape memory effect and can generate compressive stresses in concrete elements without the use of hydraulic jacks, sheaths, anchorage devices or other accessories. These alloys are currently available on the European market in the form of rebar or strip. This article evaluates the benefits of using iron-based shape memory alloy rebars as active continuity in precast hollow core slabs, more specifically, their construction process and effectiveness, based on the most relevant results of the experimental campaign. Finally, the improvements in the Serviceability Limit State are presented by implementing the active continuity compared to a continuity without prestressing, i.e., with the shape memory alloy on an inactivated iron basis. To conclude, it is demonstrated that using this technology delays the cracking process and improves the stiffness of the elements.

Index Terms— Hollow core plate; Continuity; Fe-SMA; Prestressed; Prestressing.

I. INTRODUCCIÓN

LAS aleaciones con memoria de forma en base hierro [Fe-SMA de sus siglas en inglés] (Dong et al., 2009), han ganado terreno rápidamente en el sector de la construcción debido a sus excepcionales propiedades (Mas et al., 2016) entre las cuales cabe destacar la capacidad de volver a la forma

original después de sufrir grandes deformaciones mediante la aplicación de calor, fenómeno conocido como transformación martensítica (Cladera et al., 2014). Esto permite usarlas como pretensado simplemente anclando y calentando las barras previamente preestiradas (Michels et al., 2018). sin la necesidad de usar gatos, cabezas de anclaje, conductos, etc. como requieren los aceros convencionales.

A su vez, la industria del prefabricado ha demostrado ser la óptima por su geometría y velocidad de construcción. La solución constructiva más optimizada por su relación luz-canto dentro de este ámbito son los forjados de placa alveolar [HCS de sus siglas en inglés]. Al establecer continuidad activa a momento negativo, es decir, pretensando el armado a negativo, se pretende conseguir un mejor rendimiento de todo el conjunto al generar tensiones de compresión en el hormigón tanto frente momentos flectores positivos como a negativos.

En la campaña experimental realizada se pretende evaluar la efectividad del uso de Fe-SMA en formato de barra corrugada de diámetro 11 mm para pretensar a momento negativo en forjados de HCS con y sin capa de compresión (CC).

II. METODOLOGÍA

A. Caracterización de las barras corrugadas de Fe-SMA Ø11mm

Las barras corrugadas de Fe-SMA, fueron suministradas por la empresa Re-fer de Suiza preestiradas al 4% y con una longitud total de 5,68 m. El diámetro exterior de las barras es de 11 mm mientras que el diámetro nominal es de 10,5 mm.

La caracterización se llevó a cabo en la Universidad de las Islas Baleares mediante una prensa universal Z100 Zwick que dispone de una célula de carga de 100 kN. Se hicieron tres ensayos de tensión de recuperación, tres monotónicos y un ensayo de tensión de recuperación seguido de un monotónico.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 1a calentando las barras corrugadas de Fe-SMA hasta alcanzar una temperatura en la superficie de la barra entre 250 y 300 °C y su posterior enfriamiento, la tensión de recuperación conseguida ronda los 290 MPa, valor situado dentro del rango esperado [290 - 330 MPa] según estudios realizados anteriormente por Michels (2018) y Schranz (2019). La elongación máxima que permiten,

tal como se muestra en la Figura 1 b, es del 16%, un valor similar al 20-21% obtenido por Czaderski, (2021) y Schranz (2021) respectivamente.

El módulo de elasticidad va variando a medida que la tensión aplicada aumenta dada la no linealidad del material, siendo de 109,8 GPa tras el ensayo de tensión de recuperación y descendiendo hasta 20,5 GPa para tensiones situadas entre 400 y 500 MPa.

B. Continuidad a negativos en un caso real y simplificación para el ensayo

Para establecer continuidad a momento negativo en un hcsd un caso real, un armado en la cara superior del forjado, recubrimientos según normativa, tú correspondiente a la zona de momentos negativos, de la CC (Fig. 2a) o abriendo los alveolos en el caso sin CC (Fig. 2b).

Para el ensayo, el comportamiento a momento negativo del forjado se simplificó con un diagrama triangular mediante un ensayo de carga por tres puntos con el forjado volteado. De esta manera, Fe-SMA cubrió toda la longitud correspondiente al espécimen encontrándose en la cara superior para la fabricación y activación, y en la cara inferior durante el ensayo.

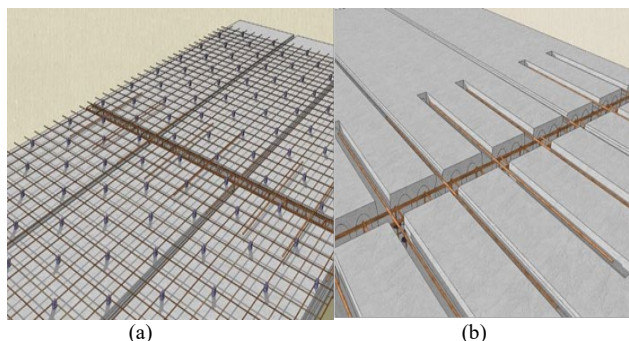


Fig. 2. Continuidad a negativos en caso real: (a) forjado con CC; (b) forjado sin CC.

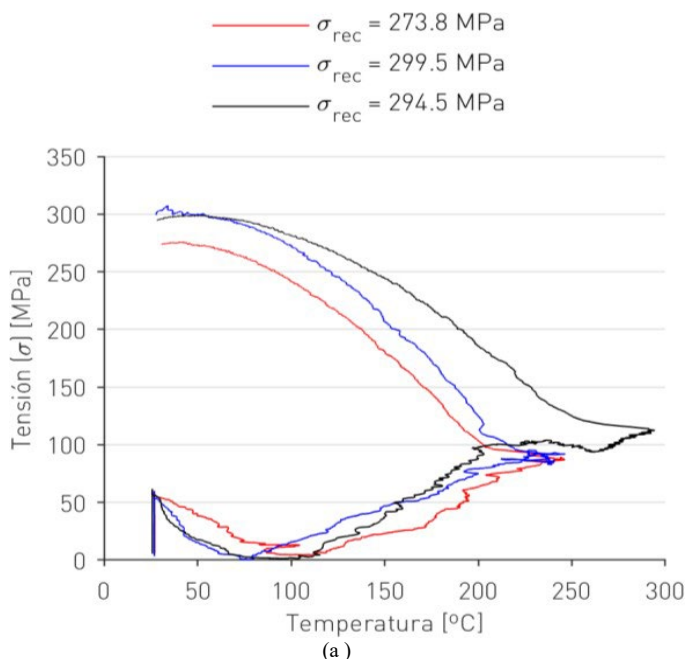


Fig. 1. Caracterización de las barras corrugadas Fe-SMA Ø11mm: (a) tres ensayos de tensión de recuperación; (b) ensayo de tensión de recuperación seguido de monotónico.

Además, para poder soportar el volteado y la manipulación hasta el laboratorio, se dispuso de un armado pasivo convencional (B500SD) en la cara opuesta. El detalle de los armados se muestra en la Fig. 3.

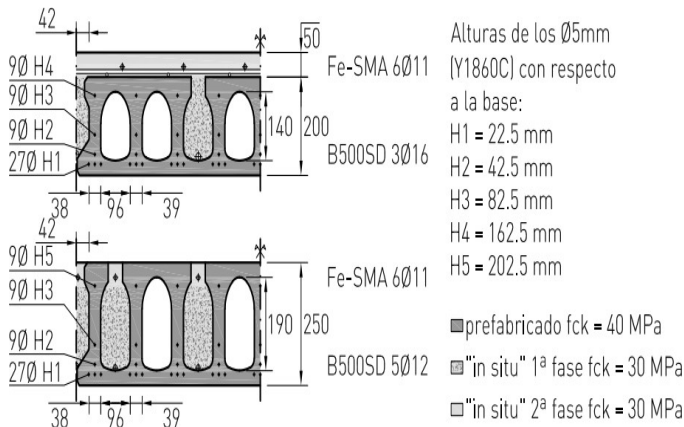


Fig. 3. Detalle del armado de los especímenes.

C. Fabricación y activación de los especímenes

Se construyen un total de 8 especímenes para la campaña experimental en la fábrica de prefabricados Pastor, en la ciudad de Mallorca.

Se tuvieron en cuenta tres variables de estudio: dos cantos de forjado total (20 y 25 cm) con el Fe-SMA activo/pasivo y con/sin CC.

Las Fig. 5 y 6 muestran el canto total de los 4 forjados que se analizarán a continuación era de 25 cm, con una luz de 4m y una distancia de anclaje del Fe-SMA de 84 cm a cada lado.

El proceso de fabricación fue el siguiente:

Primero se fabricaron las placas alveolares, tensando los alambres, extruyendo el hormigón, dejando que fraguara y transmitiendo el pretensado. Seguidamente se cortaron longitudinalmente por la mitad y transversalmente a una distancia de 2.69m. También se abrieron los alveolos correspondientes según el diseño observado en la Fig. 7a.

A continuación, se dispuso el armado correspondiente, tanto las barras de Fe-SMA y B500SD, como el mallazo de reparto

de acero convencional en caso de disponer de capa de compresión (Fig. 7b), y se taponaron los alveolos que no iban rellenos a una profundidad igual al canto total del forjado. Acto seguido, se vertió y vibró el primer hormigonado, cubriendo los alveolos, el zuncho central de 30 cm de ancho y dejando sin hormigonar los últimos 5 cm de la cara superior. A la vez, se hormigonaron las longitudes de anclaje del Fe-SMA, como se puede ver en la Fig. 7c.

Se dejó fraguar el primer hormigonado in situ y luego se procedió a activar el Fe-SMA aplicando calor con un soplete (Fig. 7d) y controlando que la temperatura que alcanzaran las barras en la superficie estuvieran alrededor de los 250°C.

En un primer instante se intentó medir la temperatura alcanzada con la instalación de termopares homogéneamente repartidos en las barras de Fe-SMA con cinta especial que soporta el calor en el espécimen sin capa de compresión (Fig. 7e), de la misma manera que se había hecho para la caracterización de las barras, pero la instalación de la instrumentación resultó ser muy dificultosa y el resultado de la lectura erróneo, pues algunos cables resultaron dañados por el soplete. Entonces se procedió a medir la temperatura con una pistola de temperatura (Fig. 7f) y resultó ser mucho más conveniente para utilizar in situ.

Posteriormente, el proceso de enfriamiento de las barras mediante la pulverización de agua para completar la transformación martensítica durante la lectura de la instrumentación instalada (Fig. 7g).

Finalmente se vertió y vibró el segundo hormigonado terminando de cubrir los especímenes (Fig. 7h) y se voltearon y acopiaron (Fig. 7i).

Cabe destacar que el proceso constructivo de los HCS sin CC fueron mucho más complicados que los que tenían CC, sobre todo durante el primer hormigonado in situ. Ello se debió a que las barras de Fe-SMA dificultaban la correcta inserción del hormigón dentro de los alveolos y tuvo que taponarse además con poliestireno expandido cada ranura manualmente para asegurar la longitud de anclaje a diferencia del peine utilizado CC.

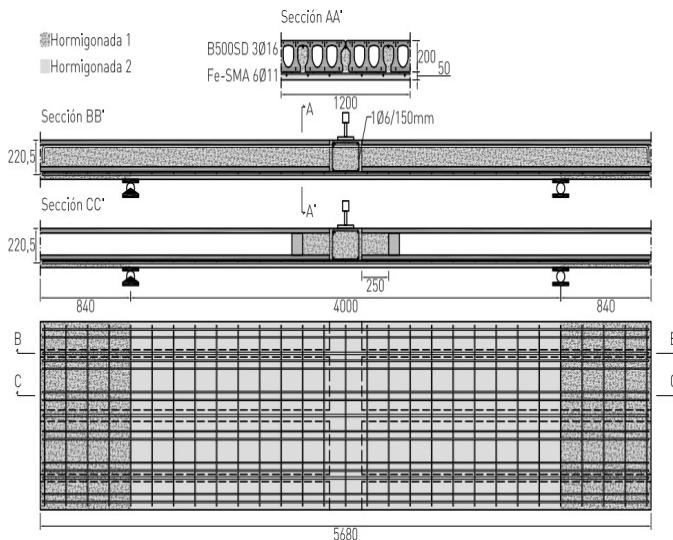


Fig. 5. Diseño de especímenes con CC.

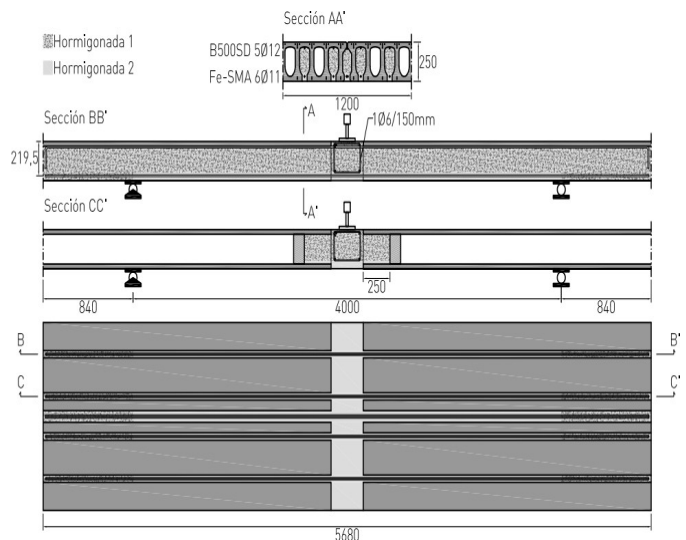


Fig. 6. Diseño de especímenes sin CC.

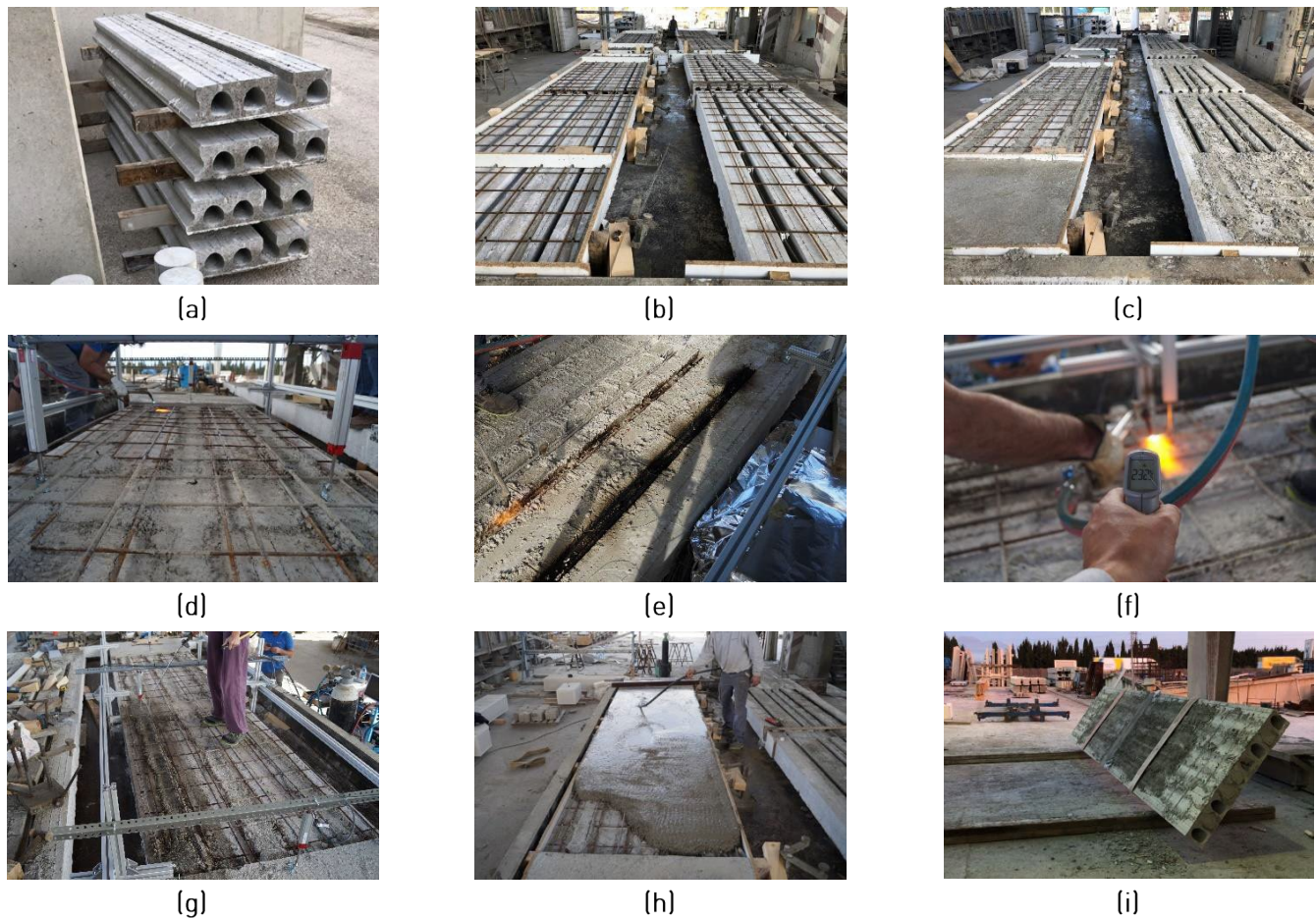


Fig. 7. Proceso constructivo de los especímenes: (a) fabricación y apertura de alveolos en las placas alveolares; (b) disposición del armado; (c) primer hormigonado in situ; (d) activación Fe-SMA con soplete; (e) control de temperatura durante la activación con termopares; (f) control de temperatura durante la activación con pistola de temperatura; (g) enfriamiento de las barras; (h) segundo hormigonado in situ; (i) Volteado de especímenes.

D. Ensayo

En la Figura 9, se presenta la instrumentación que se dispuso durante el ensayo: 4 trasductores de desplazamiento lineal variable [LVDT de sus siglas en inglés] para medir la flecha, 4 galgas extensométricas [LSG de sus siglas en inglés] para evaluar las deformaciones de los dos tipos de acero [B500SO y Fe-SMA] y 4 encoders [EC] para cuantificar las deformaciones en el lateral del forjado en el centro del vano causadas por las compresiones y tracciones. Además, se instalaron dos cámaras que iban tomando fotografías cada dos segundos para documentar el patrón de fisuración de cada elemento durante el ensayo y para la carga máxima.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El pretensado del Fe-SMA pudo comprobarse que había funcionado correctamente puesto que la contra flecha del propio espécimen era evidente a simple vista, aparte de quedar registrada numéricamente con la instrumentación dispuesta durante la activación. En la Fig. 8 se muestran los resultados obtenidos de carga / flecha para los especímenes con y sin CC, comparando a cada una el comportamiento de los especímenes con el hierro activo y pasivo. Como se puede observar, los especímenes activos tienen en un primer instante una flecha de valor negativo, correspondiente a la contra flecha de activación.

Además, las gráficas evidencian que para el estado límite de servicio (ELS) los forjados con Fe-SMA activo tienen un mejor comportamiento puesto que, gracias a la contra flecha de activación, tienen menor deformación en el centro del vano.

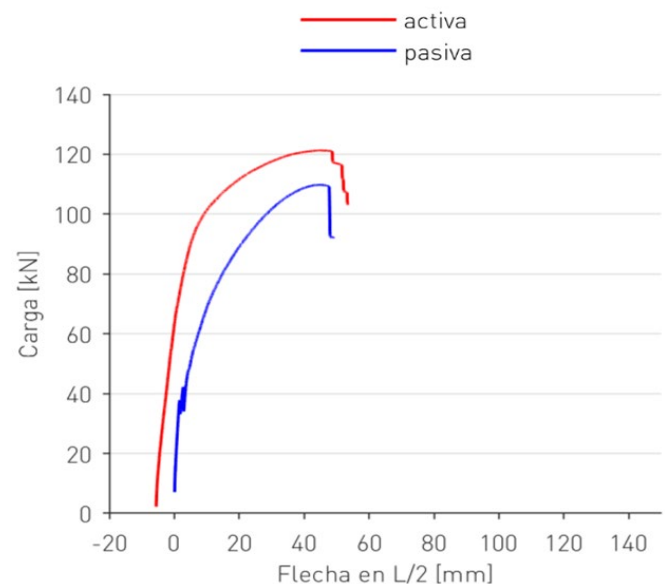


Fig. 8a. Gráfica de carga/flecha con Fe-SMA activo y pasivo con CC.

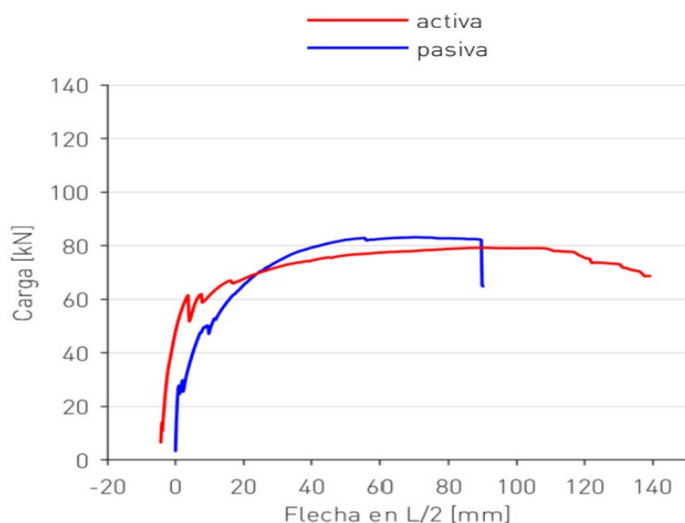


Fig. 8b. Gráfica de carga/flecha con Fe-SMA activo y pasivo sin CC.

IV. CONCLUSIONES

Las barras corrugadas de Fe-SMA son aptas para utilizarse fácilmente como pretensado si se asegura una longitud de anclaje estipulada, de la misma manera que cualquier otro acero convencional usado en el mercado.

El hecho de que para activar el pretensado con este material solo requiera anclar y calentar, que pueda introducirse dentro de los alveolos más fácilmente que otros tipos de pretensado que requieren de gatos hidráulicos inyecciones de mortero, etc.

Aunque ha resultado ser más sencilla su aplicación en obra para forjados con CC, en ambos casos los resultados han sido satisfactorios.

Los especímenes activados han tenido una menor flecha que los pasivos, por lo tanto, para la misma carga se asegura un patrón de fisuración menor mediante el uso de esta tecnología.

Para futuras investigaciones, se está analizando el comportamiento de estos forjados en estado límite último (ELU) mediante la correlación de imágenes digital (DIC por sus siglas en inglés) con las fotografías tomadas por las cámaras durante el ensayo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación forma parte del proyecto RTI2018-099091-B-C22 titulado "Continuidad de forjados de placa alveolar mediante aleaciones con memoria de forma para mejorar la sostenibilidad y seguridad de las infraestructuras prefabricadas de hormigón" cofinanciado por la Agencia Estatal de Investigación [Ministerio de Ciencia e Innovación] y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional [FEDER]. Los autores desean agradecer al Govern de les Illes Balears por la beca FPI-CAIB que concedieron a la primera autora, a la empresa Re-fer AG Strengthening Solution Company por suministrar las barras corrugadas de Fe-SMA, a la empresa de Pastor S.A por fabricar los especímenes y finalmente al laboratorio Labartec S.L donde se llevaron a cabo los ensayos.

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

Fe-SMA	Aleación con memoria de forma en base hierro
HSC	Placa alveolar
CC	Capa de compresión

REFERENCIAS

- A. Cladera, B. Weber, C. Leinenbach, C. Czaderski, M. Shahverdi, and M. Motavalli, "Iron- based shape memory alloys for civil engineering structures: An overview," *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 281-293, Jul. 2014, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.032.
- C. Czaderski, M. Shahverdi, and J. Michels, "Iron based shape memory alloys as shear reinforcement for bridge girders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 274, no. xxxx, p. 121793, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121793.
- Z. Dong, U. E. Klotz, C. Leinenbach, A. Bergamini, C. Czaderski, and M. Motavalli, "A novel Fe-Mn-Si shape memory alloy with improved shape recovery properties by VC precipitation," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 11, no. 1-2, pp. 40-44, Jan. 2009, doi: 10.1002/adem.200800312.
- B. Mas, A. Cladera, and C. Ribas, "Fundamentos y aplicaciones piloto de las aleaciones con memoria de forma para su utilización en ingeniería estructural," *Hormigón y Acero*, vol. 67, no. 280, pp. 309-323, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.HYA.2016.02.007.
- R. E.-H. J. Michels, M. Shahverdi, C. Czaderski, "Mechanical Performance of Iron-Based Shape-Memory Alloy Ribbed Bars for Concrete Prestressing," *ACI Mater. J.*, pp. 877-886, 2018.
- J. A. Payeras Vallespir, "Guia per l'execució de forjats amb placa alveolar pretensada."
- B. Schranz, C. Czaderski, M. Shahverdi, J. Michels, T. Vogel, and M. Motavalli, "Ribbed iron-based shape memory alloy bars for pre-stressed strengthening applications," *IABSE Symp. Guimaraes 2019 Towar. a Resilient Built Environ. Risk Asset Manag. - Rep.*, no. April, pp. 1394-1401, 2019, doi: 10.2749/guimaraes.2019.1394.
- B. Schranz, J. Michels, C. Czaderski, M. Motavalli, T. Vogel, and M. Shahverdi, "Strengthening and prestressing of bridge decks with ribbed iron-based shape memory alloy bars," *Eng. Struct.*, vol. 241, p. 112467, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112467.
- O. Guerra-Santin and C. A. Tweed, "In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods," *Energy Build.*, vol. 93, pp. 189-207, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.042.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.