

# Análisis numérico de continuidad activa para forjados prefabricados de hormigón mediante el uso de aleaciones con memoria de forma en base hierro

*Numerical analysis of active continuity for precast concrete floors by using iron-based shape memory alloys*

Sandra del Río<sup>a</sup>, Carlos Ribas<sup>b</sup>, Antoni Cladera<sup>c</sup>, Joaquín Ruiz<sup>d</sup>, Luis Montoya<sup>e</sup>

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

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

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

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

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

## RESUMEN

A lo largo de los últimos años se han empezado a comercializar aleaciones con memoria de forma en base hierro (Fe-SMA de sus siglas en inglés) dirigidas al sector de la construcción. En esta investigación se evalúa el uso de Fe-SMA en forma de barras corrugadas para el pretensado a negativo de continuidad de forjados de hormigón prefabricado, atendiendo al caso particular de forjados de placa alveolar. En la presente comunicación se exponen los resultados de los análisis de forjados de placa alveolar con capa de compresión y sin capa de compresión, se cuantifica la capacidad de mejora gracias al pretensado a negativo frente a los diferentes estados límites sentando las bases para una futura campaña experimental.

## ABSTRACT

Over the last few years, iron-based shape memory alloys (Fe-SMA) have been commercialized for the construction sector. In this research, the use of Fe-SMA rebars for the prestressed continuity of precast concrete structural floors is evaluated taking into account the particular case of hollow core slabs (HCS). In the present communication, it is presented the results of the analysis of HSC with concrete topping and without, the capacity for improvement thanks to the prestressing effects in front of the different limit states is quantified, laying the foundation for a future experimental campaign.

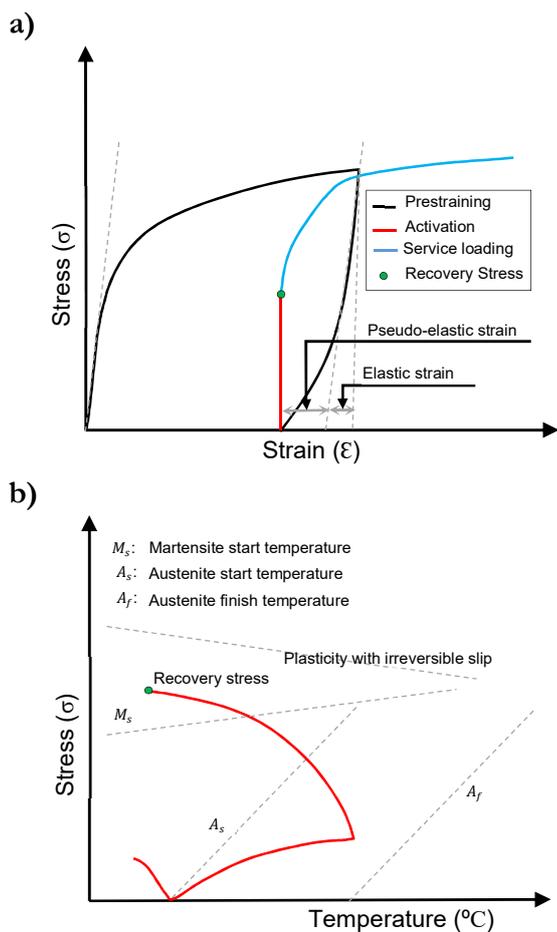
**PALABRAS CLAVE:** hormigón prefabricado, placa alveolar, cortante, SMA, forjados.

**KEYWORDS:** precast concrete, hollow core slab, shear, SMA, structural floor.

## 1. Introducción

Las aleaciones con memoria de forma en base hierro (Fe-SMA de sus siglas en inglés) son una realidad práctica para el refuerzo pretensado estructural en Suiza, con más de una quincena de realizaciones durante los 2 últimos años [1–3]. Sin embargo, son prácticamente desconocidas

en el sector de la construcción civil o de edificios en el resto del mundo. Las Fe-SMA pueden ser utilizadas como pretensado, y actualmente se comercializan en diferentes formatos, entre ellos el de barras corrugadas.



**Figura 1. Ilustración del comportamiento de una Fe-SMA. a) Curva tensión-deformación de la imposición y liberación de la tensión de pre-estiramiento (negro), tensión de recuperación (rojo) y carga (azul). b) Ilustración de la activación (generación tensiones de recuperación).**

En la Figura 1 se presenta una síntesis del procedimiento tensión-deformación y su relación con temperatura de la Fe-SMA que permite su uso como pretensado. En ella se puede observar como inicialmente se consigue que la muestra cambie de fase mediante un pre-estiramiento entre el 2 % y el 4 %, como valores óptimos para conseguir mayores tensiones de recuperación (curva negra ascendente de izquierda a derecha en la Figura 1 a). Al liberar a la Fe-SMA en forma de barra corrugada en este caso, de la tracción utilizada para el pre-estiramiento (curva negra descendente de derecha a izquierda en la Figura 1 a), la aleación se puede utilizar como refuerzo auto-pretensable. Para ello, este refuerzo de Fe-SMA deberá ser conectado a la estructura allí donde se

haya proyectado, de forma que se impida su deformación de acortamiento, y deberá ser activado a continuación. La activación del material se realiza a través de un incremento de temperatura, que produce una transformación martensítica inversa. La Fe-SMA durante la activación pretenderá volver a su forma previa (acortándose). Sin embargo, la coacción de ese acortamiento generará un aumento de las tensiones de tracción en el refuerzo (recta roja vertical en la Figura 1 a, y curva roja de calentamiento y enfriamiento de la muestra en la Figura 1 b) hasta la llamada tensión de recuperación (punto verde en la Figura 1) de unos 335 MPa. A partir de la aplicación y activación (pretensado), el refuerzo se comportará según sea solicitado con un comportamiento tensión-deformación como el mostrado en azul en la Figura 1 a. Todo este proceso permite el pretensado de barras (ancladas por adherencia) sin la necesidad de utilizar gatos hidráulicos ni anclajes.

Por otra parte, el uso de estructuras prefabricadas de hormigón tanto para edificios como para estructuras de ingeniería civil ha aumentado considerablemente desde que aparecieron los primeros elementos prefabricados de hormigón en la década de 1940 en España [4], ya sea para la construcción de estructuras completas o parciales. La industria del hormigón prefabricado cubre aproximadamente el 25% del mercado de edificios comerciales y domésticos de varias alturas si se incluyen pórticos, forjados y revestimientos (fachadas) [5]. Además, [6] predice una reducción en el uso de hormigón in situ y un aumento en los sistemas constructivos basados exclusivamente en el hormigón prefabricado.

Las uniones, o juntas, entre elementos prefabricados de hormigón son una de las partes más esenciales de las estructuras prefabricadas de hormigón. De su tipología y rendimiento dependen los diferentes estados límites estructurales, así como la fabricación, el montaje

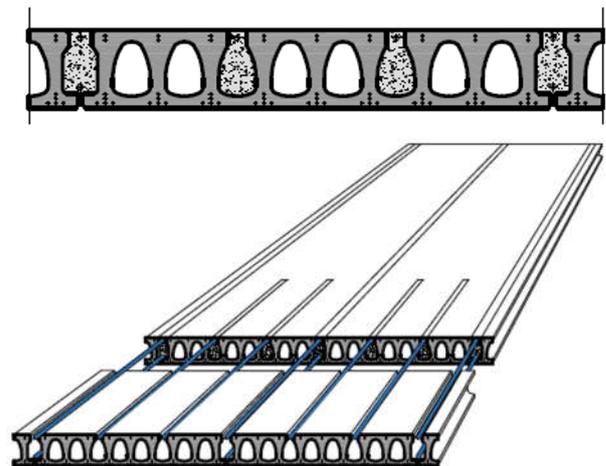
y el mantenimiento de la estructura en su conjunto [7]. Una de las uniones más extendidas en prefabricado es la de la continuidad de placas alveolares (HCS de sus siglas en inglés) de hormigón prefabricado (y pretensado en la mayor parte de los casos). Las HCS se pueden proyectar como parte de un forjado de vanos biarticulados o con continuidad. El diseño con continuidad de estos forjados sobre soportes suele conducir a una mayor resistencia, una menor deformación y una respuesta integral mejorada que supone un ahorro de materiales [8]. En este aspecto es importante reseñar que para forjados de HCS con continuidad actualmente se producen cambios en el comportamiento mecánico y tecnológico a lo largo del propio forjado, ya que para soportar la flexión positiva y sus deformaciones la solución se basa en hormigón pretensado, si bien la flexión negativa y sus deformaciones asociadas se resuelven con hormigón no pretensado.

La continuidad en forjados de HCS se ha estudiado con tipos especiales de refuerzos [9], y con barras CFRP como material de refuerzo a negativo [10], o en situaciones especiales donde la viga de soporte es muy flexible [11,12]. Sin embargo, puesto que el uso de Fe-SMA en la ingeniería estructural aún se encuentra en una etapa muy incipiente en comparación con otros materiales [9], la aplicación de SMA como refuerzo de continuidad activa a momento negativo en elementos prefabricados de hormigón aún no se ha estudiado, según el conocimiento de los autores.

Se han llevado a cabo numerosos estudios sobre la resistencia a cortante de forjados de HCS sin continuidad ([13–18] entre otros), y con y sin capa de compresión. Sin embargo, en la bibliografía técnica los autores no han encontrado estudios sobre la resistencia a cortante en soportes continuos mediante refuerzo convencional o pretensado. Esto puede deberse a la asimilación de la unión a una sección convencional de hormigón armado tal y como se especifica en [19], donde se establece que la

resistencia a cortante en zonas fisuradas (nótese que, actualmente, el refuerzo negativo es acero no pretensado y por tanto se prevé fisuración) debe calcularse utilizando las ecuaciones para la resistencia a cortante de elementos de hormigón armado fisurados del Eurocódigo 2 (EC2).

La presente comunicación pretende analizar las posibles mejoras en el comportamiento de forjados de placa alveolar con continuidad activa gracias al pretensado del refuerzo a negativo en las uniones de los forjados de HCS. Una mejora sustancial, supondría reducir los cantos de los forjados de HCS proyectados en la actualidad. Esta idea de reducir el espesor de los forjados, podría llegar a permitir eliminar la capa de compresión del forjado gracias al uso de Fe-SMA como refuerzo superior activo en los alveolos rellenos de hormigón (ver Figura 2).



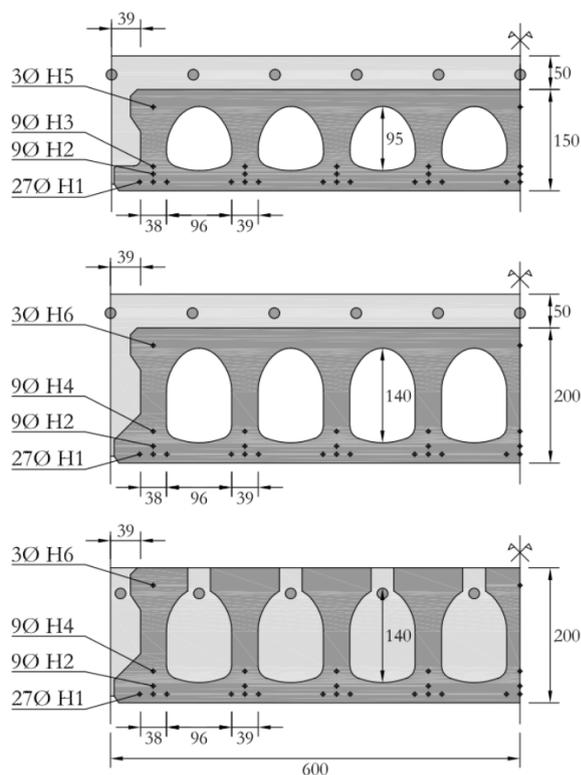
**Figura 2. Sección y perspectiva de solución de continuidad en un forjado de HCS, sin capa de compresión.**

Las especiales características como la posibilidad de pretensado y mayor tensión última de trabajo del Fe-SMA respecto a un acero pasivo convencional, pueden suponer que la aplicación de este nuevo tipo de refuerzo favorezca la reducción del canto de forjado de HCS proyectado. Nótese que estas características podrán favorecer la reducción de flecha gracias al pretensado y la mejora de los ELU gracias al pretensado y a una mayor tensión última de la armadura utilizada, ya que las barras

corrugadas de Fe-SMA presentan elevadas tensiones de rotura comparadas con la armadura pasiva convencional.

## 2. Consideraciones del análisis

Se analiza la posible respuesta de los forjados de placa alveolar de 15+5, 20+0 y 20+5, donde el primer término es el canto de la HSC y el segundo es el canto de la capa de compresión del forjado, ambos en centímetros, para tres posibilidades diferentes: a) forjados sin continuidad, b) forjados de dos vanos con continuidad mediante acero B500S y c) forjados de dos vanos con continuidad mediante Fe-SMA activada. Las características de los forjados estudiados están resumidas en la Figura 3.



Alturas de los diámetros con respecto a la base

H1 = 22.5 mm  
H2 = 42.5 mm  
H3 = 62.5 mm  
H4 = 82.5 mm  
H5 = 122.5 mm  
H6 = 162.5 mm

■  $f_{ck} = 40$  MPa  
■  $f_{ck} = 25$  MPa  
⊕ Y 1860 C (Ø5mm)  
● Ø16 mm Fe-SMA ó B500S

Figura 3. Características de las secciones de los forjados analizados, cotas en mm.

El análisis de los forjados es de carácter no lineal en base a un análisis seccional atendiendo a diagramas momento-curvatura deducidos según los propuestos por Collins y Mitchell en [20]. Además, para los análisis de los forjados con continuidad se utilizan las correcciones de las condiciones de contorno (en los apoyos) en base a análisis iterativos propuestos por Beeby en [21]. Este análisis posibilita que las redistribuciones en los apoyos estén deducidas analíticamente y no se preestablezcan por parte del proyectista, tal y como permiten algunas normas siempre y cuando se compruebe la capacidad de rotación de la sección.

En el análisis se han propuesto unas ecuaciones constitutivas del hormigón, del acero pasivo y del acero activo como las propuestas por Bentz en [22]. Para las ecuaciones constitutivas del refuerzo de Fe-SMA en los forjados con continuidad activa se ha planteado una aproximación del comportamiento tensión deformación de la aleación en base a los estudios realizados sobre la variación del módulo de Young por Yang et al. en el EMPA [23] para la fase de activación, y la experimentación realizada con este tipo de aleación por los autores en [24] para la fase posterior a la activación.

Si se observa la Figura 1ª, por la propia naturaleza del ensayo que coacciona las deformaciones en la fase de activación (línea roja vertical), se desconoce a priori el módulo de elasticidad durante la activación del refuerzo. Sin embargo, recientemente Yang et al. [23], han estudiado la evolución del módulo de Young durante la activación de la muestra interrumpiendo la activación con deformación coaccionada de la muestra y ensayándola a tracción. En la Tabla 1 se muestra la evolución del módulo de Young durante el proceso de activación, nótese que el proceso de activación tiene una fase inicial de calentamiento y otra de enfriamiento hasta la temperatura ambiente.

Para obtener un módulo de elasticidad durante la fase de activación, a falta de más datos

experimentales, se ha optado por hacer una media ponderada de los módulos en donde el peso de cada uno de los valores es el intervalo de temperaturas que representa. Así el módulo medio de deformación para la fase de activación es de 183.05 GPa.

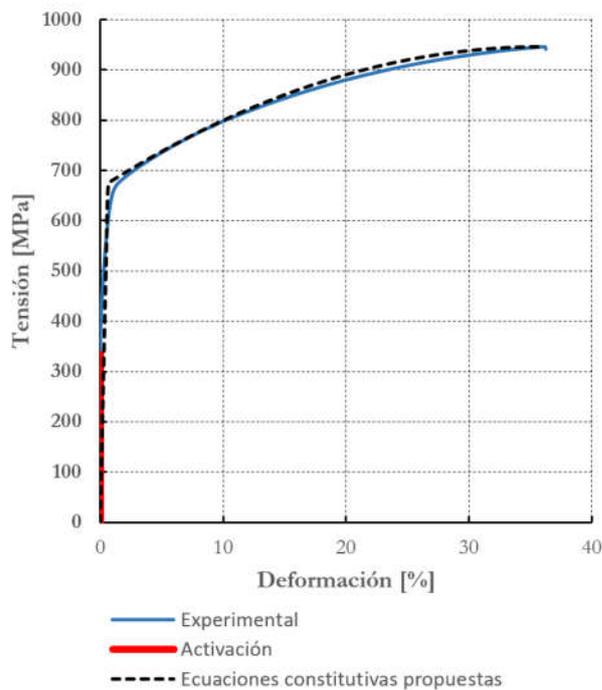
**Tabla 1. Evolución del módulo de Young durante el proceso de activación, Yang et al. [23]**

Sentido incremento temperatura	Temperatura [°C]	E [GPa]	Intervalo [°C]
Ascendente	23	210	13.5
Ascendente	50	239	38.5
Ascendente	100	201	55
Máximo	160	186	60
Descendente	100	155	55
Descendente	50	145	38.5
Descendente	23	133	13.5
<b>E<sub>Ponderado</sub></b>		<b>183.05</b>	

En la Figura 4 se presenta, en rojo la relación tensión-deformación del Fe-SMA durante la activación según el módulo de Young ponderado, y en azul según los datos experimentales obtenidos por los autores en [24]. La diferencia cualitativa con la Figura 1, es que el tramo rojo no es vertical.

La aproximación del comportamiento se ha planteado por simplicidad mediante una recta inicial y una parábola de segundo grado con tangente horizontal en la tensión última, en la Figura 4 se puede comparar la ecuación constitutiva utilizada en el análisis (línea negra discontinua) con la obtenida en los ensayos de caracterización del material (roja y azul). De forma resumida, las ecuaciones constitutivas utilizadas en el análisis suponen un módulo de elasticidad inicial de 107.94 GPa hasta una tensión de 675 MPa (módulo que comprende por tanto, todo el proceso de activación y parte del comportamiento de la aleación una vez activada) y una tensión última de 946 MPa para una deformación del 36%. Esta ampliación del comportamiento del material durante el proceso de activación de lo presentado en la Figura 1 a lo presentado en la Figura 4 es necesaria para poder

tener en cuenta la rigidez del refuerzo en una sección homogeneizada del forjado analizado durante el proceso de activación. Nótese que el módulo 107.94 GPa responde a un módulo de 183.05 GPa durante el proceso de activación (de 0 a 335 MPa) y un módulo de 34 GPa una vez activado (de 335 a 675 MPa).



**Figura 4. Comparación de ecuaciones utilizadas para el análisis con el comportamiento tensión deformación observado en una Fe-SMA en [23] y [24].**

El análisis llevado a cabo compara las sobrecargas uniformes máximas características que se pueden obtener al diseñar los forjados sin continuidad, con continuidad pasiva (mediante refuerzos a negativo de acero B500S) y con continuidad activa (mediante refuerzos a negativo de Fe-SMA), tal y como se muestran en la Figura 5.

Las limitaciones utilizadas para los diferentes análisis son las expuestas por el Código Técnico de Edificación [25] y la instrucción española EHE-08 [26] atendiendo a los estados límites últimos de cortante y flexión y a los estados límites de servicio referidos a apariencia e integridad. En este último aspecto se ha limitado la deformación a la luz del vano dividida entre 300.

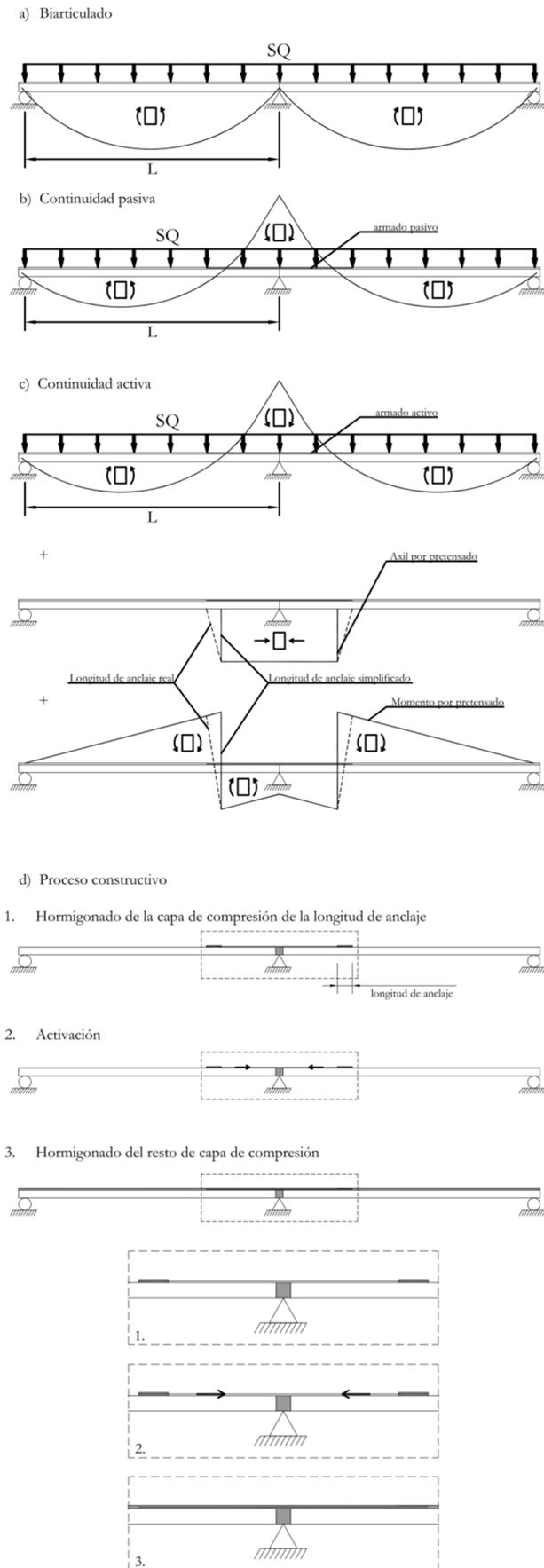


Figura 5. Tipologías de continuidad en el análisis: a) sin continuidad, b) con continuidad pasiva y c) con continuidad activa.

Nótese que en la Figura 5d se presenta el proceso constructivo, que consta de 3 partes fundamentales en relación a la activación (pretensado) del refuerzo Fe-SMA: en la primera se hormigona la zona de anclaje del refuerzo en sus extremos y la entrega entre las placas sobre el soporte intermedio, en la segunda se activa el refuerzo (aplicando calor hasta alcanzar una temperatura de 160 °C) y en la tercera se hormigona el resto de la capa de compresión en caso de existir. Sin embargo, esta longitud de anclaje se ha simplificado en los diagramas de esfuerzos provocados por el pretensado tal y como se muestran en la Figura 5d, considerando el pretensado un axil y momento flector puntual, y no a lo largo de la longitud de anclaje.

A modo de ejemplo en la Figura 6 se muestra el resultado de un análisis de un forjado, en este caso de armadura activa (Fe-SMA) de continuidad. En él se puede observar el diagrama de momentos con redistribución producido por el pretensado (a) y sumándole las cargas gravitatorias (b), las curvaturas asociadas (c) y las deformaciones (d) de uno de los dos vanos (no se ha representado el otro vano al ser simétrico por simplicidad). En este análisis se observa claramente un cambio en las curvaturas la zona a flexión negativa donde la rigidez del forjado es menor por el tipo de refuerzo (aunque también activo con menor rigidez) y el salto de esfuerzos debido al pretensado. Gracias a este tipo de análisis se han identificado las sobrecargas últimas, puesto que se ha ido aumentando la sobrecarga uniformemente distribuida (la más usual en este tipo de forjados) hasta alcanzar alguna de las limitaciones de ELU a flexión o cortante o ELS a integridad o apariencia. Por tanto para una luz de un forjado se ha deducido una sobrecarga característica máxima, este par de magnitudes suponen un punto en las gráficas mostradas en la Figura 7 y la Figura 8, que se comentarán más adelante. La iteración del análisis para diferentes luces y con diferentes condiciones de contorno ha permitido el trazado de la Figura 7 y la Figura 8.

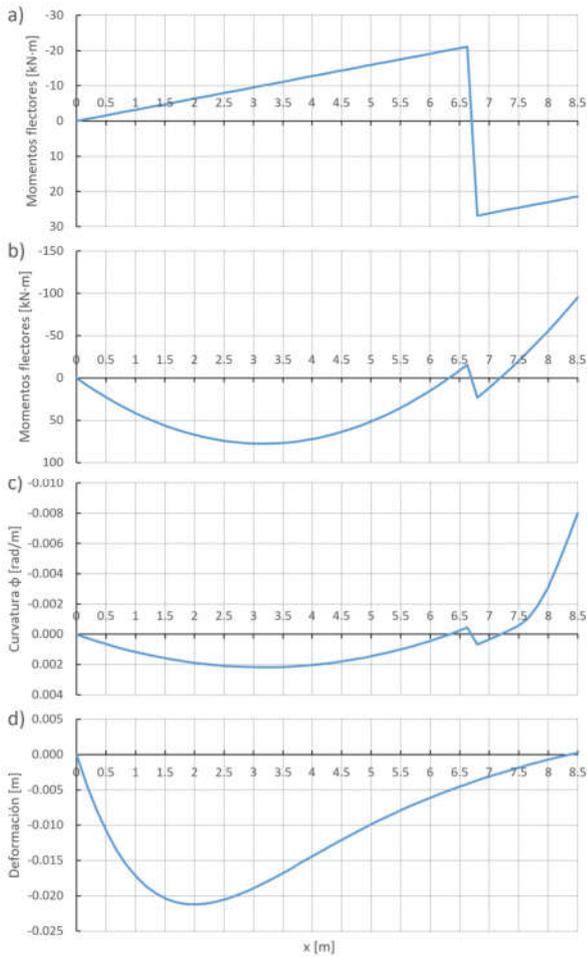


Figura 6. Resultados de un análisis no lineal para el forjado 20+5 con continuidad activa (luz 8.5 m, sobrecarga 5KN/m<sup>2</sup>): a) Diagrama de momentos por pretensado Fe-SMA, b) diagrama de momentos pretensado Fe-SMA + cargas gravitatorias, c) diagrama de curvaturas y d) deformaciones.

### 3. Descripción de los resultados del análisis

Los resultados de los análisis se muestran de forma sintetizada en la Figura 7 y la Figura 8. En la Figura 7 se muestra los límites de sobrecarga para las diferentes longitudes de vanos en las tres configuraciones de continuidad mostradas en la Figura 5 para los tres tipos de forjados estudiados (ver Figura 3). Además, en la Figura 7, se especifica las causas de las limitaciones en cada tramo (cortante  $V^*$ , flexión  $M^*$ , apariencia  $Ap^*$  o integridad  $I^*$ ).

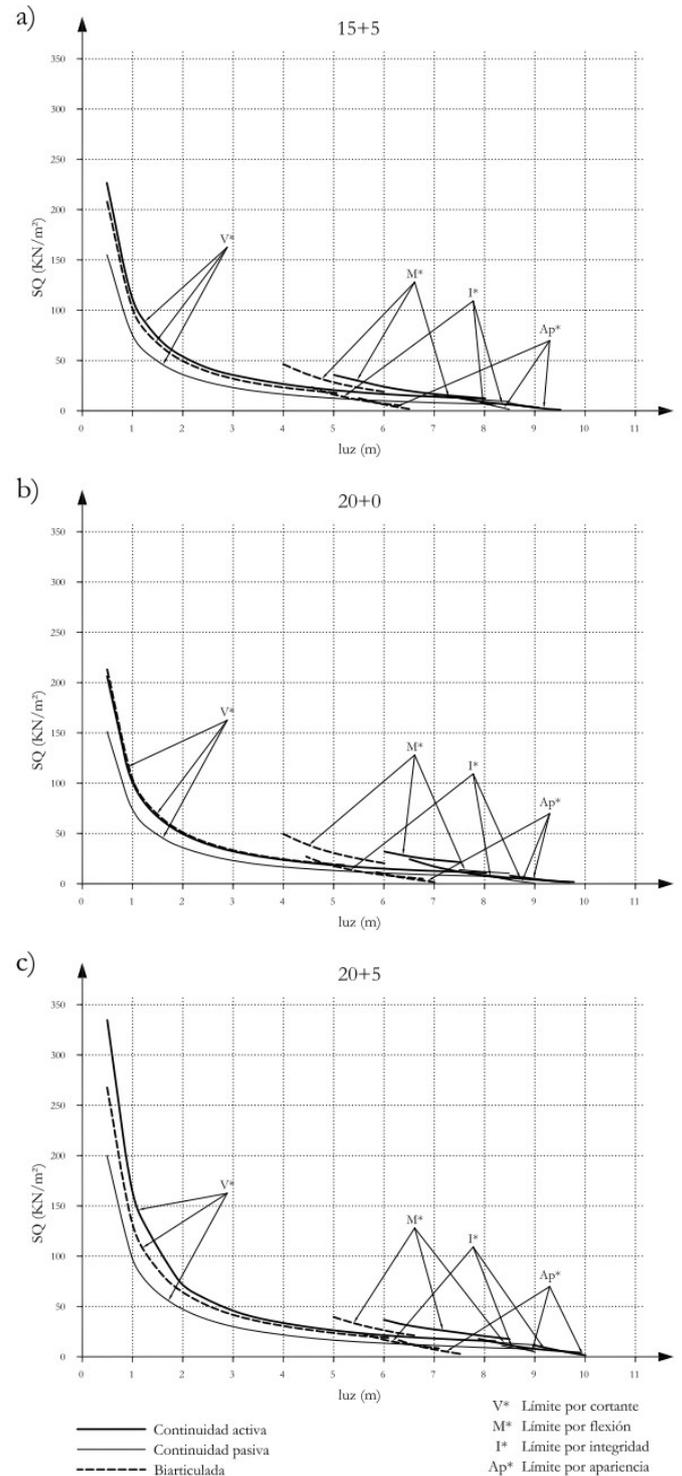
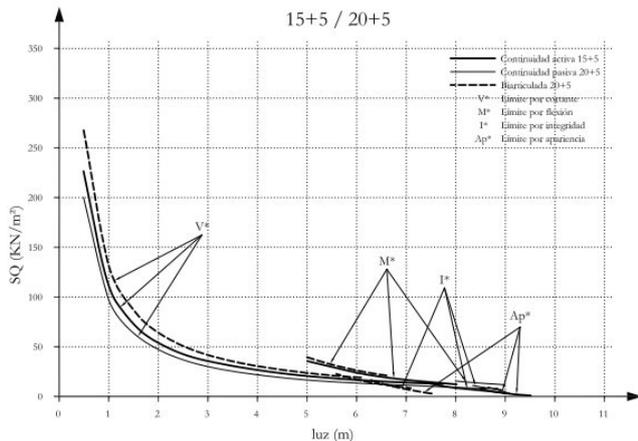


Figura 7. Resultados del análisis para diferentes cantos de forjado: a) 15+5; b) 20+0 y c) 20+5.

En la Figura 8, se muestra los mejores resultados (sobrecargas mayores de diseño) obtenidos para los forjados convencionales (biarticulados y con continuidad pasiva) de un forjado de 20 +5 comparados con los mejores resultados de un forjado de continuidad activa de 15+5.



**Figura 8. Comparativa resultados 15+5 con continuidad activa vs. 20+5 soluciones tradicionales (bi-apoyado o continuidad pasiva).**

#### 4. Discusión

En la Figura 7 se puede observar como la mejora de la resistencia a cortante producida por la continuidad activa, gracias al refuerzo a negativo de Fe-SMA, beneficia el comportamiento con respecto a las soluciones tradicionales (continuidad pasiva y biarticulada). En cualquier caso, es importante también apuntar que en estas relaciones luz-sobrecarga, el valor de la resistencia última a cortante es determinante, por lo que una mejora en la precisión de la predicción de este valor es fundamental para la consecución de un ahorro sustancial en este tipo de forjados.

Además se puede observar que las limitaciones por flexión en este tipo de forjados no hacen modificar en diseño los cantos de los forjados, (ver limitaciones por flexión  $M^*$  en Figura 7, que son menos restrictivas que el resto).

Por otra parte, en la Figura 7 también se puede apreciar que la solución más adecuada para luces mayores con cargas más bajas es la solución de continuidad activa, que se comporta mejor que la continuidad pasiva y ésta a su vez es más adecuada que la solución biarticulada. En este sentido cabe hacer dos reflexiones: la primera es que se debe seguir investigando el

cambio de rigidez que tiene el Fe-SMA durante el proceso de activación de forma experimental que en el presente análisis ha sido simplificado según la Tabla 1, tal y como se ha comentado al presentar la Figura 4, y la segunda es que el efecto favorable del pretensado en cuanto a deformaciones es superior al efecto desfavorable de utilizar un refuerzo (Fe-SMA) de menor rigidez (que la de un acero convencional). En este sentido parece conveniente contrastar experimentalmente los resultados obtenidos mediante el presente análisis.

En la Figura 8 se puede observar como para cargas elevadas, el uso de Fe-SMA como refuerzo activo de continuidad permite bajar un “escalón” (de 20+5 a 15+5) el espesor de la HCS que forma el forjado y por lo tanto del forjado en sí. Esto supone un ingente ahorro tanto en material utilizado como en emisiones. Solo a modo de indicación básica la reducción de 20+5 a 15+5 en el forjado supone un 15% menos de hormigón en el conjunto del forjado (además de sus emisiones asociadas).

#### 5. Conclusiones y propuesta de campaña de ensayos en base al análisis

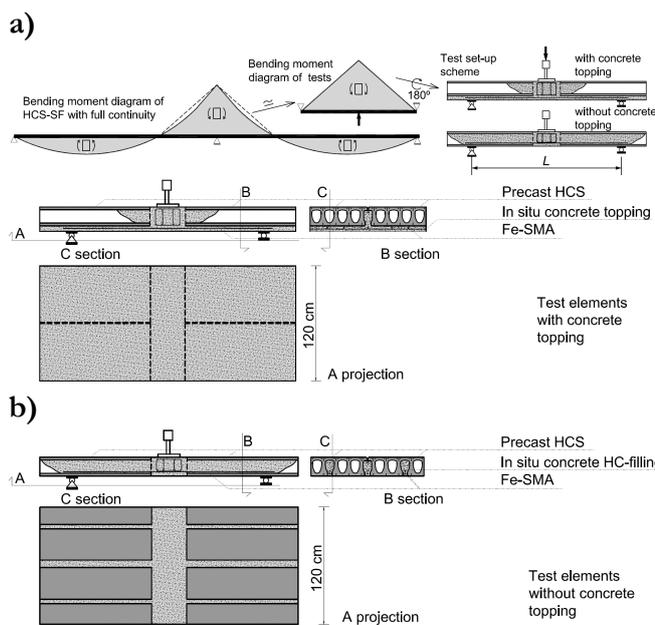
En la presente comunicación se ha analizado la posible mejora del comportamiento de forjados de placa alveolar con armadura activa formada por barras corrugadas de Fe-SMA. Este análisis ha permitido constatar:

- La importancia de la precisión del valor de la resistencia a cortante de cualquier tipo de solución de continuidad en el ahorro del diseño de este tipo de forjados.
- Se produce una mejora en el comportamiento de los forjados de placa alveolar si la continuidad se realiza mediante barras de Fe-SMA activadas, independientemente de si la limitación se

produce por ELU de cortante o ELS relacionado con deformaciones.

- La mencionada mejora permitiría reducir los espesores de los forjados en esa casuística lo que supondría un gran ahorro de material, así como una bajada en las emisiones.

Para verificar la bondad de los resultados obtenidos, se proponen estudios a nivel forjado de la mejora a estados límites últimos y de servicio de la zona de continuidad del forjado. En este sentido, en la Figura 9 se muestran las propuestas de ensayo de los forjados tanto con capa de compresión como sin capa de compresión de forma simplificada, asimilando la zona de momentos negativos a un ensayo de flexión en 3 puntos.



**Figura 9. Propuesta de ensayos del sistema de continuidad de los forjados para evaluar su comportamiento a ELU y ELS: a) con capa de compresión y b) sin capa de compresión.**

### Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al proyecto de investigación financiado por: FEDER/Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades – Agencia Estatal de Investigación/ Proyecto RTI2018-099091-B-C22: *Continuidad de forjados de placa alveolar mediante aleaciones con memoria de forma para mejorar la*

*sostenibilidad y seguridad de las infraestructuras prefabricadas de hormigón.*

Además, los autores desean agradecer la financiación de la actuación por parte de la Agencia Estatal de Investigación (Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades), el Fondo Social Europeo (2014-2020) y de la Iniciativa de Empleo Joven (Programa Operativo de Empleo Juvenil).

### Referencias

- [1] J. Mercier, B. Basile, X. Hallopeau, J. Michels, C. Tourneur, Structural concrete strengthening with Fe-SMA strips: case study with specific control after activation, in: SMAR 2019, in: Fifth Conf. Smart Monit. Assess. Rehabil. Civ. Struct., Zurich, Switz., 2019.
- [2] B. Schranz, J. Michels, M. Shahverdi, C. Czaderski, Strengthening of concrete structures with iron-based shape memory alloy elements: Case studies, in: SMAR 2019, in: Fifth Conf. Smart Monit. Assess. Rehabil. Civ. Struct., Zurich, Switz., 2019.
- [3] re-fer references, last visit 2019-11-14, (2019). <https://www.refer.eu/en/references/>.
- [4] M. Burón Maestro, D. Fernández-Ordoñez Hdez, Evolución de la prefabricación para la edificación en España. Medio siglo de experiencia, Inf. La Construcción. 48 (1997) 19–33.
- [5] K.S. Elliott, Precast concrete structures, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [6] J. de Grujil, J.-P. Schop, European Architectural Barometer Q2 2018 report., [Last Visit. 27/09/2018]. (2018) 10.
- [7] Fédération internationale du béton. Task Group 6.2., Structural connections for precast concrete buildings : guide to good practice, International Federation for Structural Concrete, 2008. <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/structural-connections-for-precast-concrete-buildings-pdf-detail.html> (accessed July 16, 2018).

- [8] K.-H. Tan, L.-X. Zheng, P. Paramasivam, Designing hollow-core slabs for continuity, *PCI J.* Jan-1996 (1996) 10.
- [9] J.C. Mejia, R. Park, Tests on Special Reinforcement for the End Support of Hollow-Core Precast Concrete Floor Units, *PCI J.* 39 (1994) 90–105.
- [10] A. Hosny, ; Ezzeldin, Y. Sayed-Ahmed, ; Amr, A. Abdelrahman, ; Naser, 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, *Can. J. Civ. Eng.* 33 (2006) 138–138. doi:10.1139/106-040.
- [11] J. Hegger, T. Roggendorf, F. Teworte, FE analyses of shear-loaded hollow-core slabs on different supports, *Mag. Concr. Res.* 62 (2010) 531–541. doi:10.1680/mac.2010.62.8.531.
- [12] J. Hegger, T. Roggendorf, N. Kerkeni, Shear capacity of prestressed hollow core slabs in slim floor constructions, *Eng. Struct.* 31 (2009) 551–559. doi:10.1016/j.engstruct.2008.10.006.
- [13] R.J. Becker, D.R. Buettner, Shear Tests of Extruded Hollow-Core Slabs, *PCI J.* 30 (1985) 40–54.
- [14] E. Baran, Effects of cast-in-place concrete topping on flexural response of precast concrete hollow-core slabs, *Eng. Struct.* 98 (2015) 109–117. doi:10.1016/J.ENGSTRUCT.2015.04.017.
- [15] E. Brunesi, D. Bolognini, R. Nascimbene, Evaluation of the shear capacity of precast-prestressed hollow core slabs: numerical and experimental comparisons, *Mater. Struct.* (2014) 1–19. doi:10.1617/s11527-014-0250-6.
- [16] B. Catoia, M.D.A. Ferreira, L.M. Pinheiro, Study of Shear Capacity in Brazilian Prestressed Hollow Core Slabs, *Adv. Mater. Res.* 163-167 (2010) 1213–1216. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.163-167.1213.
- [17] S. Cheng, X. Wang, Impact of interaction between adjacent webs on the shear strength of prestressed concrete hollow-core units., *PCI J.* 55 (2010) 46–63.
- [18] K. Elliott, Transmission length and shear capacity in prestressed concrete hollow core slabs, *Mag. Concr. Res.* 67 (2014). <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.13.00251> (accessed May 18, 2016).
- [19] T. Committee, A. 127, UNE-EN 1168:2006+A3:2012 Productos prefabricados de hormigón. Placas alveolares, AENOR, Madrid, 2012.
- [20] M. P.~Collins, Denis~Mitchell, *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall. Canada Inc., 1991.
- [21] Fédération internationale du béton, *Structural concrete: textbook on behaviour, design and performance*. Second edition. Volume 2. Fib bulletin 52, International Federation for Structural Concrete, 2009.
- [22] E.C. Bentz, Sectional analysis of reinforced concrete members (Doctoral dissertation, University of Toronto), University of Toronto, 2000.
- [23] Y. Yang, M. Breveglieri, M. Shahverdi, Axial stiffness of an Fe-SMA during the activation process, in: *SMAR 2019 - Fifth Conf. Smart Monit. Assess. Rehabil. Civ. Struct.*, 2019.
- [24] L. Montoya Coronado, J.G. Ruiz Pinilla, C.R. Ribas González, A. Cladera Bohigas, Experimental study on shear strengthening of shear critical RC beams using iron-based shape memory alloy strips, *Under Rev.* (2019).
- [25] BOE, ed., *Código Técnico de la Edificación (CTE) Seguridad Estructural*, Madrid, 2006.
- [26] Comisión Permanente del Hormigón, *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.