

Ecuaciones constitutivas para modelización numérica de refuerzos estructurales con aleaciones con memoria de forma en base hierro

Constitutive equations for numerical modeling of structural strengthening with iron-based shape memory alloys

Luis A. Montoya-Coronado^{*,a}, Joaquín G. Ruiz-Pinilla^b, Carlos Ribas^c, Antoni Cladera^d

^a Investigador post-doctoral, Departamento de Física. Universidad de las Islas Baleares, Mallorca, España

^b Profesor Contratado Doctor, Departamento de Física. Universidad de las Islas Baleares, Mallorca, España

^c Profesor Contratado Doctor, Departamento de Física. Universidad de las Islas Baleares, Mallorca, España

^d Catedrático, Departamento de Física. Universidad de las Islas Baleares, Mallorca, España

RESUMEN

Las aleaciones con memoria de forma en base a hierro (Fe-SMA) son económicamente accesibles a día de hoy para su utilización en ingeniería estructural. Una de sus mayores prestaciones es la recuperación de su forma al calentarse a una temperatura predeterminada, al haber sido previamente pre-estiradas. Esto permite crear un efecto de pretensado, o de confinamiento, en caso de usarse como refuerzo externo. Este artículo presenta las ecuaciones constitutivas uniaxiales de las Fe-SMA correspondientes a las distintas fases en la que se puede utilizar. Las curvas tensión-deformación empíricas muestran un claro comportamiento no lineal, que se puede modelizar a partir de la propuesta de Ramberg-Osgood.

ABSTRACT

Iron-based Shape Memory Alloys (Fe-SMA) are today economically accessible to be applied in structural engineering. One of its key properties is the shape recovery capacity after been heated up to a predetermined temperature, after having been pre-strained. This allows to create a prestressing effect, or confinement, in case of being used as external strengthening. This paper presents uniaxial constitutive equations of Fe-SMA that correspond to different phases in which the material could be used. The empirical stress-strain curves show a clear nonlinear behaviour that can be modelled using the equations proposed by Ramberg-Osgood for high nonlinear material.

PALABRAS CLAVE: Ecuaciones constitutivas, aleación con memoria de forma, refuerzo estructural.

KEYWORDS: Constitutive equations, shape memory alloy, structural strengthening.

1. Introducción

Hoy en día existe una gran variedad de aleaciones con memoria de forma, sin embargo, pocas de ellas son comúnmente utilizadas en proyectos de ingeniería estructural, salvo en casos muy particulares, debido a su alto costo de producción. Una excepción son las aleaciones con memoria de forma en base hierro (Fe-SMA,

de sus siglas en inglés), similares a algunos aceros inoxidables, que sí son económicamente accesibles de cara a su uso en obras civiles. Las Fe-SMA tienen como prestación particular tener la capacidad de ser deformadas (o pre-estiradas), conservando una deformación remanente, y son capaces de recuperar su forma inicial hasta en un

1% al ser activadas (calentadas) a una temperatura de 160 °C. Esta prestación se puede traducir en un pretensado si el desplazamiento de sus extremos está restringido en el momento de su intento de recuperación de forma, generando tensiones de recuperación debido a la fuerza que produce al intentar recuperar su forma. Estas tensiones de recuperación, o de pretensado, alcanzan hasta 350 MPa cuando la recuperación de la forma está totalmente impedida.

A pesar de que las Fe-SMA son hoy en día accesibles comercialmente, en forma de barras corrugadas o flejes para su uso en proyectos de ingeniería., el material sigue en estudio. Por otro lado, los elementos de Fe-SMA pueden ser suministrados sin pre-estiramiento (en fase austenita) o pre-estirados (para generar martensita en su interior). A nivel práctico, la compra del material pre-estirado facilita el trabajo en la obra, pero en esta investigación se optó por adquirirlo sin pre-estiramiento para controlar mejor todo el proceso en fase de investigación.

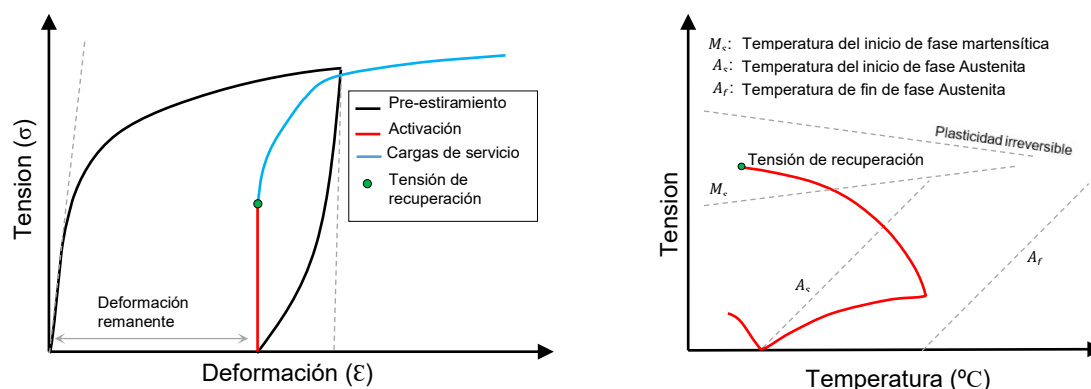
En el trabajo de Montoya-Coronado et. al. [1] se estudian láminas, o flejes, de Fe-SMA de 0.5 mm de espesor con 25 mm y 12.5 mm de ancho para reforzar a cortante vigas de hormigón armado a pequeña escala. A partir de este estudio previo, en este artículo se presentaran una propuesta de ecuaciones constitutivas tomando como base las ecuaciones de Ramberg-Osgood [2] para materiales altamente no lineales.

La mayoría de las ecuaciones de aleaciones con memoria de forma (SMA, por sus siglas en inglés) en general, ya sea como aleaciones de Ni-Ti o Ni-Ti-Nb entre otros, se enfocan para modelar la curva tensión – deformación acoplado el comportamiento termodinámico [3,4]. Otros modelos se enfocan en la superelasticidad en conjunto con un efecto de la alta memoria de forma [5–7]. Existen otras propuestas que plantean un comportamiento con una curva tensión deformación multi-lineal

como en el trabajo de [8] que también considera el comportamiento termodinámico, mecanismos de dislocamiento y transformación de fases de las SMA. El trabajo de Motahari y Ghassemieh [8], en el caso de la Fe-SMA, propone una curva ajustada basada en la caracterización en [9].

La Fe-SMA tiene un comportamiento completamente no lineal y una simplificación lineal de la respuesta de tensión-deformación no define un punto de fluencia explícito que corresponda con el método del punto de fluencia como en aceros al carbón, el llamado "Off-set Method". El comportamiento de respuesta de tensión-deformación suave de materiales no lineales puede representarse analíticamente con diferentes modelos, el más popular se basa en las formulaciones de Ramberg-Osgood o sus extensiones.

El modelo de dos etapas Ramberg-Osgood fue simplificado por Rasmussen [10]. Mientras el trabajo de Mirambell y Real [11] ha propuesto un modelo de dos etapas basado siempre en la expresión de Ramberg-Osgood para la curva de comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable, mientras que en el trabajo de Arrayo et al. [12] se ha estudiado y calibrado los parámetro no lineales de las ecuaciones de Ramberg-Osgood para mejorar la exactitud de la reproducción del comportamiento tensión-deformación del acero inoxidable. A pesar de esto, en la curva de comportamiento tensión-deformación, el grado de redondez, el nivel de endurecimiento por deformación, la deformación en la tensión máxima y la ductilidad en la fractura del Fe-SMA varían de las características de distintos aceros inoxidables. Este artículo analiza la diferentes curvas de comportamiento en diferentes fases de la caracterización del material realizadas en [1] para ajustar los parámetros y proponer, de forma preliminar, ecuaciones constitutivas para el Fe-SMA, que deberán ser reajustadas cuando estén disponibles un número mayor de datos experimentales.



- a. Esquema de diferentes acciones de la aplicación del Fe-SMA para pretensar un elemento estructural. Pre-estiramiento (negro), tensiones de recuperación (rojo) y carga (azul)
- b. Esquema de activación y desarrollo de tensiones de recuperación.

Figura 1. Ilustración esquemática del comportamiento del Fe-SMA.

2. Fundamentos y caracterización del Fe-SMA

El Fe-SMA genera el efecto de pretensado gracias al proceso de la transformación martensítica como se presenta en la Figura 1.a. El proceso implica un pre-estiramiento inicial del material (en negro), para provocar la transformación martensítica inversa por temperatura, generando tensiones de recuperación debido a la deformación impedida del elemento de Fe-SMA (en rojo en la Figura 1). La transformación de martensita a austenita empieza a una temperatura A_s y termina a una temperatura A_f como indica la Figura 1.b, aunque no es preciso alcanzar la última.

Por otro lado, la curva tensión-deformación será diferente en función del estado del material (sin pre-estiramiento, pre-estirado, activado, etc.), por lo que es esencial llevar a cabo la caracterización completa del material en diferentes estados. Se puede consultar más información sobre la caracterización en [1,13].

2.1 Caracterización

Los flejes de Fe-SMA fueron suministrados en bobinas por la empresa re-fer AG. El proceso de fabricación y los detalles de producción se describen en [14], mientras que las recomendaciones para la configuración y protocolos de ensayos se presentan en [15]. Los flejes podían ser suministrados, en el momento de la adquisición, en dos espesores diferentes (0.5 and 1.5 mm) y el fleje de menor espesor (0.5 mm) se usó para la campaña experimental en [1]. La bobina del fleje de Fe-SMA se proporcionó sin pre-estiramiento inicial, como ya se había comentado. Para obtener las propiedades mecánicas de este material se realizaron varios ensayos en una prensa universal Zwick100, equipada con una célula de carga de 100 kN

Las muestras típicas se analizaron con el ancho de la lámina original (50 mm), una longitud libre igual a 150 mm y 15 mm dentro de cada mordaza para sujetar la muestra y evitar el deslizamiento. Sin embargo, como la intención era utilizar flejes como material de refuerzo para vigas a pequeña escala, los flejes originales se cortaron en flejes más estrechos (25 y 12.5 mm).

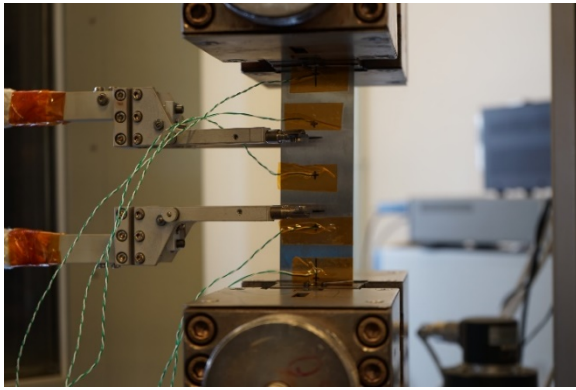


Figura 2. Ensayo de generación de tensiones de recuperación en la Zwick100.

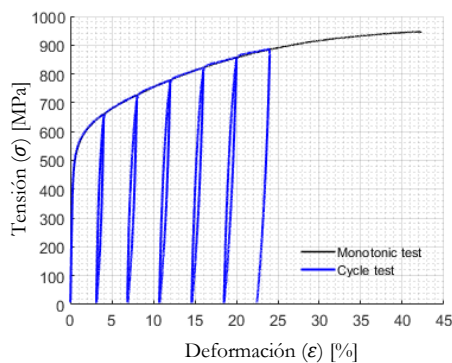


Figura 3. Ensayo monotónico hasta rotura y ensayo semi-cíclico

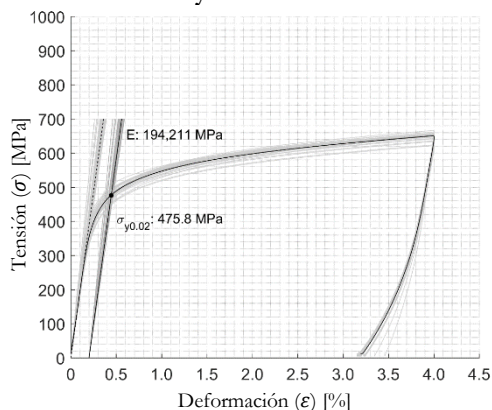


Figura 4. Curva tensión – deformación media para un pre-estiramiento del 4%.

La Figura 2 muestra un ensayo con una longitud de muestra de 75 mm, anchura 25 mm, y longitud medida por el extensómetro de 35 mm.

2.1.1. Ensayos de tracción de muestras en diferentes fases del material

La resistencia última de las láminas de Fe-SMA tal como se proporcionó sin pre-estiramiento inicial fue aproximadamente igual a 950 MPa, lo que correspondía al 45 % de la deformación

(Figura 3) ensayada a una velocidad de desplazamiento de 7.5 mm/min hasta rotura para el ensayo monotónico. Estos resultados son similares a los proporcionados por [13], quienes reportaron tensiones de rotura entre 960 y 1000 MPa y deformaciones últimas del 47 % para una láminas de Fe-SMA de 0.5 mm de espesor.

Se realizaron numerosos ensayos semi-cíclicos (carga y descarga, aprox. 80 ensayos) para pre-estirar las muestras (crear martensita en las láminas). Los resultados arrojaron datos como el módulo de elasticidad medio de aproximadamente de 195,000 MPa (Figura 4) calculado entre 100 y 300 MPa. Luego se calculó el límite elástico (definido como la resistencia correspondiente a una deformación remanente de 0.2 %), que se obtuvo aproximadamente 475 MPa (Figura 4).

Los ensayos semi-cíclicos (Figura 3) muestran una particularidad en el módulo de elasticidad, éste disminuye en cada semi-ciclo. Después de 6 semi-ciclos converge a alrededor de 100,000 MPa teniendo como resultado para cada semi-ciclo en GPa: 160.4, 134.8, 122.0, 106.5, 97.6 y 98.1. Los resultados anteriores correspondieron a la media de tres ensayos en cada caso. Las pruebas de tensiones de recuperación incluyeron tres pasos diferentes (ver Figura 5). Primero, era necesario pre-estirar previamente las láminas, como se ha mostrado también en la Figura 1. En segundo lugar, la muestra pre-estirada se colocó nuevamente en la Zwick100 y se aplicó una precarga inicial de alrededor de 40 MPa. En tercer lugar, la lámina se calentó con un decapador (una pistola de calor) hasta 160 °C y luego se enfrió a temperatura ambiente. Durante los procesos de calentamiento y enfriamiento, se evitó la deformación libre de la muestra forzando a mantener constante el nivel de deformación medido por el extensómetro, y la célula de carga midió la fuerza generada para mantener constante la deformación medida por el extensómetro. Como la muestra quería acortarse debido a la transformación martensítica inversa

cuando se calentó, pero la deformación estaba impedida, la tensión en la muestra aumentó (en azul en la **Figura 5**). El calentamiento y el enfriamiento se midieron mediante cinco termopares colocados en un lado de la muestra a una separación equidistante (ver **Figura 2**), y el calentamiento se realizó con la pistola de calor en el lado opuesto. Los termopares de los extremos se colocaron a 5 mm de distancia de cada mordaza. En los distintos ensayos se obtuvieron tensiones de recuperación de alrededor de 350 MPa. Este valor de las tensiones de recuperación es completamente compatible con las tensiones de recuperación obtenidas en [13], y que para las probetas de 0.5 y 1.5 mm de espesor calentadas hasta 160 °C se obtuvieron tensiones de recuperación entre 303 y 349 MPa. Los autores también obtuvieron tensiones de recuperación de hasta 388 MPa cuando las tiras se calentaron hasta 195 °C, si bien para no dañar el hormigón, y por prudencia ante la falta de estudios, se recomendaba limitar la temperatura a 160 °C. Los ensayos monotónicos también se llevaron a cabo después de los ensayos de generación de tensiones de recuperación (ver **Figura 5**). El módulo de elasticidad tangente después de la generación de tensiones de recuperación fue de 86,000 MPa. Sin embargo, el módulo de elasticidad medido entre 450 y 550 MPa en un ensayo monotónico después de generar tensiones de recuperación fue de 34,000 MPa.

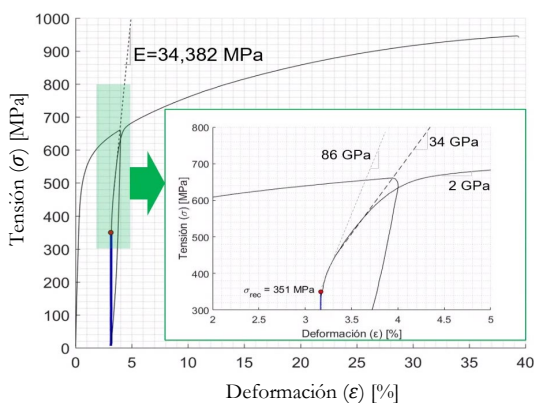


Figura 5. Ensayo de pre-estiramiento, de tensiones de recuperación y monotónico hasta rotura.

3. Propuesta de ecuaciones constitutivas

La implementación numérica en aplicaciones de ingeniería civil generalmente utiliza ecuaciones uniaxiales para modelar los distintos materiales. En este artículo se presentan propuestas de ecuaciones constitutivas: 1) con el material original (sin pre-estirar en este caso); 2) material pre-estirado sin activar; 3) ante un incremento de carga tras la activación de los flejes pre-estirados (tras la generación de las tensiones de recuperación).

Todas las muestras provienen del mismo fabricante de Fe-SMA y se han ensayado en la misma máquina para reducir la dispersión de los resultados experimentales principales como el módulo de Young [E], límite elástico (referido en este artículo siempre como la tensión para una deformación remanente del 0.2 %) y la tensión para una deformación del 0.01 %, tensión última y parámetros no lineales n y m de [2]. Esos parámetros intervienen en expresiones analíticas utilizadas para determinar una curva ajustada en dos rangos para Fe-SMA [12,16].

3.1 Curva tensión-deformación antes del pre-estiramiento

En la caracterización del material en [1] se realizaron múltiples ensayos monotónicos hasta rotura y de pre-estiramiento. A partir de estos ensayos, se pudo reproducir la curva de comportamiento de material a través del modelo de ecuaciones que lo reproduce en dos partes (ver **Figura 6**). La primera parte (Ec. (1)) para representar la rama inicial reproduce desde el origen hasta el límite elástico ($\sigma_{0.2} = 475 \text{ MPa}$).

El módulo de elasticidad medio calculado entre 100 y 300 MPa es $E = 195,000 \text{ MPa}$ donde, el límite elástico se determinó a partir del “off set method” en donde se interseca la pendiente E con la curva de comportamiento desplazada en el origen 0.2% en la deformación obteniendo el límite elástico que corresponde a

una de deformación ($\varepsilon_{0.2} = 0.45\%$). De la misma manera, se obtiene la tensión correspondiente a la deformación remanente del 0.01% y se obtiene que $\sigma_{0.01} = 320 \text{ MPa}$. La segunda parte de la Ec. (2) representada por “rama plástica” cambia su eje de referencias a $\sigma^* - \varepsilon^*$, donde se obtiene la pendiente tangente (E_2) y reproduce partir desde ese nuevo origen hasta la deformación última. Este nuevo sistema de referencia viene dado por $\sigma^* = \sigma - \sigma_{0.2}$ y $\varepsilon^* = \varepsilon - \varepsilon_{0.2}$ representando por la (Ec. (2)).

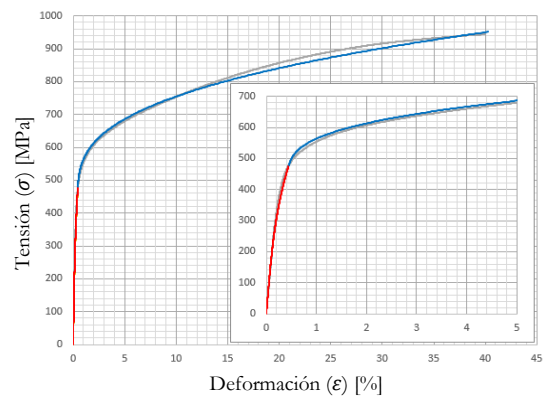
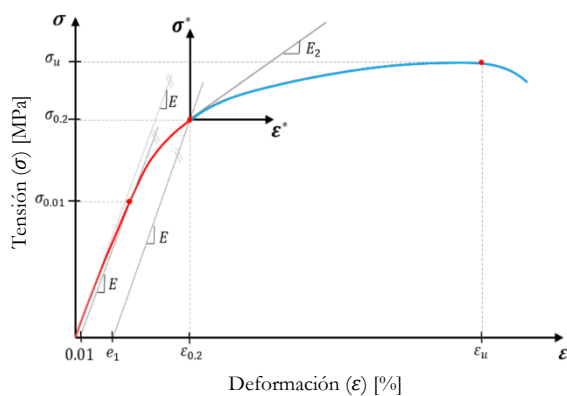
$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + e_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^{n_1} & \text{if } \sigma < \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_2} + \left(\varepsilon_u - \varepsilon_{0.2} + \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_2} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^{m_1} + \varepsilon_{0.2} & \text{if } \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases} \quad (1)$$

$$n_1 = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)} \quad (3)$$

$$m_1 = 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_u} \right) \quad (4)$$

$$E_2 = \frac{E}{1 + e_1 \cdot n_1 \cdot \left(\frac{E}{\sigma_{0.2}} \right)} \quad (5)$$

$$e_1 = \varepsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{0.2}}{E} \quad (6)$$



a. Curva típica de tensión - deformación de un Fe-SMA con la definición de sus parámetros claves b. Comparación de un ensayo monotónico después de haber sido pre-estirado con la curva del modelo de ecuaciones propuesto

Figura 6. Curva típica de tensión – deformación de un Fe-SMA con la definición de sus parámetros claves.

La tensión última $\sigma_u = 950 \text{ MPa}$ correspondiente a la deformación última ($\varepsilon_u = 40\%$) son los valores típicos para la segunda rama de la ecuación. Se establecen dos parámetros no lineales para la primera y segunda rama n_1 y m_1 , respectivamente. En este trabajo se introduce α en la ecuación no lineal m (Ec. (4)) que se ajusta para el valor de $\alpha = 3.5$ mientras que la deformación remanente del 0.2% (e_1) puede ser encontrada por la Ec (6).

3.2 Curva tensión-deformación tras la generación de tensiones de recuperación

El efecto de memoria de forma se implementa como un material auto-pretensado, en otros términos, aplicar la tensión de recuperación (σ_{rec}) igual a 350 MPa con la activación (calentamiento) como se muestra en la **Figura 7**, que se da para un intento de recuperación de la forma cuando sus extremos están fijos. Este fenómeno se consigue para un pre-estiramiento previo del 4% de su longitud original, siendo este porcentaje un pre-estiramiento óptimo de la lámina con 0.5 mm de espesor. Esta propuesta de ecuación en dos

$$\varepsilon = \begin{cases} \left(\frac{\sigma - \sigma_{rec}}{E_{rec}} \right) + e_2 \left(\frac{\sigma - \sigma_{rec}}{\sigma_{rev} - \sigma_{rec}} \right)^{n_2} & \text{if } \sigma_{rec} \leq \sigma < \sigma_{rev} \quad (7) \\ \frac{\sigma_u - \sigma_{rev}}{E_{rec2}} + \left(\varepsilon_u^* - \varepsilon_{rev} - \frac{\sigma_u - \sigma_{rev}}{E_{rec2}} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{rev}}{\sigma - \sigma_{rev}} \right)^{m_2} + \varepsilon_{rev} & \text{if } \sigma > \sigma_{rev} \quad (8) \end{cases}$$

donde,

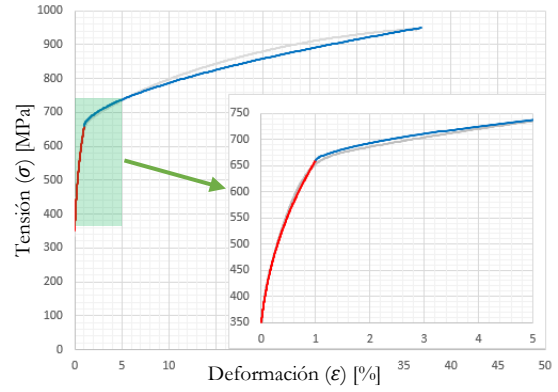
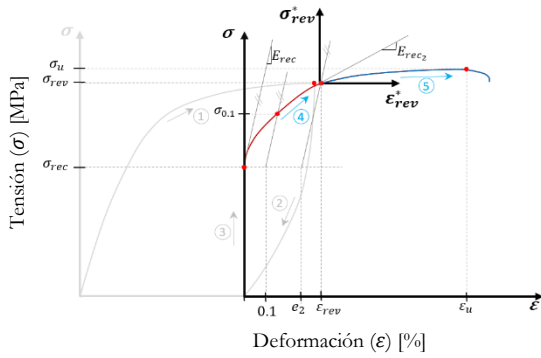
$$n_2 = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{rev}}{\sigma_{0.1rec}}\right)} \quad (9)$$

$$m_2 = 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{rev}}{\sigma_u} \right) \quad (10)$$

$$E_{rec2} = \frac{E_{rec}}{1 + e_2 \cdot n_2 \cdot \left(\frac{E_{rec}}{\sigma_{rev}} \right)} \quad (11)$$

$$e_2 = \varepsilon_{rev} - \frac{\sigma_{rev} - \sigma_{rec}}{E_{rec}} \quad (12)$$

partes, primero, parte del punto de tensión de recuperación con un módulo $E_{rec} = 86,000 \text{ MPa}$ hasta la tensión de pre-estiramiento ($\sigma_{rev} = 660 \text{ MPa}$) que tiene un deformación de recarga (ε_{rev}) de 1% hasta llegar a σ_{rev} . En este la tensión para una deformación remanente del 0.1% ($\sigma_{0.1rec} = 140 \text{ MPa}$) se ajusta mejor para reproducir la curvatura de la primera rama. En la segunda rama la deformación última real sería entonces $\varepsilon_u^* = \varepsilon_u - \varepsilon_{rem}$, donde ε_{rem} es la deformación remanente del pre-estiramiento que es 3.1%, mientras que la curvatura de la segunda rama dada por el valor de α en la Ec. (10) es 1.



- a. Curva tensión-deformación del Fe-SMA después del pre-estiramiento, obtenido sus tensiones de recuperación y enseguida un ensayo monotónico con sus parámetros claves para la definición de sus ecuaciones.
- b. Comparación de un ensayo monotónico después de obtener las tensiones de recuperación con la curva del modelo de ecuaciones propuesto.

Figura 7. Curva de comportamiento tensión – deformación del Fe-SMA tras la activación.

3.3 Curva tensión-deformación tras el pre-estiramiento inicial

Después del primer ciclo (Figura 8) el módulo de elasticidad es entonces $E_{cy} = 160,000$ MPa. La ecuación (13) en la primera rama contiene el exponencial n_3 que depende de la tensión a la cual fue pre-estirado correspondiente a la deformación de pre-estiramiento, y con una pendiente menor inicial que provoca una deformación remanente del 0.05% ligeramente diferente ($\sigma_{0.05_{cy}} = 240$ MPa).

La segunda rama se caracteriza por tener el mismo camino “plástico” en todas las fases del material. No obstante, se debe trasladar la segunda rama de la curva a otro sistema de coordenada restando a la deformación última la deformación remanente del pre-estiramiento ($\epsilon_{rem} = 3.1\%$) correspondiente a una tensión y deformación de descarga ($\sigma_{rev} = 660$ MPa y $\epsilon_{rev} = 1\%$, respectivamente) así tomar nuevos orígenes de coordenadas. La deformación última real sería entonces $\epsilon_u^* = \epsilon_u - \epsilon_{rem}$ mientras que la curvatura de la segunda rama dada por el valor de α en la Ec. (16) es 1.

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{cy}} + e_3 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{rev}} \right)^{n_3} & \text{if } \sigma < \sigma_{rev} \quad (13) \\ \frac{\sigma - \sigma_{rev}}{E_{cy_2}} + \left(\epsilon_u^* - \epsilon_{rev} - \frac{\sigma_u - \sigma_{rev}}{E_{cy_2}} \right) \left(\frac{\sigma - \sigma_{rev}}{\sigma_u - \sigma_{rev}} \right)^{m_3} + \epsilon_{rev} & \text{if } \sigma > \sigma_{rev} \quad (14) \end{cases}$$

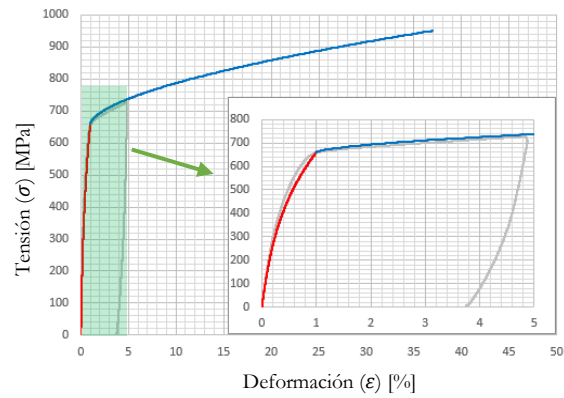
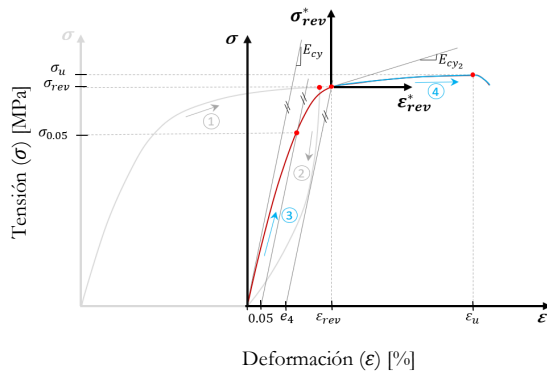
donde,

$$n_3 = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{rev}}{\sigma_{0.05_{cy}}}\right)} \quad (15)$$

$$m_3 = 1 + \alpha \left(\frac{\sigma_{rev}}{\sigma_u} \right) \quad (16)$$

$$E_{cy2} = \frac{E_{cy}}{1 + e_3 \cdot n_3 \cdot \left(\frac{E_{cy}}{\sigma_{rev}}\right)} \quad (17)$$

$$e_3 = \varepsilon_{rev} - \frac{\sigma_{rev}}{E_{cy}} \quad (18)$$



a. Curva tensión-deformación del Fe-SMA después del pre-estiramiento con sus parámetros claves para la definición de sus ecuaciones.

b. Comparación de un ensayo monotónico después de haber sido pre-estirado con la curva del modelo de ecuaciones propuesto.

Figura 8. Curva tensión-deformación del Fe-SMA después de haber sido pre-estirado.

5. Conclusiones

En esta comunicación se ha propuesto un modelo uniaxial de comportamiento de tensión-deformación para cada fase del Fe-SMA que se ajusta satisfactoriamente a las curvas de comportamiento experimental. Estas curvas se basan en la propuesta por Ramberg Osgood para modelos altamente no lineales con las modificaciones de algunos parámetros. En concreto se presentan ecuaciones constitutivas para las siguientes situaciones: 1) con el material original (sin pre-estirar en este caso); 2) material pre-estirado sin activar; 3) ante un incremento de carga tras la activación de los flejes pre-estirados (tras la generación de las tensiones de recuperación). Es necesario mencionar que el trabajo se ha realizado con un único material Fe-SMA, en particular flejes de 0.5 mm de espesor, por lo que es de esperar que estos parámetros se deban recalibrar cuando existan más datos experimentales.

Por último, en las ecuaciones se han realizado cambios en los ejes de referencia de coordenadas en función del caso y de su

tratamiento previo al ser utilizado, para su adecuada utilización con modelos numéricos, donde la medida de deformación empieza en un valor nulo, pero que las ecuaciones explícitamente tienen en cuenta las deformaciones de los estados previos del material.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo de fondos proporcionado por el ministerio de economía y competitividad (MINECO), el ministerio de ciencia, innovación y universidad, y los fondos europeos de desarrollo regional (FEDER) a través de los proyectos BIA2015-6472-C4-3-R y RTI2018-099091-B-C22. Los autores, además, desean agradecer a *re-fer AG Strengthening Solution Company* por el suministro de las láminas de Fe-SMA para la caracterización de los materiales.

Referencias

- [1] 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, *Eng. Struct.* 200 (2019). doi:10.1016/j.engstruct.2019.109680.
- [2] Ramberg W.; Osgood W, Description of stress-strain curves by three parameters, Tech. Note No. 902. Washington, D.C., USA Natl. Advis. Comm. Aeronaut. (1943).
- [3] C. Cisse, W. Zaki, T. Ben Zineb, A review of constitutive models and modeling techniques for shape memory alloys, *Int. J. Plast.* 76 (2016) 244–284. doi:10.1016/j.iijplas.2015.08.006.
- [4] L.C. Brinson, One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloys: Thermomechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 4 (1993) 229–242. doi:10.1177/1045389X9300400213.
- [5] X. Gu, W. Zaki, C. Morin, Z. Moumni, W. Zhang, Time integration and assessment of a model for shape memory alloys considering multiaxial nonproportional loading cases, *Int. J. Solids Struct.* 54 (2015) 82–99. doi:10.1016/j.ijsolstr.2014.11.005.
- [6] M. Panico, L.C. Brinson, A three-dimensional phenomenological model for martensite reorientation in shape memory alloys, *J. Mech. Phys. Solids.* 55 (2007) 2491–2511. doi:10.1016/j.jmps.2007.03.010.
- [7] C. Bouvet, S. Calloch, C. LExcellent, A phenomenological model for pseudoelasticity of shape memory alloys under multiaxial proportional and nonproportional loadings, *Eur. J. Mech. A/Solids.* 23 (2004) 37–61. doi:10.1016/j.euromechsol.2003.09.005.
- [8] S.A. Motahari, M. Ghassemieh, Multilinear one-dimensional shape memory material model for use in structural engineering applications, *Eng. Struct.* 29 (2007) 904–913. doi:10.1016/j.engstruct.2006.06.007.
- [9] S. Abouali, M. Shahverdi, M. Ghassemieh, M. Motavalli, Nonlinear simulation of reinforced concrete beams retrofitted by near-surface mounted iron-based shape memory alloys, *Eng. Struct.* 187 (2019) 133–148. doi:10.1016/j.engstruct.2019.02.060.
- [10] K.J.R. Rasmussen, Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys, *J. Constr. Steel Res.* 59 (2003) 47–61.
- [11] E. Mirambell, E. Real, On the calculation of deflections in structural stainless steel beams: An experimental and numerical investigation, *J. Constr. Steel Res.* 54 (2000) 109–133. doi:10.1016/S0143-974X(99)00051-6.
- [12] I. Arrayago, E. Real, L. Gardner, Description of stress-strain curves for stainless steel alloys, *Mater. Des.* 87 (2015) 540–552. doi:10.1016/j.matdes.2015.08.001.
- [13] M. Shahverdi, J. Michels, C. Czaderski, M. Motavalli, Iron-based shape memory alloy strips for strengthening RC members: Material behavior and characterization, *Constr. Build. Mater.* 173 (2018) 586–599. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057.
- [14] C. Czaderski, M. Shahverdi, R. Brönnimann, C. Leinenbach, M. Motavalli, Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures, *Constr. Build. Mater.* 56 (2014) 94–105. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.01.069.
- [15] W.J. Lee, B. Weber, C. Leinenbach, Recovery stress formation in a restrained Fe-Mn-Si-based shape memory alloy used for prestressing or mechanical joining, *Constr. Build. Mater.* 95 (2015) 600–610. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.098.
- [16] I. Arrayago, E. Real, E. Mirambell, Constitutive equations for stainless steels: Experimental tests and new proposal, *Res. Appl. Struct. Eng. Mech. Comput. - Proc. 5th Int. Conf. Struct. Eng. Mech. Comput. SEMC 2013.* (2013) 1435–1440.