



ELSEVIER  
www.elsevierciencia.com/hya

Disponible en

ScienceDirect

www.sciencedirect.com

Hormigón y Acero 2016; xxx(xxx):xxx-xxx



www.e-ache.com

# Fundamentos y aplicaciones piloto de las aleaciones con memoria de forma para su utilización en ingeniería estructural

*Fundamentals and pilot experiences of the application of shape memory alloys in structural engineering*

Benito Mas\*, Antoni Cladera y Carlos Ribas

*Departamento de Física, Universitat de les Illes Balears (UIB), Palma de Mallorca, España*

Recibido el 13 de mayo de 2015; aceptado el 22 de febrero de 2016

## Resumen

La investigación sobre posibles aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma (AMF) en ingeniería estructural ha ganado un enorme interés en los últimos años. Las propiedades de interés para la ingeniería estructural son el efecto memoria de forma, la superelasticidad y la capacidad de amortiguación, fruto todas ellas de la transformación martensítica. La primera se refiere al fenómeno por el que las AMF son capaces de regresar a una forma predefinida tras su calentamiento. La superelasticidad es la capacidad de experimentar elevadas deformaciones inelásticas y recuperar la forma original tras la descarga. La capacidad de amortiguación permite el diseño de mecanismos para reducir movimientos o vibraciones en estructuras. A continuación se presentan los fundamentos de la transformación martensítica, destacando los aspectos de interés para la ingeniería estructural, así como algunas aplicaciones piloto para entender su comportamiento.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

*Palabras clave:* Aleación con memoria de forma; Superelasticidad; Amortiguación; Ductilidad; Refuerzo

## Abstract

Research applications of shape memory alloys (SMA) in structural engineering have gained interest in the last few years. Their outstanding properties for structural engineering are the shape memory effect, the super-elasticity, and the damping capacity, all of them due to the martensitic transformation. The former is the phenomenon by which SMAs are able to return to their original predefined shape upon heating. Super-elasticity is the ability to show high inelastic deformations and to return to their original shape during a mechanical unload cycle. The damping capacity allows the design of devices to reduce movements or vibrations in structures. In this paper, the physics fundamentals of the martensitic transformation and some pilot applications are presented, highlighting the more interesting topics for structural engineering.

© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

*Keywords:* Shape memory alloy; Super-elasticity; Damping; Ductility; Strengthening

## 1. Introducción

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) son materiales excepcionales que tienen la capacidad de alcanzar grandes deformaciones y regresar a una forma definida previamente al

descargar o al calentarlas [1], ya sea mediante una aportación directa de calor o mediante la creación de un circuito eléctrico gracias al efecto Joule. Estas características diferenciadoras de las AMF hacen de ellas materiales únicos capaces de ser utilizados en estructuras que respondan y se adapten a los cambios del entorno. Sin embargo, la propiedad más característica de estos materiales es que la respuesta al estímulo es pronunciada y abrupta [2], al contrario de lo que pasa con la mayoría de los materiales convencionales, que presentan respuestas

\* Autor para correspondencia.

Correos electrónicos: [benito.mas@uib.es](mailto:benito.mas@uib.es), [benito.mas@gmail.com](mailto:benito.mas@gmail.com)  
(B. Mas).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2016.02.007>

0439-5689/© 2016 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

proporcionales al estímulo. Además, esta respuesta solo se da para ciertos valores concretos del estímulo, permitiendo largos periodos de inactividad. Por ejemplo, una AMF puede experimentar un cambio de forma repentino a una temperatura determinada gracias a la transformación martensítica, en comparación con la dilatación/contracción térmica que es proporcional a la temperatura. Por estos motivos, las AMF son ya utilizadas de forma habitual en diferentes campos e industrias, como en aviación, equipamiento médico-quirúrgico e implantes [1].

El primer hallazgo de un material con memoria de forma fue documentado por Chang y Read [3], que observaron una transformación de fase reversible en una aleación oro-cadmio. En 1962, Buehler et al. [4] descubrieron el efecto de memoria de forma en una aleación de níquel-titanio (Ni-Ti). Desde entonces empezaron a aparecer diferentes aplicaciones reales de Ni-Ti, y la investigación en este campo de la física de materiales no se ha detenido. De hecho, se han descubierto muy distintas AMF, aunque las aleaciones Ni-Ti, en algunos casos con un tercer componente, son las que ocupan la primera posición en aplicaciones industriales hasta la actualidad. El inconveniente principal actual para la utilización de las AMF en estructuras de ingeniería civil o edificación es su elevado coste. En los últimos años se han conseguido AMF en base Fe [5], especialmente con efecto memoria de forma, hecho que sin lugar a dudas contribuirá a disminuir el coste de estos materiales y a hacerlos mucho más competitivos. Las diferencias a nivel prestacional entre las aleaciones en base Fe y otras aleaciones Ni-Ti se discute en profundidad en [5]. Mediante la utilización de AMF en estructuras de hormigón se podrían conseguir estructuras con tendones que produjeran tensiones solo cuando estas fueran necesarias, permitiendo el proyecto de estructuras más esbeltas y ligeras [6]. Estas estructuras tendrían además capacidad de respuesta activa frente a cargas extraordinarias y la posibilidad de autorrepararse después de sufrir deformaciones excesivas, por ejemplo utilizando la superelasticidad para recentrar una unión o recuperar una deriva excesiva de un pilar de una estructura después de un sismo o el efecto memoria de forma para autopretensarse ante determinadas acciones.

La investigación de las posibles aplicaciones de AMF en hormigón estructural no tiene más límite que la imaginación de los proyectistas o investigadores, si bien encuentra un claro campo de aplicación en la reparación y rehabilitación de estructuras. Frecuentemente es necesario llevar a cabo el refuerzo de estructuras en servicio para adaptar la estructura a solicitaciones más elevadas que las indicadas en las normativas bajo las que fue proyectada, o para resistir acciones no previstas en el proyecto inicial, el sismo en la mayoría de casos. La mayor parte de técnicas actuales de refuerzo de estructuras son de tipo pasivo [7,8], en las que el refuerzo reacciona frente a esfuerzos sobrevenidos tras la ejecución del mismo, mientras que los refuerzos activos requieren generalmente tecnologías de pretensado [9], que en determinados casos son de compleja ejecución por falta de espacio para los anclajes o para su correcta ejecución. La utilización de las AMF permitiría ejecutar refuerzos activos solventando los inconvenientes citados.

En la bibliografía técnica se pueden encontrar algunos estados del conocimiento relativos a la aplicación de las AMF a

estructuras de ingeniería civil y otras áreas de la ingeniería [10–16], si bien este artículo se centrará en los fundamentos necesarios para comprender las características esenciales que permiten aplicar estas aleaciones, especialmente las Ni-Ti, a la ingeniería estructural. Además, para ilustrar su aplicación práctica se expondrán algunas aplicaciones piloto muy recientes que se pueden encontrar en la literatura científico-técnica, así como la experiencia propia de la Universidad de las Islas Baleares (UIB), centrada en conseguir una alta ductilidad en la rotura por cortante de estructuras de hormigón.

## 2. La transformación martensítica

Las propiedades clave de las AMF para su aplicación en ingeniería de estructuras son 3: el efecto memoria de forma, la superelasticidad y la capacidad de amortiguación. El efecto memoria de forma se refiere al fenómeno por el que las AMF son capaces de regresar a una forma predefinida tras su calentamiento. La superelasticidad es el fenómeno por el que las AMF pueden ser capaces de experimentar elevadas deformaciones inelásticas y, pese a ellas, volver a la forma original en el momento de descargar. La tercera propiedad, muy relacionada con las 2 anteriores, se debe a la capacidad de convertir energía mecánica en energía térmica y, por tanto, a la posibilidad de reducir movimientos o vibraciones de una estructura al disipar energía. Todas estas propiedades son el resultado de la transformación martensítica, que no es más que la transformación de fase reversible que experimentan las AMF [1].

La transformación martensítica es una transformación de estado sólido displaciva y no difusiva, en que los átomos se mueven cooperativamente, y normalmente va acompañada de esfuerzos de cizalla que deforman la red homogéneamente y que dan lugar a un cambio de estructura cristalina, así como de volumen asociado [2]. El hecho de ser una transformación displaciva y no difusiva implica que la nueva fase se constituye mediante pequeños desplazamientos coordinados de los átomos, donde los desplazamientos de los átomos vecinos son más pequeños que la distancia interatómica original. Es decir, 2 átomos adyacentes continuarán siendo vecinos después de la transformación, y conservarán la composición y el orden atómico de la fase inicial, representado gráficamente en la figura 1a. La figura 1b muestra el efecto en la estructura atómica de la deformación plástica, no siendo esta deformación recuperable, como es el caso de la transformación martensítica. Aunque la variación de la posición relativa de los átomos es muy pequeña, el movimiento coordinado de todos los átomos da lugar a cambios de volumen y puede originar deformaciones macroscópicas importantes. Además, el hecho de que la transformación martensítica no sea difusiva implica que esta se puede obtener de forma casi instantánea a temperaturas bajas, cuando los movimientos difusivos de los átomos son despreciables.

La transformación martensítica puede producirse por cambios de temperatura o por la acción de esfuerzos que generan tensiones, además de por otros efectos que no son relevantes en este artículo, por ejemplo por la variación del campo magnético en el caso de las AMF ferromagnéticas. En el primer caso, la transformación martensítica se desarrolla en un intervalo finito

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/6747407>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/6747407>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)