

Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería

- | Enseñanza de la Ingeniería-CAEDI
- | Gestión de la Educación en Ingeniería
- | Agrimensura, Geodesia y Ciencias de la tierra y el mar
- | Biotecnología y Bioingeniería
- | Materiales y Nanotecnología aplicada a los materiales
- | Desarrollo Tecnológico Social, Vinculación Universidad, Empresa y Estado
- | Ejercicio Profesional de la Ingeniería, Empresas y Servicios
- | Ferroviaria, Automotriz, Naval y Transporte
- | Alimentos y Agroindustria
- | Agronomía y Forestal
- | Energía, Energías Limpias, Energías Renovables y Eficiencia Energética
- | Ingeniería Sostenible, Gestión Ambiental y Cambio Climático
- | Innovación y Emprendedorismo en Ingeniería
- | Mujeres en Ingeniería y Cambio Social
- | Obras y Proyectos de Ingeniería, Infraestructura y Conservación del Patrimonio
- | Tecnología de la Información y Comunicación



Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería : edición 2022 / José Basterra...

[et al.] ; contribuciones de Carolina Orcola ; compilación de Martina Perduca ; prólogo de Nestor Braidot ; Jose Basterra. - 1a ed compendiada. - Corrientes : Universidad de la Cuenca del Plata. Secretaría de Políticas del Conocimiento, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4050-08-3

1. Ingeniería. 2. Educación. I. Basterra, José, prolog. II. Orcola, Carolina, colab. III. Perduca, Martina, comp. IV. Braidot, Nestor, prolog.

CDD 620.007

ISBN 978-987-4050-08-3



Desarrollo de aceros con memoria de forma para refuerzos de hormigón

Vallejos, Juan Manuel ^{a,b}; Esquivel, Isidro ^{b,c,d}; Druker, Ana ^{c,d}; Morel, Claudia ^a; Natalini, Bruno ^{a,b}; Malarría, Jorge ^{b,c,d}

^a Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Nordeste.

^b Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

^c Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario

^d Instituto de Física Rosario – CONICET/UNR

juan.manuel.vallejos@ing.unne.edu.ar

Resumen

Las aleaciones con memoria de forma reciben su nombre debido a su especial comportamiento: al aplicarles una deformación aparentemente plástica estas vuelven de manera reversible a su forma original luego de un calentamiento. Las propiedades de memoria de forma se encuentran directamente relacionadas con una transformación martensítica reversible en el material. Estas aleaciones tienen un enorme potencial para aplicaciones como refuerzos en estructuras civiles, fundamentalmente para la generación de esfuerzos de compresión en estructuras de hormigón y como base para el desarrollo de elementos amortiguadores antisísmico. A pesar de que el país cuenta con una amplia tradición de más de 50 años en el estudio de estas aleaciones, las aplicaciones industriales siguen siendo escasas. En este trabajo se revisan los antecedentes de aplicaciones de aleaciones con memoria de forma como refuerzos de estructuras civiles. Además, se muestran los principales resultados en la temática obtenidos por los grupos de Transformaciones de Fases y Propiedades Mecánicas del Instituto de Física Rosario y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste.

Abstract

Shape memory alloys are so called due to their special behaviour: when an apparently plastic deformation is applied to them, they return reversibly to their original shape after heating. The shape memory properties are directly related to a reversible martensitic transformation in the material. These alloys have enormous potential for applications such as reinforcements in civil structures, fundamentally for the generation of compression stress in concrete structures and as a basis for the development of anti-seismic damping elements. Although the country has a long tradition of more than 50 years in the study of these alloys, industrial applications are still scarce. In this work, the applications of shape memory alloys as reinforcement of civil structures are reviewed. In addition, the main results in the subject obtained by the groups of Phase Transformations and Mechanical Properties of the Rosario Physics Institute and the Faculty of Engineering of the Northeast National University are shown.

Palabras clave: Aleaciones con memoria de forma, refuerzo de hormigón, materiales inteligentes.

INTRODUCCIÓN

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) reciben su nombre debido a su especial comportamiento termomecánico: al aplicarles una deformación aparentemente plástica, luego de un calentamiento vuelven de manera reversible a su forma original [1]. Las propiedades de memoria de forma se encuentran directamente relacionadas con una transformación martensítica en el material. Esta transformación se distingue por su carácter no difusivo, donde los átomos sufren desplazamientos ordenados de longitud menor a las distancias interatómicas.

Las AMF tienen dos tipos de comportamientos mecánicos, que aparecen como consecuencia de la transformación martensítica: la pseudoelasticidad y el efecto memoria de forma [1]. La primera, también

llamada efecto pseudoelástico, se relaciona con la posibilidad de inducir la transformación martensítica por aplicación de un esfuerzo mecánico cuando el material se encuentra en una fase austenítica de alta temperatura, esto es a una temperatura $T > A_f$. (A_f : Austenite finish, temperatura de finalización de la austenita). Dicha deformación se recupera al retirar la carga y así el material desarrolla una deformación reversible que puede superar en un orden de magnitud la elongación elástica usual de los metales. En cambio, el efecto de memoria de forma está relacionado con la capacidad que tiene un material para recuperar su forma original mediante un calentamiento, luego de haberse deformado reorientando variantes de martensita, a una temperatura $T < M_f$ (M_f : Martensite finish, temperatura de finalización de la martensita).

Estos dos efectos se muestran en las curvas Esfuerzo-Deformación-Temperatura de la Figura 1.

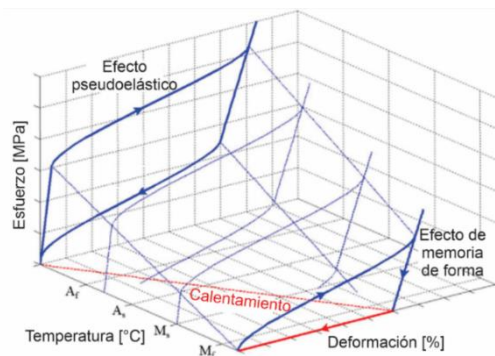


Figura 1: Efectos de memoria de forma y pseudoelástico esquematizados en curvas Esfuerzo-Deformación-Temperatura.

El primer registro de una AMF fue reportado en Au-Cd en el año 1951 [2]. Desde entonces, el desarrollo de AMF y de sus aplicaciones industriales ha aumentado en numerosas áreas, tales como la automotriz, aeroespacial, actuadores y sistemas electromecánicos, robótica, biomédica, así como también en productos de consumo [1]. Aunque las AMF se conocen desde hace décadas, aún no se han utilizado masivamente en la industria de la construcción debido a su alto costo, bajo módulo de elasticidad y el conocimiento limitado del material en la industria de la ingeniería civil [3].

Algunas de las características mecánicas y termodinámicas de las AMF resultan de utilidad desde la perspectiva de la ingeniería estructural. La rigidez variable en las aleaciones con comportamiento pseudoelástico se puede utilizar para proporcionar control de la fuerza y el desplazamiento dentro de los tres regímenes de deformación. A bajas deformaciones ($\epsilon < 1\%$), el módulo elástico de la fase austenita puede usarse para limitar las deformaciones en condiciones de carga de servicio. A deformaciones intermedias ($1\% < \epsilon < 8\%$; es decir, en el plateau pseudoelástico), el bajo módulo elástico se puede usar para limitar la fuerza transmitida a la estructura mientras sufre grandes desplazamientos. A grandes deformaciones ($\epsilon > 8\%$), el módulo elástico de la fase martensita inducida por deformación se puede utilizar para controlar los desplazamientos bajo cargas de terremoto severas. En la descarga, la tensión durante la recuperación pseudoelástica es más baja que durante la carga. Esto implica la disipación de energía debido a esta histéresis en la curva σ - ϵ .

Por otra parte, en las AMF, cuando el material supera un cierto límite de tensión, esta se deforma sin aumento significativo de tensión mediante la reorientación de las variantes de martensita. Cuando la carga es retirada, una deformación aparentemente plástica permanece en

el material. Sin embargo, esta deformación es recuperada mediante un calentamiento al producirse la transformación inversa desde la fase martensita a la fase austenita. Con este mecanismo se logra recuperar la forma original de la pieza. Este efecto puede ser usado para mantener tensionados elementos mecánicos y estructurales, como acoples de tubos y ejes.

DESARROLLO

AMF para tesado de vigas de hormigón

Una de las potenciales aplicaciones de las AMF es la de pretensado de piezas de hormigón. El objetivo que se persigue con la utilización del pretensado es mejorar la resistencia del elemento estructural, introduciendo un esfuerzo de compresión interno que contrarreste en parte el esfuerzo de tracción que producen las cargas debido a que la resistencia a la tracción del hormigón es muy inferior a su resistencia a la compresión. La estructura, considerada globalmente, queda sometida bajo la acción del pretensado, a un sistema de fuerzas nulo. El pretensado desarrolla solamente esfuerzos internos. Se busca que la compresión sobre la pieza en estado de servicio, permita controlar las condiciones de fisuración. Generalmente, este esfuerzo se logra estirando barras de acero de alta resistencia y luego colando el mortero en el encofrado, manteniendo las barras en tracción. Cuando se cortan las barras tensionadas, estas no pueden recuperar la deformación elástica aplicada debido a la restricción que genera la matriz de hormigón, induciendo así esfuerzos de compresión. Otra posibilidad de realizar el tesado del hormigón in situ es utilizando la técnica de postesado, la cual consiste en colocar una vaina de plástico o metal en el encofrado, colar el mortero, y una vez que este fraguó, introducir una barra de acero por la vaina. Esta barra se estira con gatos hidráulicos y mediante anclajes en los extremos se transmite la tensión al elemento estructural. Los procesos de fabricación de elementos pretensados y postesados se esquematiza simplificada en las Figuras 2a y 2b.

Al utilizar AMF, los esfuerzos de compresión en las vigas de hormigón se podrían generar de dos formas distintas. Por un lado, los cables de AMF se someten a una predeformación y luego son dispuestos en el encofrado de tal manera de quedar insertos dentro de la viga al colar el mortero. Al aplicarles un calentamiento posterior mediante la circulación de corriente a través de los alambres y el consecuente calentamiento por efecto Joule, en la AMF se producirá la transformación martensítica inversa. Como la restricción de la matriz impide que éstas recuperen su forma anterior a la predeformación, se generará un esfuerzo de compresión en la matriz de hormigón de la viga. Así, se logrará un estado de cargas favorable para el uso de

este elemento. Un esquema simplificado del proceso se muestra en la Figura 3a. Por otro lado, si los cables o chapas predeformadas de AMF son dispuestas en la base de una viga de hormigón ya colado mediante anclajes mecánicos, al generar un calentamiento en estos, se inducirá la transformación martensítica inversa en la AMF. Como consecuencia de la

restricción de los anclajes mecánicos, los elementos de refuerzo de AMF producirán esfuerzos de compresión en la parte inferior de la viga, la cual sufre los mayores esfuerzos de tracción en servicio al aplicarse un esfuerzo de flexión. Un esquema simplificado de este proceso se muestra en la Figura 3b.

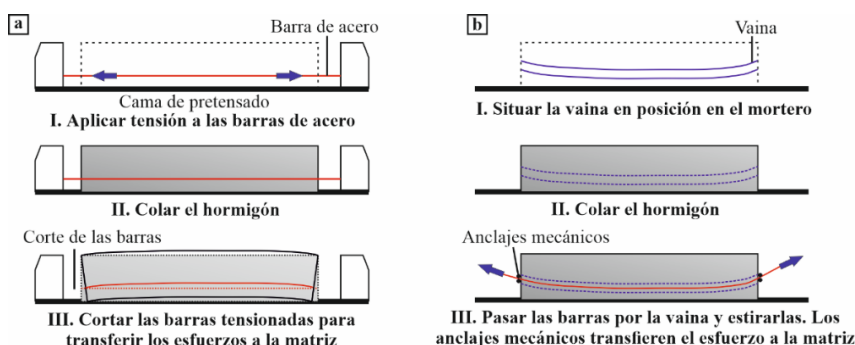


Figura 2. Esquema de los procesos de fabricación de elementos de hormigón: a. pretensados; b. postesados.

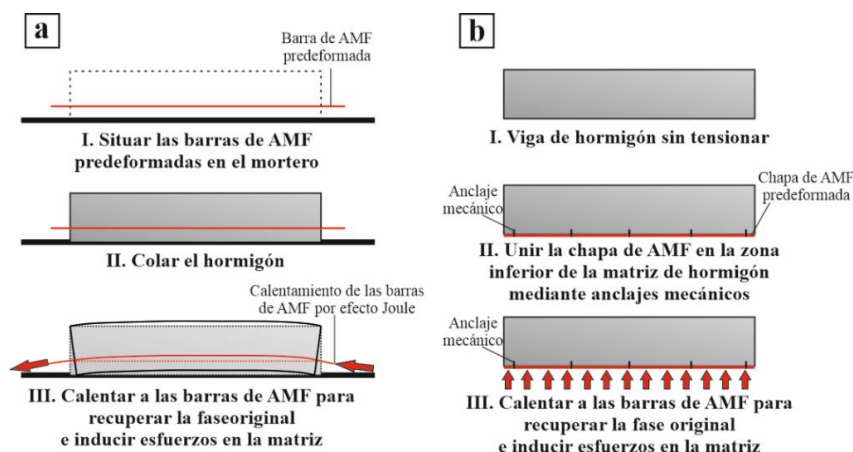


Figura 3. Esquema del proceso de fabricación de vigas de hormigón con AMF: a. pretensado. b. postesado.

Durante los últimos años, el efecto de pretensado de las AMF, fundamentalmente en la familia Fe-Mn-Si, ha cobrado importancia dentro de la comunidad científica internacional. Watanabe y otros [4] reforzaron un modelo reducido de viga de yeso con un alambre predeformado de 1 mm de diámetro de aleación Fe-Mn-Si-Cr-C-. Las muestras se calentaron hasta 250 °C para generar la transformación inversa en el alambre, y como consecuencia de esto, una tensión de compresión en la matriz. Se realizaron ensayos de flexión, las cuales mostraron que los alambres mejoraban la resistencia a la flexión del yeso. Sawaguchi y otros [5] reforzaron pequeños prismas de hormigón con alambres de Fe-Mn-Si-Cr-NbC y las compararon con muestras reforzadas con barras de acero y sin refuerzo. Los morteros con AMF mostraron una resistencia a la flexión significativamente más alta con respecto a las

muestras reforzadas con acero y a las muestras no reforzadas, como se puede observar de la Figura 4.

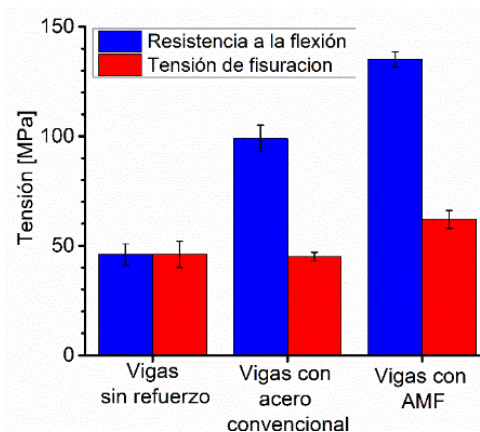


Figura 4. Tensión de fisuración y resistencia a la flexión en vigas de hormigón sin refuerzo, reforzadas con acero convencional y pretensadas con AMF. Recopilado de [5].

Czaderski y otros [6] investigaron la viabilidad de aplicar una AMF de base hierro como refuerzo de vigas montado cerca de la superficie. Los autores obtuvieron esfuerzos de recuperación de hasta 300MPa. Lee y otros [7] y Hong y otros [8] estudiaron el comportamiento de la tensión de recuperación de una AMF Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC para pretensar estructuras de cemento. Los autores realizaron pruebas para diferentes temperaturas de calentamiento y pre-deformaciones iniciales, obteniendo la mayor tensión de recuperación a 400 MPa, para una pre-deformación del 4% y una temperatura de calentamiento de 160 °C. Michels y otros [9] aumentaron significativamente la resistencia a la flexión de piezas de hormigón mediante la técnica de postesado, utilizando láminas de AMF de base Fe fijadas en la superficie. Recientemente, Zhao y otros [10] demostraron la viabilidad de pretensar losas de hormigón utilizando un refuerzo curvo de AMF.

La familia Ni-Ti también fue evaluada como refuerzo para pretensar el hormigón. En este sentido, El-Tawil y Ortega-Rosales [11] usaron cables de Ni-Ti y Ni-Ti-Nb: el primer sistema metálico resultó inadecuado para aplicaciones de pretensado permanente porque todos los esfuerzos de recuperación se perdieron con el descenso de la temperatura hasta ambiente; el segundo sistema demostró ser más apto. Se alcanzaron tensiones de recuperación de entre 156 y 244 MPa. Czerderski y otros [12] utilizaron cables de Ni-Ti de 4 mm de diámetro para reforzar una viga de hormigón de 1.14 m de longitud. Los resultados demostraron que, mediante el uso de AMF como material de refuerzo es posible producir una viga reforzada con rigidez y resistencia variables. Por otra parte, Moser y otros [13] demostraron la factibilidad de pretensar hormigón con fibras cortas de Ni-Ti, en este caso con fibras en forma de estrella. Estos autores obtuvieron unos 7 MPa de tensión de pretensado. Choi y otros [14] mejoraron en un 50% la resistencia a la flexión de vigas pretensadas con fibras cortas de Ni-Ti. Además, las fibras cortas actuaron como elementos inhibidores de propagación de grietas en la matriz de hormigón.

Respuesta antisísmica de las AMF

Si bien una aleación pseudoelástica puede ser mecánicamente reversible, es decir puede recuperar la deformación aplicada completamente, no es reversible desde el punto de vista termodinámico. Debido a que en cada ciclo pseudoelástico la carga del material se produce con una tensión mayor que en la descarga (ver Figura 1), el trabajo mecánico realizado sobre el material no es completamente devuelto al sistema. Así, en cada ciclo el material convierte parte del trabajo mecánico en calor. Este fenómeno puede ser utilizado

para fabricar dispositivos amortiguadores basados en este tipo de materiales, el cual es de particular interés para uso en estructuras civiles con comportamiento antisísmico.

Muchas investigaciones hicieron foco en el estudio de la viabilidad de arriostrar marcos de acero utilizando barras de aleación pseudoelásticas como elementos de autocentrado y disipación de energía mediante pruebas de mesa vibratoria a escala. Un esquema simplificado de un marco de acero arriostrado con barras pseudoelásticas se puede observar en la Figura 5.

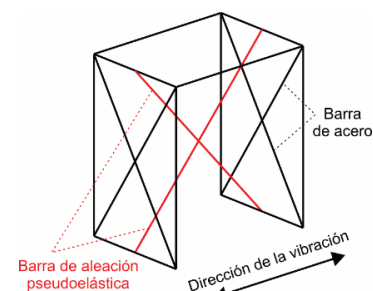


Figura 5. Esquema de un marco de acero arriostrado con barras pseudoelásticas para ensayos de mesa vibratoria.

Han y otros [15] desarrollaron un dispositivo amortiguador fabricado a partir de alambres de Ni-Ti para la reducción de vibraciones en un marco de acero con una altura de 2 m. Los datos experimentales mostraron que la velocidad de caída de la vibración del marco controlado por los amortiguadores de Ni-Ti fue mucho más rápida que la del marco no controlado. Asgardian y Moradi [16] evaluaron numéricamente las respuestas dinámicas de veinticuatro marcos arriostrados de acero con varios números de piso y tipos de arriostramiento con el objetivo de investigar la eficiencia de barras pseudoelásticas en la reducción de la respuesta sísmica de las estructuras. Los resultados mostraron que las aleaciones pseudoelásticas podrían utilizarse eficazmente para el diseño sísmico de estructuras, proporcionando un medio para minimizar las pérdidas asociadas con el daño a los sistemas estructurales durante un terremoto, independientemente de la configuración de la riostra y la altura de la estructura. Araki y otros [17] llevaron a cabo estudios experimentales y analíticos para investigar la viabilidad del uso de barras de Cu-Al-Mn en riostras en estructuras de acero. Se encontró que estos poseen un rendimiento pseudoelástico comparable al Ni-Ti. Soul [18] evaluó las respuestas dinámicas de una estructura aislada protegida con un dispositivo pseudoelástico de base Ni-Ti para entradas de sacudidas compatibles con la zona de mayor sismicidad del mapa de zonas argentino. Los autores observaron que la mayoría de las configuraciones del dispositivo, para las cuales se reducen tanto las

aceleraciones absolutas máximas como los desplazamientos relativos, se encuentran alrededor de la región de 3,2 a 4 m de longitud de cable con una masa asociada de 300 kg.

Han y otros [19] desarrollaron un amortiguador pseudoelástico que puede trabajar simultáneamente en tensión, compresión y torsión. El amortiguador utiliza alambres Ni-Ti que están sujetos a tensiones de tracción para todos los casos de carga. Para verificar la efectividad del amortiguador para distintos esfuerzos, se realizaron estudios analíticos y experimentales en amortiguadores a escala reducida. Dezfuli y Alam [20] desarrollaron cojinetes de caucho inteligentes de alta amortiguación con alambres de dos aleaciones pseudoelásticas: Ni-Ti y FeNiCuAlTaB. Debido al efecto pseudoelástico y la capacidad de recentrado de las aleaciones pseudoelásticas, se redujo la deformación residual en las estructuras. La evaluación del desempeño sísmico de un puente continuo de tres tramos aislado por estos cojinetes inteligentes mostró que el uso de cables pseudoelásticos produciría una alta disipación de energía durante un terremoto.

Casos reales de aplicación de AMF en estructuras

La primera aplicación a escala real que usó el efecto de memoria de forma para el postesado de una estructura de hormigón fue en un puente de carretera en Michigan, Estados Unidos, el cual se muestra en la Figura 6a [21]. Este había sufrido grietas por insuficiente resistencia al corte. Para reforzar la viga del puente, se montaron barras de AMF de Fe-Mn-Si-Cr cruzando las grietas en ambas caras del alma. Cada varilla se calentó con energía eléctrica por efecto Joule hasta alcanzar los 300 °C, lo que resultó en una reducción del ancho de la fisura en un 40%.

En otra aplicación, en la iglesia de San Giorgio en Trignano, Italia, se usaron varios dispositivos de AMF en la restauración del campanario (Figura 6b), que resultó gravemente dañado por un terremoto en 1996 [22]. Los dispositivos de AMF se conectaron con barras de acero en serie dentro del campanario para restringir el movimiento horizontal durante un terremoto. Luego se implementó una aplicación similar para mejorar el desempeño sísmico del campanario de Badia Fiorentina en Italia como forma de prevención de daños por terremoto. El campanario se reforzó con 18 dispositivos de AMF, en el año 2006. La técnica también se aplicó en varios sitios del patrimonio cultural italiano dañados por terremotos para evitar el colapso de las fachadas, como la Basílica de San Francisco de Asís y la iglesia de San Serafino [23]. Para 2008, al menos 19 edificios fueron reforzados con dispositivos de AMF para disipación de energía.

En 2014, se instalaron dieciséis amortiguadores antisísmicos que utilizan la aleación Fe-Mn-Si-Cr-Ni en los pisos primero a cuarto de un rascacielos de 196 metros, "JP Tower Nagoya", que se completó en noviembre de 2015 (Figura 6c) [24]. Las alturas de los pisos del primer al cuarto piso son 6,5 a 7,8 metros, las cuales son mayores que las de los pisos normales, y allí se concentrarán las deformaciones cuando ocurran los terremotos. Al aplicar los nuevos amortiguadores sísmicos de AMF en estos lugares, fue posible lograr un edificio de control de vibraciones de alto grado con márgenes de rendimiento que incluso pueden soportar movimientos sísmicos de larga duración y períodos prolongados y repetidos después de los terremotos.



Figura 6. a. Puente de carretera postesado con AMF, Michigan, Estados Unidos. b. Iglesia San Giorgio en Trignano, Italia, reforzada con dispositivos antisísmicos basados en AMF. c. JP Tower Nagoya, construida con 16 amortiguadores antisísmicos de AMF Fe-Mn-Si-Cr-Ni

Una metodología de reciente desarrollo para reforzar estructuras de hormigón es mediante placas de AMF en las superficies a reparar. La primera aplicación de este método con placas de AMF de 100 mm de ancho y 1,5 mm de espesor tuvo lugar en 2017 en Villigen, Suiza [25]. En este caso, fue necesario un cambio en el sistema estático debido a la eliminación de un muro de mampostería de carga. El aumento de las distancias entre apoyos se cubrió con la introducción de un perfil de acero doble T 180 y 14 placas de AMF de 5,2 m de longitud adicional para cubrir las necesidades de servicio y carga última. El calentamiento resistivo condujo a un pretensado eficaz, mientras que la temperatura fue controlada por termopares instalados en las tiras. Los autores destacan una decena de proyectos exitosos utilizando esta tecnología [25].



Figura 7. Reparación de una losa en un edificio escolar en Nieppe, Lille, Francia, mediante láminas de AMF [25].

Principales resultados del grupo de trabajo

Las AMF de base Fe-Mn-Si comenzaron a ser investigadas por los miembros del grupo de

Transformaciones de Fase y Propiedades Mecánicas del Instituto de Física Rosario (IFIR) en el año 2004 [26]. El grupo ha investigado características microestructurales de las aleaciones Fe-Mn-Si y Fe-Mn-Si-Ni-Cr, enfocando en sus propiedades de memoria de forma y desarrollo de textura favorable a la transformación martensítica en estos materiales [27,28]. Mediante procedimientos de fundición en horno de inducción bajo atmósfera protectora de argón, y colada en moldes de arena, se produjeron aleaciones en condiciones reproducibles a nivel industrial, y con materia prima de calidad comercial. El equipo de trabajo ha ganado experiencia en ensayos de doblado, que anticipan una adecuada conformabilidad, y ha desarrollado un método original para la producción de acoples que se ajustan por temperatura al revertirse la transformación martensítica $\varepsilon \rightarrow \gamma$ [29]. Se estudiaron además los efectos de la deformación severa sobre la textura que facilita la transformación [30]. Un exhaustivo análisis microestructural fue publicado recientemente, en donde se aborda el efecto de las temperaturas de laminación y el recocido sobre las propiedades de memoria de forma de dos nuevas aleaciones Fe-Mn-Si-Cr-Ni [31]. Recientemente, se lograron esfuerzos de compresión de alrededor de 500 MPa con una aleación de base Fe-Mn-Si predeformada luego de un calentamiento hasta 350 °C, como se muestra en el ensayo Tensión-Temperatura mostrado en la Figura 8 [32].

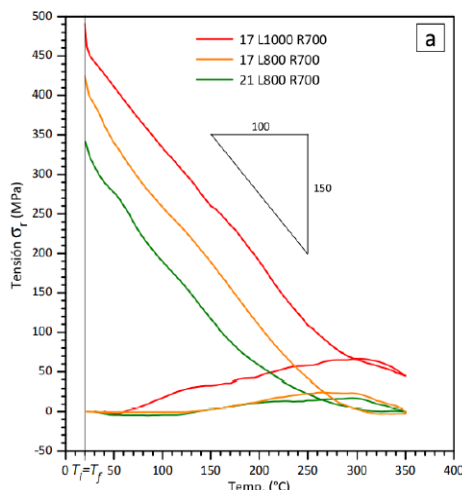


Figura 8. Ensayos Tensión-Temperatura para determinar los esfuerzos de compresión generados en aleaciones de base Fe-Mn-Si luego de un calentamiento hasta los 350 °C [32].

Por otra parte, se logró desarrollar acoples sin costura mediante un novedoso método de extrusión por punzonado en caliente (Figura 9) [33]. Estos acoples mostraron una recuperación de forma del 75 % y una unión de ejes de 21 mm de diámetro de par normalizado de 40 N·m/cm².



Figura 9. Acoples sin costura fabricados por el grupo de trabajo mediante extrusión por punzonado en caliente [33].

Recientemente se ha desarrollado un nuevo grupo dentro de las AMF de base Fe que presenta propiedades termoelásticas: se trata de la aleación Fe-Mn-Al-Ni con muy alto contenido de Mn ($\geq 30\%$). Esta AMF presenta pseudoelasticidad en un amplio rango de temperatura [34]. El abordaje del sistema Fe-Mn-Al-Ni ha producido amplio impacto en la comunidad científica dedicada a las AMF, e involucra un desafío de suma importancia debido a su enorme potencial. Esto se debe a que se trata de una aleación pseudoelástica ferrosa de bajo costo en relación al Ni-Ti, y que no presenta las dificultades de estabilidad de fases y fragilidad de las AMF de base Cu. Además, su elaboración es accesible por procedimientos metalúrgicos convencionales. La aleación presenta un ciclo pseudoelástico reversible de gran alcance ($> 5\%$ recuperable), ductilidad (deformación a fractura $> 8\%$), amplia histéresis (~ 200 MPa), y muy baja dependencia en la tensión de transformación en el rango $-50\text{ °C} - 200\text{ °C}$ [34]. Se sabe que para que se manifieste la pseudoelasticidad debe lograrse un control preciso de la microestructura resultando crítica la introducción de precipitados y el tamaño de grano [34]. Se ha reportado que estructuras monocristalinas o de tipo bambú mejoran la respuesta pseudoelástica del material [34]. Recientemente, se descubrió que el material puede presentar el efecto de memoria de forma bajo condiciones microestructurales específicas, alcanzando esfuerzos de retransformación de 500MPa, ampliando así las potenciales aplicaciones de la aleación [35]. Los resultados obtenidos en la aleación Fe-Mn-Al-Ni por el grupo de trabajo hicieron foco en el desarrollo de técnicas para crecer monocristales y oligocristales, como en análisis del rol de precipitados ordenados ricos en Ni-Al para lograr una pseudoelasticidad 100 % reversible. Se desarrolló la tecnología de crecimiento direccional cíclico, mediante la cual se promueve el crecimiento anormal de granos, ciclando la aleación a través de un fuerte gradiente de temperatura [36]. Se logró así obtener materiales con estructura de granos tipo bambú y cristales de hasta 1 cm de largo (con $4 \times 4\text{ mm}^2$ de sección), los cuales alcanzaron una recuperación pseudoelástica completa y deformaciones pseudoelásticas recuperadas en compresión de hasta 8.4 %, las máximas reportadas en el sistema hasta el momento, como puede observarse en la Figura 10 [37].

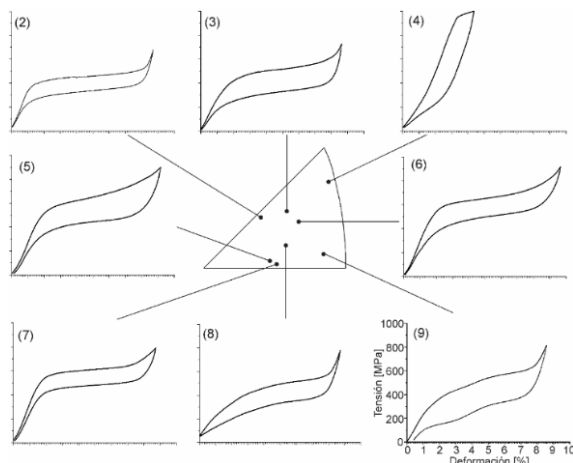


Figura 10. Curvas tensión-deformación de monocristales de Fe-Mn-Al-Ni en función de la orientación cristalográfica.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) tienen un enorme potencial para aplicaciones de refuerzos de estructuras civiles, fundamentalmente para la generación de esfuerzos de compresión y como base para el desarrollo de elemento antisísmico. A pesar de que el país cuenta con una amplia tradición de más de 50 años en el estudio de las AMF, las aplicaciones industriales de estas aleaciones siguen siendo escasas. En este sentido, se ha puesto en marcha una colaboración que se estructura alrededor de la experticia, recursos humanos, infraestructura y equipamiento de dos instituciones que acreditan una trayectoria en docencia, investigación y posgrado de más de 50 años: el Instituto de Estabilidad de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (FI-UNNE) y el grupo de Transformaciones de Fase y Propiedades Mecánicas del Instituto de Física Rosario (IFIR-UNR). La FI-UNNE tiene las capacidades para desarrollar las aplicaciones y los ensayos de los elementos estructurales y el IFIR cuenta con experticia y capacidades para desarrollar y caracterizar las AMF.

El objetivo general de la colaboración es desarrollar elementos estructurales utilizando AMF de base hierro. La investigación propone aprovechar los efectos de memoria de forma de este grupo de aleaciones para mejorar el rendimiento de algunos elementos estructurales utilizados comúnmente en la ingeniería civil, tales como vigas y columnas de hormigón pretensado y postesado. El estudio abarca el uso como refuerzo de dos grupos de AMF ferrosas de alto contenido de manganeso y cuyo desarrollo impacta en distintas áreas de interés actual en la metalurgia y en aplicaciones tecnológicas: la nueva generación de AMF Fe-Mn-Al-Ni, y las aleaciones clásicas de base Fe-Mn-Si. Se propone la obtención y caracterización de

AMF con geometrías adecuadas para su empleo en elementos estructurales y la utilización de los datos obtenidos para el diseño y fabricación de los elementos con refuerzos de AMF, cuyos efectos serán evaluados mediante ensayos de resistencia en una etapa final.

REFERENCIAS

- [1] Otsuka, K.; Wayman, C.M. (1998). *Shape Memory Materials*. University Press. Cambridge.
- [2] Chang, L.C.; Read, T.A. (1951). Martensitic transformation in Au-Cd systems. *Trans. Am. Inst. Met. Eng.*, 189, 47-52.
- [3] Motavalli, M.; Czaderski, C.; Bergamini, A.; Lars J. (2009). Shape memory alloys for civil engineering structures—on the way from vision to reality. *Arch. Eng. Env.*, 4, 81-94.
- [4] Watanabe, Y.; Miyazaki, E.; Okada, H. (2002). Enhanced Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Cr Shape Memory Fiber/Plaster Smart Composite. *Mater. Trans.*, 43, 974-983.
- [5] Sawaguchi, T.; Kikuchi, T.; Ogawa, K.; Kajiwar, S.; Ikeo, Y.; Kojima, M. (2006). Development of Prestressed Concrete Using Fe-Mn-Si-Based Shape Memory Alloys Containing NbC. *Mater. Trans.*, 47, 580-583.
- [6] Czaderski, C.; Shahverdi, M.; Brönnimann, R.; Leinenbach, C.; Motavalli, M. (2014). Feasibility of iron-based shape memory alloy strips for prestressed strengthening of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 56, 94-105.
- [7] Lee, W.J.; Weber, B.; Feltrin, G.; Czaderski, C.; Motavalli, M.; Leinenbach, C. (2013). Stress recovery behaviour of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni-VC shape memory alloy used for prestressing. *Smart Mater. Struct.*, 22, 1-9.
- [8] Hong, K.; Lee, S.; Han, S.; Yeon, Y. (2018). Evaluation of Fe-Based Shape Memory Alloy (Fe-SMA) as Strengthening Material for Reinforced Concrete Structures. *Applied Sciences*, 8(5), 730.
- [9] Michels, J.; Shahverdi, M.; Czaderski, C. (2018). Flexural strengthening of structural concrete with iron-based shape memory alloy strips. *Struct. Concrete*, 2018(19), 876-891.
- [10] Zhao, H.; Andrawes, B. (2020). Innovative prestressing technique using curved shape memory alloy reinforcement. *Cons. B. Mater.*, 238, 117687.
- [11] El-Tawil, S.; Ortega-Rosales, J. (2004). Prestressing concrete using shape memory alloy tendons. *ACI Structural Journal*, 101, 846-851.
- [12] Czaderski, C.; Hahnebach, B.; Motavalli, M. (2006). RC beam with variable stiffness and strength. *Cons. Build. Mater.*, 20(9), 824-833.
- [13] Moser, K.; Bergamini, A.; Christen, R.; Czaderski, C. (2005). Feasibility of concrete prestressed by

- shape memory alloy short fibers. *Mat. & Struct.*, 38, 593-600.
- [14] Choi, E.; Kim, D.J.; Hwang, J.; Kim, W.J. (2016). Prestressing effect of cold-drawn short NiTi SMA fibres in steel reinforced mortar beams. *Smart Mater. Struct.*, 25, 085041.
- [15] Han, Y.; Li, Q.S.; Li, A.; Leung, A.Y.T.; Lin, P. (2003). Structural vibration control by shape memory alloy damper. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 32, 483-494.
- [16] Asgardian, B.; Moradi, S. (2011). Seismic response of steel braced frames with shape memory alloy braces. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 65-74.
- [17] Araki, Y.; Maekawa, N.; Shrestha, K.C.; Yamakawa, M.; Koetaka, Y.; Omori, T.; Kainuma, R. (2014). Feasibility of tension braces using Cu-Al-Mn superelastic alloy bars. *Struct. Control Health Monit.*, 21, 1304-1315.
- [18] Soul, H.; Yawny, A. (2017). Applicability of superelastic materials in seismic protection systems: a parametric study of performance in isolation of structures. *Smart Mater. Struct.*, 26, 085036.
- [19] Han, Y.L.; Xing, D.J.; Xiao, E.T.; Li, A.Q. (2005). NiTi-wire shape memory alloy damper to simultaneously damp tension, compression, and torsion. *J. Vibration & Control*, 11, 1067-1084.
- [20] Dezfili, F.H.; Alam, M.S. (2014). Performance-based assessment and design of FRP-based high damping rubber bearing incorporated with shape memory alloy wires. *Eng. Structures*, 61, 166-183.
- [21] Soroushian P.; Ostowari, K.; Nossoni, A.; Chowdhury, H. (2001). Repair and Strengthening of Concrete Structures Through Application of Corrective Posttensioning Forces with Shape Memory Alloys. *Transp. Res. Rec.*, 1770, 20-26.
- [22] Indirli, M.; Castellano, M.G. (2008). Shape Memory Alloy Devices for the Structural Improvement of Masonry Heritage Structures. *Int. Journal of Architectural Heritage* 2(2), 93-119.
- [23] Benavent-Climent, A. (2008). *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- [24] Sawaguchi, T.; Maruyama, T.; Otsuka, H.; Kushibe, A.; Inoue, Y.; Tsuzaki, A. (2016). Design concept and applications of Fe-Mn-Si-based alloys-from shape-memory to seismic response control. *Materials Transactions*, 57, 283-293.
- [25] Schranz, B.; Michels, J.; Shahverdi, M. y Czaderski, C. (2019). *Proceedings of Int. Conf. on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures*, Potsdam, Alemania.
- [26] Druker, A.V. (2009). Desarrollo de Texturas y Tratamientos Termomecánicos en aleaciones Fe-Mn-Si con Memoria de Forma, Tesis de Doctorado, UNR.
- [27] Druker, A.; Sobrero, C.; Brokmeier, H.-G.; Malarria, J.; Bolmaro, R. (2008). Texture evolution during thermomechanical treatments in Fe-Mn-Si shape memory alloys. *Mat. Sci. Eng. A*, 481-482, 578-81.
- [28] Druker, A.; Baruj, A.; Malarria, J. (2010). Effect of rolling conditions on the structure and shape memory properties of Fe-Mn-Si alloys. *Mater. Charact.*, 61, 603-12.
- [29] Druker, A.; Perotti, A.; Esquivel, I.; Malarria, J. (2014). A manufacturing process for shaft and pipe couplings of Fe-Mn-Si-Ni-Cr shape memory alloys. *Mater. & Design*, 88, 878-888.
- [30] Druker, A.; Baruj, A.; Isola, L.; Fuster, V.; Malarria, J.; Bolmaro, R. (2016). Gaining flexibility in the design of microstructure, texture and shape memory properties of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni alloy by ECAE and annealing. *Mat. & Des.*, 107, 153-162.
- [31] Esquivel, I.; Giordana, M.F.; Druker, A. (2019). Effect of heat treatment on the microstructure and shape memory behaviour of Fe-Mn-Si-Ni-Cr alloys. *Materials Characterization*, 155, 109811.
- [32] Esquivel, I. (2021). Elaboración y caracterización de aleaciones ferrosas con memoria de forma para uso industrial: un proceso de producción de acoples sin costura, Tesis de Doctorado, UNR.
- [33] Esquivel, I.; Malarria, J.; Druker, A. (2021). Design, manufacturing and performance OF Fe-Mn-Si-Ni-Cr shape memory seamless couplings. *Advances in Ind. & Manufac. Eng.*, 3, 100061.
- [34] Omori, T.; Ando, K.; Okano, M.; Xu, X.; Tanaka, Y.; Ohnuma, I.; Kainuma, R.; Ishida, K. (2011). Superelastic effect in polycrystalline ferrous alloys. *Science*, 333, 68-71.
- [35] Vollmer, M.; Bauer, A.; Frenck, J.-M.; Krooß, P.; Wetzel, A.; Middendorf, B.; Fehling, E.; Niendorf, T. (2021). Novel prestressing applications in civil engineering structures enabled by Fe-Mn-Al-Ni shape memory alloys. *Eng. Struct.*, 241, 112430.
- [36] Vallejos, J.M.; Malarria, J. (2020). Growing Fe-Mn-Al-Ni single crystals by combining directional annealing and thermal cycling. *J. Mat Proc Tech*, 275, 116317.
- [37] Vallejos, J.M.; Giordana, M.F.; Sobrero, C.; Malarria, J. (2020). Excellent pseudoelasticity of Al-rich Fe-33Mn-17Al-6Ni-0.15C (at%) shape memory single crystals obtained without an aging conditioning stage. *Scr Mater*, 179, 25-29.