

## **Aleaciones con memoria de forma para refuerzos de hormigón**

Vallejos, Juan Manuel; Morel, Claudia; Natalini, Bruno; Malarría, Jorge  
Ing. Electromec./Dr. Ing.; Ing. Civil/ Mgter. Ing.; Ing. Mecánico/PhD; Lic. Física/Dr. Física  
Universidad Nacional del Nordeste – Instituto de Física Rosario/FCEIA-UNR  
[juan.manuel.vallejos@ing.unne.edu.ar](mailto:juan.manuel.vallejos@ing.unne.edu.ar)

### **RESUMEN**

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) 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. Una de las potenciales aplicaciones de las AMF que resultan más interesantes es la de pretensado de piezas de hormigón. Para esto, se aplica una deformación a las barras de AMF antes de ser dispuestas en el encofrado. Luego de que el hormigón haya fraguado, se aplica un calentamiento a las barras, por ejemplo, mediante la circulación de corriente eléctrica, a fin de que se produzca la transformación martensítica inversa en la AFM. Como la restricción que produce la matriz de hormigón impide que las barras recuperen su forma anterior, se generará un esfuerzo de compresión en esta. En este trabajo se revisan los antecedentes de aplicaciones de AMF como refuerzos de estructuras civiles y se describen los principales resultados del grupo de Transformaciones de Fases y Propiedades Mecánicas del Instituto de Física Rosario en la temática de las AMF para pretensado de hormigón.

### **ABSTRACT**

*Shape memory alloys (SMA) 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. One of the most interesting potential applications of SMA is the prestressing of concrete pieces. For this, a deformation is applied to the SMA bars before being placed in the formwork. After the concrete has set, heating is applied to the bars, for example by circulating electric current, so that the reverse martensitic transformation in SMA occurs. As the restriction produced by the concrete matrix prevents the bars from recovering their previous shape, a compressive stress will be generated in it. In this work, the applications of SMA as reinforcement of civil structures are reviewed. Also, the main results of the Phase Transformations and Mechanical Properties group of the Instituto de Física Rosario on the subject of SMA for prestressed concrete are described.*

## ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA Y PSEUDOELÁSTICAS

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<sup>1</sup>. 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 relativamente pequeña, 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<sup>1</sup>. 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.

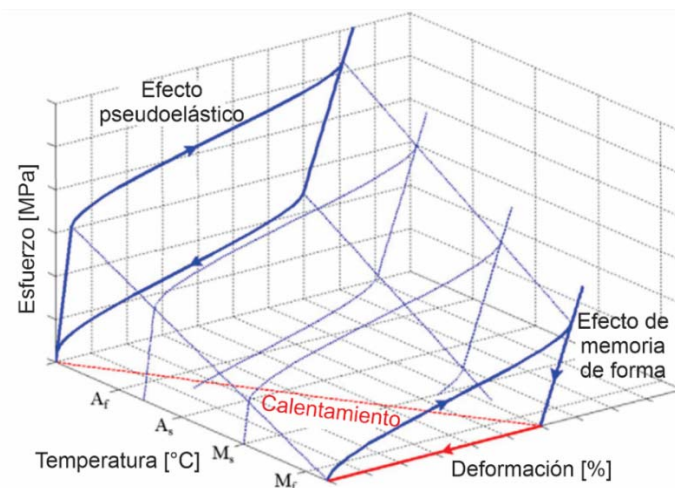


Figura 1. Efectos de memoria de forma y pseudoelástico esquematizados en curvas Esfuerzo-Deformación-Temperatura.

El primer registro de una AMF fue reportado en Au-Cd en el año 1951<sup>2</sup>. Desde entonces, el desarrollo de SMA y de sus aplicaciones industriales ha aumentado en numerosas áreas, tales como la automotriz<sup>3</sup>, aeroespacial<sup>4</sup>, actuadores y sistemas

electromecánicos<sup>5</sup>, robótica<sup>6</sup>, biomédica<sup>7</sup>, así como también en productos de consumo<sup>8</sup>. 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<sup>9</sup>.

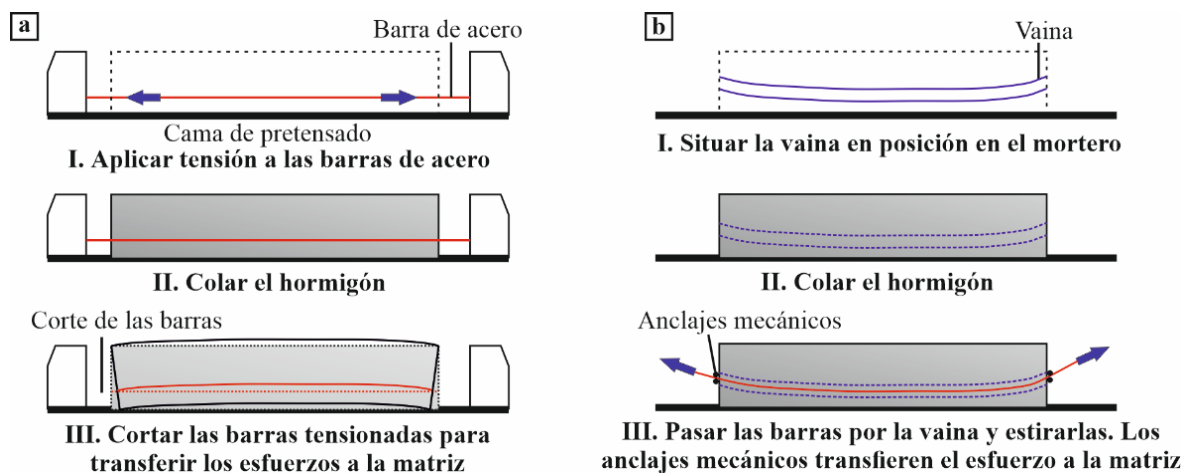
Algunas de las características mecánicas y termodinámicas de las AMF resultan de utilidad desde la perspectiva de la ingeniería estructural. La rigidez variable en las aleaciones con comportamiento pseudoelástico se puede utilizar para proporcionar control de la fuerza y el desplazamiento dentro de los 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 debido a la transformación martensítica inversa es más baja que durante la carga. Esto implica la disipación de energía debido a esta histéresis en la curva  $\sigma$ - $\epsilon$ . Esto resulta atractivo para el control sísmico de estructuras. Este comportamiento también permite el auto centrado completo debido a la capacidad de las AMF de recuperar su forma original después de deformarse mucho más allá del rango usual de deformación elástica ( $\approx 1\%$ ).

Por otra parte, en las aleaciones que presentan efecto de memoria de forma, cuando el material supera un cierto límite de tensión se deforma sin aumento significativo de tensión mediante la reorientación de las variantes de martensita<sup>1</sup>. Cuando la carga es retirada, una deformación aparentemente plástica permanece en el material. Sin embargo, esta deformación es recuperada cuando el material se calienta a una temperatura  $T > A_F$ . Mediante este calentamiento se produce la transformación inversa desde la fase martensita a la fase austenita, mecanismo por el cual se logra recuperar la forma original de la pieza. Este efecto puede ser utilizado para mantener tensionados elementos mecánicos y estructurales, como acoples de tubos y ejes.

## **ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA PARA PRETENSADO Y POSTESADO DE VIGAS DE HORMIGÓN**

Una de las potenciales aplicaciones de las aleaciones con efecto de memoria 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.



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

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.

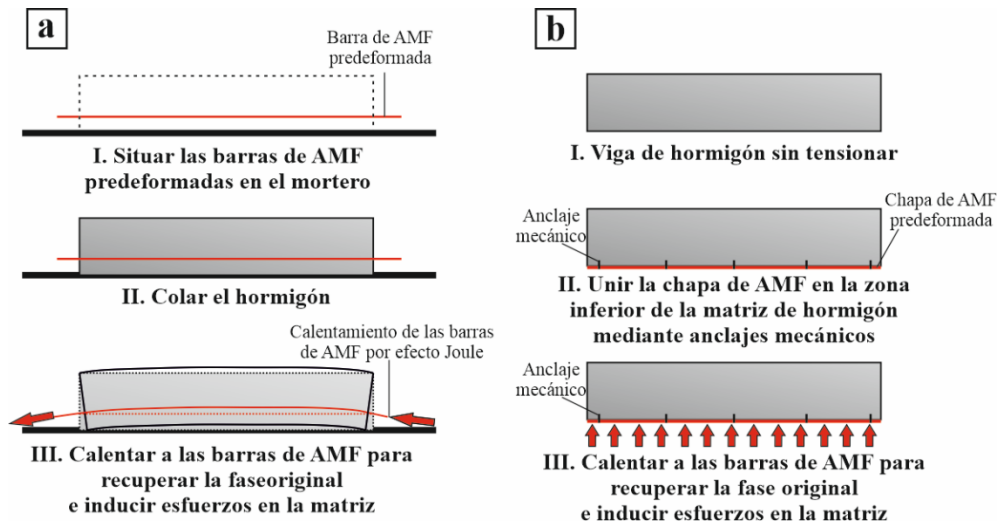


Figura 3. Esquema simplificado del proceso de fabricación de vigas de hormigón con AMF: a. pretensado. b. postesado.

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 reforzaron un modelo reducido de viga de yeso con un alambre predeformado de 1 mm de diámetro de aleación Fe-Mn-Si-Cr-C<sup>10</sup>. 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 fractura del yeso y que la resistencia a la flexión de la muestra aumentaba con los niveles crecientes de pretensado en los alambres de AMF. Sawaguchi y otros reforzaron pequeños prismas de hormigón con alambres de Fe-Mn-Si-Cr-NbC y las compararon con muestras de iguales dimensiones reforzadas con barras de acero y sin refuerzo<sup>11</sup>. 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.

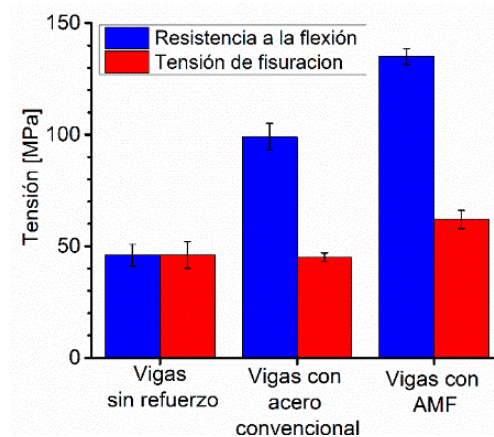


Figura 4. Tensión de fisuración y resistencia a la flexión en vigas de hormigón sin refuerzo, reforzadas con acero convencional y pretensadas con AMF<sup>11</sup>.

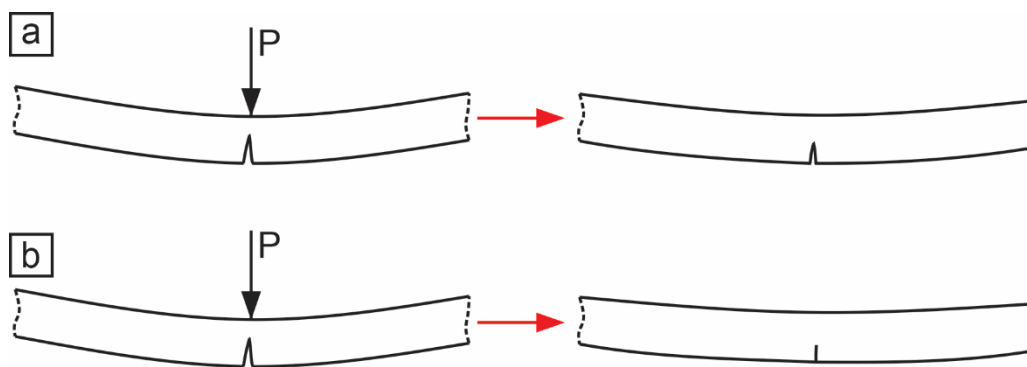
Czaderski y otros investigaron la viabilidad de aplicar una AMF de base hierro como refuerzo de vigas montado cerca de la superficie<sup>12</sup>. Los autores obtuvieron esfuerzos de recuperación de hasta 300MPa. Se observó un comportamiento de enlace adecuado para aplicaciones en ingeniería civil. Lee y otros<sup>13</sup> y Hong y otros<sup>14</sup> 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<sup>15</sup> aumentaron significativamente la resistencia a la flexión de piezas de hormigón in situ mediante la técnica de postesado, utilizando láminas de AMF de base Fe fijadas en la superficie. Recientemente, Zhao y Andrawes demostraron la viabilidad de pretensar losas de hormigón utilizando un novedoso refuerzo curvo de AMF<sup>16</sup>.

La familia Ni-Ti también fue evaluada como refuerzo para pretensar el hormigón. En este sentido, El-Tawil y Ortega-Rosales<sup>17</sup> 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. Czaderski y otros utilizaron cables de Ni-Ti de 4 mm de diámetro para reforzar una viga de hormigón de 1.14 m de longitud<sup>18</sup>. 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 demostraron la factibilidad de pretensar hormigón con fibras cortas de Ni-Ti, en este caso con fibras en forma de estrella<sup>19</sup>. Estos autores obtuvieron unos 7 MPa de tensión de pretensado. Choi y otros 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<sup>20</sup>.

## **ALEACIONES PSEUDOELÁSTICAS PARA RECENTRADO DE VIGAS DE HORMIGÓN**

El uso de las aleaciones pseudoelásticas como refuerzo puede mejorar la respuesta de las estructuras de hormigón bajo cargas sísmicas y reducir las deformaciones permanentes en los miembros estructurales. Abdulridha y otros investigaron el comportamiento a la flexión en vigas de hormigón reforzados con Ni-Ti con efecto pseudoelástico<sup>21</sup>. Las vigas reforzadas con Ni-Ti exhibieron un rendimiento superior en cuanto a la recuperación de la deformación aplicada y a la propagación de grietas con respecto a las piezas con refuerzos convencionales. Shrestha y otros evaluaron la viabilidad de reemplazar parcialmente las barras de acero para reforzar cemento con barras de la aleación pseudoelástica Cu-Al-Mn, con el fin de reducir las grietas residuales en las estructuras durante y después de terremotos intensos<sup>22</sup>. Los

resultados mostraron que las vigas de hormigón reforzado con Cu-Al-Mn poseen una fuerte capacidad de recentrado y una mejora significativa en la capacidad de recuperación de grietas, en comparación con las vigas reforzadas con acero convencional. Este comportamiento se puede observar en el esquema de las Figuras 5a y 5b. En el primer caso, se trata de una viga con refuerzo convencional. Ante una carga que supera la tensión de fisuración, aparecen grietas en el material que permanecen luego de retirar la carga. En la Figura 5b, se muestra esquemáticamente el comportamiento de una viga reforzada con una aleación pseudoelástica. En este caso, la deflexión luego de retirar la carga es menor que en el caso anterior y las grietas que se generaron se cierran debido al efecto de recuperación producido por el refuerzo de la aleación.

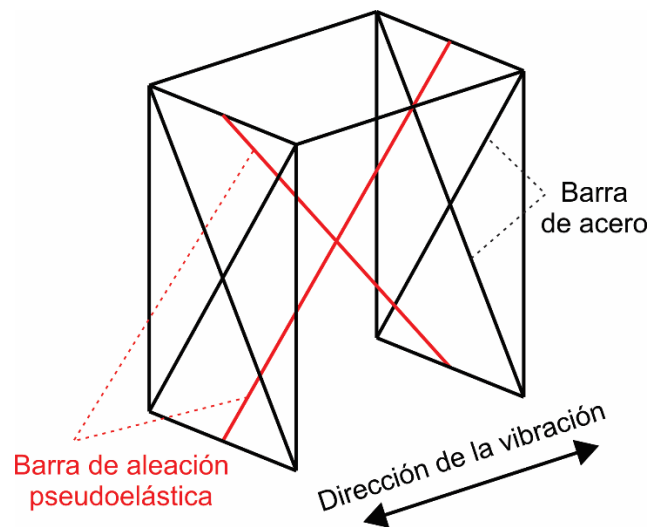


*Figura 5. a. Comportamiento a la flexión de una viga reforzada con acero convencional. b. Comportamiento a la flexión de una viga reforzada con una aleación pseudoelástica. La deflexión luego de retirada la carga es menor que en el caso anterior y las grietas generadas se cierran.*

## RESPUESTA ANTISÍSMICA DE ALEACIONES PSEUDOELÁSTICAS

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 6.



*Figura 6. Esquema simplificado de un marco de acero arriostrado con barras pseudoelásticas para ensayos de mesa vibratoria.*

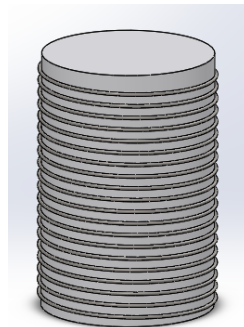
Han y otros desarrollaron un dispositivo amortiguador fabricado a partir de alambres de Ni-Ti para la reducción de vibraciones en un marco de acero con una altura de 2 m<sup>23</sup>. Los datos experimentales mostraron que la velocidad de caída de la vibración del marco controlado por los amortiguadores de Ni-Ti fue mucho más rápida que la del marco no controlado. Asgardian y Moradi 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<sup>24</sup>. 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 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<sup>25</sup>. Se encontró que estos poseen un rendimiento pseudoelástico comparable al Ni-Ti. Soul y Yawny realizaron una evaluación de 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<sup>26</sup>. 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 300 kg. Además, las simulaciones llevadas a cabo demostraron que la contribución del dispositivo a la disipación de energía está entre el 20 y el 40 % de la energía total de entrada.

Han y otros desarrollaron un amortiguador pseudoelástico que puede trabajar simultáneamente en tensión, compresión y torsión<sup>27</sup>. 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 desarrollaron cojinetes de caucho inteligentes de alta amortiguación con alambres de dos aleaciones pseudoelásticas: Ni-Ti y FeNiCuAlTaB<sup>28</sup>. 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.

## **ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA PARA CONFINAMIENTO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN**

Una aplicación reciente y de creciente interés de las AMF es para el confinamiento de columnas de hormigón. Existen dos tipos de confinamiento en columnas: confinamiento pasivo o activo. En el confinamiento pasivo de columnas de hormigón se usan camisas de acero convencional para reacondicionar estos elementos estructurales ya que esto aumenta su resistencia a la compresión y al corte, así como su ductilidad<sup>29</sup>. Sin embargo, el revestimiento de acero pasivo tiene como principal deficiencia el espacio que queda entre la superficie de la columna de hormigón luego de fraguar y el revestimiento. Debido a esto, la presión de confinamiento sólo se activa cuando la dilatación del hormigón está por encima de cierto valor. El confinamiento activo resuelve este problema, al aplicar presión de confinamiento externo a las camisas de hormigón mediante técnicas de pretensado. Sin embargo, esto complejiza la aplicación del método. Janke y otros propusieron envolver columnas de hormigón reforzado con bandas de AMF<sup>30</sup>. Varios estudios probaron experimentalmente la viabilidad de usar cables de AMF para reacondicionar columnas de hormigón, ya sea bobinados o en forma de cilindros soldados<sup>31-36</sup>. Luego del montaje de la AMF, se activa la transformación martensítica inversa en el material mediante un calentamiento, produciendo una tensión de confinamiento en la columna. Estos estudios demostraron que las columnas reacondicionadas con AMF tenían una ductilidad y resistencia mucho mayores en comparación con las columnas sin confinamientos o mediante confinamientos pasivos. Un esquema simplificado de las columnas reforzadas con cables de AMF bobinados superficialmente se muestra en la Figura 7.



*Figura 7. Esquema simplificado del confinamiento activo de columnas de hormigón mediante cables de AMF bobinados en la superficie.*

## CASOS REALES DE APLICACIÓN DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA EN ESTRUCTURAS CIVILES

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 8<sup>37</sup>. Este había sufrido grietas por insuficiente resistencia al corte. Para reforzar la viga del puente, se montaron barras de aleación con memoria de forma 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%.



*Figura 8. Puente de carretera postesado con AMF, Michigan, Estados Unidos.*

En otra aplicación, en la iglesia de San Giorgio en Trignano, Italia, se usaron varios dispositivos de aleación con memoria de forma en la restauración del campanario (Figura 9), que resultó gravemente dañado por un terremoto en 1996<sup>38,39</sup>. Los dispositivos de aleación con memoria de forma 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 aleación con memoria de forma, en el año 2006. Aunque los dispositivos no pueden evitar que la torre o una estructura delgada desarrollen grietas durante un terremoto, pueden evitar que tenga una deformación excesiva y, en consecuencia, se derrumbe durante las réplicas. 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<sup>39,40,41</sup>. Para 2008, al menos 19 edificios fueron reforzados con dispositivos de aleación con memoria de forma o sistemas de disipación de energía<sup>42</sup>.



*Figura 9. Iglesia San Giorgio en Trignano, Italia, reforzada con dispositivos antisísmicos basados en AMF.*

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 10)<sup>43</sup>. 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 10. 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 Villigen, Suiza<sup>44</sup>. 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. En el 2017, se usaron láminas de AMF para reducir el ancho de las grietas de flexión en una losa de concreto en un edificio escolar en Nieppe, Lille, Francia. Tres placas de repuesto con una sección transversal de 100 mm x 1,5 mm se sujetaron mecánicamente al miembro de hormigón (ver Figura 11) y se activaron con dispositivos de calentamiento resistivo. Las tiras se calentaron a una temperatura de 160°C, dando como resultado un pretensado de 300 MPa o 45 kN por tira. Durante el proceso de activación, se midió la disminución del ancho de la fisura con medidores de galgas extensiométricas instaladas en varios lugares en una fisura, como se ilustra en la Figura 11. Se registró una reducción del ancho de la fisura en 0,14 mm. Durante el año 2018, en Aarau, Suiza, se reforzó una losa de hormigón mediante la instalación de tiras de acero con memoria con una sección transversal de 120 mm x 1,5 mm. En este caso, se utilizó calefacción por infrarrojos para activar las tiras. Los autores destacan una decena de proyectos exitosos utilizando esta tecnología<sup>44</sup>.



*Figura 11. Reparación de una losa en un edificio escolar en Nieppe, Lille, Francia, mediante láminas de AMF para reducir el ancho de las grietas de flexión<sup>44</sup>.*

Una técnica similar desarrollada por los mismos autores implica la utilización de barras en lugar de láminas, en este caso embebidas sub-superficialmente en la matriz de hormigón. Por ejemplo, en el año 2018, en Münchenstein, Suiza, se modificó un edificio residencial de varios pisos y se reforzaron dos losas de hormigón<sup>44</sup>. Se instalaron diez barras de acero con memoria de  $\varnothing 16$  mm en una aplicación montada cerca de la superficie para aumentar la capacidad de carga máxima y de servicio (Figura 12). En primer lugar, se cortaron ranuras con una profundidad de unos 3 cm y una anchura de unos 3 cm en la losa del suelo con una sierra de diamante. Posteriormente, los extremos de la barra se adhirieron al hormigón. Después del curado del mortero, las barras se calentaron con equipos de infrarrojos a una temperatura de 190 °C. El proceso de calentamiento condujo a la activación de la transformación martensítica inversa en la AMF y, por lo tanto, al pretensado de la losa de hormigón. Esto fue monitoreado con sensores de temperatura adheridos a las superficies de las barras. La longitud restante de la ranura también se llenó con

mortero después de la retransformación martensítica y el posterior enfriamiento a temperatura ambiente.



*Figura 12. Modificación de un edificio residencial de varios pisos en Münchenstein, Suiza, utilizando barras de AMF subsuperficiales en la losa<sup>44</sup>.*

## **PRINCIPALES RESULTADOS DEL GRUPO DE TRANSFORMACIONES DE FASES Y PROPIEDADES MECÁNICAS DEL INSTITUTO DE FÍSICA ROSARIO**

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<sup>45</sup>. 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<sup>46,47,48</sup>. 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  $\epsilon \rightarrow \gamma$ <sup>49</sup>. Para ello, previamente se realizaron investigaciones sobre el efecto de la soldadura en la memoria de forma de estos materiales<sup>50</sup>. Se estudiaron además los efectos de la deformación severa sobre la textura que facilita la transformación<sup>51,52</sup>. Un exhaustivo análisis microestructural fue publicado recientemente<sup>53</sup>. En este, 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. Por otra parte, se logró desarrollar acoples sin costura mediante un novedoso método de extrusión por punzonado en caliente (ver Figura 13)<sup>54</sup>. 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/cm<sup>2</sup>. 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 14<sup>55</sup>.



Figura 13. Acoples sin costura fabricados por el grupo de trabajo del IFIR mediante el método de extrusión por punzonado en caliente<sup>54</sup>.

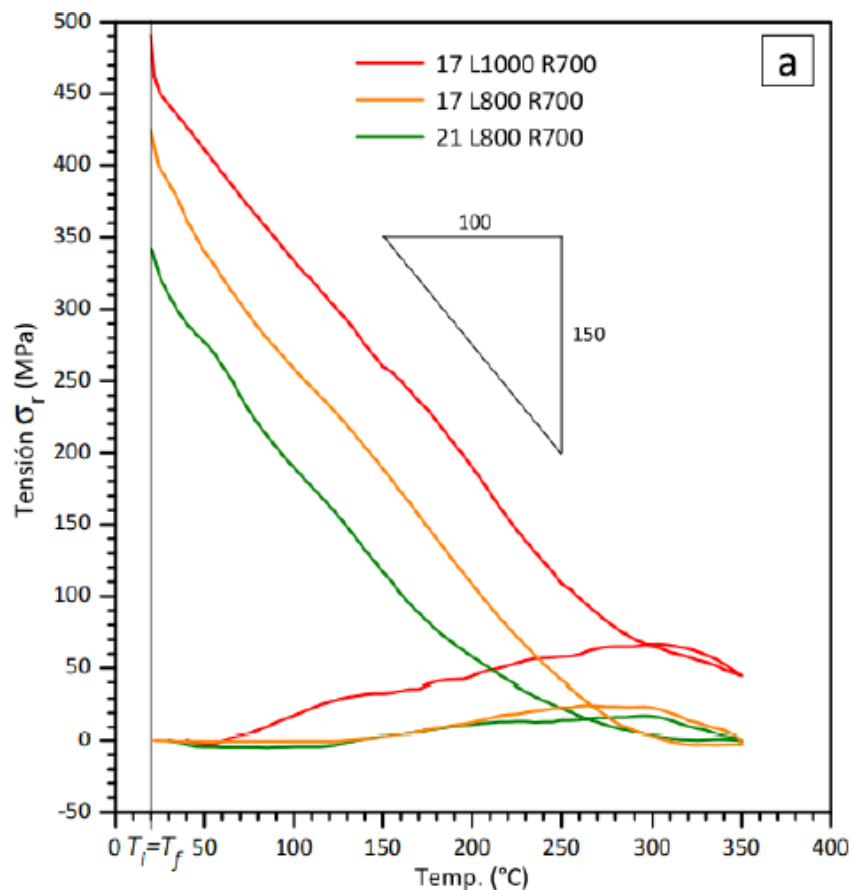


Figura 14. Ensayos Tensión-Temperatura para determinar los esfuerzos de compresión por retransformación generados en aleaciones de base Fe-Mn-Si luego de un calentamiento hasta los 350 °C<sup>55</sup>.

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 ( $\geq 30\%$ ). El sistema Fe-Mn-Al-Ni fue desarrollado en años recientes y se trata de una AMF que presenta pseudoelasticidad en un amplio rango de temperatura<sup>56</sup>. 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 ( $\sim 200$  MPa), y muy baja dependencia en la tensión de transformación en el rango  $-50\text{ }^{\circ}\text{C} - 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>56</sup>. 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<sup>57,58</sup>. Se ha reportado que estructuras monocristalinas o de tipo bambú mejoran la respuesta pseudoelástica del material<sup>56,58</sup>. 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<sup>59</sup>.

Los resultados obtenidos en la aleación Fe-Mn-Al-Ni por el grupo de trabajo del IFIR 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<sup>60,61</sup>. Se logró así obtener materiales con estructura de granos tipo bambú y cristales de hasta 1 cm de largo (con  $4 \times 4$  mm<sup>2</sup> 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 15<sup>62</sup>. Así mismo, se puso de manifiesto el carácter crítico del tipo de distribución de precipitados en la matriz para una pseudoelasticidad eficiente, así como el rol de la composición química en la estabilidad de fases de la aleación Fe-Mn-Al-Ni<sup>62,63</sup>.

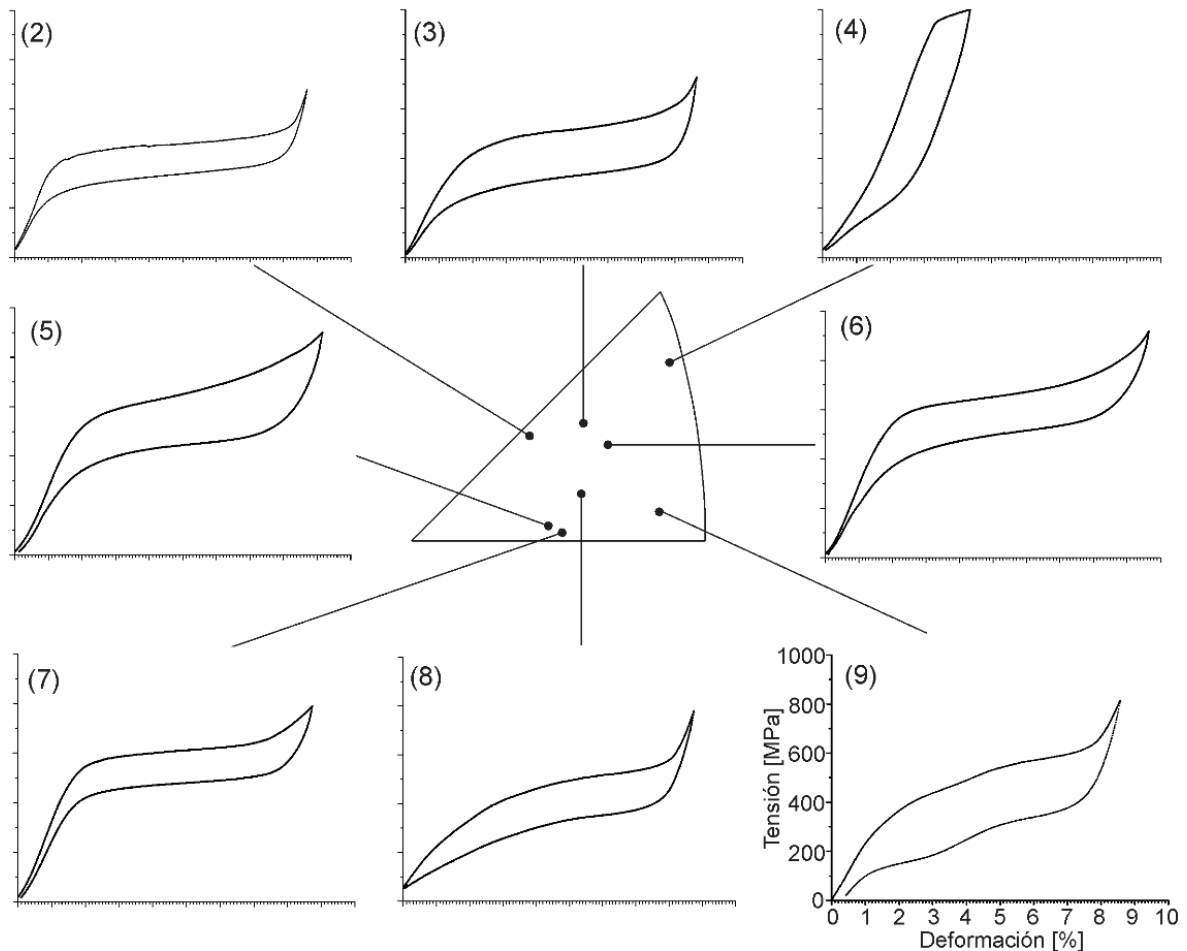


Figura 15. Curvas tensión-deformación de monocristales de aleación pseudoelástica Fe-Mn-Al-Ni en función de la orientación cristalográfica.

## 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 el desarrollo y caracterización de 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 aleaciones con memoria de forma 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.

## COLABORADORES

Dra. Ing. Ana Velia Druker

Dr. Ing. Isidro Esquivel

Dr. Ing. Javier Mroginski

## REFERENCIAS

- <sup>1</sup> Otsuka, K. y Wayman, C.M. (1998). Shape Memory Materials. Cambridge, Reino Unido: University Press.
- <sup>2</sup> Chang, L.C. y Read, T.A. (1951). Trans. Am. Inst. Met. Eng., 189, 47-52.
- <sup>3</sup> Leo, D.J., Weddle, C., Naganathan, G. y Buckley, S.J. (1998). Proceedings de la Conferencia SPIE: Smart Structures and Materials 1998: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures and Technologies, 3326, 106-116.
- <sup>4</sup> Hartl, D.J. y Lagoudas, D.C. (2007). Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 221, 535-552.
- <sup>5</sup> Sun, L., Huang, W.M., Ding, Z., Zhao, Y., Wang, C.C., Purnawali, H. y Tang, C. (2012). Mater. & Des., 33, 577-640.
- <sup>6</sup> Sreekumar, M., Nagarajan, T., Singaperumal, M., Zoppi, M. y Molfino, R. (2007). Industrial Robot: An International Journal, 34, 285-294.
- <sup>7</sup> Petrini, L. y Migliavacca, F. (2011). J. Metall., 2011, 1-15.
- <sup>8</sup> Zider, R.B. y Krumme, J.F. (1988). Eyeglass frame including shape-memory elements. En: US Patents 4772112. Menlo Park, California, USA: CVI/Beta Ventures, Inc.
- <sup>9</sup> Motavalli, M., Czaderski, C., Bergamini, A. y Lars J. (2009). Arch. Eng. Env., 4, 81-

94.

- <sup>10</sup> Watanabe, Y., Miyazaki, E. y Okada, H. (2002). *Mater. Trans.*, 43, 974-983.
- <sup>11</sup> Sawaguchi, T., Kikuchi, T., Ogawa, K., Kajiwara, S., Ikeo, Y. y Kojima, M. (2006). *Mater. Trans.*, 47, 580-583.
- <sup>12</sup> Czaderski, C., Shahverdi, M., Brönnimann, R. Leinenbach, C. y Motavalli, M. (2014). *Construction and Building Materials*, 56, 94-105.
- <sup>13</sup> Lee, W.J., Weber, B., Feltrin, G., Czaderski, C., Motavalli, M. y Leinenbach, C. (2013). *Smart Mater. Struct.*, 22, 1-9.
- <sup>14</sup> Hong, K., Lee, S., Han, S. y Yeon, Y. (2018). *Applied Sciences*, 8(5), 730.
- <sup>15</sup> Michels, J., Shahverdi, M. y Czaderski, C. (2017). *Structural Concrete*, 2017, 1-16.
- <sup>16</sup> Zhao, H. y Andrawes, B. (2020). *Construction and Building Materials*, 238, 117687.
- <sup>17</sup> El-Tawil, S. y Ortega-Rosales, J. (2004). *ACI Structural Journal*, 101, 846-851.
- <sup>18</sup> Czaderski, C., Hahnebach, B. y Motavalli, M. (2006). *Cons. Build. Mater.*, 20(9), 824-833.
- <sup>19</sup> Moser, K., Bergamini, A., Christen, R., Czaderski, C. (2005) *Materials and structures*, 38, 593-600
- <sup>20</sup> Choi, E., Kim, D.J., Hwang, J. y Kim, W.J. (2016). *Smart Mater. Struct.* 25, 085041.
- <sup>21</sup> Abdulridha, A., Palermo, D., Foo, S. y Vecchio, F.J. (2013). *Eng. Struct.*, 49, 893-904.
- <sup>22</sup> Shrestha, K.C., Araki, Y., Nagae, T., Koetaka, Y., Suzuki, Y., Omori, T., Sutou, Y., Kainuma, R. y Ishida, K. (2013). *Smart Mater. Struct.*, 22, 025025.
- <sup>23</sup> Han, Y., Li, Q.S., Li, A., Leung, A.Y.T. y Lin, P. (2003). *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 32, 483-494.
- <sup>24</sup> Asgardian, B. y Moradi, S. (2011). *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 65-74.
- <sup>25</sup> Araki, Y., Maekawa, N., Shrestha, K.C., Yamakawa, M., Koetaka, Y., Omori, T. y Kainuma, R. (2014). *Struct. Control Health Monit.*, 21, 1304-1315.
- <sup>26</sup> Soul, H., y Yawny, A. (2017). *Smart Mater. Struct.*, 26, 085036.
- <sup>27</sup> Han, Y.L., Xing, D.J., Xiao, E.T. y Li, A.Q. (2005). *Journal of Vibration and Control*, 11, 1067-1084.
- <sup>28</sup> Dezfuli, F.H., Alam, M.S. (2014). *Engineering Structures*, 61, 166-183.
- <sup>29</sup> Chai, Y.H., Priestly, M.J.N., Seible, F. (1994). *J. Struct. Eng. ASCE*, 120, 2358-2376.
- <sup>30</sup> Janke, L. , Czaderski, C., Motavalli, M. y Ruth, J. (2005). *Mater. Struct.* 38, 578-92.
- <sup>31</sup> Choi, E., Chung, Y.S., Cho, B.S. y Nam, T.H. (2008). *Eur. Phys. J. Spec.*, 158, 255-259.

- <sup>32</sup> Destrebecq, J.F. y Balandraud, X. (2010). In *Materials with Complex Behaviour: Modelling, Simulation, Testing, and Applications*. Advanced Structured Materials; A. Ochsner, L.F.M. DaSilva, H. Altenbach, Eds.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 3, 19–34.
- <sup>33</sup> Choi, E., Park, S.H., Cho, B.S. y Hui, D. (2013). *J. Alloy Compd.*, 577(1), 756–759.
- <sup>34</sup> Tran, H., Balandraud, X. y Destrebecq, J.F. (2015). *Arch. Civ. Mech. Eng.* 15, 292–299.
- <sup>35</sup> Hong, C.K., Qian, H. y Song, G.B. (2020). *Materials*, 13, 1227.
- <sup>36</sup> Pan, S., Yue, R., Hui, H., Fan, S. (2022). *J. Asian Archit. Build.* 21(1), 66-79.
- <sup>37</sup> Soroushian P., Ostowari, K., Nossoni, A. y Chowdhury, H. (2001). *Transportation Research Record*, 1770, 20–26.
- <sup>38</sup> Indirli, M., Castellano, M.G., Clemente, P. y Martelli, A. (2001). In *Proceedings of SPIE's 8th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA, USA. International Society for Optics and Photonics, Bellingham, WA, USA, 262–272.
- <sup>39</sup> Indirli, M. y Castellano, M.G. (2008). *International Journal of Architectural Heritage* 2(2), 93–119.
- <sup>40</sup> Indirli, M., Forni, M., Martelli, A. y otros. (2001). *Proceedings of the 7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, Assisi, Italia.
- <sup>41</sup> Croci, G. (2001). *Structural Engineering International*, 11(3), 207–210.
- <sup>42</sup> Benavent-Climent, A. (2008). *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- <sup>43</sup> Sawaguchi, T., Maruyama, T., Otsuka, H., Kushibe, A., Inoue, Y. y Tsuzaki, A. (2016). *Materials Transactions*, 57, 283-293.
- <sup>44</sup> Schranz, B., Michels, J., Shahverdi, M. y Czaderski, C. (2019). *The International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, SMAR*, Potsdam, Alemania.
- <sup>45</sup> Druker, A.V. (2009). *Desarrollo de Texturas y Tratamientos Termomecánicos en aleaciones Fe-Mn-Si con Memoria de Forma*, Tesis de Doctorado, UNR.
- <sup>46</sup> Druker, A., Sobrero, C., Brokmeier, H.-G., Malarría, J. y Bolmaro, R. (2008). *Mat. Sci. Eng. A*, 481-482, 578-81.
- <sup>47</sup> Druker, A., Baruj, A. y Malarría, J. (2010). *Acta Microscópica*, 19, 9-12.
- <sup>48</sup> Druker, A., Baruj, A. y Malarría, J. (2010). *Mater. Charact.* 61, 603-12.
- <sup>49</sup> Druker, A., Perotti, A., Esquivel, I. y Malarría, J. (2014). *Mater. & Design*, 88, 878-888.
- <sup>50</sup> Druker, A., Perotti, A., Esquivel, I., Charca Ramos, G. y Malarría, J. (2011). *Actas del 11º Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales – CONAMET/SAM-2011*.

- <sup>51</sup> Druker, A., Baruj, A., Isola, L., Fuster, V., Malarría, J. y Bolmaro, R. (2016). *Materials and Design*, 107, 153-162.
- <sup>52</sup> Druker, A., Sobrero, C., Fuster, V., Malarría, J. y Bolmaro, R. (2017). *Advanced Engineering Materials*, 20(4), 1700062.
- <sup>53</sup> Esquivel, I., Giordana, M.F. y Druker, A. (2019) *Materials Characterization* 155 (2019) 109811.
- <sup>54</sup> Esquivel, I., Malarría, J. y Druker, A. (2021). *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 3, 100061.
- <sup>55</sup> 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.
- <sup>56</sup> Omori, T., Ando, K., Okano, M., Xu, X., Tanaka, Y., Ohnuma, I., Kainuma, R. y Ishida, K. (2011). *Science*, 333, 68-71.
- <sup>57</sup> Omori, T., Nagasako, M., Okano, M., Endo, K. y Kainuma, R. (2012). *App Phys Lett.*, 101, 231907.
- <sup>58</sup> Omori, T., Okano, M. y Kainuma, R. (2013). *APL Materials*, 1, 032103.
- <sup>59</sup> Vollmer, M., Bauer, A., Frenck, J.-M., Krooß, P., Wetzel, A., Middendorf, B., Fehling, E. y Niendorf, T. (2021). *Engineering Structures*, 241, 112430.
- <sup>60</sup> Vallejos, J.M., Leonard, M., Sobrero, C., La Roca, P., Druker, A.V. y Malarria, J. (2017). *Rev Sci Instrum*, 88, 025107-1-6.
- <sup>61</sup> Vallejos, J.M. y Malarria, J. (2020). *J. Mat Proc Tech*, 275, 116317.
- <sup>62</sup> Vallejos, J.M., Giordana, M.F., Sobrero, C. y Malarria, J. (2020). *Scr Mater*, 179, 25-29.
- <sup>63</sup> Vallejos, J.M., Giordana, M.F., Sobrero, C. y Malarria, J. (2021). *Shape Memory and Superelas*, 7(3), 362–372.