

## ► Aleaciones con Memoria de Forma: Metales Inteligentes

Camilo Marín Villar  
Periodista Metal Actual

**A toda acción  
corresponde  
una reacción.**

*Existen metales que una vez que han aprendido algo lo recuerdan; aunque, puede parecer de ciencia ficción, lo cierto es que poseen una propiedad que les permite recuperar su forma original tras haber sido sometidos a una deformación previa.*

Hace pocos meses, el diario español El Mundo, anunció en sus páginas que investigadores de la compañía alemana Siemens están desarrollando un sistema de seguridad para automóviles usando 'materiales inteligentes'.

Esta tecnología está sustentada en un conjunto de sensores y radares capaz de detectar previamente un choque inminente y enviar una corriente eléctrica, segundos antes del impacto, a la zona de la carrocería en peligro, la cual está fabricada con una aleación metálica con memoria de forma; es decir, un material que al recibir la descarga inmediatamente se expande para crear un 'colchón metálico', capaz de resistir buena parte del golpe.

Esta nueva aleación, la cual se adapta y duplica su resistencia al recibir el estímulo eléctrico externo, combinada con los airbags laterales, podría suponer un avance revolucionario en la protección de pasajeros.

Sin embargo, una de las principales inquietudes que surgen con respecto al sorprendente desarrollo de la Siemens es: ¿un material puede tener inteligencia?

La respuesta depende de lo que se quiera significar con 'inteligencia'; por una parte, según la Real Academia de la Lengua Española, esta palabra se refiere a la capacidad de percibir, memorizar, actuar y reaccionar; pero también se refiere al conocimiento, la reflexión y resolución de problemas; en ese sentido, frente al tema de materiales, de alguna manera, las primeras cuatro características sí describen parte de las propiedades de los 'materiales inteligentes'.

Actualmente, gracias a la popularidad que ha adquirido a lo largo de estos últimos años, el término 'inteligente', éste se ha adoptado como un modo válido para calificar y describir una clase de materiales que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas y estructurales (rigidez, elasticidad, viscosidad, forma, color, entre otras.) con la influencia de un estímulo externo concreto.

Según explica el profesor e ingeniero metalúrgico Francisco Javier Herrera, del Departamento de Materiales de la Universidad de Antioquia, no existe un consenso a la hora de aplicar este término a un material o estructura, pero existe un acuerdo en cuanto a ciertos criterios o rasgos comunes que deben presentar los llamados materiales o estructuras inteligentes en general:

- Estos materiales, de manera intrínseca, cuentan con sensores de reconocimiento en su estructura químico-física que les permiten reconocer un estímulo determinado.

Foto: <http://www2.pnewswire.com>



► Los materiales inteligentes presentan sensores y mecanismos de control, intrínsecos, por los cuales son capaces de responder ante un estímulo de forma predeterminada en un tiempo apropiado y de volver a su estado original.

- A su vez tienen 'actuadores', embebidos, con los que responden ante dicho estímulo y reaccionan de la manera específica que el fabricante ha diseñado; es decir, reaccionan de forma predeterminada y controlada.
- El tiempo de respuesta es corto.
- El material regresa a su estado original tan pronto como el estímulo termina.

De modo que, con guardadas proporciones, bajo la denominación de 'materiales inteligentes' se definirían aquellos materiales que cuentan con sensores, 'actuadores' y/o mecanismos de control, intrínsecos, por los cuales el material es capaz de percibir un estímulo (corriente eléctrica, campo magnético, humedad, solventes, pH, temperatura, presión, entre otros), y de responder ante él de una forma predeterminada en un tiempo apropiado y de regresar a su estado original tan pronto como el estímulo termine".

Básicamente, los 'materiales inteligentes' se clasifican en tres grandes grupos, determinados según el estímulo y la reacción que presentan. Así las cosas, existen materiales electro y magneto-activos, que experimentan cambios en sus propiedades físicas ante la presencia o aplicación de un campo eléctrico o magnético; materiales foto y cromoactivos, aquellos en los que se producen

cambios de diferente naturaleza como consecuencia de la acción de la luz o que son capaces de emitir luz, por efecto de algún fenómeno externo; y, por supuesto, los materiales con memoria de forma, como la aleación utilizada por Siemens en el nuevo sistema de seguridad para automóviles.

Todos los denominados 'materiales inteligentes' están incluidos en alguno de estos tres grupos, pero por ser uno de los desarrollos más importantes para la industria metalúrgica y metalmecánica mundial en los últimos años, conviene conocer más sobre los materiales con memoria de forma y en especial sobre las aleaciones de tipo metálico.

## Aleaciones Con Memoria de Forma (AMF)

Las aleaciones con memoria de forma o AMF, en inglés *Shape Memory Alloys (SMA)*, son materiales metálicos que tienen la capacidad de 'recordar' una forma determinada, incluso después de severas deformaciones.

En el caso de las aleaciones metálicas, el efecto de memoria de forma se basa en la transición que se produce entre dos fases sólidas, una de baja temperatura o martensítica y otra de alta temperatura o austenítica.

El material se deforma en la fase martensítica y recupera, de forma reversible, sus dimensiones originales mediante el calentamiento por encima de una temperatura crítica de transición; en resumen es un cambio de sólido a sólido en el que se produce una modificación de forma.

El profesor Javier Herrera, explica que los términos de martensita y austenita originalmente se referían sólo a fases del acero, sin embargo se han extendido los términos refiriéndose no sólo al material sino al tipo de transformación; la martensita de los aceros implica un cambio de volumen y forma, mientras que las AMF básicamente tienen sólo cambio de forma.

El efecto de memoria de forma, básicamente, se produce por la influencia que tiene el cambio de temperatura sobre el material; es decir, las temperaturas a las cuales la transformación martensítica comienza y concluye y las temperaturas a las cuales la formación austenítica empieza y termina. En general, no existe, pues, una determinada temperatura para la transición, sino un rango de temperaturas en el que se produce el cambio, el cual es establecido por cada fabricante.

Cuando el efecto de memoria de forma ocurre sólo una vez se le suele llamar efecto de memoria de forma simple, con un grado de deformación en las aleaciones AMF del orden del 7.0 por ciento, aunque en algunas alcanza el 10 por ciento; un rango considerablemente alto si se tiene en cuenta que la deformación de un acero común sólo permite un promedio de 2.0 por ciento.

Actualmente, se fabrican aleaciones con doble efecto de memoria de forma; materiales que se expanden calentándolos por encima del rango de la temperatura de transición y se contraen espontáneamente, cuando se vuelven a enfriar por debajo de esta temperatura. Así, la aleación se extiende de nuevo cuando se calienta y se contrae cuando se enfría, repitiéndose indefinidamente.

Para producir el doble efecto de memoria de forma el material se somete a un tratamiento térmico, llamado tratamiento de educación o adiestramiento, con el cual se puede conseguir que el material recuerde sucesivamente y de forma cíclica, tanto la forma en caliente como en frío.

Desde el punto de vista microscópico, prácticamente todas las propiedades físicas de la aleación en sus fases son diferentes y por ello a medida que se pasa de una a otra, mediante la variación de la temperatura, aparece una gran variedad de cambios en la estructura y en sus propiedades, como la resistencia a la corrosión, elasticidad y capacidad de amortiguamiento; por ello se consideran 'materiales inteligentes', capaces de reaccionar a un estímulo y adoptar una nueva estructura.

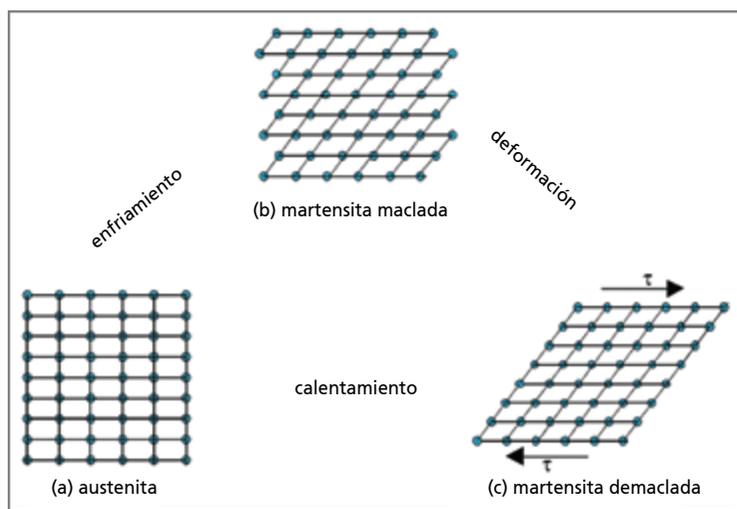
Estas propiedades especiales han despertado grandes expectativas en muchos campos de aplicación en diversas tecnologías e industrias, pues se pueden usar para generar forma o movimiento o almacenar energía.

Actualmente, sus aplicaciones son innumerables, en especial en el campo médico, electrónico, aeronáutico y espacial. Se emplean para diseñar conexiones herméticas para conducciones hidráulicas y neumáticas, sistemas de control mecánico, activadores eléctricos y térmicos, aparatos médicos, fabricación de prótesis y en procesos especiales de soldadura.

Las aplicaciones más extendidas en los últimos años son en productos con superelasticidad como monturas de gafas, alambres dentales y antenas móviles.

Gracias a su superelasticidad, estas aleaciones se utilizan en numerosos dispositivos de cirugía no invasiva y biomedicina, ya que permiten generar grandes deformaciones en el material que se recuperan cuando se elimina la carga. Esta propiedad posibilita aplicaciones en dispositivos como los stents, prótesis tubulares que restablecen la capacidad de flujo de cualquier conducto corporal afectado por un estrechamiento.

Se están aplicando para el guiado de alambres en cirugía, por su flexibilidad y torsionabilidad, y más recientemente, en técnicas quirúrgicas con terapia mínimamente invasiva: localizadores de tumores, introducción de herramientas de cirugía



**Figura 1.** Descripción microscópica del proceso de memoria de forma; la austenita (a) es enfriada para formar martensita maclada (b), aunque hay una reacomodación de átomos no sufre cambio en la forma. Posteriormente se deforma moviendo las fronteras del maclado (c), para que así al calentar el material a la temperatura de transición, tanto en el estado (b) como (c), éste volverá a la estructura y forma original austenítica.

Foto: <http://secure.techxpress.net>

► Por su gran deformación elástica combinada con un bajo esfuerzo obtenible las ventajas para el paciente son diversas: mayor acoplamiento, resistencia y flexibilidad debido al fácil ajuste elástico; mayor confort debido a bajos niveles de esfuerzos.

Foto: [www.memometal.com](http://www.memometal.com)

(grapas...agujas) a través de una cánula, fórceps, filtros de sangre, filtros de vena cava, placas intracraneales, o en aplicaciones ginecológicas.

Además, su campo de aplicación abarca numerosos sectores que van desde su uso en antenas para satélites desplegables a sensores de distintas maquinarias, pasando por materiales para la construcción de puentes colgantes o dispositivos antisísmicos.

En general, todas las aplicaciones, de alguna manera, dependen del efecto de 'acción-reacción' del material, así como de las condiciones bajo las cuales tenga lugar la aplicación determinada, aspecto que hace que las aleaciones metálicas con memoria de forma, también sean considerados materiales 'funcionales'.

### Tipos de aleaciones con Memoria de Forma

El ingeniero Herrera, explica que de las aleaciones metálicas con propiedades de memoria de forma se tiene conocimiento desde la década de los 30, pero su auge y mayor desarrollo comenzó con la aparición de aleaciones de níquel – titanio (Ni-Ti), descubiertas y desarrolladas entre 1962 y 1963 por el Naval Ordnance Laboratory; y las de base cobre (Cu), desarrolladas posteriormente.

**KORLOY**

**herratec s.a.**

Desarrollos y tecnología del mañana a su alcance

Medellín - PBX: (4) 262 69 69   Bogotá - PBX: (1) 351 15 55   Cali - PBX: (2) 438 46 96   Manizales - PBX: (6) 881 56 46

[www.herratec.com.co](http://www.herratec.com.co)

El primer tipo de aleación (Ni-Ti) es conocido comercialmente con el nombre de Nitinol, en honor a sus descubridores. Este material presenta amplias propiedades mecánicas, entre las que se destacan la ductilidad, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. Por su parte, las basadas en cobre tienen menor costo y soportan a la vez un mayor rango de temperaturas en las que se pueden dar potencialmente las transformaciones de forma.

A menudo, unas y otras son aleadas con aluminio, hierro, zinc o manganeso para mejorar sus propiedades; también suelen añadirse a éstas elementos como boro, cobalto, hierro y vanadio para refinar el grano.

Hoy en 90 por ciento de las nuevas aplicaciones están basadas en NiTi, NiTiCu y NiTiNb, pero otras aleaciones como CuAlNi o FeMnSi comienzan a introducirse en el mercado, también algunas como la NiAl o NiTi-Zr son potencialmente interesantes, pero con el inconveniente que han resultado extremadamente frágiles.

Las actuales investigaciones se centran en las aleaciones con platino (Pt) como base para los nuevos materiales. Dentro de esta familia de aleaciones, se destacan por su efecto de memoria de forma, las constituidas por Ti-Pt (capaces de operar hasta los 1000°C); Pt<sub>3</sub>Al (especiales

para aplicaciones *in vivo* o prótesis); Fe<sub>3</sub>Pt y Fe-Pt ya que son capaces de operar a temperaturas más elevadas que las basadas en Ni y Cu, y parecen mostrar también una alta biocompatibilidad para aplicaciones médicas.

De hecho, el principal objetivo de la investigación de nuevas aleaciones AMF es la búsqueda de materiales que soporten altas temperaturas de transformación, por lo cual se les adicionan los diferentes elementos aleantes, también llamados ternarios, a las más comunes aleaciones de níquel y cobre.

En teoría, todos los componentes fabricados con aleaciones AMF como el Nitinol (alambres, tubos, flejes, barras, láminas) siguen los mismos pasos de fabricación. Primero se alean en vacío; es decir, en un ambiente sin oxígeno y completamente inerte, se trabajan en caliente y posteriormente se trabajan en frío; y nuevamente se tratan en caliente para finalizar el proceso de adiestramiento y conseguir las propiedades finales.

Los procesos siguientes son los necesarios para su terminado como el corte por láser o por chorro de agua abrasivo, soldadura y tratamientos superficiales; todos se aplican para producir el elemento final.

Por ejemplo, si un industrial quisiera comprar Nitinol a un fabricante, debería tener en cuenta que las especificaciones de las aleaciones han de ser lo

suficientemente claras y precisas para cumplir los requerimientos necesarios.

Por esta razón es conveniente conocer las formas posibles más comerciales, el tipo de aleación, sus componentes y temperaturas de transición, además de sus tratamientos térmicos y especificaciones para el mecanizado.

Normalmente, los fabricantes dicen suministrar NiTi en diversas formas: alambres, láminas, flejes y microtubos; sin embargo, estos deben ser pedidos por solicitud especial, ya que comercialmente sólo se consiguen chipas de alambre de reducido diámetro (1, 1½ y 2 mm).

Así mismo, el usuario debe considerar que las propiedades de estas aleaciones están determinadas por su composición y temperaturas de transición, pues un cambio pequeño en la combinación de los elementos aleantes y sus proporciones conduce a grandes cambios en los rangos de temperaturas y, consecuentemente, en sus límites de deformación.

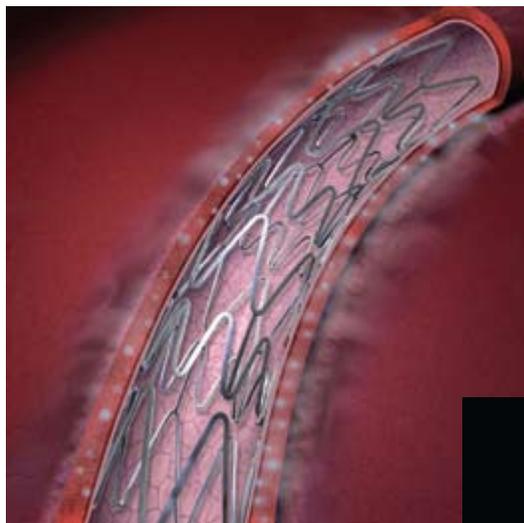
Conviene que el usuario también pregunte por las condiciones del tratamiento térmico; tal como se explicó anteriormente, normalmente las aleaciones AMF se procesan con un trabajo en caliente seguido de varios trabajos en frío, con recocido completo o intermedio, después de esto se le realiza el tratamiento térmico al material para obtener las propiedades superelásticas o de memoria de forma.

Además de las condiciones o especificaciones del fabricante, existen otros factores fundamentales a tener en cuenta cuando se trabaja con estas aleaciones.

Uno de ellos es el proceso de unión o soldadura, ya que las aleaciones AMF son difíciles de soldar, siendo recomendado el soldeo por láser o plasma; otros métodos de unión no son recomendables porque suelen producir fragilidad intermetálica en la zona soldada. También se suelen soldar en atmósfera inerte o en vacío debido a la reactividad del titanio.

Propiedad	NiTi / AMF	Acero Inoxidable
Deformación recuperable (%)	8	2
Módulo de elasticidad (Mpa)	8,7*10 <sup>4</sup> (A); 1,4*10 <sup>4</sup> (M)	20.7* 10 <sup>5</sup>
Resistencia a la cedencia (Mpa)	200 – 700 (A); 70 – 140 (M)	248 - 517
Resistencia última a tracción	900 (Tr); 2000 (Tf)	448 - 857
Elongación a rotura	24 – 50 (Tr); 5-10 (Tf)	20
Resistencia a la corrosión	Excelente	Muy buena

Comparación de la aleación AMF NiTi con un acero inoxidable AISI316. A y M significan austenita y martensita respectivamente; Tr se refiere al termino Totalmente Recocido y Tf trabajado en frío.

Fotos: <http://media-2.web.britannica.com>

► La aleación níquel-titanio puede volver a una forma fija sin importar que se haya doblado o retorcido, actualmente su funcionalidad es utilizada para fabricar stens; prótesis biomédicas para evitar obstrucción vascular.



esfuerzo y apoyo para el campo de las AMF, para favorecer su aplicación y potenciar nuevos usuarios que deseen utilizar estos materiales para la industria y su desarrollo.

Hoy día, el costo de las AMF ha ido decreciendo paulatinamente, a medida que su uso se ha ido incrementando; pero aún se requiere investigar materiales con costos más bajos. El desarrollo en aleaciones ha producido varias composiciones ternarias con propiedades más ventajosas sobre las binarias, y es probable así mismo que en los próximos años se multiplique el número de aleaciones diseñadas específicamente para determinados fines.

Es importante también, de cara a mejorar las futuras aplicaciones de este tipo de aleaciones, prestar una especial atención a los procesos, pues en ellos hay contaminantes comunes como el oxígeno y el carbono que pueden, tanto modificar la temperatura de transformación como degradar las propiedades mecánicas de la aleación, por lo que se ha de tratar de minimizar su cantidad en la muestra. De este modo, uno de los mayores desafíos consiste en el desarrollo de los procesos de producción adecuados que conduzcan a materiales que posean las propiedades y características deseadas para la aplicación en cuestión. ▀

#### Fuentes:

- Francisco Javier Herrera. Ingeniero metalúrgico. Departamento de Materiales de la Universidad de Antioquia. [pgjhb084@udea.edu.co](mailto:pgjhb084@udea.edu.co)
- Introducción a las Aleaciones con Memoria. Enrique Gómez Cuellar. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) México. 2004.
- Los Materiales de Hoy. Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México (IIM-UNAM). 2006. [http://www.jcce.org.cu/libros/Libros\\_2/ciencia3/069/htm/sec\\_8.htm](http://www.jcce.org.cu/libros/Libros_2/ciencia3/069/htm/sec_8.htm)
- <http://www.elmundo.es> <http://www.interempresas.net> <http://www.inteligentes.org> <http://www.soygik.com> <http://metalurgiape.ru.blogspot.com>

Otro factor a tener en cuenta es el mecanizado; en el caso del Nitinol, aunque este es un material altamente abrasivo, debido a la tenacidad del óxido de titanio, es posible su torneado, fresado y rectificado con grandes resultados, pero con un gran desgaste de herramientas, por ello se recomienda el mecanizado con carburo y el uso de abundante lubricante para el enfriado.

## Todo un Camino por Recorrer

Si bien es cierto las aplicaciones de estas aleaciones cada vez son más extensas y se están popularizando en la industria mundial, aún existen todavía muchas limitaciones que hacen que sea necesario profundizar en el diseño y modernización de los materiales AMF.

La mayoría de las aplicaciones explicadas se han desarrollado por métodos experimentales (prueba y error). En otros casos, su principio de funcionamiento prácticamente es el mismo, sin renovación en lo referente al diseño de la pieza, esto debido

a que falta más investigación para calcular las aleaciones y económicamente tienen un costo elevado.

Además de ello, el tema de las aleaciones con memoria de forma está básicamente concentrado en pocos especialistas en Japón, Estados Unidos y algunos en Europa. Las publicaciones y los estudios de estos materiales están dispersos y son muy variados, falta un modelo constitutivo que se aceptado y compartido mundialmente. Así mismo, y como gran limitante para el crecimiento de esta tecnología está la falta de normalización (normas de fabricación, composición, aplicaciones y mecanizados); pues, aunque en la actualidad existen normas japonesas y estadounidenses éstas todavía no son una completa solución a las necesidades de estandarización y evidentemente, no son generalizables a otras regiones como América Latina.

Por ello, los equipos de los departamentos de ingeniería y nuevos materiales de las universidades del país, que con dedicación investigan estas nuevas aleaciones, piden un mayor