

Materiales inteligentes Aleaciones metálicas y polímeros con memoria de forma^{**}

■
IONAS KLEMAS V*

RESUMEN

Se presenta una breve definición de Materiales Inteligentes como introducción al grupo de materiales que poseen la especial característica de Memoria de Forma, explicando los principios básicos del Efecto de Memoria de Forma (Shape Memory Effect) como fundamento operacional de los mismos, abarcando el fenómeno asociado de Superelasticidad. Se analizan el carácter funcional de este tipo de materiales y sus propiedades, así como los factores de diseño con miras a la posible construcción de novedosos elementos y artefactos médicos, o bien de mecanismos integrantes de la mecatrónica, la microrrobótica o sistemas biomiméticos, aportando algunos ejemplos representativos.

PALABRAS CLAVE:

Austenita

Histeresis

Martensita

Transformación martensítica

Nitinol

Fenómeno de memoria simple

Transformación de fases

Actuador robótico

Memoria de forma

Efecto de memoria de forma

Materiales inteligentes

Superelasticidad

Deformación superelástica.

* Laboratorio de Biomateriales CES-EIA. Ingeniería Biomédica pfjokle@eia.edu.co, jklemas@ces.edu.co

** El trabajo se divide en dos partes. La **Primera Parte** trata con materiales tipo nitinol, constando de: **Sección 1**, la cual se enfoca en la comprensión del fenómeno de la "memoria de forma", así como del "efecto de forma" que la sustenta. La **Sección 2**, versando sobre aspectos teórico-prácticos como base de comprensión de los factores de cálculo y diseño, con enfoque a una serie de aplicaciones innovativas en el campo de la biotecnología y la ingeniería biomédica mediante el acompañamiento de ejemplos constructivos prácticos. La **Segunda Parte**, - bajo un esquema similar al de la primera, - acometerá el estudio de los polímeros dotados con memoria de forma centrándose en aplicaciones de carácter estructural, cual ocurre en el área de la rehabilitación y concretamente en la ortopedia, pero también en otras áreas de la medicina en las cuales la miniaturización, la biocompatibilidad, y de ser posible la biodegradabilidad, sean prerequisites "sine qua non".

ABSTRACT

A brief description of Smart Materials with focus on Shape Memory Materials is given and so the necessary explanation to understand the underlying principles of the Shape Memory Effect – responsible of the operational mechanisms of such group of materials – with special consideration of the associated phenomena of Superelasticity. Functional aspects, properties and design factors shall be discussed (in Section 2 of Part 1 to be published later),- these being the necessary tools to anticipate the feasibility of assembling innovative medical devices or microrobotic, mechatronic and biomimetic systems integrating elements,- presenting some illustrative and practical examples.

KEY WORDS:

Austenite

Hysteresis

Martensite

Martensitic transformation

Nitinol

One way shape memory

Phase transformation

Robotic actuator

Shape memory

Shape memory alloy

Shape memory effect

Smart materials

Stress induced transformation

Superelasticity

Superelastic deformation

Two way shape memory.

INTRODUCCIÓN

¿Un material puede poseer inteligencia? Ello dependerá de lo que queramos significar con el vocablo "inteligencia", el cual para nosotros por una parte se refiere a la capacidad cerebral de percibir, memorizar, actuar y reaccionar, etc., pero también de pensar, aprender, y resolver problemas. Las primeras cuatro características de alguna manera sí las poseen los "materiales inteligentes"; las últimas tres podrían caer bajo el dominio de la "inteligencia artificial". Resta la capacidad de crear... Es un hecho que ni aún con la ayuda de "computadores biológicos", - en lo previsible,- será posible emular los aspectos más sofisticados de la inteligencia versus un modesto cerebro humano, como lo son el manejo de símbolos y la capacidad de abstracción. De modo que con las necesarias restricciones, bajo la denominación de *materiales inteligentes* se tomarán aquellos que poseen la cualidad y capacidad de manifestar algún tipo de respuesta en función o presencia de estímulos externos, tales como: la corriente eléctrica, un campo magnético, humedad, solventes, pH, calor, presión, o la imposición de una deformación mecánica en general. La respuesta inducida en el material, pudiendo ser reversible, con frecuencia es de naturaleza física,- caso típico de los Materiales con Memoria de Forma,- con ocurrencia de los fenómenos de expansión o contracción y de movimiento; o bien de otro tipo, como por ejemplo: la generación de calor, de un potencial, o bien variaciones de la resistividad o conducción eléctrica, de la iluminación óptica, etc.. Todos estos materiales, - y de uso experimental o práctico hoy en día, - forman parte de algunas de las siguientes clases: electro y magnetostrictivos, los piezoeléctricos, los fluidos electro y magnetoreológicos, materiales piezoeléctricos, electrocrómicos, y desde luego algunas aleaciones metálicas así como de algunos compuestos poliméricos. Considerarlos a todos ellos, así fuese brevemente, se sale del objetivo de este artículo, el cual se limita a las *Aleaciones Metálicas* y *Polímeros*, dotados de *Memoria de Forma*.

Las aplicaciones posibles en general, y las médicas en particular, de alguna manera dependen de los tipos de "acción-reacción" del material, así como de las condiciones bajo las cuales tenga lugar un evento determinado, aspectos que hacen que los materiales inteligentes también puedan ser considerados como *funcionales*; en este sentido se desempeñan como sensores, actuadores, o simultáneamente como transductores, pudiendo a su vez desempeñarse como micromotores electro-mecano-químicos mediante la conversión de algún tipo de energía traducida en acciones o movimientos predeterminados.

Entre todos los "materiales inteligentes", los materiales dotados con la *Memoria de Forma* son apenas un grupo menor el cual, a su vez reducido a las *aleaciones metálicas y polímeros*, no por ello es de menor importancia; y tal en virtud de la amplia gama de aplicaciones prácticas e innovativas posibles en el ramo de la ingeniería biomédica y, por ende, de la medicina. Este aspecto será tratado posteriormente en la segunda sección del presente capítulo. Y por cuanto las características de la Memoria de Forma en cada uno de los tipos de materiales a considerar obedecen a una fenomenología particular, será a su vez necesario estudiarlos en forma independiente, tratando el grupo de los polímeros como una segunda parte de la temática escogida.

Primera Parte – Sección 1

ALEACIONES METÁLICAS con MEMORIA DE FORMA

Shape Memory Alloys – SMA

GENERALIDADES...

De las aleaciones metálicas dotadas con la propiedad de *memoria de forma* se tiene conocimiento

de tiempos atrás pero de todas ellas, descubiertas hasta ahora, la de Níquel-Titanio (NiTi) sigue siendo la más versátil en cuanto a aplicaciones de ingeniería se trate, sobresaliendo por su mayor ductilidad, una notable resistencia a la corrosión, mayor capacidad de recuperación de deformaciones o movimientos, y sobre todo por su alta biocompatibilidad. Demás aleaciones con memoria de forma, como lo son las de Cu-Al-Ni, Fe-Mn-Si, Cu-Sn, Fe-Pt, Au-Cd, etc., todas ellas son mecánicamente más débiles y con límites de deformaciones recuperables mucho menores, - no siendo biocompatibles, - razón por la cual no serán consideradas.

Las aleaciones de níquel-titanio, en términos metalúrgicos, mas bien son composiciones intermetálicas de los dos metales en proporciones equiatómicas (caso del "Nitinol" tradicional), o cercanas a ellas. Un exceso de níquel, por ejemplo del orden de un 1%, introduce notables cambios en el comportamiento 'térmico-mecánico' de la aleación, al igual que la adición de pequeñas cantidades de otros elementos aleantes, como por ejemplo, de cromo o hierro. Las modificaciones descritas tienen por efecto la reducción de las *temperaturas de transición* y un simultáneo incremento de la resistencia del material en su fase *austenítica*.

Por ahora diremos que los tipos de aleaciones a estudiar, NiTi, se suelen tomar como sinónimo del "Nitinol" en honor de sus inventores, "Níquel Titanium Naval Ordinance Laboratories", con el riesgo de creer que se trata de un único 'producto único'. De hecho existe una gran variedad de este tipo de "aleaciones", cada una con propiedades diferentes y enfocadas hacia alguna aplicación específica. Aún aleaciones con una composición similar o igual pueden diferenciarse en su comportamiento, el cual se verá influido por variables introducidas durante los procesos de manufactura, tales como los tratamientos mecánicos (cold working) y térmicos (heat treatment-annealing) a los cuales estos materiales deben ser sometidos por los distintos fabricantes; Tales y obligatorios tratamientos son los que, en

*** La terminología utilizada en la parte introductoria se irá clarificando en la medida del avance del presente escrito.

últimas, determinan unas propiedades diferenciadas conducentes a rangos de aplicaciones a su vez diferentes y reproducibles. Producir y configurar aleaciones de Ni-Ti / SMA para un propósito específico, graduando su ductilidad, relaciones de 'Tensión-Deformación' y 'Temperaturas de Conversión Martensítica' no es tarea fácil para la casa fabricante, como tampoco son expeditos los posteriores procedimientos constructivos a cargo del usuario.

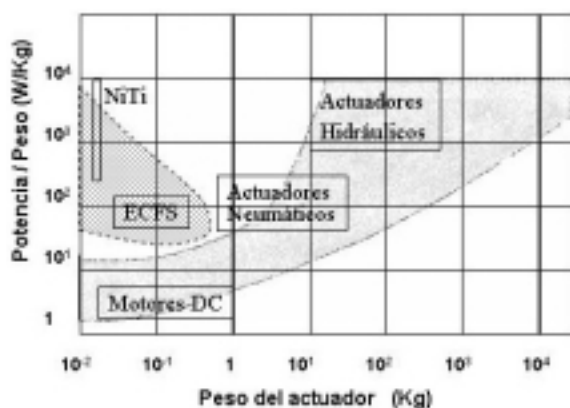
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

1.- Físicas

Lo que hace atractivos a los materiales dotados con la propiedad de la memoria de forma en general, y de las aleaciones metálicas- concretamente la de NiTi- en particular, es:

(a) Su capacidad de una recuperación reversible de deformaciones impuestas al material- hasta de un 8.5 %- actuadas o acompañadas de altas fuerzas (tensiones), las cuales son las responsables de la mecánica que nos concierne; En la Figura No. 1 se ilustran, en forma cualitativa, las magnitudes relativas del comportamiento mecánico de algunos materiales que nos son familiares. A título de comparación, podemos anotar que un NiTi / SMA desarrolla fuerzas tensiles de un orden de magnitud más alta que cualquier elemento piezoeléctrico.

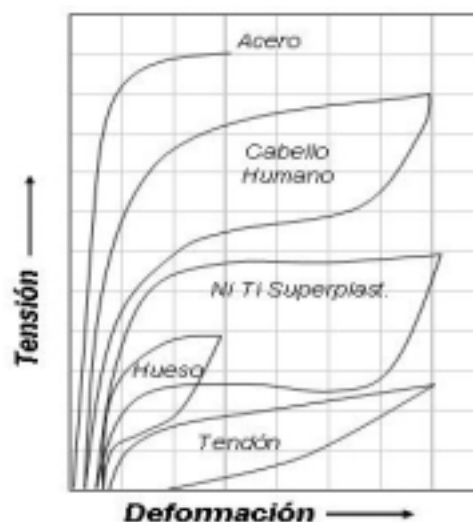
Figura 1



(b) Su relación 'Peso / Potencia'. En el Cuadro No. 2, de más abajo, se pueden apreciar algunos ejemplos, de los cuales se deduce que el nitinol presenta la mayor relación de peso/potencia para cualquier material utilizado hasta ahora, convirtiéndolo como la mejor selección disponible cuando de actuadores con menos de 100 gramos de peso se trate, convirtiéndolos en la mejor opción para el ensamble de componentes miniaturizados. Y en términos absolutos, para visualizar la potencialidad del material, en este caso un '55Ni-45Ti', calculemos el tenor de las fuerzas desarrolladas mediante el siguiente ejemplo:

Un actuador, fabricado con la aleación bajo cita, posee una tensión de actuación de 500 MPa y genera una contracción de un 8.5 %; de manera que si tomamos un alambre de nitinol de 10 cm de longitud y con un diámetro de 150mm, su peso será de 11.4 miligramos. Dicho alambre tiene la capacidad de aplicar una fuerza de 8.8N y contraerse 0.85 cm., de manera que el actuador puede alzar un objeto a casi un centímetro de altura, con un peso que es 78.000 veces mayor que el suyo propio!

Figura 2



(c) Su carácter no magnético, permitiendo la fabricación y uso de dispositivos quirúrgicos expuestos a procesos de imagenología, Vg. de magnetorresonancia.

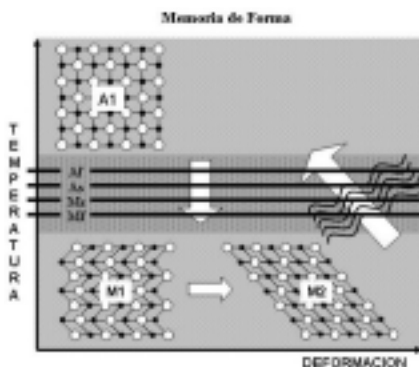
2.- Biocompatibilidad

Si bien es ampliamente aceptado el criterio de que las aleaciones de Níquel-Titanio son biocompatibles también es cierto que los mecanismos de la misma distan de haber sido clarificados, y ello en razón de los siguientes factores:

- (a) Los componentes de la aleación pueden ir disolviéndose a causa de procesos corrosivos.
- (b) Los componentes individualmente pueden formar algunos compuestos, los cuales exhibirán sus propios efectos de toxicidad (reacciones iónicas ínter actuantes con un medio complejo).

De manera que la resistencia a la corrosión de una aleación dada y la posible toxicidad de los metales individualmente, son las determinantes de la biocompatibilidad. La problemática se complica por cuanto es difícil poder estimar la concentración de los componentes metálicos liberados desde un material de implante toda vez que el proceso es afectado por muchas y diversas causas, tales como el tiempo y las condiciones locales, sea el medio químico-fisiológico y el físico-mecánico, este último siendo el caso para los materiales tipo SMA operando bajo condiciones dinámicas y estados de tensión, situaciones que de alguna forma intervienen la cinética de los procesos corrosivos. Ciertamente, estas facetas están siendo investigadas y los resultados habidos, o por obtenerse, deberán ser consultados en la literatura científica pertinente.

Figura 3.1



A_F : Temperatura de terminación austenítica
 A_S : Temperatura de iniciación austenítica

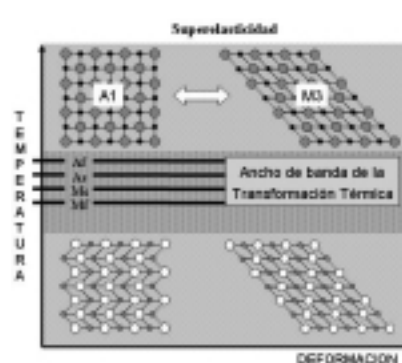
EL PRINCIPIO OPERACIONAL

Desde el punto de vista de las aplicaciones prácticas de las aleaciones SMA, en nuestro caso del nitinol, podemos decir que este tipo de material puede poseer tres formas diferentes:

- (1) Martensita, térmicamente inducida ($M_1 - M_2$)
- (2) Martensita Súper Elástica (M_3) inducida por tensión (en un delimitado rango de alta temperatura y partir de cierta tensión crítica), y
- (3) Austenita (A_1), que es la forma estable de la aleación en su rango de alta temperatura.

A esta altura es conveniente aclarar que las expresiones de "alta", o "baja" temperatura, no se deben interpretar en su sentido literal sino como referencia de un estado por encima o por debajo de una temperatura crítica, temperatura que definiremos como la de la "Transformación Martensítica", sea cuando el material al ser calentado pasa a su estado 100% austenítico (ver Figuras 3). Dicha temperatura, equivalente por definición a la de la terminación austenítica, A_F , -de acuerdo al tipo de aleación y variables en los procesos de su manufactura, - puede ser ajustada por el fabricante para un valor cualquiera comprendido en el rango de temperaturas desde -100°C , hasta $+200^{\circ}\text{C}$. En el caso de aplicaciones biomédicas, usualmente, la temperatura de transformación se fija alrededor de los 37°C .

Figura 3.2



M_S : Temperatura de iniciación martensítica
 M_F : Temperatura de terminación martensítica

Ahora bien, cuando el material se encuentra en su forma martensítica (de baja temperatura) es blando y dúctil, pudiendo ser deformado con gran facilidad (contextura parecida al peltre). Si la martensita se generó mediante el enfriamiento de una muestra en su estado austenítico, sea que se obtuvo por vía térmica exclusivamente (Fig 3.1), la deformación o configuración que se le imponga será de tipo plástico y se conservará como tal hasta que dicha muestra sea calentada por encima de su temperatura de transformación, momento en el cual habrá recuperado su forma original previa a la distorsión impuesta. Si en cambio la transformación martensítica fue inducida mediante una tensión deformativa (Fig 3.2),- solo funcional en un estrecho rango de temperaturas ligeramente superiores a A_F , - entonces se generará un material extraordinario, *superelástico*- M_3 , del cual nos ocuparemos llegado el momento. Falta acotar diciendo que si el material es calentado a temperaturas superiores a la de la transformación martensítica, el resultado será la obtención de una austenita, forma cristalográfica estable que corresponde a un material de alta tenacidad, duro y fuerte mecánicamente, con valores similares a los del titanio puro. De manera que la aleación NiTi /SMA posee todas las propiedades mencionadas, cuya manifestación particular y específica dependerá de la temperatura a la cual sea utilizada.

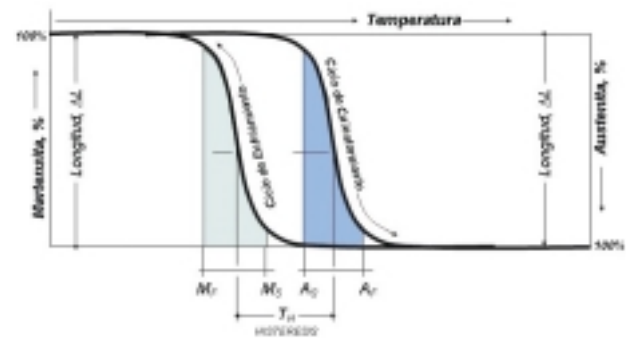
Ya visto desde el punto de vista cristalográfico, nos atenemos solo a dos formas: la austenítica, y la martensítica, independientemente de cómo esta última haya sido obtenida. La transformación martensítica es un proceso reversible y ocurre no a una temperatura exacta sino en un intervalo de temperaturas que generalmente viene comprendido entre los 1°C y 20°C, intervalo que denominaremos como "Banda de la Transformación Térmica"(ver Figuras 3). El límite superior de esta banda es la temperatura a la cual la totalidad de la martensita se ha transformado en austenita. Su valor viene definido y especificado por el fabricante del material.

El sentido de la transformación puede tener dos direcciones: (a) ciclo de calentamiento desde mar-

tensita a austenita, y el inverso (b) ciclo de enfriamiento de austenita a martensita. Los recorridos de los dos ciclos no son iguales, es decir, no son superponibles, sea: están desfasados. La diferencia entre las temperaturas medias de transición correspondientes a cada uno de los ciclos se llama *histéresis*, la cual puede tener una amplitud de entre 10° C hasta 50° C, o más (ver figura No. 4), dependiendo de cómo haya sido procesado el material durante su manufactura.

Figura 4

Transformación Martensítica y los cambios dimensionales asociados en función de la temperatura y ciclos de calentamiento - enfriamiento



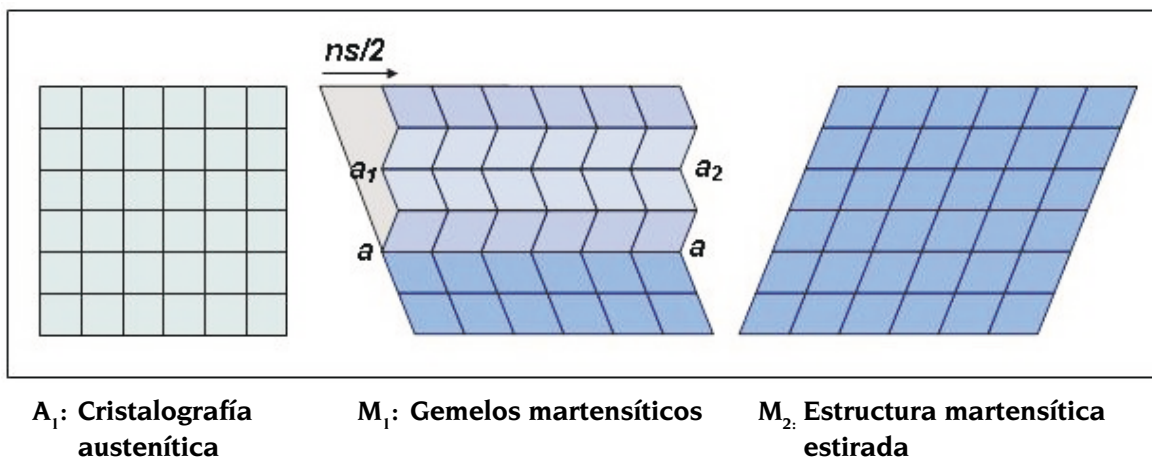
El inusual fenómeno de la transformación martensítica obedece a la necesidad que una estructura cristalina dada tiene para adquirir un estado de mínima energía, correspondiente a una temperatura dada, acorde con principios de la termodinámica clásica. En una aleación NiTi las relativas simetrías entre las dos fases conducen a una transformación altamente ordenada, en la cual los predecibles desplazamientos atómicos (de átomos individuales) son los que generan los cambios dimensionales a escala microscópica; la estructura cristalina de la martensita es menos simétrica que la de la fase emparentada austenítica y de ahí la direccionalidad de la transformación hacia austenita en respuesta a un suficiente incremento de la temperatura.

Para comprender mejor el comportamiento de la aleación a escala física es necesario explicar que

solo existe una sola orientación cristalográfica posible para la forma austenítica y que en cambio para la martensítica existen 24 planos conformacionalmente equivalentes, llamados "variantes". El mecanismo mediante el cual cada una de las variantes es acomodada se denomina "twinning" (conformación gemela), la cual puede ser descrita como 'simetría de espejo', producto del acoplamiento de átomos a lo largo de un particular plano atómico, el plano de "gemelos" (ver Figura No. 5), con lo cual las deformaciones pueden ser absorbidas elásticamente mediante cambios en la orientación de la estructura cristalina sin in-

currir en deslizamientos o dislocaciones, cuales rigen el comportamiento deformacional de los metales comunes. Un espécimen NiTi en estado martensítico se podrá deformar hasta el punto de convertirse en una sola variante cristalográfica con capacidad de un cierto máximo de tensión deformativa. Sobrepasado este nivel el material seguirá deformándose, pero plásticamente, sea de un modo convencional por deslizamiento, hasta el límite de su resistencia y la consiguiente ruptura. La deformación post-elástica no es recuperable y por tanto en esta zona no habrá lugar para el "Efecto de Memoria".

Figura 5



A₁: Cristalografía austenítica

M₁: Gemelos martensíticos

M₂: Estructura martensítica estirada

Ahora cabe una observación de importancia: si se suspende/interrumpe la deformación (del material en su estado martensítico) antes de llegar al límite crítico (el de la iniciación de las deformaciones plásticas), el material conservará algunas de sus variantes cristalográficas asociadas, y si en este momento es calentado por encima de la temperatura de la *transformación martensítica*, ésta tendrá lugar, restituyendo la asociada cristalografía austenítica y de esta manera reasumiendo (casi en su totalidad) su figura o forma originales, anteriores a la deformación impuesta a la dúctil martensita. El paso descrito constituye el fenómeno de memoria simple (one way memory), cual se ilustra en la gráfica No. 1, bajo el título de "Funcionalidad de los Materiales SMA" (Capítulo Primero, Sección 2), significando que un nuevo ciclo

de enfriamiento no introducirá cambios dimensionales en la muestra tratada.

Vistos los aspectos que rodean el fenómeno de la Memoria de Forma, para el caso particular de las aleaciones metálicas, ésta puede ser definida en los siguientes términos:

"Son un grupo de materiales inusuales que (habiendo sido deformados) poseen la habilidad de regresar a su forma original cuando:

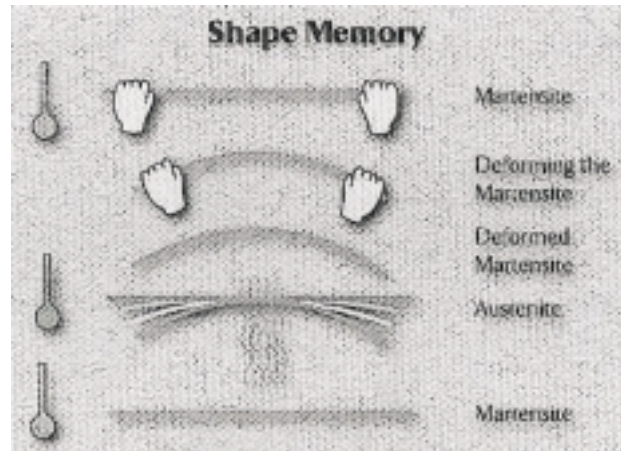
- a.- son calentados por encima de una determinada temperatura crítica, o
- b.- es removida la fuerza o tensión (mechanical constraint), responsable de la deformación previamente impuesta".

LA TRANSFORMACIÓN MARTENSÍTICA Y EL EFECTO DE LA MEMORIA DE FORMA

Recapitulando algunos conceptos nos extendemos para decir que independientemente del tipo de nitinol, o una aleación asimilable, la **Memoria de Forma** obedece a la continua aparición y desaparición de entidades o formas cristalinas de diferente especie, habitualmente al vaivén de la elevación o descenso de la temperatura, y que **El Efecto de la Memoria de Forma (shape memory effect – SME)** en el cual se basa es consecuencia de un desplazamiento o reorientación de tales estructuras cristalinas dentro del material, entre dos fases sólidas diferentes,- la martensítica y la austenítica,- las cuales en su curso de una a otra pueden ser temporal y parcialmente coexistentes. El proceso de pasar de una fase a la otra es el que se denomina como **La Transición Martensítica**, durante la cual se desarrolla una martensita termoelástica a partir de una austenita estable; Tal como ya se dijo, este proceso si bien es geométricamente reversible, no lo es en cuanto a la ruta seguida en uno u otro sentido (de enfriamiento o calentamiento), sea que viene acompañado del fenómeno de histéresis. La histéresis térmica a su vez viene asociada con la respectiva histéresis dimensional, cual se ilustró en las Figuras 4.

Los procesos de Transformación *térmicamente inducidos*, para ser caracterizados, requieren del conocimiento de las temperaturas que definen el inicio y la finalización de la conversión martensítica durante el ciclo de enfriamiento como también durante el de enfriamiento, temperaturas que a su turno también definen el ancho del lazo de la **histéresis térmica**.

Veamos el efecto SME en acción:



Una barra cilíndrica recta (o un alambre) de TiNi/SMA en estado austenítico (de alta temperatura) es enfriada por debajo de su temperatura de transición: la estructura cristalina cambiará a martensita. Si este material blando ahora es, por ejemplo, doblado o curvado, sea deformado plásticamente y a continuación recalentado por encima de la temperatura de transición, se enderezará recuperando la forma original.

Para una mejor comprensión del fenómeno ocurrido nos valdremos de un esquema simplificado, bidimensional, representando el arreglo cristalográfico del material en sus dos fases.

Complementando explicaciones previas, cada 'cuadrado' representa un grano (en términos metalúrgicos) con sus respectivos linderos. Los granos forman una estructura gemela, en el sentido de que se encuentran orientados simétricamente a lado y lado de los límites ínter granulares, con ello permitiendo que el 'enrejado' interno de granos individuales pueda desplazarse (inclinarse o enderezarse) pero manteniendo el mismo contacto interfacial con granos adyacentes. Como resultado de esta posibilidad los materiales SMA pueden sufrir grandes deformaciones macroscópicas sin perder el ordenamiento interno en su estructura microscópica. Nótese también que los granos se encuentran orientados en direcciones diferentes en cada par de capas adyacentes, siendo cada formación una imagen de espejo de la otra. Si a este tipo de estructura la sometemos a

fuerzas tensiles- o bien de compresión, flexión o corrosión- deformativas, la retícula comenzará a deformarse estirándose, para alinearse en una

misma dirección. El proceso lo podemos graficar en términos de 'tensión-deformación', como se ilustra en la Figura No. 6 a continuación:

Figura No. 6

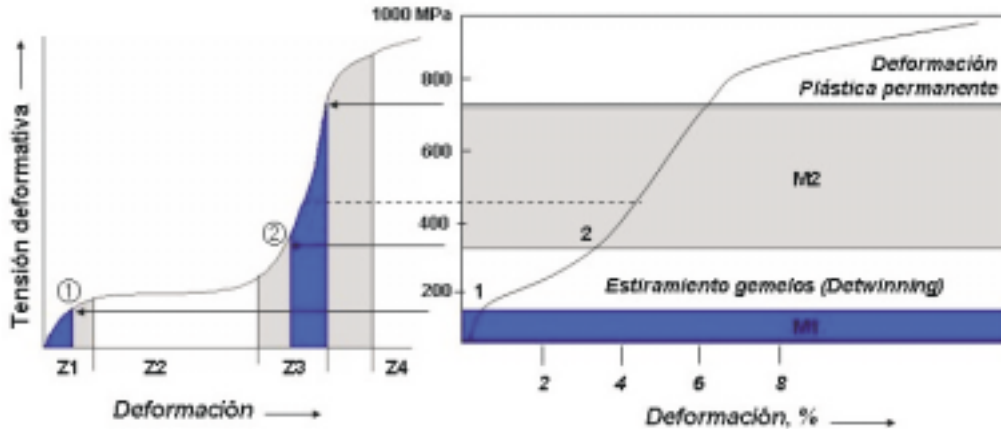


Diagrama de Tensión en la fase martensítica

Para tensiones pequeñas la estructura M_1 de la Figura 5 se comporta elásticamente: zona Z1. En el punto 1 el material comienza a ceder mediante el estiramiento de los gemelos (zona Z2) hasta que en el punto 2 la estructura M_1 llega a su límite, quedando convertida en la estructura martensítica M_2 , alineada. A partir de este momento, en respuesta a sustanciales incrementos de tensión, se entra en una segunda región elástica (zona Z3). De aquí y en adelante (zona Z4), modestos incrementos de tensión causarán subsiguientes estiramientos, pero de carácter plástico convencional, causando deformaciones permanentes y no recuperables térmicamente.

Los cambios sufridos en el interior de la estructura cristalina del material, durante el ejercicio del *Efecto de Memoria*, no corresponden a un proceso termodinámicamente reversible toda vez que hay un gasto de energía disipada a causa de una natural fricción interna y la inevitable creación de algunos defectos estructurales cual se presenta normalmente en los metales. De ahí la ocurrencia del fenómeno de *Histéresis*, el cual, sea dicho anticipadamente, se convierte en un desafío para el desarrollo de esquemas de control para actuadores basados en el uso de aleaciones metálicas con memoria de forma.

EL FENÓMENO DE LA SUPERELASTICIDAD

En anteriores ilustraciones ya habíamos insinuado el proceso de la aparición de una martensita por vía de tensión, como una transición entre las estructuras A_1 y M_3 . La ocurrencia de este fenómeno bajo condiciones de operación isotérmica, para el caso del nitinol, solo es posible en materiales especialmente tratados para tal efecto, y se vuelve operativo únicamente bajo ciertas circunstancias; Estas son: (a) la temperatura de trabajo debe ser superior a la de la transformación martensítica del material, en un rango variable que generalmente no excede de un $DT = 508C$ y, (b) cualquier temperatura operacional escogida en este rango tendrá su respectiva y mínima tensión crítica a la cual podrá tener lugar el fenómeno de la superelasticidad.

A diferencia de la martensita térmicamente inducida, una aleación superelástica cambia de forma mediante la simple aplicación de una fuerza o tensión deformante, regresando a su figura original en el momento que tal fuerza es removida; es decir, actúa a semejanza de un resorte. Otra

de las diferencias consiste en que: (a) se requieren fuerzas sustancialmente mayores para lograr una determinada deformación, (b) se pueden obtener deformaciones de mayor magnitud, y (c), las deformaciones son totalmente recuperables (100% reversibles), caso que no ocurre con la martensita termoelástica la cual siempre presenta una pequeña deformación residual ($\Delta\epsilon$ de 0.5 %) no recuperable por vías "normales" de ciclaje térmico. Este último aspecto permite un método práctico para poder distinguir los dos tipos de aleaciones NiTi/SMA.

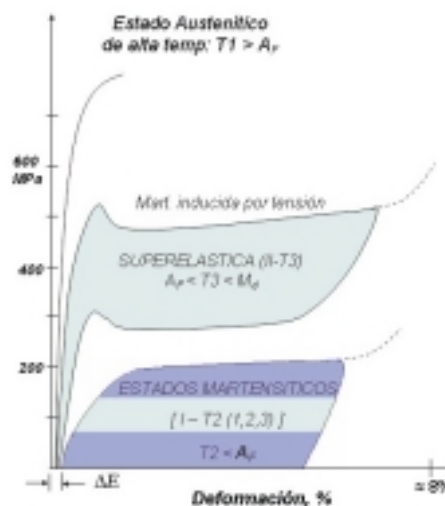
El comportamiento superelástico, - por su importancia en el desarrollo de múltiples aplicaciones prácticas, como por la complejidad de las bases teóricas necesarias para poder aprovechar todo su potencial en la creación de aplicaciones avanzadas, - será parte de los temas a tratar más adelante, en la Sección 2 de este Primer Capítulo.

Por ahora solo diremos que cuando un material NiTi/SMA superelástico es sometido a una carga mecánica, la transformación de la fase 'cúbica-austenítica' a la 'monoclínica martensítica', - previa transición por la rombohédrica martensítica (fase R), - es producto de la tensión aplicada sobre el material, con acompañamiento de las correspondientes deformaciones del orden de hasta un 8%. Si la temperatura operacional excede cierto límite, $T > M_s$, el material dejará de exhibir el fenómeno de la superelasticidad y se comportará de una manera convencional. Por ahora, no sobra mencionar que se requiere menos energía para inducir por vía de tensión a una martensita, y así para deformarla, que la que se necesitaría para deformar una austenita mediante usuales mecanismos.

Para terminar, diremos que es un hecho el que las propiedades mecánicas de una aleación determinada de NiTi varían de manera drástica a lo ancho de la banda de transformación térmica, cual se representa en la Figura 7, lo cual sin embargo no es de importancia real por cuanto que la funcionalidad del "actuador" se basa en la transformación martensítica total, sea en los estados del material correspondientes a temperaturas ma-

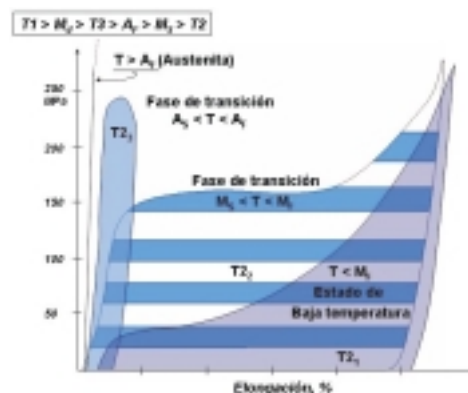
yores a A_s y menores que M_f y no en los estados transicionales intermedios.

Figura 7
Comportamiento termo-mecánico
Características de "Tensión-Deformación"
en función de la temperatura



En el caso de las martensitas *inducidas por tensión*, sea en los materiales superelásticos, el panorama cambia por completo y requiere de un análisis de mayor profundidad, cual se hará en su oportunidad. Mientras tanto, y de manera por demás cualitativa, se presentan las características mecánicas para los tres tipos de material (austenítico, martensita termoelástica y martensita inducida por tensión-superelástica), las cuales corresponden a alguna temperatura cualquiera de trabajo, comprendida entre los límites de temperaturas propias para cada uno de ellos cual se aprecia en la Figura 8.

Figura 8



Debe tomarse nota, habida cuenta de anteriores consideraciones, que la línea 'punteada' en la Figura 8 (correspondiente a estados martensíticos I-T2) representa la respuesta a un ciclo de calentamiento conducente a la recuperación de la forma previa a su deformación, la cual no es total. La deformación remanente D_e (permanent set)

- puede ser reducida o eliminada solo mediante
- repetitivos y subsiguientes ciclos deformativos y
- recuperativos térmicos, procedimiento que se denomina "entrenamiento".
- Las situaciones presentadas, así como los correspondientes interrogantes, serán motivo de posterior análisis.

