

F. X. GIL*
C. LIBENSON**
J. A. PLANELL*

* Dept. Ciencias Materiales e Ingeniería Metalúrgica. ETS Ingenieros Industriales de Barcelona. Universidad Politécnica de Cataluña.

** Dept. Ciencias Morfológicas y Odontostomatología. Facultad de Odontología. Universidad de Barcelona.

Procesos de adiestramiento de alambres ortodóncicos con memoria de forma

Training processes in NiTi orthodontic archwires

Resumen

Los alambres de ortodoncia de níquel-titanio son suministrados por los diferentes fabricantes con formas de arco estándar. Los procesos de adiestramiento o de «educación» permiten cambiar las formas del arco dental del alambre. Esta propiedad permitirá que el material a una temperatura tenga una forma y que a una temperatura menor recuerde otra forma diferente. Este doble efecto memoria de forma proporciona al clínico una mayor versatilidad de los alambres de NiTi en el tratamiento ortodóncico.

Palabras clave: Níquel-titanio. Adiestramiento. Memoria de forma.

Summary

Nickel-titanium orthodontic wires are supplied by the different manufacturers with a standard shape. Training processes give the change of the dental archwire shape as the orthodontist likes; being this shape memorized as original and will be achieved at the end of the treatment. This property is due to the two way shape memory effect of these alloys.

Key words: Nickel-titanium. Shape memory. Training.

Introducción

Uno de los campos donde las aleaciones con memoria de forma se han aplicado más extensamente es en la odontología y, especialmente, la ortodoncia. La corrección de las posiciones dentales con los alambres superelásticos de Ni-Ti se debe a que éstos ejercen ligeras y constantes tensiones sobre los dientes mal posicionados, produciendo una completa corrección en las posiciones dentales en un menor tiempo y con un mayor confort para el paciente.

Las empresas suministran diferentes alambres de Ni-Ti con diferentes curvaturas y perfiles que se adaptan a las arcadas maxilares y modulares estándar. Estos alambres con una preforma tienen en ocasiones que ser ajustados a las morfometrías orales del paciente; la nueva forma original de los alambres se pueden conseguir por diferentes procesos de adiestramiento, consiguiéndose que el alambre tenga diferentes formas a la temperatura bucal, y a la temperatura ambiente el alambre adquirirá la forma fría o caliente solamente con los cambios de temperatura¹.

Correspondencia:

ETS Ingenieros Industriales de Barcelona. Departamento de Ciencias Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Universidad Politécnica de Cataluña.

Esta propiedad que presentan estas aleaciones se denomina doble efecto memoria de forma y se debe a que la aleación Ni-Ti presenta una transformación martensítica termoelástica. En este trabajo se presentan los fundamentos de dicha transformación, el efecto de memoria simple y los procesos de adiestramiento que dan lugar al doble efecto de memoria de forma. Esta propiedad abre muchas posibilidades en la terapia ortodóncica, ya que permite hacer arcos con el alambre, según los criterios del clínico para cada paciente^{2,3,4}.

Transformaciones martensíticas termoelásticas

Una transformación martensítica es un cambio estructural en estado sólido que tiene lugar mediante un movimiento coordinado de los átomos, tal que el desplazamiento relativo observado sea pequeño en relación al parámetro de la red. Esta transformación transcurre por un mecanismo de reordenación atómica sin difusión.

Si partimos de la fase estable a alta temperatura, que en nuestro caso es la austenita, y enfriamos rápidamente obtenemos una nueva estructura denominada martensita; la

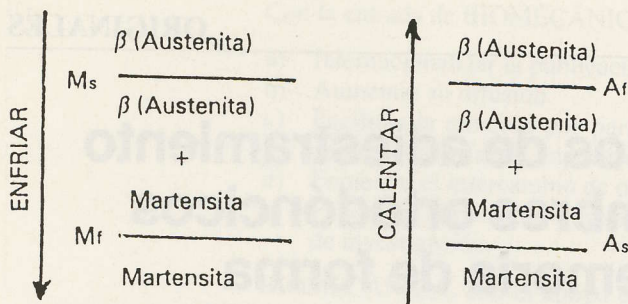


FIG. 1.—Esquema de las temperaturas de transformación.

temperatura a la que se inicia la transformación martensítica es la M_s ; si se prosigue el enfriamiento, la transformación concluye a la temperatura de M_f , es decir, a esta temperatura la estructura es totalmente martensítica; si una vez estabilizada la estructura martensítica se calienta se inicia una transformación inversa a una temperatura singular denominada A_s , concluyendo la transformación a otra temperatura singular A_f , para la cual la estructura estabilizada es totalmente de fase austenítica (Fig. 1).

Efectuadas ambas transformaciones se observa una cierta histéresis, denominada histéresis de la transformación. Una cuantificación de la histéresis puede ser evaluada como $T_h = A_f - M_f$; la magnitud de la histéresis está relacionada con la energía de fricción de la transformación⁵.

Las características de esta transformación martensítica son:

- Se produce entre unos intervalos de temperatura:
 - Para la transformación austenita \rightarrow martensita, desde M_s a M_f .
 - Para la transformación martensita \rightarrow austenita, desde A_s a A_f .
- Presenta un ciclo de histéresis M_f - A_s del orden de 10°C .
- La transformación es reversible: austenita \rightarrow martensita.

En las transformaciones martensíticas termoelásticas la histéresis es pequeña, a diferencia de otras transformaciones martensíticas no termoelásticas como las que tienen lugar en los aceros.

La reversibilidad de las transformaciones termoelásticas es debido principalmente a que existen pequeñas deformaciones elásticas asociadas con el cambio de estructura cristalina, nunca se sobrepasa el límite elástico de la fase origen, no tiene lugar una deformación plástica irreversible. En la figura 2 se presentan los ciclos de histéresis para una aleación termoelástica (Au-Cd) y otra no termoelástica (Fe-Ni).

La temperatura de transformación depende a su vez de la tensión a la que se somete el material, así para producir la transformación martensítica pueden influirse sobre estos 2 parámetros: temperatura y tensión. En efecto, la transformación se puede inducir a temperaturas superiores a M_s mediante la aplicación de una tensión externa que tienda a neutralizar las tensiones internas producidas por la transformación.

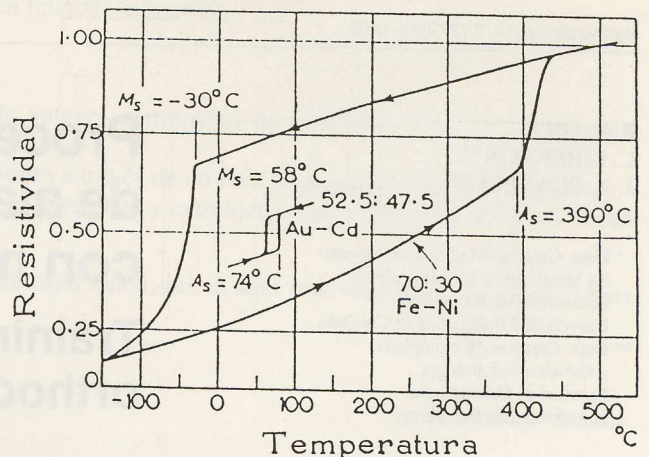


FIG. 2.—Ciclos de histéresis para una aleación Au-Cd termoelástica y un acero Fe-Ni no termoelástica.

A la temperatura de M_s la tensión externa requerida para inducir la transformación es nula; al aumentar la temperatura por encima de M_s aumenta la tensión requerida para inducir la transformación⁶.

Se puede definir otra temperatura característica, M_d , por encima de la cual no se induce al cambio por tensión. A temperaturas elevadas superiores a M_d la fase origen se deforma plásticamente antes de que la tensión externa alcance un nivel suficiente para inducir la transformación martensítica. También se puede hablar de la temperatura A_d , la cual es la menor temperatura a la cual se puede inducir la transformación inversa por aplicación de una tensión mecánica externa.

Las propiedades de las aleaciones con transformación martensítica termoelástica son el efecto pseudoelástico o la superelasticidad, efecto memoria de forma simple y doble, alta capacidad de amortiguamiento, entre las más importantes. A continuación se presenta el efecto memoria de forma simple y doble.

Efecto memoria de forma simple

Partiendo de una aleación en fase austenítica (Fig. 3) al enfriarla por debajo de la temperatura M_f estabiliza la estructura martensítica, y al serle aplicado un esfuerzo tiene lugar una reorientación de los cristales martensíticos, lo que produce una deformación que permanece en el cristal incluso después de cesar el esfuerzo aplicado (plasticidad por reorientación de planos martensíticos).

Al calentar por encima de la temperatura A_f el material recupera el dimensionado original. Este es el llamado *efecto de memoria simple*.

La aleación fue producida con una forma particular, denominada «forma caliente», por debajo de M_f (estructura martensítica), pudiendo ser modificada aplicando un esfuerzo, se denomina «forma fría» al calentar y sobrepasar M_s recupera exactamente su forma inicial, aunque se le opongán esfuerzos que pueden llegar a los 70 kg/mm^2 . Es-

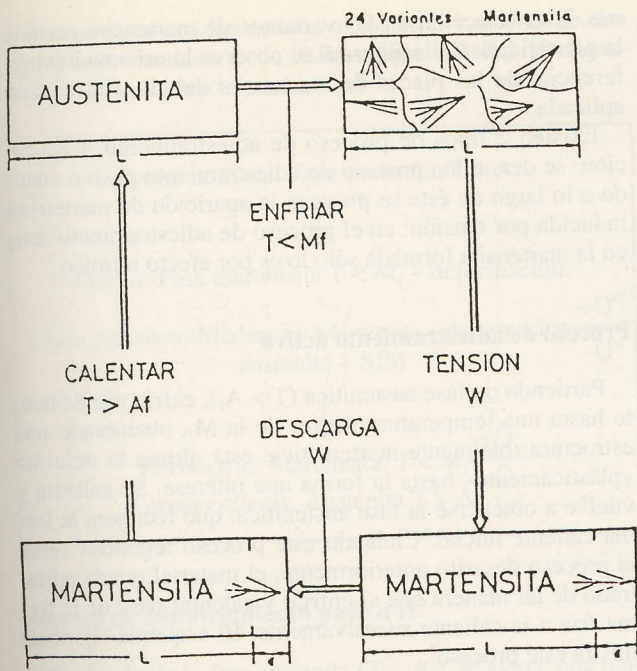


FIG. 3.—Efecto memoria de forma simple.

to puede observarse en la figura 4, en la que el esfuerzo en este caso se proporciona por un peso. En la «forma fría» de estructura martensítica el peso produce la deformación en el alambre; al calentar y obtener la «forma caliente» de estructura austenítica recupera la forma inicial, superando la fuerza contraria ejercida por el peso⁷.

Tenemos entonces un material que «memoriza» la forma en que fue elaborado y vuelve a ella por efecto térmico, aunque deba de vencer importantes esfuerzos.

También se puede observar el efecto de memoria de forma cuando la estructura del alambre presenta martensita de origen térmico y la martensita inducida por tensión a partir de austenita (SIM: *stress induced martensite*). En efecto, partiendo de fase austenita + martensita si se le somete a tensión puede inducirse martensita, de tal manera que observando la figura 5 puede apreciarse cómo la parte ascendente de la curva corresponde al campo elástico y la segunda pendiente más moderada corresponde a la forma-

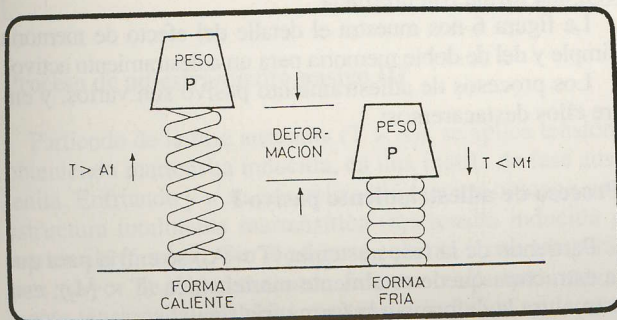


FIG. 4.—Respuesta de una aleación con memoria de forma al aplicar temperatura.

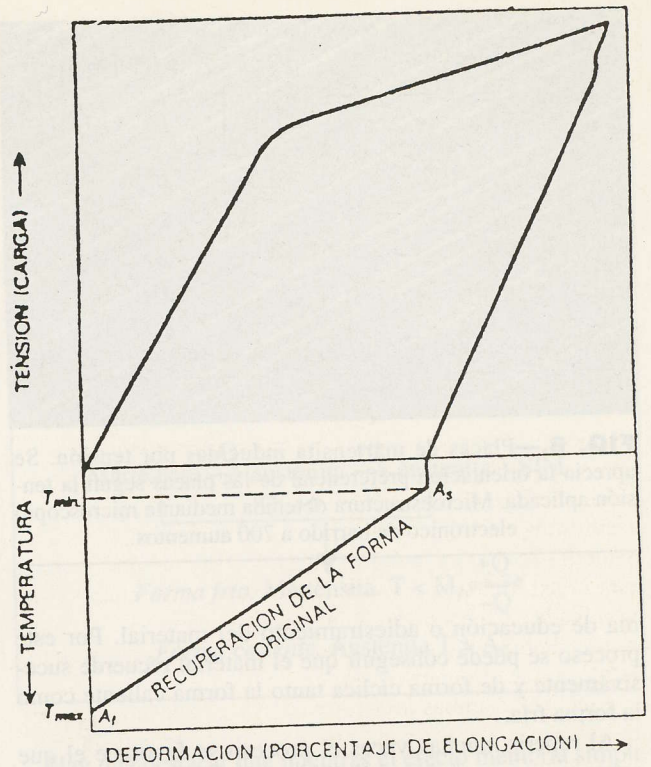


FIG. 5.—Curva tensión-deformación de una aleación que presenta las fases austenita y martensita.

ción de martensita inducida por tensión; cuando se suprime la tensión el material recupera elásticamente en parte el estado inicial, pero mantiene una deformación residual como consecuencia de la deformación plástica de la martensita de origen térmico.

Calentando hasta la temperatura A_s , la fase austenita empieza a estabilizarse, disminuyendo la proporción de martensita de origen térmico, y con ello la deformación disminuye gradualmente a medida que la temperatura aumenta. Cuando la temperatura llega a A_f la fase austenita es total y la muestra retorna a la forma inicial.

Tanto si se parte de una martensita estabilizada térmicamente como por tensión (SIM), la justificación de este efecto de memoria de forma que presentan estas aleaciones metálicas descansa en el hecho de que el material presenta una transformación reversible en su distribución atómica y que además se produce en un rango estrecho de temperatura.

Durante la transformación hay un pequeño cambio de volumen y desplazamiento de átomos que producen deformación en la matriz que está transformando. Estas deformaciones son elásticas, ya que si fueran plásticas serían irreversibles.

Efecto doble memoria de forma. Procesos de adiestramiento

Este efecto de doble memoria se logra haciendo muchas veces el ciclo de memoria simple: es un proceso que se llama

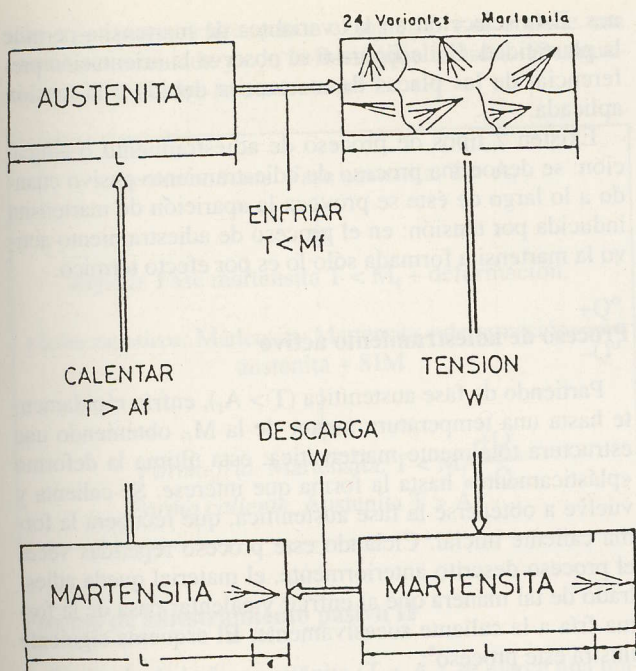


FIG. 3.—Efecto memoria de forma simple.

to puede observarse en la figura 4, en la que el esfuerzo en este caso se proporciona por un peso. En la «forma fría» de estructura martensítica el peso produce la deformación en el alambre; al calentar y obtener la «forma caliente» de estructura austenítica recupera la forma inicial, superando la fuerza contraria ejercida por el peso⁷.

Tenemos entonces un material que «memoriza» la forma en que fue elaborado y vuelve a ella por efecto térmico, aunque deba de vencer importantes esfuerzos.

También se puede observar el efecto de memoria de forma cuando la estructura del alambre presenta martensita de origen térmico y la martensita inducida por tensión a partir de austenita (SIM: *stress induced martensite*). En efecto, partiendo de fase austenita + martensita si se le somete a tensión puede inducirse martensita, de tal manera que observando la figura 5 puede apreciarse cómo la parte ascendente de la curva corresponde al campo elástico y la segunda pendiente más moderada corresponde a la forma-

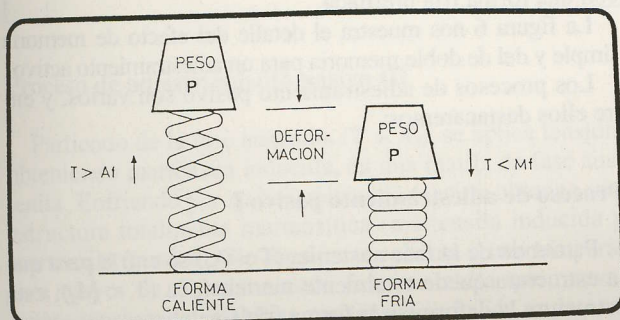


FIG. 4.—Respuesta de una aleación con memoria de forma al aplicar temperatura.

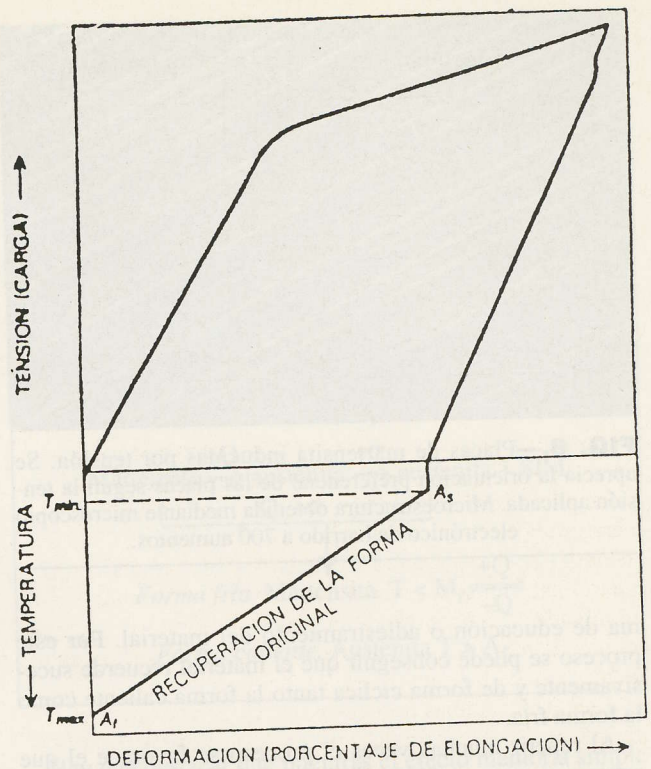


FIG. 5.—Curva tensión-deformación de una aleación que presenta las fases austenita y martensita.

ción de martensita inducida por tensión; cuando se suprime la tensión el material recupera elásticamente en parte el estado inicial, pero mantiene una deformación residual como consecuencia de la deformación plástica de la martensita de origen térmico.

Calentando hasta la temperatura A_s , la fase austenita empieza a estabilizarse, disminuyendo la proporción de martensita de origen térmico, y con ello la deformación disminuye gradualmente a medida que la temperatura aumenta. Cuando la temperatura llega a A_f la fase austenita es total y la muestra retorna a la forma inicial.

Tanto si se parte de una martensita estabilizada térmicamente como por tensión (SIM), la justificación de este efecto de memoria de forma que presentan estas aleaciones metálicas descansa en el hecho de que el material presenta una transformación reversible en su distribución atómica y que además se produce en un rango estrecho de temperatura.

Durante la transformación hay un pequeño cambio de volumen y desplazamiento de átomos que producen deformación en la matriz que está transformando. Estas deformaciones son elásticas, ya que si fueran plásticas serían irreversibles.

Efecto doble memoria de forma. Procesos de adiestramiento

Este efecto de doble memoria se logra haciendo muchas veces el ciclo de memoria simple: es un proceso que se lla-

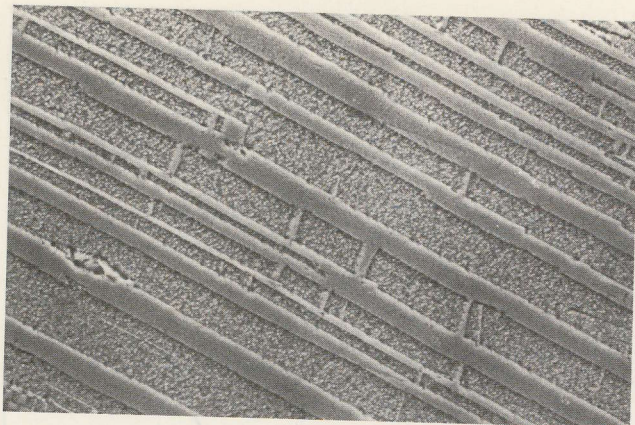


FIG. 6.—Placas de martensita inducidas por tensión. Se aprecia la orientación preferencial de las placas según la tensión aplicada. Microestructura obtenida mediante microscopio electrónico de barrido a 700 aumentos.

ma de educación o adiestramiento del material. Por este proceso se puede conseguir que el material recuerde sucesivamente y de forma cíclica tanto la forma caliente como la forma fría.

Al repetir muchas veces el proceso se favorece el que aparezcan unas variantes de martensita, frente a otras que quedan impedidas, según parece debido a las dislocacio-

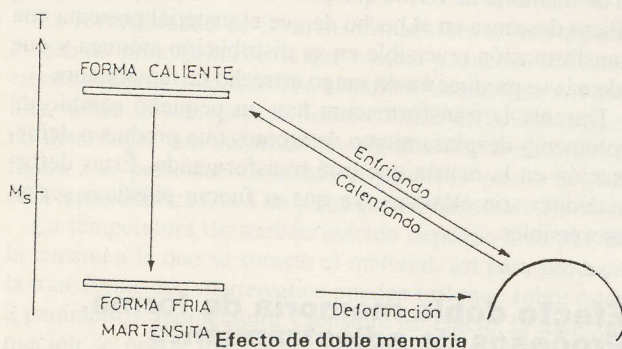
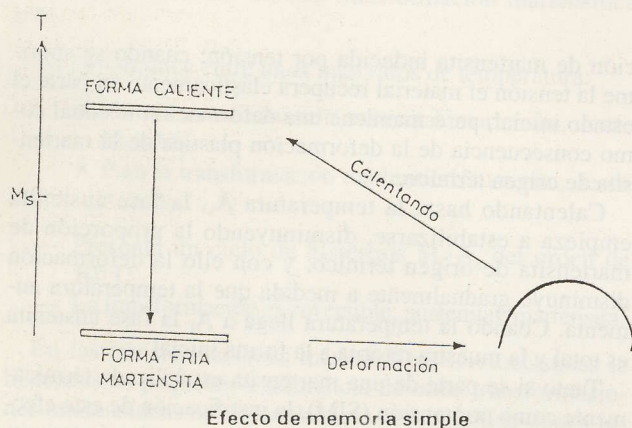


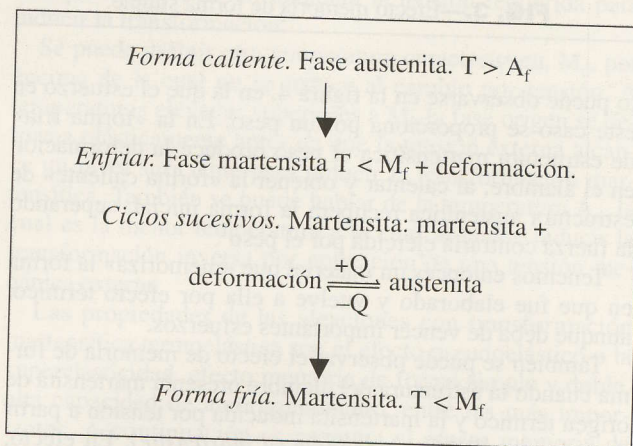
FIG. 7.—Diferencias entre el efecto simple y doble memoria de forma.

nes. Esta selección en las variantes de martensita permite la plasticidad. En la figura 6 se observa la orientación preferencial de las placas de martensita debida a la tensión aplicada.

Existen 2 tipos de proceso de adiestramiento o educación: se denomina proceso de adiestramiento pasivo cuando a lo largo de éste se provoca la aparición de martensita inducida por tensión; en el proceso de adiestramiento activo la martensita formada sólo lo es por efecto térmico.

Proceso de adiestramiento activo

Partiendo de fase austenítica ($T > A_f$), enfrío rápidamente hasta una temperatura menor de la M_f , obteniendo una estructura totalmente martensítica; esta última la deformato «plásticamente» hasta la forma que interese. Se calienta y vuelve a obtenerse la fase austenítica, que recupera la forma caliente inicial. Ciclando este proceso repetidas veces el proceso descrito anteriormente, el material queda adiestrado de tal manera que al enfriar y calentar pasa de la forma fría a la caliente sucesivamente. El esquema siguiente ilustra este proceso⁸:



En este caso la deformación repetida sobre la estructura martensítica comporta una educación en unas orientaciones preferentes que la fase austenita en su retransformación sucesiva memoriza estabilizando finalmente esta estructura martensítica con orientación preferente y con ello con una forma fría prefijada.

La figura 6 nos muestra el detalle del efecto de memoria simple y del de doble memoria para un adiestramiento activo.

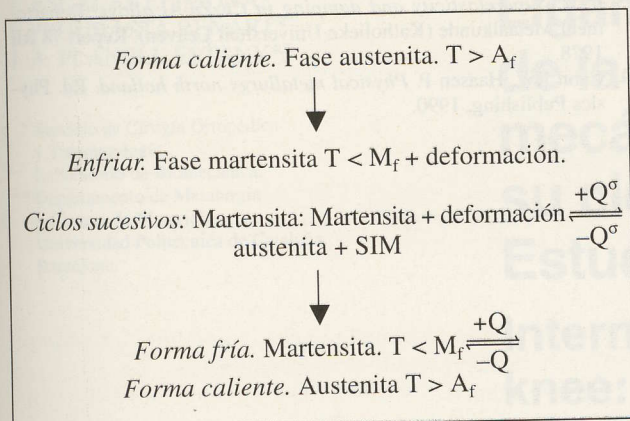
Los procesos de adiestramiento pasivo son varios, y entre ellos destacaremos:

Proceso de adiestramiento pasivo I

Partiendo de la fase austenita ($T > A_f$) se enfría para que la estructura quede totalmente martensítica ($T < M_f$); esta estructura la deformato a la forma fría final.

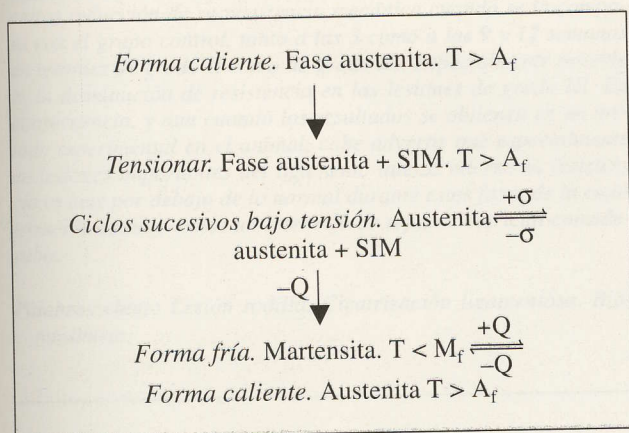
Acto seguido caliente ejerciendo a su vez una tensión, obteniendo la fase austenita con una martensita inducida (SIM). Enfriando y calentando sucesivamente con la ten-

sión y de forma cíclica, educo el material y se obtiene una martensita orientada y con la forma que interesa. El esquema siguiente ilustra lo comentado^{8,9}:



Proceso de adiestramiento pasivo II

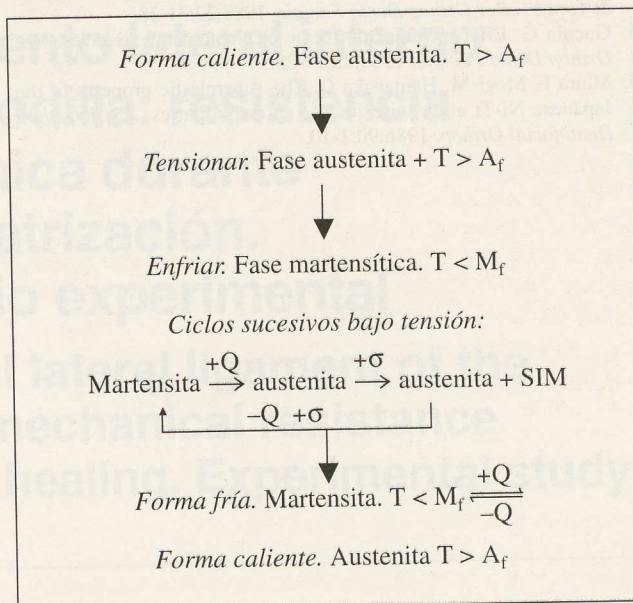
Partiendo de la fase austenita ($T > A_f$), se ejerce una tensión provocando la aparición de martensita inducida en la matriz de la fase austenítica; al descargar la tensión desaparece la martensita inducida, obteniendo fase austenita; esta carga y descarga se realiza varias veces; al enfriar obtendré martensita orientada de la misma forma que la martensita inducida por tensión. El esquema siguiente ilustra este proceso⁹:



Proceso de adiestramiento pasivo III

Partiendo de la fase austenita ($T > A_f$), se aplica tensión, obteniendo martensita inducida, en una matriz de fase austenita. Enfriando y a su vez aplicando tensión obtengo una estructura totalmente martensítica (martensita inducida y martensita térmica). Sin tensión se calienta a una temperatura mayor de A_f , obteniendo fase austenita que nuevamente tensionada estabiliza martensita inducida en la austenita; al enfriar y seguir aplicando la misma tensión vuelve a estabilizar una estructura totalmente martensítica orientada. Repitiendo sucesivas veces estos ciclos el mate-

rial se adiestra con el efecto doble memoria. Véase el esquema adjunto:



Hay que destacar que mientras el efecto memoria simple puede vencer esfuerzos de 70 kg/mm², el efecto doble memoria sólo puede vencer esfuerzos del orden de 0,5 kg/mm².

En la actualidad existen aparatos que permiten cambiar la forma original del arcada del alambre basados en unas tenazas que calientan el alambre a temperaturas superiores a A_f y permiten ejercer tensiones mecánicas para producir la deformación sobre el metal¹. Este proceso no es de educación del alambre ya que éste solamente permite recordar una forma con los cambios de temperatura y, por tanto, tendrá el efecto de memoria simple. Recientemente se están realizando diferentes ensayos para evaluar la fatiga y la recuperación de forma de los alambres con el número de ciclos de calentamiento/enfriamiento; esperamos que pronto se pueda disponer de un equipo que permita educar los alambres de ortodoncia de una manera sencilla y se pueda disponer en las clínicas para una mayor eficacia en la clínica ortodóncica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a J. M. Gil la ayuda prestada en la elaboración de este trabajo de investigación.

Bibliografía

1. Loreille JP, Flagene F. "L'éducation" des fils a mémoire de forme: mode d'emploi. *Rev Orthop Dento Faciale*. 1990;24:237-244.
2. Andreasen GF, Hilleman TB. An evaluation of 55 cobalt substituted nitinol wire for use in orthodontics. *J Am Dent Assoc*. 1971;82:1373-1375.

3. Burstone CJ. Variable modulus orthodontics. *Am J Orthod.*, 1981; 80:1-16.
4. Flageul F. L'utilisation orthodontique des alliages dits "à mémoire de forme". *Rev Orthop Dento Faciale.* 1988;22:31-38.
5. Guenin G. Effet mémoire de forme et phénomènes associés. *Rev Orthop Dento Faciale.* 1988;22:17-28.
6. Miura F, Mogi M, Hamanaka O. The superelastic property of the Japanese Ni-Ti alloy wire for use in orthodontics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 1986;90:1-10.

7. Nishida M, Honna T. All-round shape memory effect in Ni-rich Ti-Ni alloys generated by constrained aging. *Scripta Met.* 1984;18: 1293-1298.
8. Delaey L, Deruyttere A, Aernoudt E, Roos JR. *Shape memory effects. Superelasticity and damping in Cu-Zn-Al alloys.* Departement Metaalkunde (Katholieke Universiteit Leuven). Report 78 RI, 1978.
9. Cahn RW, Haasen P. *Physical metallurgy north holland.* Ed. Physics Publishing, 1990.