

MODELADO DE LA TORSIÓN INDUCIDA EN VIGAS UTILIZANDO ALAMBRE DE ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA.

Gaetano Sterlacci* y Oledipo Onipede&.

*Centro de Métodos Numéricos en Ingeniería
Departamento de Mecánica
Universidad de Oriente. Venezuela
e-mail: gsterlacci@yahoo.com

&Mechanical Engineering Department
University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA.
e-mail: onipede@pitt.edu

Key words: Elementos Finitos, Aleaciones con Memoria de Forma, Cambio y Control de Forma, Niquel-Titanio.

Resumen. Un método para producir torsión activa en miembros estructurales utilizando aleaciones con memoria de forma (SMA) fue desarrollado. SMA presentan diferencias notables en propiedades mecánicas y comportamiento, con respecto de las aleaciones comunes. Entre los SMA encontramos aleaciones de Oro-Cadmio, Cobre-Zinc y Niquel-Titanio, entre otras. Las aleaciones de Niquel-Titanio son capaces de sostener cambios a temperatura ambiente de hasta 8% de deformación y sostenerla hasta ser calentados a un rango de temperatura específico, para el cual retoman su posición inicial no deformada. Utilizando este concepto se logra la torsión activa de un elemento estructural cualquiera. El alambre de Niquel-Titanio es previamente estirado y luego se enrolla en la viga en forma helicoidal para que al elevar la temperatura en el alambre a la temperatura de transición de la aleación, el alambre al volver a su posición original sin deformación produce la torsión de la viga. Se desarrollaron varios modelos para diferentes configuraciones del alambre sobre la viga utilizando el método de los elementos finitos predecir el ángulo de torsión inducido por el alambre sobre la viga para diferentes configuraciones del alambre. Los resultados del modelo a 45 grados de configuración del alambre arrojaron un ángulo de torsión de 31.07 grados. Los resultados obtenidos del modelo por elementos finitos se comparan con un modelo experimental desarrollado para la configuración a 45 grados del alambre obteniéndose una diferencia menor al 2% para el ángulo de torsión total obtenido en la viga.

1 INTRODUCCIÓN

Las aleaciones con memoria de forma han sido utilizadas extensivamente para controlar y cambiar activamente la forma de algún elemento estructural^{1,2}. Estos materiales poseen propiedades mecánicas altamente no lineales y pueden ser sometidas a grandes deformaciones, las cuales pueden ser recuperadas cuando se eleva la temperatura hasta el rango de transformación de la aleación específica. Una descripción unidimensional de las ecuaciones constitutivas es presentada por Liang y Rogers³. Este modelo considera solo aleaciones para las cuales la temperatura de inicio de austenita es mayor que la temperatura de inicio de martensita. Graesser y Cozzarelli⁴, estudiaron la aplicación de las aleaciones con memoria de forma como amortiguadores pasivos a través de un modelo tri-dimensional basado en el comportamiento viscoelástico del material. En la actualidad se conocen diferentes aleaciones que presentan el efecto de memoria de forma. La aleación más utilizada es conocida como NiTiNOL, la cual es una combinación de níquel y titanio en proporción aproximada de 50% cada una. El alambre de NiTiNOL ha sido utilizado como pretensador y para cambiar la geometría y rigidez de elementos estructurales^{5,6,7}. Otras investigaciones utilizando alambre inmerso dentro del elemento estructural han sido efectuadas^{8,9,10}. Para aplicaciones donde el alambre va externamente adherido al elemento estructural, Shu et. al.¹¹ estudiaron el control y posicionamiento de una viga larga en voladizo; Thomson et. al.¹² desarrollaron modelos teóricos y experimentales para amortiguamiento pasivo en una viga en voladizo con una masa en el extremo libre.

Muchas otras aplicaciones han sido estudiadas para los materiales con memoria de forma. En el campo de la Mecánica de la Fractura, Rogers et al.¹³ estudiaron la forma de controlar propagación de grietas utilizando alambre previamente deformado inmerso en materiales compuestos. En algunos campos de la medicina es altamente utilizado debido a la combinación del efecto de memoria de forma con la alta resistencia a la corrosión, buena biocompatibilidad y la superelasticidad Gil and Plannel¹⁴. El método de los elementos finitos se utilizó para realizar los modelos de la viga en voladizo para diferentes configuraciones de amarre del alambre sobre la viga. Estos modelos incorporan las propiedades altamente no lineales de las aleaciones con memoria de forma y las propiedades ortotrópicas de la madera balsa. Los resultados de los modelos por elementos finitos son presentados en forma gráfica y se comparan con el modelo experimental desarrollado para la configuración a 45 grados del alambre sobre la viga obteniéndose una diferencia menor al 2% para el ángulo de torsión total obtenido en la viga.

Las aleaciones con memoria de forma son materiales que presentan cambios en la estructura cristalina cuando son sometidos a un estado de deformación. La cantidad de deformación recuperable que puede ser obtenida cuando la aleación con memoria de forma es deformada plásticamente a baja temperatura es una propiedad mecánica que caracteriza a este material. Para aleaciones de Níquel-Titanio esta cantidad de deformación puede alcanzar un 8% pero un rango de trabajo que permite mayor vida útil a la aleación se sitúa entre 3 y 5%. Las proporciones de Níquel y Titanio en la aleación son aproximadamente la misma y cuando esta proporción se varía, también se varía el rango de temperatura a la cual se produce el cambio de fase. Este rango de temperatura está situado entre 51 y 69 grados Centígrados para el alambre de Níquel-Titanio utilizado en esta investigación.

2 MODELO DE LA ALEACIÓN CON MEMORIA DE FORMA

El esfuerzo, la deformación, la temperatura y la fracción volumétrica de martensita proveen un conjunto completo de variables de estado para describir el comportamiento de las aleaciones con memoria de forma.³

La ecuación constitutiva que envuelve grandes deformaciones está dada por:

$$\bar{\sigma} = \rho_0 \frac{\partial \Psi}{\partial \bar{\epsilon}} = \sigma(\bar{\epsilon}, T, \xi) \quad (1)$$

Donde: $\bar{\sigma}$ es el tensor de esfuerzos de Piola-Kirchhoff, $\bar{\epsilon}$ es el tensor de deformaciones de Green, T es la Temperatura, ξ es la fracción volumétrica de martensita, y ρ_0 es la densidad en la configuración referencial.

Un modelo independiente del tiempo se presenta en la Ecuación 2:

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 = C(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_0) + \theta(T - T_0) + \Omega(\xi - \xi_0) \quad (2)$$

Donde C es el tensor de rigidez, θ es el tensor termoelástico y Ω es el tensor de transformaciones metalúrgicas, dados todos en la Ecuación 3:

$$C = \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon}^2} \quad \theta = \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon} \partial T} \quad \Omega = \rho_0 \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \bar{\epsilon} \partial \xi} \quad (3)$$

Donde las variables con el subíndice “o” se refieren a las condiciones iniciales del material donde las propiedades son constants.

3 MODELO POR ELEMENTOS FINITOS

En el presente modelo se asume que las transformaciones ocurren desde una fase de pura martensita y que ellas alcanzan la fase de pura austenita. Además, en el presente modelo todas las transformaciones ocurren para un incremento de temperatura en el sistema de tal forma que la influencia del tensor de transformación isotérmica es incluido en el tensor termoelástico y la ecuación constitutiva se reduce a la forma simplificada que se presenta en la Ecuación 4.

$$\bar{\sigma} - \bar{\sigma}_0 = E(\xi, T)[(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_0) + \alpha(\xi, T)(T - T_0)] \quad (4)$$

Donde: $E(\xi, T)$ es el Modulo de Elasticidad en la configuración actual, $(\bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}_0)$ es la variación en la deformación, $\alpha(\xi, T)$: es el coeficiente de expansión térmica y $(T - T_0)$ es la variación en la temperatura actual.

Por ejemplo, en la transformación de martensita a austenita (calentamiento), para el caso unidimensional, la representación del Módulo de elasticidad es:

$$E = \begin{cases} E_M & \text{if } T \leq A_s \\ E_A & \text{if } T \geq A_f \\ \xi E_M + (1 - \xi) E_A & \text{otro caso} \end{cases} \quad (5)$$

Donde los subíndices A y M representan las fases de austenita y martensita respectivamente. A_s es la temperatura inicial de la transformación austenítica y A_f es la temperatura final de la transformación austenítica.

Ahora bien, este modelo es utilizado para estudiar el cambio activo en geometría de un elemento recto o pre-torsionado colocando externamente alambre con memoria de forma previamente estirado al elemento de forma helicoidal y luego calentando el material hasta su temperatura de transformación como se muestra en el modelo de la Figura 1.

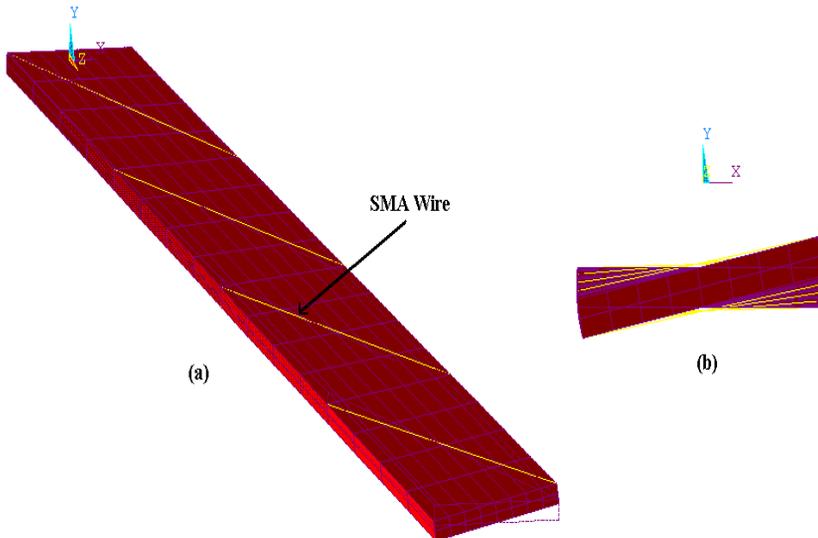


Figure 1. Torsión de una viga en voladizo usando alambre con memoria de forma.
(a) Vista Isométrica. (b) Vista Frontal.

Este concepto puede ser utilizado para mejorar y optimizar el funcionamiento de superficies sometidas a levantamiento y arrastre en la industria aeronáutica y de maquinarias rotativas. El método de los elementos finitos es empleado para desarrollar diferentes modelos, los cuales incorporan las propiedades no lineales del material con memoria de forma y

estudiar el comportamiento del elemento sometido a la torsión activa en diferentes configuraciones. Estudios experimentales serán conducidos para verificar la exactitud de los modelos desarrollados. El diámetro del alambre utilizado para esta investigación es de 3.81×10^{-4} m. (0.015 pulgadas). Algunas propiedades físicas y mecánicas para las fases martensítica y austenítica se presentan a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1 Algunas Propiedades Físicas y Mecánicas del alambre de Níquel-Titanio. NiTiNOL

Propiedad	Fase Martensítica.	Fase Austenítica.
	Baja Temperatura	Alta Temperatura
Coefficiente de Expansion	$6.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{Centígrados}$	$11.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{Centígrados}$
Modulo de Elasticidad[*]	28 a 41 GPa.	83 GPa.
Esfuerzo de Fluencia	70 a 140 MPa.	195 a 690 MPa.
Coefficiente de Poisson	0.33	0.33
Densidad	6450 kg/m^3	6450 kg/m^3

* Varía en forma no lineal con la temperatura

El comportamiento mecánico modelado consiste en el desplazamiento lineal que se obtiene del alambre con memoria de forma previamente estirado cuando se calienta a la temperatura de transformación, utilizando la fuerza restauradora producida para provocar torsión en un elemento recto o previamente pre-torsionado. Supongamos que se tiene un alambre con memoria de forma de longitud L_0 , y este es estirado a una longitud L_1 a baja temperatura mediante la aplicación de una fuerza de magnitud F , la cual deforma el alambre "plasticamente". Si removemos la acción de la fuerza, el alambre no cambiará de longitud, como si la fuerza aún estuviese aplicada. Aplicando calor al alambre, este recuperará la longitud inicial L_0 que tenía antes de la aplicación de la fuerza. El rango de la temperatura de transición se ubica entre 51 y 69 grados centígrados. Sobre los 69 grados centígrados se encuentra la fase austenítica y por debajo de los 51 grados centígrados se encuentra la fase martensítica. Estas curvas para las fases martensítica y austenítica fueron modeladas utilizando un modelo de material multi-lineal elástico. Las tangentes del módulo de elasticidad por encima del esfuerzo de fluencia fueron tomadas como cero y 10% del módulo de elasticidad para las fases austenítica y martensítica respectivamente.

Una ventaja de utilizar alambre de Níquel-Titanio es que este puede ser calentado pasando corriente eléctrica através de él. Corriente directa y corriente alterna puede ser aplicada directamente a este tipo de alambre. Otra ventaja que presenta el alambre de Níquel-Titanio es la de soportar requerimientos térmicamente cíclicos. Una desventaja es que puede presentar inestabilidad térmica cuando es calentado a temperaturas superiores a los 250 grados Centígrados, lo cual hace necesario mantener las temperaturas de trabajo por debajo de 250 grados Centígrados en alambres de Níquel-Titanio.¹⁵

Las especificaciones para el diseño están basadas en las propiedades del material dadas por el fabricante. Bajo estas condiciones, las temperaturas de transición y los requerimientos de movimiento se especifican en el modelo desarrollado para los valores máximos recomendados. Una deformación inicial permanente es inducida en el alambre, antes de ser pegado a la viga en voladizo. El valor máximo de deformación recomendado por el fabricante para el alambre de Níquel-Titanio es de 5%.

4 MODELO EXPERIMENTAL

Para estudiar el ángulo de torsión que se obtiene en una viga en voladizo de madera balsa, alambre de níquel-titanio previamente estirado en un 5% se coloca alrededor de la viga en una configuración de 45 grados como se muestra en el montaje experimental de la Figura 2.



Figura 2. Montaje experimental de la viga con 4 alambres de Níquel-Titanio en una configuración a 45 grados.

En las Figuras 3 y 4 se presentan un dibujo esquemático y una foto real respectivamente del montaje experimental utilizado para la medición del ángulo de torsión que se obtiene en la viga a medida que se activa por medio de corriente eléctrica el alambre de aleación con memoria de forma. Desplazamientos lineales se obtienen mediante los transformadores diferenciales variables Lineales (LVDT) y el ángulo de torsión en la punta de la viga se calcula utilizando la relación de la Ecuación 6.

$$(2r^2 + 2lu + u^2)\sin\alpha - 2r(l + u)\sin^2\alpha - r^2\sin 2\alpha = 0 \quad (6)$$

Donde: α es el Angulo de torsión de la viga, r es la mitad del ancho de la viga, l es la longitud de la barra que une la punta de la viga con el LVDT y u es el desplazamiento lineal obtenido del LVDT.

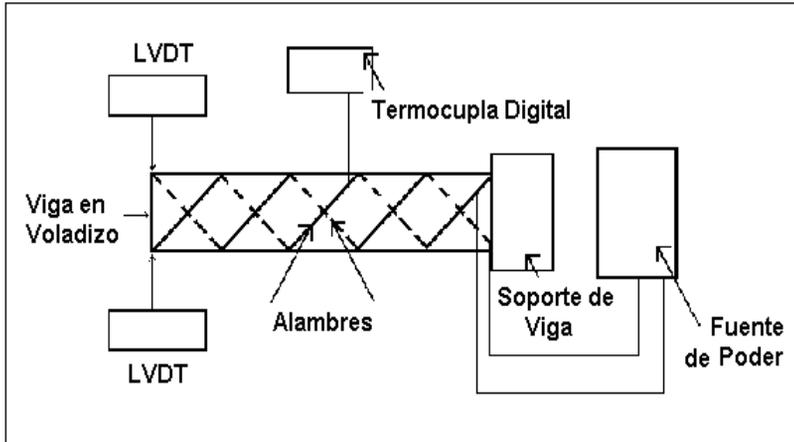


Figura 3. Representación esquemática del montaje Experimental



Figura 4. Foto del montaje Experimental. En el se observa la viga torsionada.

5 RESULTADOS

La Tabla 2 presenta los resultados del ángulo total de torsión obtenido cuando el alambre con memoria de forma ha sobrepasado completamente el rango de temperatura de transición, el alambre se encuentra totalmente en una fase austenítica. Todos los resultados son para vigas de madera balsa en voladizo. Para la configuración a 45 grados del alambre, la comparación entre el modelo experimental y el modelo por elementos finitos arrojó una diferencia menor al 2% para el ángulo de torsión total de la viga.

Tabla 2. Ángulo de torsión total obtenidos numericamentey experimentalmente

Seccion Transversal Viga y Configuración de alambre	Ángulo de Torsión Grados
Rectangular 30 grados. MEF	24,01
Rectangular 45 grados. Exp	31.70
Rectangular 45 grados. MEF	31,07
Rectangular 60 grados. MEF	36,20

En los resultados se puede observar que el ángulo total de torsión aumenta a medida que aumenta el ángulo de amarre del alambre con respecto a un eje paralelo a la sección transversal de la viga.

6 CONCLUSIONES

Se desarrolló un método para inducir torsión activa en una viga en voladizo utilizando Alambre de Niquel-Titanio.

Los Resultados Numéricos y Experimentales muestran la validez del método desarrollado, pues la diferencia obtenida en el ángulo total de torsión para la configuración del alambre a 45 grados entre los resultados numéricos y experimentales resultó menor al 2 %.

Los resultados numéricos muestran que a medida que se aumenta el ángulo de configuración del alambre se aumenta el ángulo de torsión inducido en la viga. Las aleaciones de Niquel-Titanio presentan un gran número de propiedades difíciles de encontrar en otro material de Ingeniería, entre los cuales cabe destacar el calentamiento que se puede inducir al alambre a través de corriente directa.

7 REFERENCIAS

[1] M. Ahrens, "Structural integration of shape memory alloys for turbo-machinery applications," *Proceedings of the 6th annual symposium on Smart Structures and Materials*, Newport Beach, CA., March 1-5, (1999).

- [2] S. Choi and J. Lee, "The shape control of an Composite Beam with Embedded Shape Memory Alloy Wire", *Smart Mater. Struct.*, 7, 759-770, (1998).
- [3] C. Liang, y C. Rogers, One-dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials, *J. Intelligent Mat. Sys. And Struct*, Vol. 1. No. 2, pp. 207-234, (1990).
- [4] E. Graesser, y F. Cozzarelli, "A Proposed Three-Dimensional Constitutive Model for Shape Memory Alloys", *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, Vol. 5, pp. 78-89, (January, 1994).
- [5] G. Wang y M. Shahinpoor, "Design, Prototyping and Computer Simulations of a Novel Large Bending Actuator made with a Shape Memory Alloy Contractile Wire", *Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp. 214-221, (1997).
- [6] A. Maji e I. Negret, "Smart prestressing with shape memory alloy", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, pp. 1121-1128, (1998),.
- [7] D. Satpathi y A. Maji, "Shape Memory Alloys in Smart Applications: A review", *Intelligent Civil Engineering Materials and Structures*, ASCE, pp. 29-43, (1997).
- [8] C. Rogers, C. Liang y J. Jia, "Behavior of shape memory alloy reinforced composites. Part I: Model formulations and control concepts", *Proc., 30th Struct., Struct. Dyn. And Mat.Conf.*, Paper No. AIAA 89-1389-CP: 2011-2017, (1989).
- [9] Liang, C., Jia, J., and Rogers, C., "Behavior of shape memory alloy reinforced composites. Part II: Results". *Proc., 30th Struct., Struct. Dyn. And Mat.Conf.*, Paper No. AIAA 89-1331-CP, pp 1504-1513, (1989).
- [10] D. Lagoudas e I. Tadjbakhsh, "Active flexible rods with embedded SMA fibers", *Smart Mat. And Struct.*, 1:162-167, (1992).
- [11] S. Shu, D. Lagoudas, D. Hughes y J. Wen, "Modeling of a Flexible Beam Actuated by Shape Memory Alloy Wire", *Smart Mater. Struct.* 6:265-277, (1997).
- [12] P Thomson, G. Balas y P Leo, "The Use of Shape Memory Alloys for Passive Structural damping", *Smart Materials and Structures*, Vol. 4, pp.36-42, (1995).
- [13] C. Rogers, C. Liang, y J. Jia, "Behavior of shape memory alloy reinforced composites. Part I: Model formulations and control concepts", *Proc., 30th Struct., Struct. Dyn. And Mat.Conf.*, Paper No. AIAA 89-1389-CP, pp. 2011-2017, (1989).
- [14] F. Gil y J. Plannel, "Shape Memory Alloys for Medical Applications", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, Vol. 212, Part H, pp. 473-488, (1998).
- [15] T. Waram, *Actuator Design Using Shape Memory Alloys*, Mondo*Tronics, Inc, Canada, (1993).