

SISTEMA VIBRATORIO DE DOS ESTADOS CON RESORTES DE NiTi CON MEMORIA DE FORMA

PACS: 43.40.At

Elizondo Garza, Fernando; Puente Córdova, Jesús; Reyes Melo, Edgar
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León,
Pedro de Alba s/n, Ciudad Universitaria, C.P. 66455,
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.
Tel. +52 (81) 83294020 ext. 5855
E-mail: fjelizon@hotmail.com, jesus.puentecr@uanl.edu.mx, edgar.reyesml@uanl.edu.mx

KEYWORDS: Vibratory system, shape memory, NiTi helical coil springs, behavior, design

PALABRAS CLAVE: Sistema vibratorio, memoria de forma, resorte helicoidal NiTi, comportamiento, diseño.

ABSTRACT

The characteristics of shape memory materials, on the one hand, open possibilities in terms of their use, but on the other hand, they make mechanical design and applications difficult. One of its possible uses is as coil springs with variable mechanical properties, which produce variable vibration conditions in a vibratory system. In this work a vibratory system is elaborated using NiTi springs with shape memory effect and its dynamic behavior is studied, to analyze, point out and discuss the problems in the design of a two-state vibratory system.

RESUMEN

Las características de los materiales con memoria de forma, por un lado, abren posibilidades en cuanto a su uso, pero por el otro dificultan el diseño mecánico y sus aplicaciones. Uno de sus posibles usos es como resortes helicoidales con propiedades mecánicas variables, las cuales producen en un sistema vibratorio condiciones de vibración variables. En este trabajo se elabora un sistema vibratorio utilizando resortes de NiTi con memoria de forma y se estudia su comportamiento dinámico, con la finalidad de analizar, puntualizar y discutir las problemáticas implicadas en el diseño de un sistema vibratorio de dos estados.

1. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones mecánicas se consideran como no deseables en máquinas, a menos que hayan sido diseñadas con el propósito de vibrar. El diseño de sistemas de aislamiento para vibraciones debe tomar en cuenta las condiciones de trabajo y de operación de la máquina, y las condiciones del entorno para conseguir un nivel de vibración aceptable.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

En este sentido, bajo el esquema del diseño clásico linealizado, se pueden utilizar diversos materiales que lleven a cabo la función de aisladores pasivos, cuya principal característica es no requerir, para actuar, una fuente de energía externa al sistema vibratorio, por ejemplo, resortes helicoidales a base de metales y aleaciones o soportes elastoméricos, considerados como materiales viscoelásticos. Se busca con esto que las propiedades de elasticidad y amortiguamiento, en este tipo de aisladores, tengan propiedades constantes o de valor fijo.

Si se desea controlar la vibración en forma semi-activa o activa, en algunos casos es fundamental utilizar materiales con propiedades de elasticidad y amortiguamiento variables, aunque en este caso se requiere el uso de una fuente externa de energía para lograr el comportamiento deseado. Es aquí donde los materiales avanzados, materiales con propiedades variables, juegan un rol importante para la generación de nuevas tecnologías, y en específico, el desarrollo de aisladores activos para el control de la vibración [1, 2]. Entre dichos materiales, se encuentran las aleaciones metálicas con memoria de forma, los fluidos electroreológicos, los fluidos magnetoreológicos, los piezoeléctricos, los elastómeros magnetoreológicos y los polímeros con memoria de forma.

En esta ponencia se presenta con un enfoque didáctico, el estudio de un sistema vibratorio con resortes helicoidales fabricados con una aleación NiTi con memoria de forma, la cual permite obtener un sistema con propiedades de elasticidad y amortiguamiento variables. La estructura de esta ponencia es la siguiente: se da una breve introducción a las aleaciones con memoria de forma, para posteriormente abordar la metodología desarrollada y utilizada para estudiar la problemática de un sistema con dos estados. Finalmente, se exponen los resultados, la discusión y las conclusiones.

2. ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Las aleaciones con memoria de forma, AMF, presentan un comportamiento termomecánico inusual en comparación con metales y aleaciones convencionales [3, 4]. Típicamente, cuando un metal o aleación se somete a una carga mecánica mayor que su límite elástico o de cedencia, manifiesta una deformación plástica después de retirarse la carga. Las AMF no presentan dicho comportamiento, por ejemplo, una muestra de dicha aleación deformada plásticamente, a una temperatura dada, puede recuperar completamente su forma original por un simple incremento de temperatura. Este fenómeno, se denomina efecto de memoria de forma, y está asociado a una transformación estructural martensítica reversible que se produce entre la temperatura a la que se deforma la AMF y la obtenida que es producto del incremento de temperatura.

El término transformación martensítica se asoció originalmente a la transformación de fases estructurales que se produce durante un proceso de enfriamiento en los aceros: la austenita formada a alta temperatura se transforma en martensita mediante enfriamiento rápido, evitándose con esto la típica difusión atómica. Actualmente, la transformación martensítica se refiere a las transiciones que se producen en diversas aleaciones (NiTi, CuAlNi, CuZnAl, AgCd, entre otras). Dicha transformación corresponde a una transición estructural displasiva de primer orden, dando origen a una deformación homogénea de la red cristalina [5-7]. Esta deformación está asociada esencialmente a fuerzas cortantes.

El término displasivo de primer orden, significa que la transformación toma en cuenta desplazamientos pequeños, del orden de magnitud de las distancias interatómicas, para lo cual los átomos se redistribuyen de manera cooperativa para dar origen a una nueva estructura cristalina. Por lo tanto, no hay difusión atómica durante la transformación, lo que puede ocurrir a cualquier temperatura y sin cambiar la composición química de la aleación.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

El efecto de memoria de forma en las AMF se induce mediante la adición de energía térmica, lo cual también se puede conseguir mediante la aplicación de una corriente eléctrica que genere un incremento de temperatura por efecto Joule. Por otra parte, las AMF también tienen una elevada capacidad de amortiguamiento, la cual se debe a la fricción interna de los movimientos atómicos displasivos que caracterizan a la transformación martensítica [8]. Estos movimientos deben ser de naturaleza cooperativa, y también se conocen como una reorientación de las variantes estructurales de la fase martensítica o bien, en la fase austenita, debido a la transformación martensítica inducida por esfuerzo.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Esta ponencia, desarrollada con fines didácticos, tiene como objetivo puntualizar las implicaciones de usar un resorte de NiTi con memoria de forma en un sistema masa-resorte-amortiguador bajo un esquema semi-activo simple sin sistema de control.

Se plantea el sistema como uno con 2 estados principales, solo para estudiar las diversas problemáticas que se presentan en virtud de las no linealidades intrínsecas a los materiales con memoria de forma. A continuación, se abordan algunos aspectos metodológicos.

3.1 Selección y adquisición de resorte NiTi

Para los fines de este trabajo se seleccionaron resortes helicoidales de una aleación con memoria de forma de NiTi (manufacturados por Dynalloy, USA). Los resortes poseen un diámetro de alambre de 0.75 mm, 18 espiras e índice del resorte ($C = D/d$) de 7.533. Dichos elementos son utilizados en un sistema mecánico MKC de 1 GDL trabajando en un esquema de 2 estados o condiciones de operación base, incluyendo las transiciones entre estados.

3.2 Caracterización termomecánica de los resortes de NiTi

Debido a su sensibilidad a la movilidad atómica, el análisis mecánico dinámico (DMA) es una técnica experimental que permite caracterizar la disipación o almacenamiento parcial de energía en los materiales, cuando se aplica un estímulo mecánico periódico. La movilidad atómica refleja la tasa a la que se ha perdido o se ha almacenado una porción de energía [9]. El análisis termomecánico del resorte de NiTi se realizó tomando muestras en forma de alambre de diámetro igual a 0.25 mm y una longitud de 25 mm (Flexinol, de Dynalloy, USA). Para ello, se utilizó un DMA 8000 Perkin Elmer. Las condiciones del análisis fueron: a una frecuencia de 1 Hz, en un rango de temperatura de 20 a 120°C, con una tasa de calentamiento de 2°C/min, en el modo de tensión y bajo un desplazamiento o amplitud de 5 µm. Las muestras no fueron sometidas a tratamiento alguno (térmico y químico) previo a su análisis.

3.3 Sistema masa-resorte NiTi de 2 estados

En este estudio se utilizó el sistema masa-resorte NiTi de 1 GDL, el cual se presenta en la figura 1. Los estados se definieron como: "A" el sistema a temperatura ambiente y "B" el sistema después de ser calentado eléctricamente con 2 A en corriente directa y voltaje controlado (2.6 V). La masa de prueba utilizada fue de 148 g.

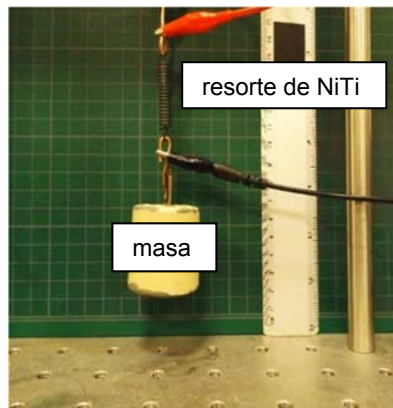


Figura 1. Montaje experimental del sistema MKC de 1 GDL.

3.4 Pruebas realizadas al sistema vibratorio con 2 estados

Entre estos 2 estados se encuentran condiciones transitorias que dependen de la estrategia de calentamiento y enfriamiento. Aunque hay varios efectos a considerar, en este trabajo se busca tener un enfoque de carácter didáctico, que dé una visión general del uso de este tipo de resortes en sistemas vibratorios y las problemáticas en su implementación en un sistema mecánico simple. Para ello, se diseñó un experimento que involucra el llevar al sistema desde un estado "A" a temperatura ambiente (fase martensita), aplicando 2 A para calentar, y evaluar el desplazamiento del sistema en función del tiempo, hasta un estado "B" (fase austenita).

3.5 Instrumentación

Se utilizó una fuente de voltaje/corriente BK Precision 1621A con una capacidad de 5 A en corriente directa, magnitud necesaria para activar el efecto de memoria de forma del resorte NiTi. El comportamiento dinámico fue analizado a través de la captura de videos, para ello se utilizó una cámara digital Fujifilm FinePix S4800. El montaje del sistema MKC y la instrumentación se realizó en una mesa anti-vibratoria Newport, con la finalidad de reducir la transmisibilidad de vibraciones del medio circundante.

3.6 Procesamiento de datos

El manejo y procesamiento de datos se llevó a cabo a través del análisis de videos empleando el software Tracker (physlets.org/tracker/). Tracker es una herramienta de análisis y modelado de video basada en la plataforma Java (OSP). Está diseñado para ser utilizado en la enseñanza de la física e ingeniería. Dadas las limitantes del equipo de video, la frecuencia natural del sistema se diseñó dentro del rango.

4. RESULTADOS

4.1 Análisis termomecánico (DMA) de la aleación NiTi

En la figura 2a se presenta la parte real del módulo elástico complejo, E' , en función de la temperatura, bajo condiciones isocrónicas a una frecuencia de 1 Hz. Se observa un incremento del módulo (y la rigidez) a medida que aumenta la temperatura, de un valor casi constante de 16 GPa a 52 GPa. Este incremento se debe a una transformación martensítica, la cual consiste en un reacomodo estructural de la fase de baja temperatura, martensita, a la fase de alta temperatura, austenita. Alrededor de 70°C, se presenta un ligero decremento del módulo, se presume que sea debido al movimiento de dislocaciones o interfaces de la fase R [10].

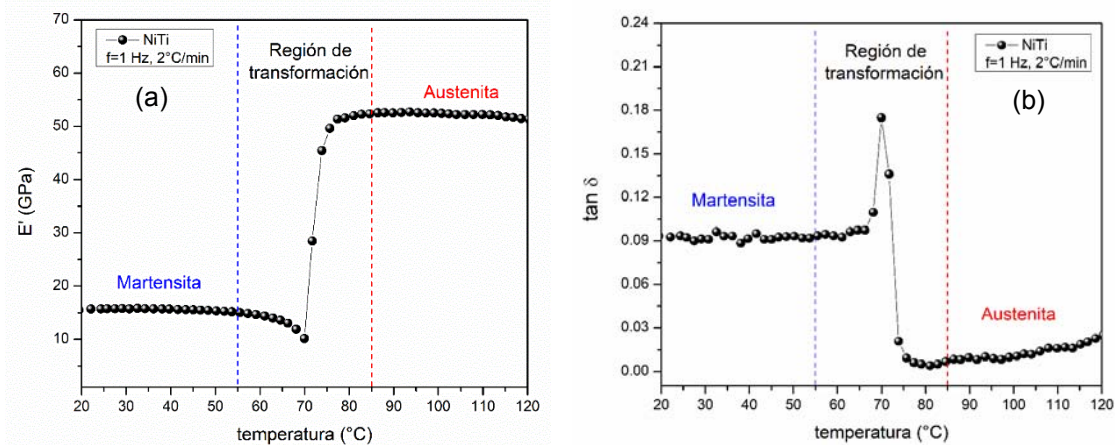


Figura 2. (a) Módulo elástico en función de la temperatura y (b) tangente delta en función de la temperatura, para la aleación de NiTi.

También para esta misma muestra, se presenta en la figura 2b la curva experimental de tangente delta ($\tan \delta$) en función de la temperatura. El parámetro $\tan \delta$ se expresa como la razón entre la energía disipada por el material y la energía almacenada ($\tan \delta = E''/E'$), y desde un punto de vista de aplicación en ingeniería mecánica, se relaciona con la capacidad de amortiguamiento de vibraciones.

En la figura 2b se identifican de manera cualitativa tres regiones [11-13]. La primera región, comprendida de 20 a 55°C, corresponde al amortiguamiento que se produce por el movimiento de interfaces de variantes estructurales de la fase martensita. Dicha magnitud es mayor a la que presentan los metales y aleaciones convencionales [14, 15]. En la segunda región, de 55 a 85°C, se presenta la mayor disipación de energía, como consecuencia de la transformación de fase en estado sólido de la fase martensita a la fase austenita. Este fenómeno corresponde a la variación de E' cuando la temperatura se incrementa, lo cual se identifica en la figura 2a. En la tercera región, por encima de 85°C, el material se encuentra en la fase austenita y por ende la disipación de energía tiende a un mínimo.

4.2 Condiciones transitorias entre estados

Para el sistema masa-resorte NiTi considerado, se debe tomar en cuenta el paso entre estados, lo que implica dos condiciones transitorias: una de calentamiento (del estado "A" hacia "B") y otra de enfriamiento (del estado "B" hacia "A"), cuyas características dependen de la estrategia empleada para calentar o enfriar la muestra bajo estudio. En este sentido, en la figura 3 se presenta el proceso de calentamiento, para pasar de una condición donde se ha colocado la masa de prueba al resorte, a 25°C (estado "A"). Posteriormente, en un $t = 2$ s se aplica una corriente de 2 A, la cual aporta energía térmica para que se manifieste el proceso de transformación de la fase martensita a la fase austenita (estado "B").

Conforme avanza el tiempo, se observa un desplazamiento del sistema del tipo exponencial, fenomenología típica de sistemas térmicos. Al resorte, bajo estas condiciones, le toma alrededor de 4 s para desplazarse 2 cm, y recuperar su forma original. Al transcurrir 8 s, el sistema vibratorio alcanza el estado estable. En el caso del enfriamiento, el tiempo requerido para regresar a la condición deformada (estado "A"), es mucho mayor en comparación con la etapa de calentamiento, dado que en este experimento el proceso de transferencia de calor se da por convección natural (la cual depende de la temperatura, humedad, densidad y viscosidad del medio, entre otras).

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

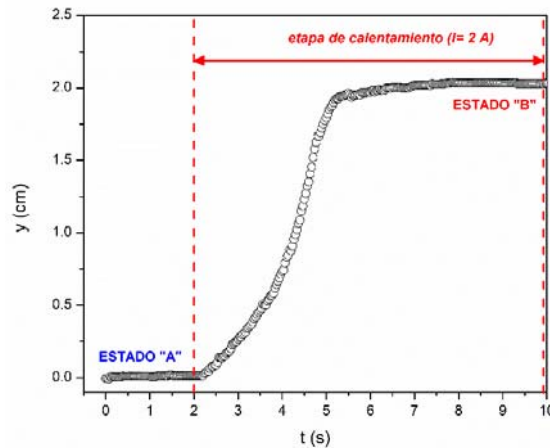


Figura 3. Condición transitoria durante calentamiento de sistema masa-resorte NiTi.

A continuación se presentan los resultados de la vibración libre del sistema masa-resorte NiTi para los estados “A” y “B”.

4.3 Cambios en parámetros vibratorios entre estados

En la figura 4a se presenta el resultado de la vibración libre del sistema MKC a temperatura ambiente (25°C a 0 A), donde se observa una respuesta subamortiguada de la vibración. En esta condición, estado “A”, el resorte de NiTi se encuentra en la fase martensita, una estructura cristalina con amortiguamiento proveniente del movimiento de interfaces y maclas.

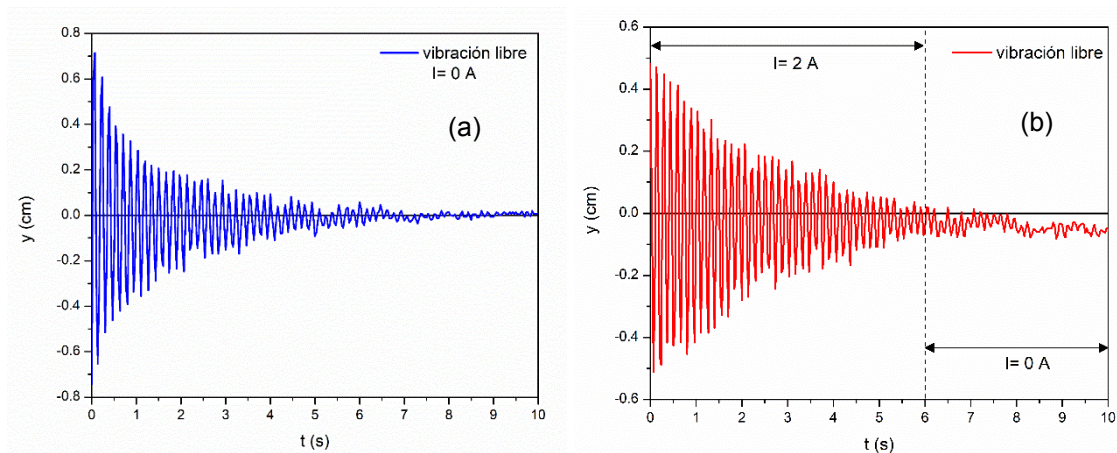


Figura 4. Vibración libre de (a) sistema MKC a temperatura ambiente y 0 A (estado “A”) y (b) sistema MKC a 2 A (estado “B”).

Para obtener el estado “B”, el resorte se calienta por medio de la aplicación de una corriente eléctrica de 2 A durante 10 s, con la finalidad de obtener un valor estable de temperatura. La corriente genera un calentamiento por efecto Joule, lo cual incrementa la temperatura de las espiras del resorte, permitiendo que se manifieste el efecto de memoria de forma (el resorte se contrae). Posterior a esto, el sistema masa-resorte NiTi se pone a vibrar libremente. En la figura 4b se presenta el resultado obtenido de la vibración libre, donde se observa una respuesta subamortiguada, similar a la obtenida en la figura 4a. Sin embargo, si se comparan ambas figuras, 4a y 4b, se aprecia una caída en amplitud de la vibración más pronunciada para el resorte bajo la condición de 0 A.

Otro aspecto por recalcar de la figura 4b es que la vibración libre comienza a decaer por debajo de $y=0$ (posición de equilibrio bajo 2 A), en un tiempo mayor a 6 s. Esto se debe a la desconexión de la fuente de energía ($I=0$ A), dado que el nivel de corriente tuvo que ser limitado en este caso a intervalos discretos de tiempo, para evitar una desprogramación de la forma de la aleación de NiTi. Siendo esto el inicio de la transición de la condición "B" hacia la "A" (etapa de enfriamiento).

A partir de los datos de las figuras 4a y 4b, se calcularon los parámetros vibratorios f_n (frecuencia natural), ζ (razón de amortiguamiento) y k (constante de rigidez), los cuales se presentan en la tabla 1. Primero se calculó la razón de amortiguamiento empleando el método del decremento logarítmico, luego se obtuvo la frecuencia natural, y finalmente se calculó la constante de rigidez para los dos estados.

Tabla 1. Parámetros vibratorios de sistema MKC.

	f_n	ζ	k
Estado "A"	6.25 Hz	0.023	228.35 N/m
Estado "B"	6.82 Hz	0.009	271.78 N/m

5. DISCUSIÓN

El sistema físico masa-resorte NiTi se puede representar como un sistema MKC, donde la elasticidad (K) y el amortiguamiento (C) son variables, en este caso, con la temperatura (corriente eléctrica). En la figura 5 se presenta el modelo vibratorio del sistema bajo estudio.

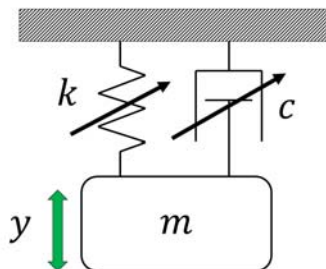


Figura 5. Modelo vibratorio de sistema masa-resorte NiTi.

A partir de la tabla 1 se determinó que la rigidez se incrementó en un 19%, al pasar del estado "A" hacia el "B". Esto es consistente con lo obtenido mediante análisis mecánico dinámico (figura 2a), donde la rigidez se incrementa a medida que aumenta la temperatura de la aleación de NiTi. Como la masa es constante en el sistema vibratorio, dicho incremento de la rigidez produce un cambio en la frecuencia natural, generando un aumento del 9.1%.

En cuanto al amortiguamiento, se redujo un 60% al pasar del estado "A" hacia el "B". Este hecho es consistente con lo reportado en la literatura [16-18], donde se presenta una mayor cantidad de amortiguamiento en la fase martensita respecto a la fase austenita. Además, en la figura 2b ($\tan \delta$) se observa esta diferencia significativa, lo que lleva a obtener condiciones variables de rigidez y amortiguamiento.

De las gráficas del comportamiento vibratorio resulta evidente que una dificultad de diseño es el control de la temperatura, puesto que el medio circundante afecta los mecanismos de la transferencia de calor y por ende modifica la transformación de fase.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

En la etapa de calentamiento, el control de la temperatura es un factor crítico, dado que una corriente eléctrica en exceso genera una alta temperatura que puede desprogramar la forma del resorte, y por ende fallaría el sistema. Respecto al enfriamiento, la disipación de calor dependerá de la estrategia para enfriar, por lo tanto, se requiere equipo adicional si se desea que el enfriamiento sea a la misma tasa que el calentamiento, lo cual aumenta la complejidad del sistema y su control.

6. CONCLUSIONES

Es claro que las no linealidades de los resortes con memoria de forma (NiTi) hacen que la única manera de generar estados con características estables es trabajarlo con un sistema de control activo que compense las variaciones de respuesta intrínsecas a los resortes.

Debe prestarse atención también a las problemáticas de las transiciones entre los dos estados, esto es el calentamiento y el enfriamiento del material del resorte, el cual si no es suficientemente rápido ralentizará el paso entre estados y limitará las posibilidades de uso de este tipo de sistemas.

Dada la complejidad que implica la implementación de un sistema de este tipo con una respuesta confiable y precisa, adecuada a una aplicación específica, la cual excede en general las habilidades de una sola persona, este tipo de proyectos debe abordarse por un equipo de especialistas en diferentes áreas de la ingeniería.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Preumont, *Vibration Control of Active Structures: An Introduction*, 3rd ed. Springer, 2011.
- [2] E. Świtoński, A. Mężyk, W. Klein; Application of smart materials in vibration control systems, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 24 (1), 2007, pp. 291-296.
- [3] J. Mohd Jani, M. Leary, A. Subic, M. A. Gibson; A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, *Materials and Design*, 56, 2014, pp. 1078-1113.
- [4] E. López-Cuellar; Una introducción a las aleaciones con memoria de forma. Parte I, *Ingenierías*, 5 (16), 2002, pp. 5-11.
- [5] X.-S. Yang, S. Sun, X.-L. Wu, E. Ma, T.-Y. Zhang; Dissecting the mechanism of martensitic transformation via atomic-scale observations, *Scientific Reports*, 4, 2014, 7pp.
- [6] F. N. García-Castillo, R. Schouwenaars, J. Cortés-Pérez, V. Amigó, M. A. Ramírez-Toledo; Análisis de la formación de variantes de martensita en un monocristal con memoria de forma Cu-Al-Be sometido a tracción simple, *Memorias del XXIII Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2017, 6pp.
- [7] K. Otsuka, X. Ren; Physical metallurgy of Ni-Ti-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, 50, 2005, pp. 511-678.
- [8] Y. Liu, J. Van Humbeeck; On the Damping Behaviour of NiTi Shape Memory Alloy, *Journal de Physique IV Colloque*, 07 (C5), 1997, pp. C5-519-C5-524.
- [9] M. E. Reyes-Melo, F. Y. Rentería-Baltierrez, B. López-Walle, E. López-Cuellar, C. J. de Araujo; Application of fractional calculus to modeling the dynamic mechanical analysis of a NiTi SMA ribbon, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 126 (2), 2016, pp. 593-599.
- [10] J.-E. Bidaux, L. Bataillard, J.-A. Manson, R. Gotthardt; Phase transformation behavior of thin shape memory alloy wires embedded in a polymer matrix composite, *Journal de Physique IV*, 3, 1993, pp. 561-564.
- [11] J. San Juan, M. L. Nó; Damping behavior during martensitic transformation in shape memory alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 355, 2003, pp. 65-71.



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

- [12] A. Fabregat-Sanjuan, F. Gispert-Guirado, F. Ferrando, S. De la Flor; Identifying the effects of heat treatment temperatures on the Ti50Ni45Cu5 alloy using dynamic mechanical analysis combined with microstructural analysis, *Materials Science and Engineering A*, 712, pp. 281-291.
- [13] N. J. da Silva, E. N. D. Grassi, J. de Brito Simões, C. J. de Araújo; Dynamic mechanical analysis of a NiTi shape memory alloy: an experimental study, *Proceedings of International Congress of Mechanical Engineering*, 2009, 10pp.
- [14] M. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, H.-R. Sinning. *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook*. Springer-Verlag 2007.
- [15] D. C. Lagoudas. *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. Springer Science, 2008.
- [16] R. A. A. Aguiar, M. A. Savi, P. M. C. L. Pacheco; Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloys, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24 (2), 2013, pp. 247-261.
- [17] S. A. Holanda, A. A. Silva, C. J. de Araújo, A. S. de Aquino; Study of the complex stiffness of a vibratory mechanical system with shape memory alloy coil spring actuator, *Shock and Vibration*, 2014, 11pp.
- [18] N. J. Da Silva, E. N. D. Grassi, C. J. de Araújo; Dynamic properties of NiTi shape memory alloy and classic structural materials: a comparative analysis, *Materials Science Forum*, 643, 2010, pp. 37-41.