

Desarrollo de acople con memoria de forma

Development of Shape Memory Coupling

*Andre Tabash-Matamoros¹
Bárbara González-Rolón²*

*Fecha de recepción: 4 de diciembre del 2012
Fecha de aprobación: 3 de febrero del 2013*

Tabash,-Matamoros A; González-Rolón,
B. Desarrollo de acople con memoria de
forma. *Tecnología en Marcha*. Vol. 26, N° 3.
Pág 75-83

- 1 Tabash&Asociados S.A. 300m norte y 300m este de Terramall, Tres Ríos Cartago, Costa Rica. Tel. (506)87186264. Correo electrónico: andree@tabashadvisor.com
- 2 DICIS Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato.
Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato.
Comunidad de Palo Blanco s/n, C.P. 36885. Carretera Salamanca-
Valle de Santiago Km.3.5 +1.8, Salamanca, Guanajuato, México.
Tel. 52 (464)6479940 Ext. 2383, 2441 Fax.Tel. 52 (464)6479940 Ext.
2311. Correo electrónico: barbara@ugto.mx

Palabras clave

Desarrollo; acople; tubería; aleación de memoria de forma; simulación; elemento finito; cobre; zinc; aluminio; modelado matemático; mallado; diagrama de fase ternario

Resumen

En este trabajo se reporta el desarrollo de una aleación de memoria de forma (SMA) de CuZnAl, obtenida bajo condiciones de presión atmosférica, para producir acoples para unir tubería. La caracterización de su composición química se determinó por Espectrometría de Emisión Óptica. Las temperaturas de cambio de fase se determinaron por medio de un estudio térmico DSC. Por microscopía óptica se identificó la fase martensita a temperatura ambiente. A través de un modelado matemático y la simulación por elemento finito combinando datos experimentales, se obtuvo la gráfica de esfuerzo contra temperatura de la aleación tipo SMA. El experimento concluyó con una prueba de tensión del acople con la tubería de cobre para determinar la fuerza de la unión.

Keywords

Development; coupling; pipe; shape memory alloy; simulation; finite element; copper; zinc; aluminum; mathematical modeling; meshing; ternary phase diagram.

Abstract

This paper describes the development of a shape memory alloy SMA of CuZnAl to produce coupling for unite pipes; for which the solid-state transformation process was obtained under atmospheric pressure. The characterization of the chemical composition was determined by Spectrometry of Optical Emission. The temperatures of the phase change were determined with a DSC thermal study, whilst the structure of martensite was identified by optical microscopy under room temperature. Afterwards, it is shown a graphic of effort against temperature of an alloy type SMA that was obtained through a shaped mathematical model and simulation using finite element combining experimental data. The experiment concludes with a test of tension of the coupling with the tubing of copper to determine the force of the union.

Introducción

Las aleaciones de memoria de forma (Shape Memory Alloy, SMA por sus siglas en inglés) se conocieron cuando A. Ölander descubrió la súperelasticidad en una aleación de oro-cadmio (AuCd) en 1932, y Greninger y Mooradian observaron la aparición y desaparición de la fase martensita al cambio de temperatura en la aleación de CuZn (Flor, 2005). No obstante, el descubrimiento más importante ocurrió en 1962 en el Naval Ordnance Laboratory, que desarrolló la aleación de NiTi (Shaw, Churchill & Iadicola, 2008).

Las aleaciones de memoria de forma han sido utilizadas para diversos tipos de aplicaciones, ya que también algunas de ellas son biocompatibles. Una de estas aplicaciones se da en la fabricación de tuberías. La mayor aplicación tecnológica fue desarrollada en

1971 por Raychem Corporation of Menlo Park, en California. Las aleaciones de memoria de forma son muy útiles para este tipo de aplicaciones (Devices, 2003). Las aleaciones de memoria de forma tienen propiedades distintas a las aleaciones convencionales, ya que poseen dos propiedades diferentes, una en la fase martensítica y otra en la fase austenítica (Van Humbeeck, 2009).

El objetivo de esta investigación fue obtener una aleación de memoria de forma de CuZnAl, para producir acoples para la unión de tuberías.

Materiales y métodos

En la preparación de la aleación de memoria de forma se utilizó el diagrama de fases del sistema ternario del CuZnAl, el cual muestra las fases de

acuerdo a la composición química y la temperatura, como se ilustra en la Figura 1.

Con este tipo de diagrama se determinaron los porcentajes de la composición química de la aleación, tomando en consideración que estuviera presente la fase austenítica FCC, la cual, mediante enfriamiento, se logró transformar a la fase martensítica BCC. Con este procedimiento se eligió la composición química de 70%Cu, 5%Al, 25%Zn para la SMA de CuZnAl. Después se procedió a pesar cada uno de los componentes, se mezclaron y se colocaron en un crisol de grafito que tiene la facilidad de maquinarse para poder hacer el molde; esta mezcla se llevó a la fundición, la cual se realizó en un horno de gas bajo condiciones atmosféricas, como se ilustra en la Figura 2.

Una vez lograda la aleación, se determinó su composición química en un espectrómetro de emisión óptica Modelo SPECTROLAB 2009 con ALCANCE de 120 a 780 nm con software integrado LAB-SPEED VISIÖN, 80 canales, 13 programas para Cu, Sn, Zn, Pb, Ni. La composición química obtenida fue (70.82%Cu 24.02%Zn5.09%Al0.07%R).

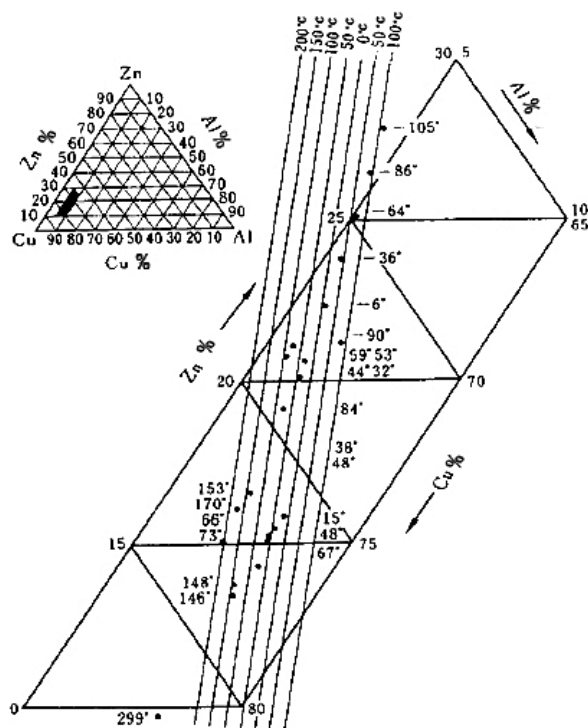


Figura 1. Diagrama de fases ternario para CuZnAl (Braz Fernandes, 2003)

Modelado matemático

Para comprobar el cambio de fases que se presenta en las aleaciones de tipo SMA, con la composición química de la aleación obtenida, se procedió a elaborar un modelado matemático. Los acoples de aleaciones de memoria de forma también se conocen como acoples termomecánicos porque usan la energía para obtener su memoria de forma. Por esto se pueden proponer las ecuaciones para el modelado de un acople termomecánico, para ello se comienza con la suposición de que las temperaturas de transformación y los esfuerzos de transformación están linealmente relacionados con el esfuerzo aplicado, lo cual implica que:

$$M_s^\sigma = M_s + \frac{\sigma}{C^M} \quad (1)$$

$$M_f^\sigma = M_f + \frac{\sigma}{C^M} \quad (2)$$

$$A_s^\sigma = A_s + \frac{\sigma}{C^A} \quad (3)$$

$$A_f^\sigma = A_f + \frac{\sigma}{C^A} \quad (4)$$

Donde:

M_s^σ Inicio de martensita bajo esfuerzo

M_s Temperatura martensítica inicial

σ Esfuerzo uniaxial

C^M Coeficiente de influencia de esfuerzo en martensita

M_f^σ Fin de martensita bajo esfuerzo

M_f Temperatura final martensita

A_s^σ Inicio de austenita bajo esfuerzo

A_s Temperatura inicio austenita

C^A Coeficiente de influencia de esfuerzo en austenita

A_f^σ Fin de austenita bajo esfuerzo

A_f Temperatura final austenita

Con las ecuaciones propuestas se generó una gráfica, que relaciona los esfuerzos con la temperatura. Con los esfuerzos obtenidos se utilizó la ecuación 5 (Lagoudas, 2008) para conocer la deformación elástica que sufrirá la pieza.

$$\varepsilon = S\sigma + \alpha(T - T_0) + H \operatorname{sgn}(\sigma)\xi \quad (5)$$



Figura 2. Horno para la fundición de la aleación SMA de CuZnAl.

Donde:

- ε Tensor de deformación infinitesimal
- S Tensor de compliance
- σ Esfuerzo uniaxial
- α Promedio entre tensión y compresión
- T Temperatura
- T_0 Temperatura de referencia
- H Porcentaje de transformación
- ξ Fracción total del volumen martensítico

Donde se considera la fracción total del volumen martensítico (ξ), como se muestra en la Figura 3.

Considerando esta suposición, tenemos que en el lapso donde $\sigma \leq \sigma \leq \sigma^{Ms}$, ξ se considera 0 el cual reduce la ecuación (5) a:

$$\varepsilon = S^A \sigma + \alpha^A (T - T_0) \quad (6)$$

Para el lapso en donde $\sigma^{Mf} \leq \sigma \leq \sigma^{Max}$ para la carga y $\sigma^{Max} \geq \sigma \geq \sigma^{As}$ para la descarga para la cual ξ se considera 1 y la ecuación (5) se reduce a:

$$\varepsilon = S^M \sigma + \alpha^M (T - T_0) + H \operatorname{sgn}(\sigma) \quad (7)$$

Para el lapso donde $\sigma^{Af} \geq \sigma \geq \sigma$, ξ se considera 0 el cual reduce la ecuación (5) a:

$$\varepsilon = S^A \sigma + \alpha^A (T - T_0) \quad (8)$$

Para generar una gráfica de esfuerzo deformación, la cual será comparada con la gráfica que se genera en ANSYS.

Resultados y discusión

Una vez obtenida la SMA de CuZnAl, se maquinó el acople como se observa en la Figura 4.

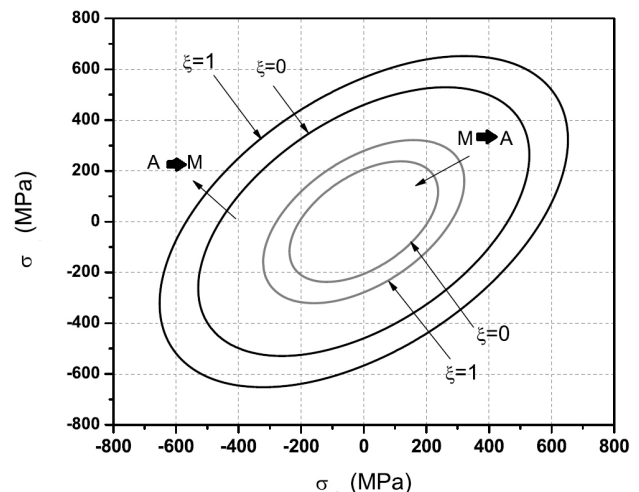


Figura 3. Gráfica donde se muestra ξ para las fases de cambio (Lagoudas, 2008).

Para investigar la microestructura de la aleación y confirmar que se obtuvo una SMA de CuZnAl, se procedió a preparar una muestra metalográfica, la cual se atacó con cloruro férrico en solución, la muestra a 25°C se llevó al microscopio metalográfico Axiovert 200 Mat Zeiss, donde se logró observar la fase martensítica como se observa en la Figura 5.

Una vez comprobado que se obtuvo una aleación tipo SMA; para conocer las temperaturas de transformación se caracterizó la aleación mediante un estudio DSC-TGA como se observa en la Figura 6.

Con las ecuaciones 1-4 y las temperaturas de transformación obtenidas del estudio de DSC-TGA, se generó la gráfica de esfuerzo contra temperatura, como se puede observar en la Figura 7.

Con esta gráfica se obtienen los esfuerzos a temperatura ambiente, los cuales son:

$$\sigma_{Ms} = 200\text{Mpa}$$

$$\sigma_{Mf} = 400\text{Mpa}$$

$$\sigma_{Max} = 600\text{Mpa}$$

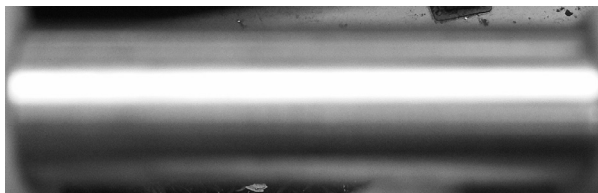


Figura 4. Acople de SMA de CuZnAl con maquinado superficial.

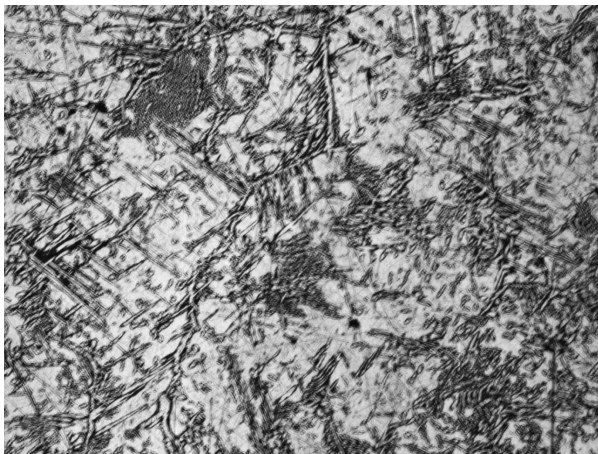


Figura 5. Microestructura martensita para SMA de CuZnAl a 10x.

Los porcentajes de deformación se obtienen con los valores de esfuerzo obtenidos aplicando las ecuaciones (6), (7) y (8), resultando:

$$\text{Deformación martensítica inicial } (\epsilon_{ms}) = 0,35\%$$

$$\text{Deformación martensítica final } (\epsilon_{mf}) = 4,70\%$$

$$\text{Deformación martensítica máxima } (\epsilon_{max}) = 4.90\%$$

Con estos datos se obtiene la gráfica de esfuerzo contra deformación, como se observa en la Figura 8.

Adicionalmente se hicieron dos tubos para acoplar, de cobre 1100. Estos se pusieron a prueba uniéndolos con el acople de SMA de CuZnAl como se observa en la figura 9.

Para medir la fuerza de la unión del acople se realizó una prueba a tensión en la Máquina Universal Chatillón Material Testing LR-10k.

La separación obtenida de las piezas mostradas en la Figura 10 se obtuvo después de aplicar una fuerza de 6.10N, para un desplazamiento total de 23.8 mm.

Modelado por elemento finito

Para el inicio del modelado por elemento finito en el paquete informático ANSYS, se definió el tipo de elemento, para lo cual se eligió el SOLID186.

Para el modelado del acople de la aleación de memoria de forma de CuZnAl del cambio de fases en elemento finito, se realizó el modelo de un cuarto de geometría para lograr simplificar el tiempo de cómputo del análisis, ya que el programa analiza los nodos del mallado individualmente. Esta se consideró como una tubería empotrada en una de sus caras, a la otra se le aplicó una presión negativa de 600MPa, la cual, por motivos del análisis, se le fue aplicando en cargas de 100MPa hasta llegar al máximo (Torres-San-Miguel, Urriolagoitia-Calderón, Urriolagoitia-Sosa & Hernández-Gómez, 2010).

Adicionalmente, se introdujeron las seis constantes que ANSYS ocupa para resolverlo como un material de memoria de forma, las cuales son:

$$C1 = 400\text{MPa}$$

$$C1 = 200\text{MPa}$$

$$C1 = 20\text{MPa}$$

$$C1 = 10\text{MPa}$$

$$C1 = 0.04$$

$$C1 = 0$$

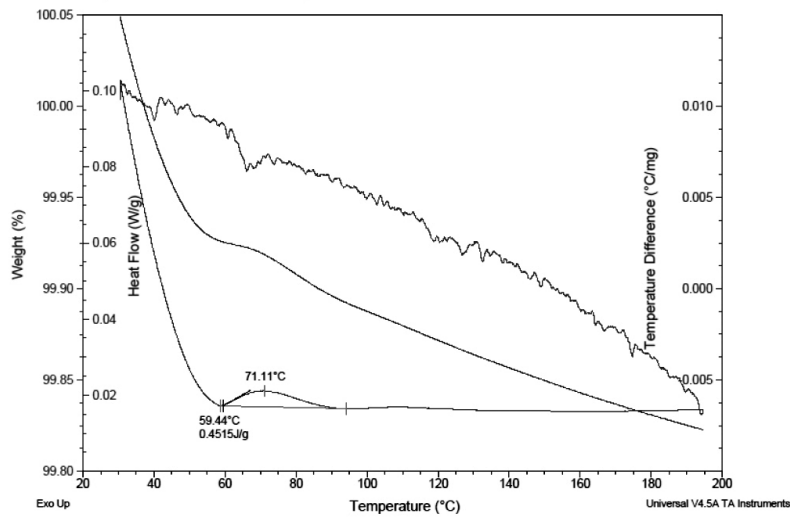


Figura 6. DSC-TGA para la SMA de CuZnAl.

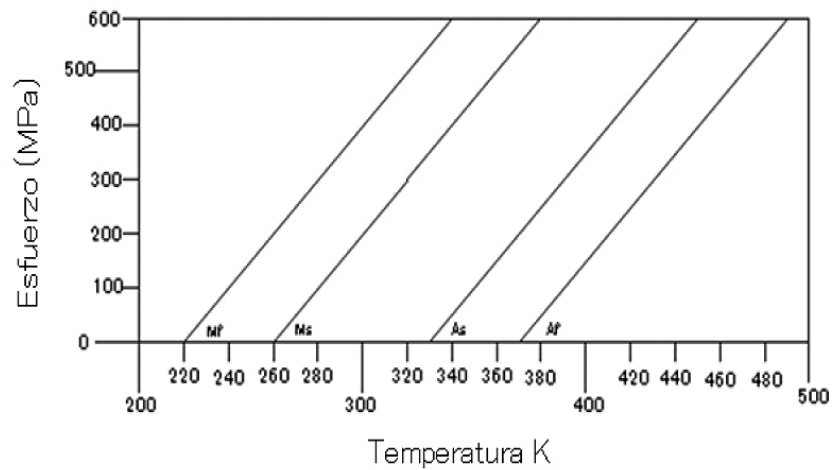


Figura 7. Esfuerzo contra temperatura para la SMA de CuZnAl.

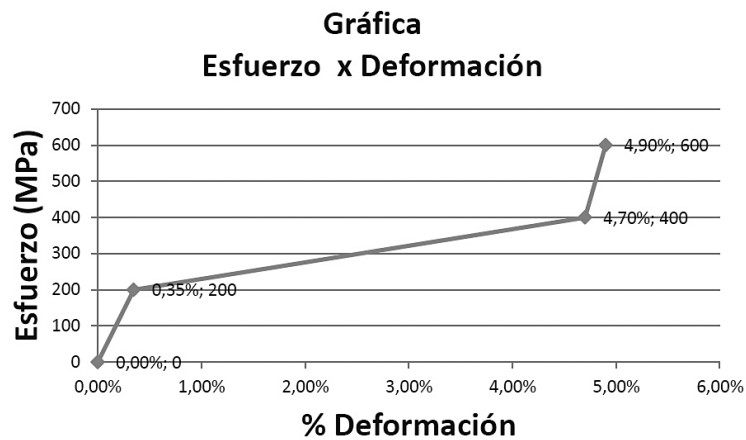


Figura 8. Gráfica de esfuerzo contra deformación para la SMA de CuZnAl.

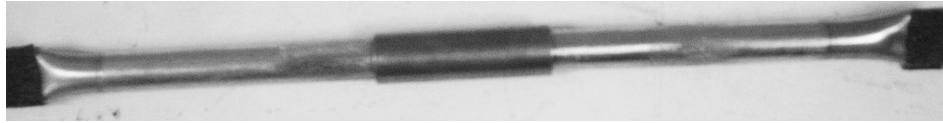


Figura 9. Tubos de cobre I 100 unidos con el acople de SMA de CuZnAl.

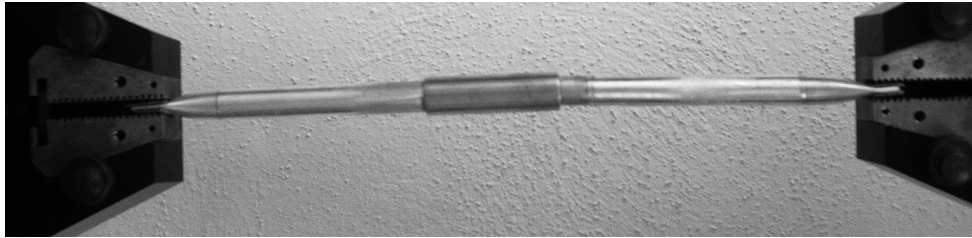


Figura 10. Tubos de cobre I 100 unidos con acople de SMA de CuZnAl, sometidos a tensión.

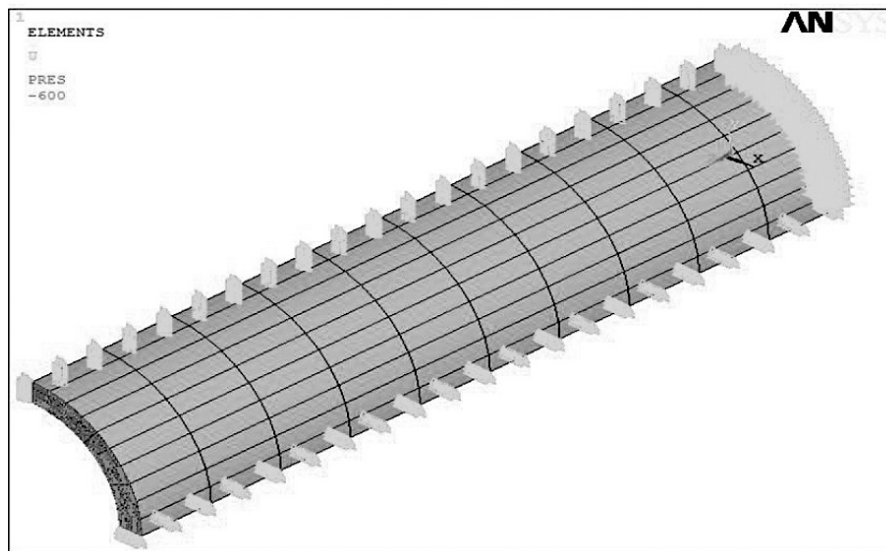


Figura 11. Geometría cargada y restringida para el acople de SMA de CuZnAl.

Las constantes lineales (ANSYS, 2008):

$$E_A=72000\text{Mpa}$$

$$\text{NU}=0.3$$

$$\text{YMRT}=70000\text{Mpa}$$

El modelo analizado, una vez consideradas todas las cargas y restricciones pertinentes, se muestra en la Figura 11.

Con estos datos se obtuvo la gráfica de esfuerzo contra deformación dada por ANSYS, la cual se muestra en la Figura 12.

La comparación de las gráficas obtenidas por el modelado matemático y por el modelo de elemento finito se muestra en la Figura 13.

Lo cual muestra que el material exhibe los cambios de fases presentes en las aleaciones de memoria de forma; además, se comprueba que el modelado matemático y el modelado por elemento finito son herramientas sólidas para comprobar la súperelasticidad y el cambio de fase en este tipo de materiales, ya que con estos modelos se puede comprobar el cambio en cada punto de la gráfica, aunque en el

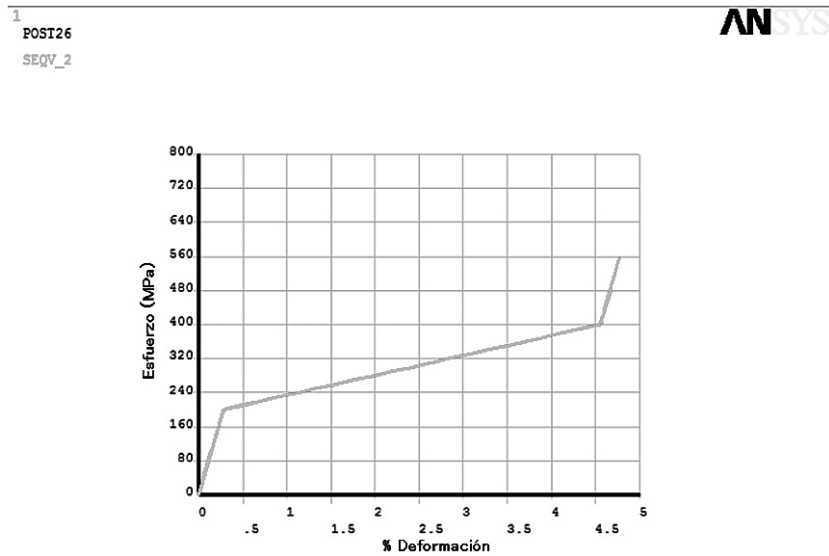


Figura 12. Gráfica que muestra el esfuerzo contra deformación, ANSYS para la SMA de CuZnAl.

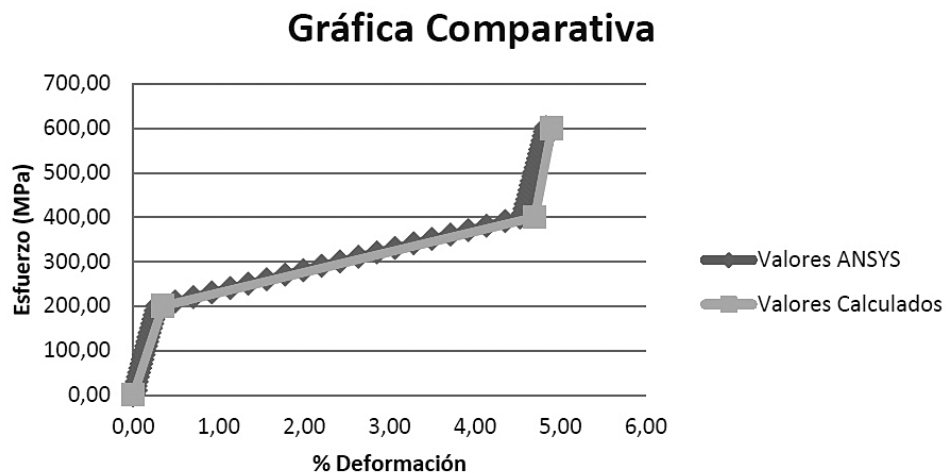


Figura 13. Gráfica comparativa ANSYS contra modelado matemático de la SMA de CuZnAl.

modelo matemático solo se comprobaba con los puntos críticos de cambio.

Conclusiones

Se logró desarrollar una aleación de memoria de forma de CuZnAl para fabricar acoples de memoria de forma para unir tubería destinada a diversas aplicaciones mecánicas en las cuales es muy difícil o peligroso utilizar soldadura y/o bridas. Además, los datos experimentales obtenidos en la caracterización física de la aleación se emplearon en un modelo matemático y la simulación de

elemento finito en el programa ANSYS, para lograr la demostración del cambio de fases características en las aleaciones de memoria de forma. Con todo ello se concluye que el modelado matemático y el modelado por elemento finito son herramientas favorables para la comprobación de los cambios de fases en aleaciones de memoria de forma.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Nacobre S.A. de C.V de Celaya, Guanajuato, México, por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

Bibliografía

- Ansys. (2011). *Ayuda de Ansys*.
- Braz Fernandes, F.M. (2003). *Ligas con memoria de forma*. Lisboa: Universidad Nova de Lisboa.
- Casciati, F., Faravelli, L. & Hamdaoui, K. (2007). A base isolation device with bars in shape memory alloys. *Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials*, 1-8.
- Devices, I. (2003). *Acerca de nosotros Intrinsic Devices Incorporated*. Recuperado el 10 de enero de 2011 del sitio web de *Intrinsic Devices Incorporated*: <http://www.intrinsicdevices.com/history.html>
- Flor, S. d. (2005). *Ensayos para la caracterización de aleaciones con memoria de forma NiTi*. Cataluña: Departament de resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria.
- Guilemany, J., Fernández, J. & Franch, R. (1998). Relación estructura-propiedades en aleaciones inteligentes con memoria de forma Cu-Al-Ag de alta temperatura de transformación martensítica termoelástica. *Revista de metalurgia*, 281-285.
- ILCE, B. d. (2000). *Los materiales de hoy*. Recuperado el 10 de julio de 2011 de http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/069/htm/sec_8.htm
- Lagoudas, D. (2008). *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. USA: Springer Science+Business Media.
- Langelaar, M. & van Keulen, F. (2004). Modeling of a Shape Memory Alloy Active Catheter. *Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*, 19-22.
- Nacobre. (2010). *Política de Calidad y Certificaciones*. Recuperado el 13 de agosto de 2011 del sitio web de Nacobre: <http://www.nacobre.com.mx/certificaciones.htm>
- Otsuka, K. & Wayman, C. (1998). *Shape memory materials*. Reino Unido: Cambridge University Press.
- Rios-jara, D., & Guenin, G. (1987). On the characterization and origin of the dislocation associated with the two way memory effect en Cu-Zn-Al thermoelastic alloys-I. Quantitative analysis of the dislocations. *Acta metall*, 109-119.
- Shaw, J., Churchill, C. & Iadicola, M. (2008). Tips and tricks for characterizing shape memory alloys wire: part I-differential scanning calorimetry and basic phenomena. *Experimental Technique Journal*, vol. 32, núm. 5, Septiembre/Octubre, 55-62.
- Shuxhuan, C., Zuyao, X. & Fan, Y. (1990). Stabilization of martensite and parent phase ordering in a Cu-Zn-Al alloy. *Acta Metall sin (Chinese EDN)*, 246-254.
- Tjahjanto, D., Turteltaub, S., Suiker, A. & van der Zwaag, S. (2006). Modelling of the effects of grain orientation on transformation-induced plasticity in multiphase carbon steels. *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* 14, 617-636.
- Torres-San-Miguel, C.R., Urriolagoitia-Calderón, G., Urriolagoitia-Sosa, G. & Hernández-Gómez, L. (2010). Análisis numérico de una prótesis endobronquial utilizada para el tratamiento de cáncer pulmonar. *Colomb. Biotecnol*, 41-54.
- Van Humbeeck, J. (2009). Shape Memory Alloys. En: M. Schwartz, *Smart Materials*. USA: Taylor & Francis Group.
- Wales, J. & Sanger, L. (2001). *Wikipedia*. Recuperado el 11 de agosto de 2011 de <http://es.wikipedia.org/wiki/Cobre>