

MODELADO DE ALEACIONES DE MEMORIA DE FORMA CuZnAl

Modeling Shape Memory Alloys CuZnAl

Andre Tabash Matamorros*
andre.tabasth@ulatina.cr

Resumen

Para este trabajo se desarrolla una comparación en la cual se modela un acople de tubería de cobre para mejorar las uniones de las tuberías y evitar las soldaduras, con un modelado matemático que reúne varias teorías matemáticas. Se desarrolla un método que combina la deformación térmica junto con la deformación mecánica para tener una base de comparación con el método de elemento finito que usa la deformación mecánica. Se utiliza la aleación de memoria de forma de CuZnAl con distintos porcentajes de los materiales por usar en la mezcla y con diversos tratamientos térmicos.

Palabras clave

Unión de tubería; Aleación de memoria de forma; SMA; Cobre; Zinc; Aluminio; Modelado matemático; Simulación en elemento finito.

Abstract

For this work, it is developed a comparison which would model as a copper piping connection to improve the piping's union. This would also avoid the soldering. This is a mathematical modelling that combines many mathematical theories. Developing a method that combines the thermal deformation with the mechanical one to have a comparison base with the finite element method in which the mechanical deformation used. Here, it is used the memory lining up in CuZnAl form with different percentages of the materials used in the mixture and of different thermal treatments.

Keywords

Union Pipe; Shape Memory Alloy; SMA; Copper; Zinc; Aluminum; Mathematical Model-ing; Finite Element Simulation.

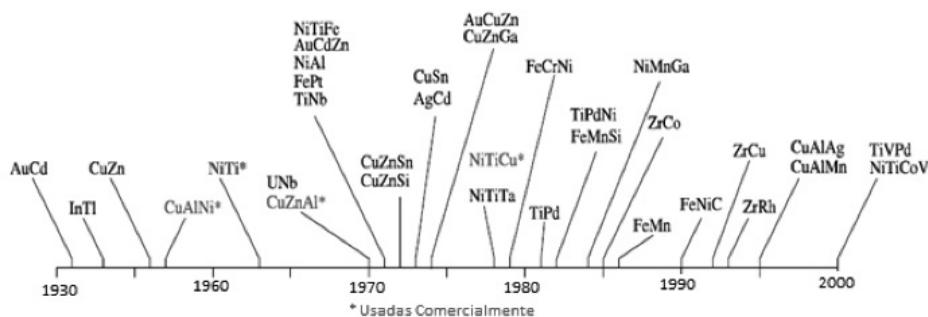
*Coordinador general Mecánica Electromecánica de la Escuela de Ingeniería Electricidad – Mecánica, Universidad de Latina de Costa Rica.

Las aleaciones de memoria de forma (*shape memory alloys*) o SMA, por sus siglas en inglés tienen la capacidad de cambiar de forma y regresar a su forma original tras ser sometidas a un calentamiento o deformación mecánica; estas, en un determinado rango de temperatura, pueden ser deformadas casi hasta un 10% volviendo a recuperar su forma original al ser descargadas. (Lagoudas, 2008). Este fenómeno también es conocido como memoria de forma térmica (efecto memoria de forma) y memoria de forma elástica (súper-elasticidad), respectivamente. Este diferente comportamiento es producido por un cambio de fase llamado transformación martensítica termo-elástica, el cual es un reajuste de la microestructura del elemento (Guilemany, Fernández, y Franch, 1998).

Además, son conocidos como materiales inteligentes por la capacidad de recordar su forma después de severas deformaciones, una vez deformada a bajas temperaturas (en su fase martensítica), estos materiales permanecen deformados hasta ser calentados, los cuales regresarán a su forma previa antes de ser deformados una vez que pasan las temperaturas de deformación.

Las SMA se descubrieron en 1932 cuando Ölander descubrió la superelasticidad presente en una aleación de oro-cadmio (AuCd), lo que condujo a que Greninger y Mooradian observaron, en una aleación de CuZn, cómo la fase martensítica se manifestaba y se ausentaba por cambios de temperatura. Varias aleaciones se han descubierto a partir de los años como ejemplo el CuZnAl en 1970 y el NiTiNOL en 1962, como se observa en la Figura 1. (Shaw, Churchill, y Ladiacola, 2008).

Figura 1. Línea de tiempo del descubrimiento de aleaciones de memoria de forma.



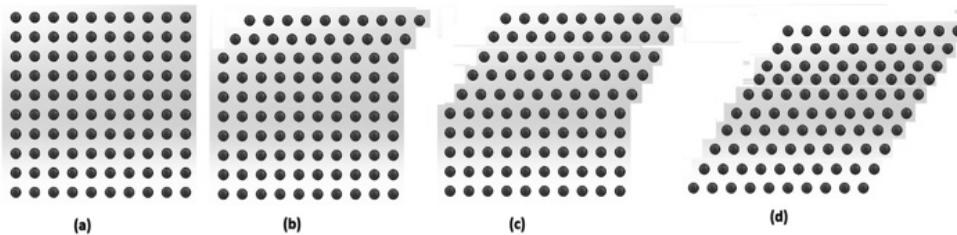
Elaboración propia.

Las aleaciones más comerciales son las aleaciones de níquel-titanio (NiTi) la cual fue desarrollada en 1962 en *Naval Ordnance Laboratory*, que lo nombró como NiTiNOL (por Ni=níquel, Ti=titanio, NOL= *Naval Ordnance Laboratory*).

Las SMA han sido utilizadas, desde su invención, en diversos tipos de aplicaciones; en el área de tuberías la mayor aplicación tecnológica se desarrolló durante el año 1971 por *Raychem Corporation of Menlo Park, CA*. El producto es un acople de tubería hidráulica para 3000psi en la cual unen tuberías de titanio para la fuerza naval estadounidense. Más de 300, 000,00 uniones fueron puestas en servicio para la demanda. Raychem vende los acoples con el nombre de Cryofit® (Devices, 2003).

Las aleaciones de memoria de forma poseen la cualidad de regresar a su forma previa a la deformación; esto se logra mediante lo que se llama cambio de fase, la cual sucede cambiando de la fase austenita a la fase martensita y viceversa. Es un cambio en la microestructura de la aleación como se muestra en la Figura 2.

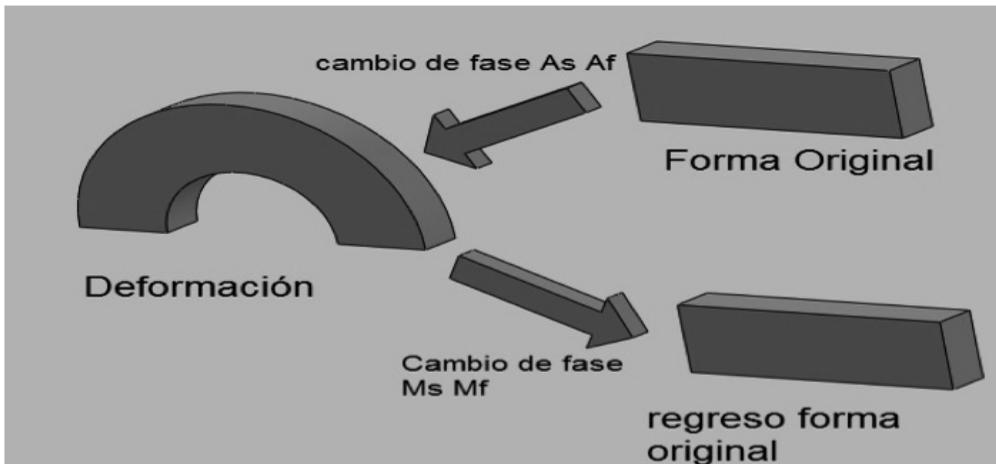
Figura 2. Se muestra un esquema del cambio de austenita a martensita (a) completamente austenita, (d) completamente martensita, (b) y (c) se muestra que solo a pequeñas distancias atómicas se desplazan los átomos.



Elaboración propia.

Se observa como si hubiera ocurrido una deformación física. Según se ve en la Figura 3.

Figura 3. Esquema del efecto memoria de forma.



Elaboración propia.

Tipos de aleaciones de memoria de forma

Hay varios tipos de aleaciones inteligentes que tienen la capacidad de restaurar su composición después de una deformación: están las simples, conocidas como aleaciones de memoria de forma (*Shape Memory Alloys, SMA*); las cerámicas, con memoria de forma (*Shape Memory Ceramics, SMC*); polímeros con memoria de forma (*Shape Memory Polymers, SMP*), y un último grupo, las ferromagnéticas con memoria de forma (*Ferromagnetic Shape Memory Alloys, FSMA*).

Las aleaciones de memoria de forma son aleaciones metálicas y son las más comunes; realizan su transición por medio de temperatura. Se pueden deformar entre un 5% y

un 10% sin llegar hasta la zona plástica. Las más comercializadas son las aleaciones de NiTi y las de base de cobre. Solo pueden ser utilizadas hasta una temperatura máxima de 100°C, lo que significa que para mayores temperaturas se debe de utilizar otro tipo de aleación, esto porque son bio-compatibles, y pueden ser utilizadas en implantes en seres vivos.

La búsqueda de nuevas aleaciones es relevante para las distintas aplicaciones que se encuentran en el mercado con el fin de que posean un mayor rango de temperaturas. Las de mayor desarrollo se ilustran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química y propiedades de algunas SMA

Aleación	Composición	Rango de Temperatura °C	Histéresis °C
Ag-Cd	44/49 a %Cd	-190 a -50	15
Au-Cd	46.5/50 a %Cd	30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/45 a %Al; 3/4.5 wt% Ni	-140 a 100	35
Cu-Sn	15 a %Sn	-120 a 30	Na
Cu-Zn	38.5/41.5 a %Ti	-180 a -10	10
In-Ti	18/23 a %Ti	60 a 100	4
Ni-Al	36/38 a Ti	-180 a 100	10
Ni-Ti	49/51 a Ni	-50 a 110	30
Fe-Pt	25 a %Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 a %Cu	-250 a 180	24
,Fe-Mn-Si	32 wt%Mn; 6wt% Si	-200 a 150	100

Tomado de: Flor, S. d. (2005). *Ensayos para la caracterización de aleaciones con memoria de forma NiTi*. Cataluña, España: Universitat Politècnica de Catalunya, Departament de Resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, p.38.

En las cerámicas de memoria de forma (SMCs) se observa el fenómeno de memoria de forma, en las que contienen zirconio, niobato de magnesio o cerámicas perovskitas. La deformación que logran obtener sin llegar a la zona plástica es poca, de un 0,5%, además de ser frágiles. Entre las distintas aplicaciones, se pueden utilizar en las llamadas ventanas inteligentes, las que según a la temperatura a que se encuentren dejarán pasar luz o no.

Los polímeros de memoria de forma (SMPs) hacen posible ese efecto cuando, con la combinación de la estructura y morfología de un polímero, y adicional tecnología de programación y procesado empleado. Son rígidos y poseen un alto

módulo en su forma original. En los campos de uso están el médico, el automotriz, etc.

Las aleaciones ferromagnéticas con memoria de forma (FSMAs) son similares a las metálicas, pero el cambio de forma se realiza por medio de un campo magnético en lugar de temperatura.

Procesos de manufactura

El proceso de fabricación de una aleación de memoria de forma es similar al de una pieza normal; primero se realiza la fundición, luego se trabaja tanto en caliente como en frío, y por último se realiza un tratamiento térmico. El proceso de

fundición y colado posee similitud con los procesos convencionales, con la excepción de que se debe tener una mayor precaución con los elementos de la fundición para evitar problemas en la composición química final.

El trabajo en caliente de la aleación, tal como forja, rolado y extrusión, es fácil de llevar a cabo. La extrusión en caliente es eficiente por reducción del tiempo. Por lo general, la mayoría de las piezas de producción son extruidas como barras con sección transversal arbitraria (redonda, rectangular, etc.).

Las aleaciones, conformadas en caliente tienen una estructura de grano grueso que provoca la ruptura del límite de grano y disminuye la vida de la aleación. Una estructura de grano fino, la cual provee al límite de grano más vida en esfuerzo y fatiga, es uno de los principales requisitos para una aleación de CuZnAl comercial.

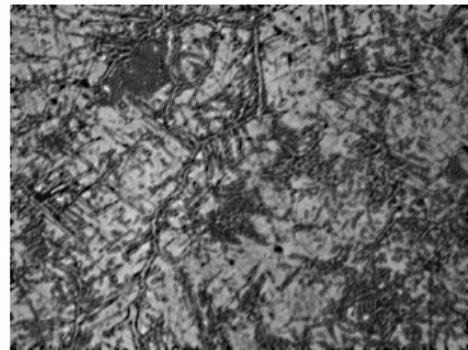
El trabajo en frío es más efectivo para refinar el tamaño de grano. De acuerdo con el diagrama de fases, después de un trabajo en caliente, la aleación está en fase β pero trabajar en frío en la fase β es poco práctico. Para obtener un buen trabajo en frío, la aleación es tratada en caliente para lograr la fase dual donde pequeñas cantidades de fase β están mezcladas con la martensita. Un tratamiento de 773-873 K provee dicha transformación.

En este proceso para combinar el cobre, el zinc y el aluminio, existen dos problemas fundamentales: la oxidación del zinc y la segregación del aluminio. El Zn fundido es oxidado, el aluminio se va a la superficie segregado por gravedad. Para evitar estos problemas, a la hora de fundir este tipo de aleaciones, la solución es usar un horno de inducción, sin núcleo, a baja frecuencia. Un horno de alta frecuencia se utiliza para preparar un pequeño lingote. Los hornos que calientan con gasolina y electricidad no son utilizados por su bajo

rango de temperaturas y por el alto rango de oxidación que producen.

Existen dos objetivos en el tratamiento de memorias de forma de CuZnAl, uno es memorizar la forma deseada y dos es transformar la aleación en la fase β . Para satisfacer ambos puntos la aleación es calentada hasta el punto donde se encuentra la región de la fase β . Las temperaturas de calentado son seleccionadas lo más bajo posible para evitar el engrosamiento de los granos. Después de un corto tiempo, esta es enfriada con agua y lograr una microestructura que cambie de fase.

Figura 4. Microestructura en fase martensítica a 10x, para la SMA de CuZnAl.



Fotografía del autor.

El objetivo del artículo es definir un modelado matemático para relacionar las temperaturas de transformación con los esfuerzos de transformación, mediante un modelado matemático y un modelado por elemento finito.

Metodología

Se definen tres aleaciones de diferentes composiciones de CuZnAl en donde las aleaciones demuestren que hay algún cambio de fase, esto mediante estudios en un espectrómetro de emisión óptica. Las tres muestras seleccionadas se encuentran ilustradas en la Tabla 1. En donde se observa que estas, aunque son muy

similares, poseen diferencias en cuanto a su composición química (Otsuka y Wayman, 1998, Shuxhuan, 1990).

Tabla 2. Composición química de las muestras

Composición química de la muestra 1		
Zn	Al	Cu
%	%	%
24,02	5,09	70,89
Composición química de la muestra 2		
Zn	Al	Cu
%	%	%
17,02	7,54	75,34
Composición química de la muestra 3		
Zn	Al	Cu
%	%	%
25,9	4	70,1

Con un estudio de calorimetría de barrido diferencial (en inglés *Differential Scanning Calorimetry* o DSC) las temperaturas de transformación son las descritas en la Tabla 3, dependen directamente de los tratamientos térmicos que se les haya aplicado a las fundiciones y de su composición química. Si se mantiene un factor a la hora de la función, estas pasan tanto por sus temperaturas de martensita como de austenita (Guilemany, Fernández y Franch, 1998).

Tabla 3. Temperaturas de transformación de las muestras

Temperaturas de transformación muestra 1		
As		K
Af		K
Ms		K
Mf		K
Temperaturas de transformación muestra 2		
As		K
Af		K
333		
368		
257		
220		
361		
384		

Ms	319	K
Mf	326	K
Temperaturas de transformación muestra 3		
As	347	K
Af	358	K
Ms	337	K
Mf	331	K

Una vez obtenidas las temperaturas de transformación se realiza la correlación con los esfuerzos de transformación; para esto se efectúa una gráfica la cual va a ser el punto de comparación, donde al introducir las temperaturas de transformación se pueden encontrar los esfuerzos. Se deben trazar líneas que corten las temperaturas de transformación con una pendiente. La pendiente de estas líneas simboliza el valor de la ecuación $C^{M/CA}$ en donde CM y CA equivalen a la relación que existe entre el esfuerzo de transformación y la temperatura de transformación promedios para este tipo de aleaciones que se denominan como CA: coeficiente de influencia de esfuerzo en austenita y CM: coeficiente de influencia de esfuerzo en martensita (Van Humbeeck, 2009), que para las aleaciones con base de cobre es 5MPa/K, lo cual genera un valor de 1 y, por ende, se realizan las pendientes con un ángulo de 45° cada una de ellas. Con el dato del ángulo de la pendiente se trazan las líneas en donde cortan las temperaturas de cambio con la pendiente calculada de 45°. Están ilustradas en las Figuras 5, 6 y 7.

Figura 5. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 1.

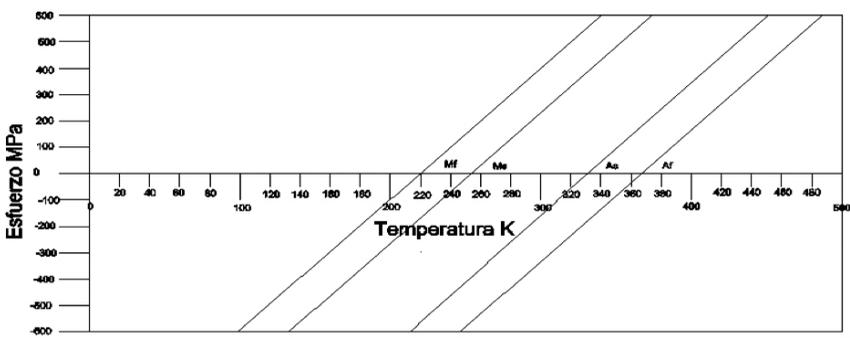


Figura 6. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 2.

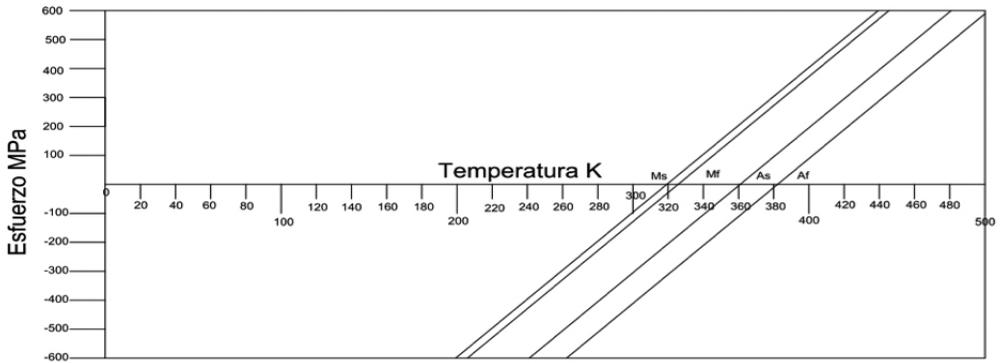
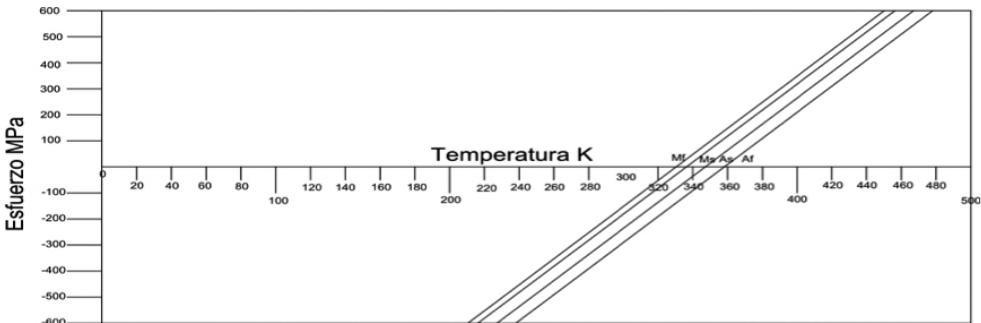


Figura 7. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 3.



Nótese la diferencia entre ellas, la cual radica en dónde se van a cruzar las temperaturas de transformación con la temperatura base, a la que los materiales van a estar expuestos durante la mayor parte del tiempo para esta prueba, una temperatura de 25°C. Esto da una referencia para colocar distintas temperaturas bases, dependiendo de su lugar de ubicación, y así asegurarse que las piezas no generen un cambio debido a las temperaturas en el exterior de las piezas. Utilizando la base de 25°C, se traza una línea recta en dicha temperatura; el corte de las líneas de las temperaturas de transformación se desplazarían al eje, donde se encuentra su esfuerzo de transformación, según se representa en las Figuras 8, 9 y 10.

Figura 8. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 1.

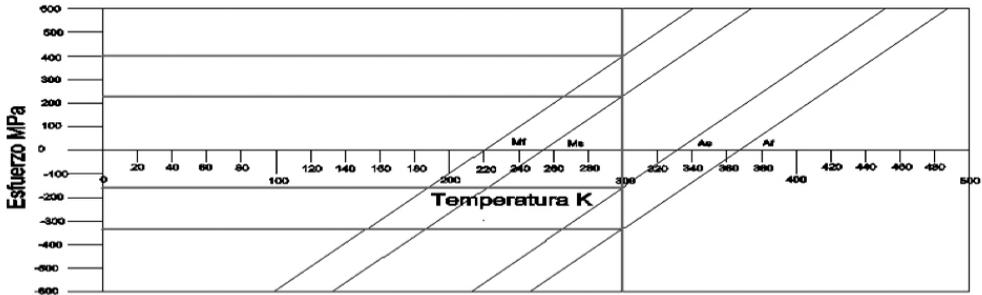


Figura 9. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 2.

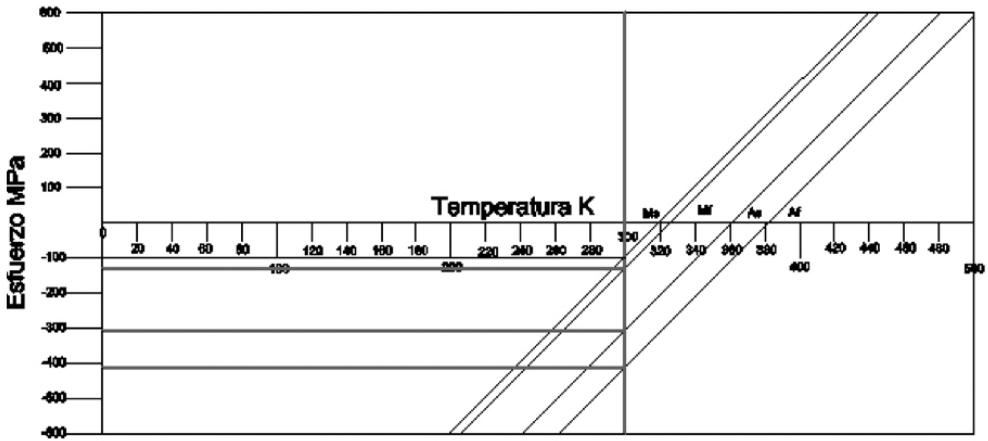
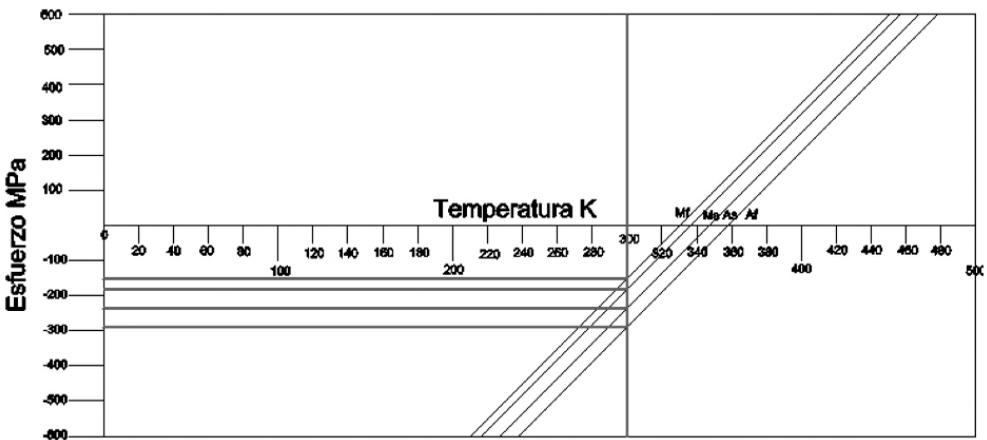


Figura 10. Gráfica de relación esfuerzo temperatura para la SMA de CuAlZn muestra 3.



Para el desarrollo de este experimento se propuso una temperatura ambiente de 300K con el fin de lograr los esfuerzos de transformación, obtenidos de las Figuras 10, 11 y 12; los esfuerzos para las tres muestras se definen en la Tabla 4, donde se aprecian los de cambio con uno máximo que no se va a superar de 600MPa (Van Humbeeck, 2009).

Tabla 4. Esfuerzos de transformación para las muestras

Esfuerzos de transformación muestra 1			Esfuerzos de transformación muestra 2			Esfuerzos de transformación muestra 3		
σMs	230	Mpa	σMs	99	Mpa	σMs	152	Mpa
σMf	400	Mpa	σMf	128	Mpa	σMf	181	Mpa
σMax	600	Mpa	σMax	600	Mpa	σMax	400	Mpa
σAs	300	Mpa	σAs	303	Mpa	σAs	236	Mpa
σAf	500	Mpa	σAf	404	Mpa	σAf	290	Mpa

Se puede observar que aunque se manejen los mismos tres elementos de las mezclas, su composición es diferente, y por sus tratamientos térmicos se van a comportar de otra manera en lo que respecta a los cambios de fase.

Como siguiente paso de deben de establecer las propiedades de la aleación, las cuales están descritas en las Tablas 5, 6 y 7

Tabla 5. Propiedades térmicas del SMA

Punto de fusión	950 a 1020	°C
P	8893	Kg/m ³
Resistencia	10 a 12	Ω
Conductividad térmica	120	W/m ² K
Calor específico	400	J/kg ² K
Aa	1,60E-05	/K
Am	1,60E-05	/K
Entalpía de transformación	10000	J/kg

Tomado de: Van Humbeeck, J. (2009). Shape Memory Alloys. En M. Schwartz, *Smart Materials*. Nueva York, Estados Unidos: Taylor y Francis Group, p. 26.

Tabla 6. Propiedades mecánicas del SMA

Ea	72000	Mpa
Em	70000	Mpa
V	0,33	
Sa	1,39E-05	/Mpa
Sm	1,43E-05	/Mpa

Tomado de: Braz Fernandes, F. M. (2003). *Ligas con memoria de forma*. Lisboa, Portugal: Universidad Nova de Lisboa, p. 15.

Tabla 7: Propiedades de transformación del SMA

Rango de transformación	-200 a 200	°C
H	4	%
C ^M	5	Mpa/K
C ^A	5	Mpa/K
Histéresis	15 a 25	°C
Temperatura máx.	200	°C
Esfuerzo máximo	600	Mpa

Tomado de: Van Humbeeck, J. (2009). Shape Memory Alloys. En M. Schwartz, *Smart Materials*. Nueva York, Estados Unidos: Taylor y Francis Group, p.26.

Para el modelado matemático de la deformación se plantea una ecuación, la cual resume varias propiedades de las aleaciones de memoria de forma; se plantea la ecuación de deformación como se muestra en la ecuación 1 (véase Ecuaciones, Lagoudas, 2008).

$$\epsilon = S\sigma + \alpha(T - T_0) + \epsilon^t \quad (1)$$

En donde está dado como se muestra en la ecuación 2:

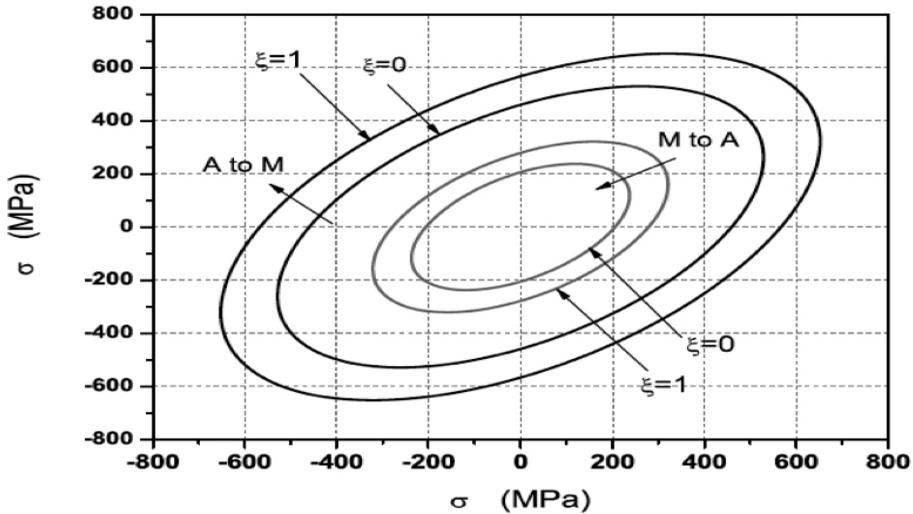
$$\epsilon^t = Hsgn(\sigma)\xi \quad (2)$$

En donde está dado como se muestra en la ecuación 3:

$$sgn(\sigma) = \begin{cases} 1 & \text{si } \sigma \geq 0 \\ -1 & \text{si } \sigma < 0 \end{cases} \quad (3)$$

En donde ξ va a variar dependiendo del punto en donde se esté calculando; para los puntos en los cuales ξ está en sus fases de cambio podemos asumir como se muestra en la Figura 11.

Figura 11. Grafica en la que se muestra ξ para sus fases de cambio.



Tomado de: Lagoudas, C. D. (2008). *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. Nueva York, Estados Unidos: Springer Science+Business Media, p.142.

Considerando esta suposición tenemos que en el lapso donde $0 \leq \sigma \leq \sigma^{Ms}$, ξ se considera 0 el cual reduce la ecuación 1 a:

$$\epsilon = S^A\sigma + \alpha^A(T - T_0) \quad (4)$$

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 1 se reduce a:

$$\epsilon = S^M\sigma + \alpha^M(T - T_0) + Hsgn(\sigma) \quad (5)$$

Para el lapso donde $\sigma^{Af} \geq \sigma \geq 0$, ξ se considera 0 el cual reduce la ecuación 1 a:

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

Estos términos significan lo expresado en la tabla

Tabla 8. Simbología de ecuaciones

Valor	Descripción
E_a	Módulo de Young austenítico
E_m	Módulo de Young martensítico
H	Porcentaje de transformación
S^A	Tensor de compliance de austenita
S^M	Tensor de compliance de martensita
T	Temperatura
T_0	Temperatura de referencia
α_a	Coefficiente de expansión térmica austenita
α_m	Coefficiente de expansión térmica martensita
ϵ	Tensor de deformación infinitesimal
ϵ^t	Tensor de deformación de transformación
ν	Número de poisson
ξ	Fracción total del volumen martensítico
ρ	Densidad
σ	Esfuerzo uniaxial
σ^{max}	Esfuerzo máximo de la transformación
σ^{as}	Esfuerzo inicial de la fase de transformación austenítica
σ^{af}	Esfuerzo final de la fase de transformación austenítica
σ^{ms}	Esfuerzo inicial de la fase de transformación martensítica
σ^{mf}	Esfuerzo final de la fase de transformación martensítica

Elaboración propia.

Resolviendo las ecuaciones 4, 5 y 6 con los esfuerzos obtenidos, logramos que las deformaciones y las propiedades de SMA de base de cobre en las tablas vayan a ser para las tres muestras como se ilustra en las Tablas 9, 10 y 11.

Tabla 9. % de deformación para la muestra 1

ϵ_{ms}	0.39%
ϵ_{mf}	4.70%
ϵ_{max}	4.90%
ϵ_{as}	4.40%
ϵ_{af}	0.59%

Tabla 10. % de deformación para la muestra 2

ϵ_{ms}	0.11%
ϵ_{mf}	4.10%
ϵ_{max}	4.90%

ϵ_{as}	4.30%
ϵ_{af}	0.43%

Tabla 11. % de deformación para la muestra 3

ϵ_{ms}	0.15%
ϵ_{mf}	4.20%
ϵ_{max}	4.60%
ϵ_{as}	4.30%
ϵ_{af}	0.31%

Como resultado de estos valores de deformación y con los esfuerzos obtenidos de las Tablas 4, 9, 10 y 11, graficando estos resultados alcanzamos los puntos de esfuerzo-deformación para las tres muestras observadas en las Figuras 12, 13 y 14.

Figura 12. Gráfica de esfuerzo deformación para la muestra 1.

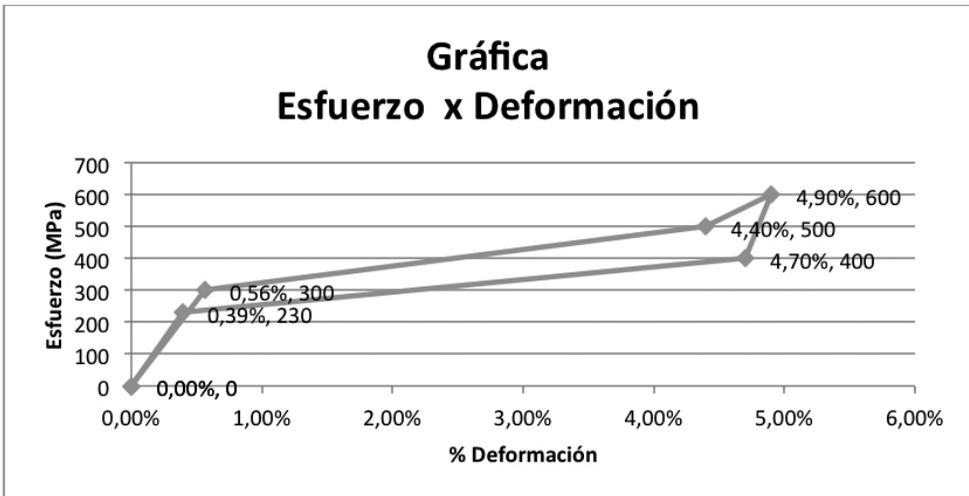


Figura 13. Gráfica de esfuerzo deformación para la muestra 2.

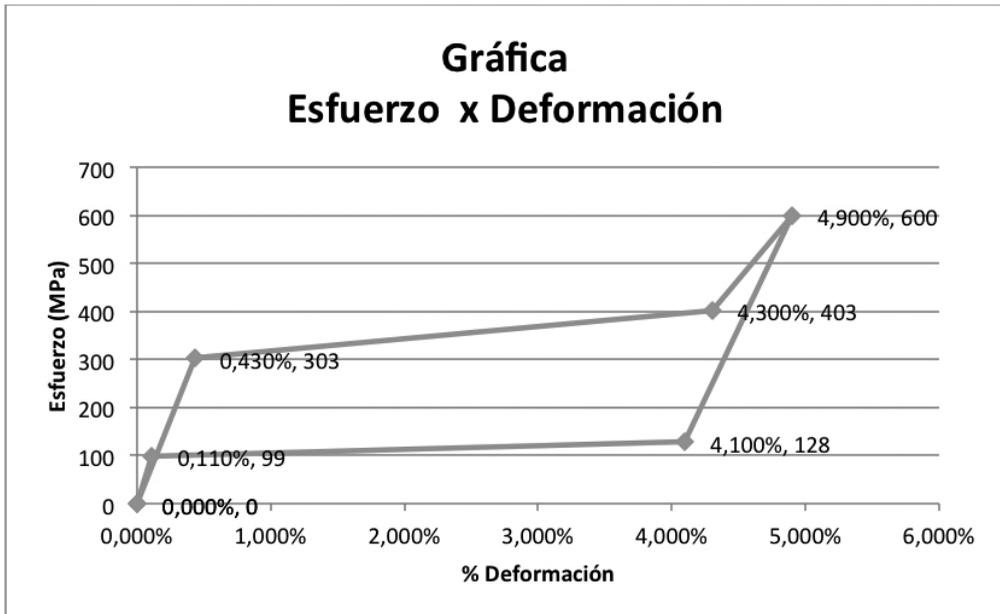
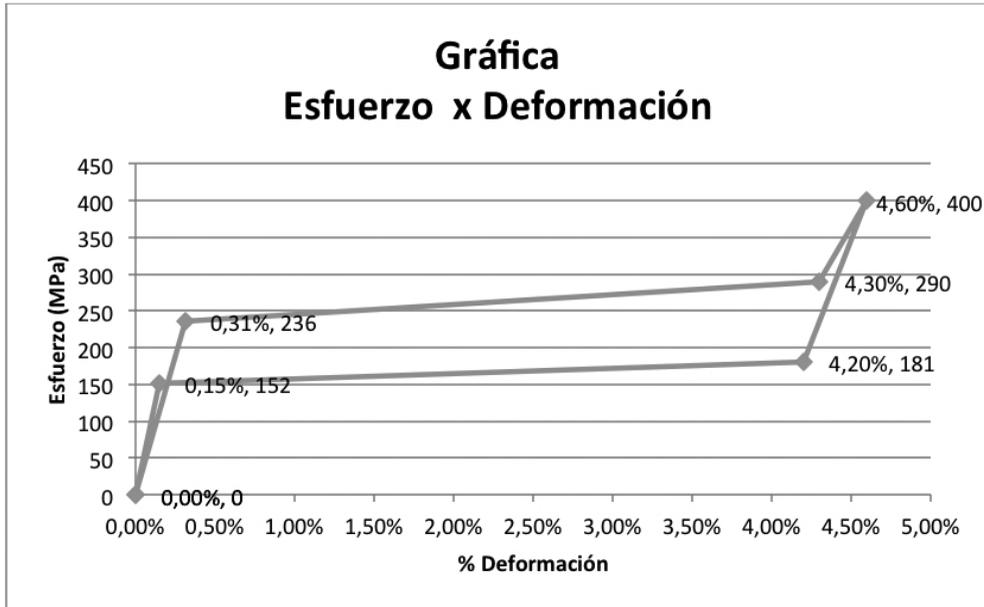


Figura 14. Gráfica de esfuerzo deformación para la muestra 3.

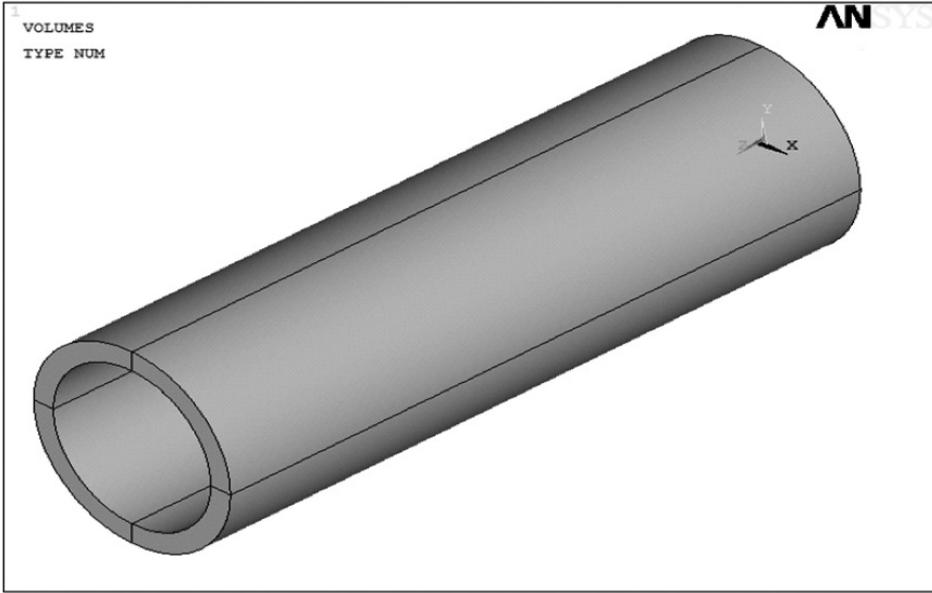


Como se puede apreciar, gracias a que se trasladaron las temperaturas de cambio a esfuerzo de cambio, se pueden evaluar mejor los cambios de fases en cada una de las muestras, considerando que son de diferentes componentes y de diferentes métodos de tratamientos térmicos.

Modelado por elemento finito

En este proyecto se utilizó como método de comprobar el modelado matemático propuesto, el modelado por elemento finito. Este es un sistema de mallado, el cual permite hacer cálculos más exactos para determinar la viabilidad de los cálculos obtenidos con el método de modelado matemático. Se puede utilizar como herramienta para el cálculo de aleaciones de memoria de forma, esto porque el modelado por elemento finito utiliza cierto grupo de ecuaciones, y el modelado matemático propuesto utiliza otro tipo de ecuaciones. En el modelado por elemento finito se utiliza la figura geométrica de un cilindro, representando un acople de tubería de SMA como se muestra en la Figura 15. (Casciati, Faravelli y Hamdaoui, 2007).

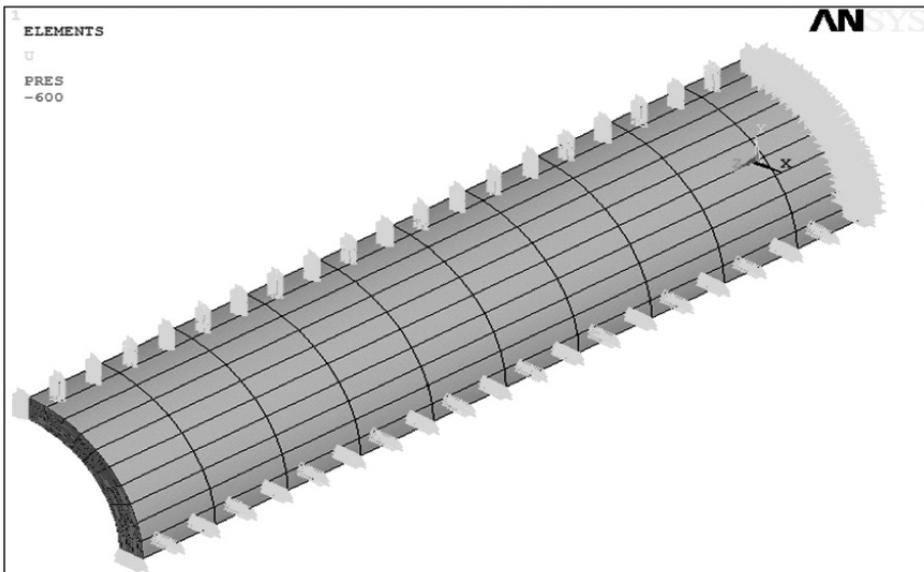
Figura 15. Vista completa de la pieza por analizar.



Elaboración propia.

A manera de simplificar el tiempo de cómputo se utiliza una cuarta parte de la figura; se colocan restricciones de simetría para simular la figura completa, sumándole una restricción de movimiento en todas las direcciones en un extremo de la figura, además simulando empotramiento en un lado de la figura y agregándole la presión en pascuales del otro lado, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. Geometría cargada y restringida.



Elaboración propia.

Se siguieron los siguientes pasos para realizar el modelado por elemento finito, efectuando análisis de SMA; el programa solo realiza análisis de súper-elasticidad para el cual los elementos que se pueden usar para simular el SME son para 2D PLANE182, que se utiliza para el modelado de 2-D de las estructuras sólidas. El elemento puede ser utilizado como un elemento plano (tensión plana o deformación plana) o como un elemento de simetría axial. El elemento se define por cuatro nodos que tienen dos grados de libertad en cada uno: traducciones en las X e Y nodales. El elemento tiene plasticidad, rigidez estrés, la desviación grande, y grandes capacidades de deformación.

Para 3D SOLID185 se utiliza el modelado tridimensional de estructuras sólidas, el elemento está definido por ocho nodos que tienen tres grados de libertad en cada uno: traducciones en las direcciones x, y, z nodales.

SOLID186 es una orden superior 3-D 20-nodo elemento sólido que exhibe un comportamiento de desplazamiento cuadrático. El elemento se define por 20 nodos que tienen tres grados de libertad cada uno: traducciones en las direcciones x, y, z nodales, El elemento es compatible con la plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, rigidez estrés, la desviación grande, y grandes capacidades de deformación.

SOLID 187 es un elemento de orden superior 3-D, 10-nodo, tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y se adapta bien a modelar mallas irregulares (tales como los producidos a partir de diversos sistemas CAD / CAM). El elemento se define por 10 nodos que tienen tres grados de libertad en cada uno: traducciones en las direcciones x, y, z nodales. El elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, rigidez estrés, la desviación grande, y grandes capacidades de deformación. También tiene la capacidad de formulación mixta para la simulación de las deformaciones de los materiales elastoplásticos casi incompresible, y totalmente incompresible, hiperelásticos materiales.

Para lograr la simulación correcta del material, a esta se le deben agregar 9 constantes, 3 lineales y 6 no lineales de SMA. Las constantes de SMA están planeadas en la Tabla 12 y están descritas desde C1-C6, donde C1 es el esfuerzo de inicio austenítico, C2 es el fin del esfuerzo austenítico, C3 es el inicio del esfuerzo martensítico, C4 es el fin del proceso martensítico, C5 es el porcentaje de deformación lineal, y C6 es la histéresis del material.

Tabla 12. Constantes de SMA

Constantes	Símbolo
SIG-SAS (C1)	
SIG-FAS (C2)	
SIG-SSA (C3)	
SIG-FSA (C4)	
EPSILON (C5)	
ALPHA (C6)	α

Tomado de: Ansys. (2011). Ansys. Student recuperado desde: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>

Las constantes lineales del material están descritas en la Tabla 13, las cuales son, E_a es el módulo de Young de austenita, E_m es el módulo de Young de martensita, y ν es el módulo de poisson.

Tabla 13. Constantes lineales

Constantes	Símbolo
E_A	E_a
NU	ν
YMRT	E_m

Tomado de: Ansys. (2011). Ansys. Student recuperado desde: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>

Se continúa con la creación de la pieza por analizar, ejemplificada en la Figura 15. Para continuar se debe seleccionar el tipo de análisis y las características de la solución, ya que es un análisis no lineal

se colocan pasos de carga para simular el aumento de la presión. Se definen las condiciones en donde primero se selecciona el área y luego se elige la dirección de las restricciones X, Y Z, para tener una sección empotrada de un lado de la Figura 16 (Langelaar y van Keulen, 2004).

Se aplican las cargas en donde primero se selecciona el área que se desea para aplicar la carga, y después se seleccionan las condiciones de la carga; si se coloca la carga en negativo va a aplicarse compresión y si se coloca en positivo se aplica tensión.

Para realizar la solución se debe especificar más de una carga para lo cual conviene definir pasos de carga, desde 0 hasta el esfuerzo máximo que se tenga. Se da paso a la solución, en la cual hay que especificar los pasos de carga que se desean solucionar.

Una vez concluida la solución se deben revisar los resultados, para las SMA, ANSYS genera la gráfica de esfuerzo contra deformación, las cuales se ilustran en las Figuras 17, 18 y 19.

Figura 17. Gráfica de esfuerzo contra deformación dada por ANSYS para la muestra 1.

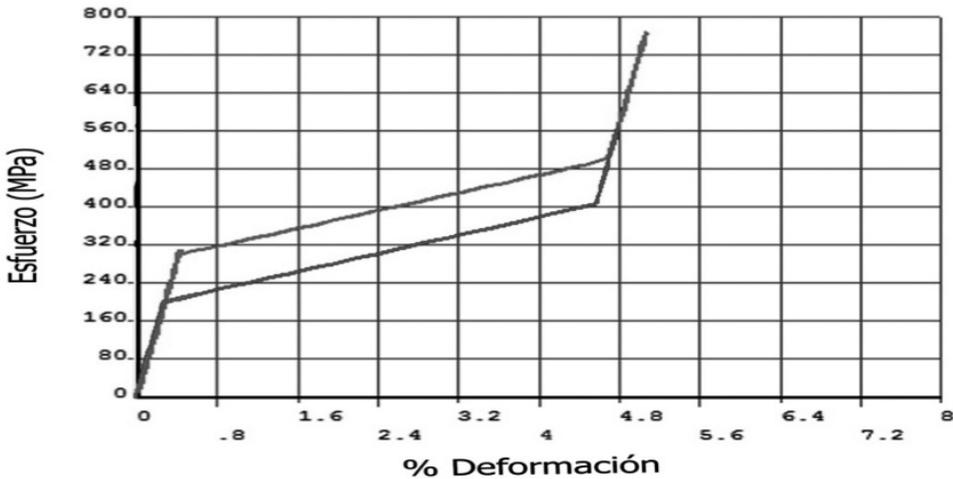


Figura 18. Gráfica de esfuerzo contra deformación dada por ANSYS para la muestra 2.

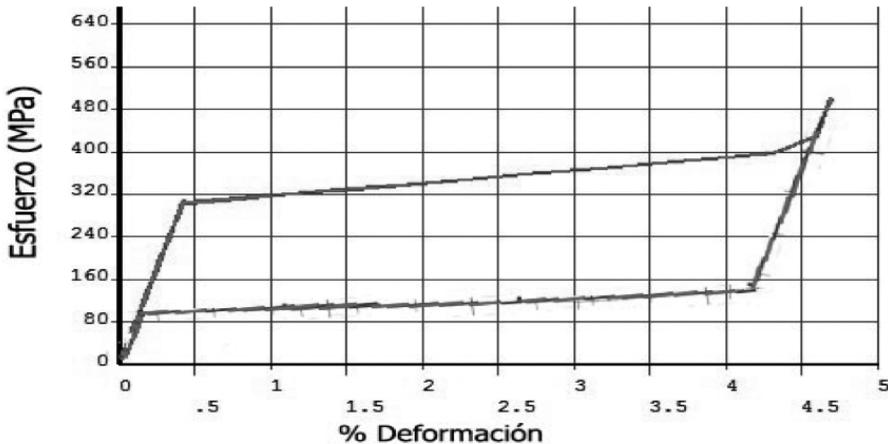
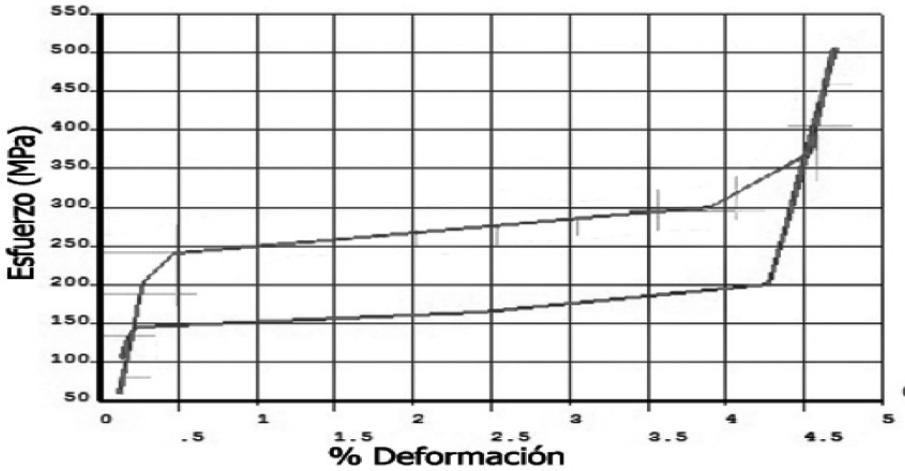


Figura 19. Gráfica de esfuerzo contra deformación dada por ANSYS para la muestra 3.



Se denota cómo las distintas graficas dan diferentes resultados independientemente de la composición que tengan, esto por el tratamiento térmico que se les aplicó. Como se muestra en la Figura 19, no se logró cumplir la meta de regresar la pieza a su estado previo a la deformación, debido a la cercanía de los esfuerzos de cambio.

Comparación de resultados

Es importante resaltar que los resultados deben de ser comparados uno con res-

pecto a otro, para validar correctamente el modelado matemático, asumiendo que este funciona no solo para una combinación específica sino para varias combinaciones con diferentes tratamientos térmicos. Sobreponiendo la gráfica obtenida en el modelado matemático a la obtenida en el modelado por elemento finito se obtienen las Figuras 20, 21 y 22.

Figura 20. Gráfica de comparativa ANSYS contra modelado matemático.

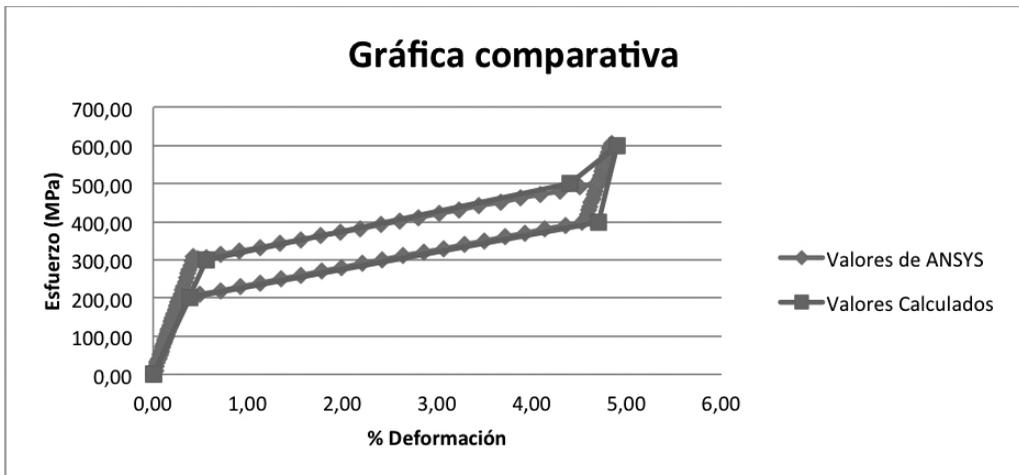


Figura 21. Gráfica de comparativa ANSYS contra modelado matemático.

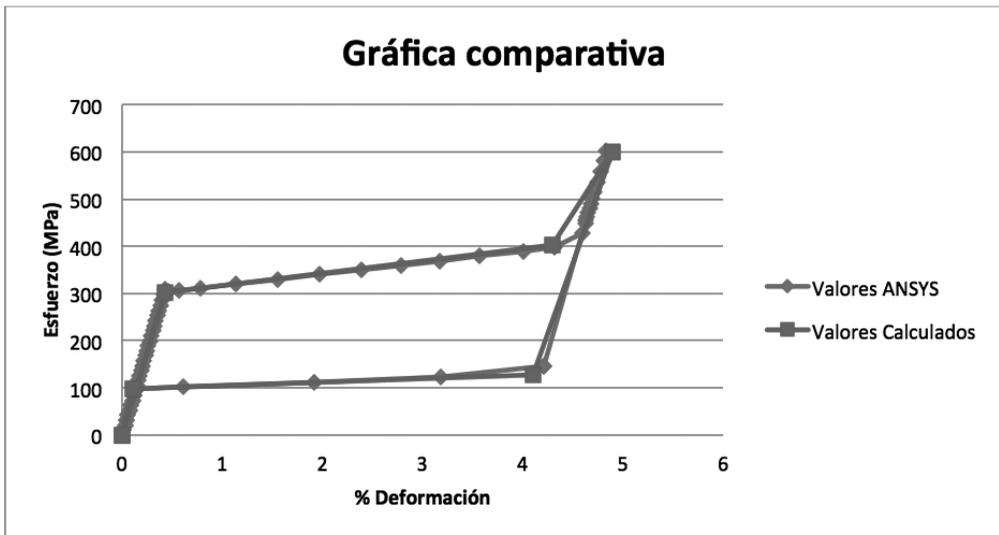
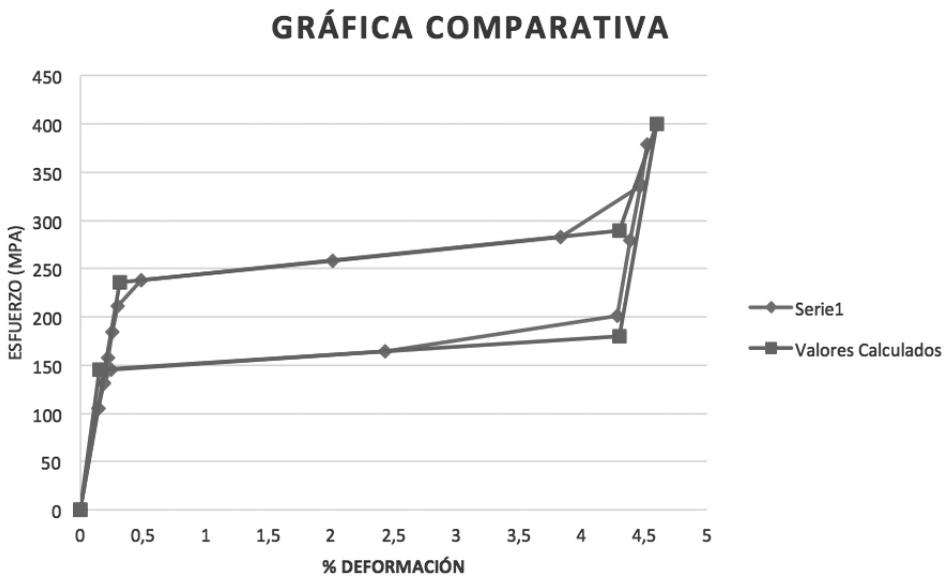


Figura 22. Gráfica de comparativa ANSYS contra modelado matemático.



Con esto se observa que las gráficas obtenidas en el modelado matemático propuesto en los tres casos, son muy similares a las obtenidas por medio de la simulación por elemento finito. Se nota que las diferencias obedecen a que las gráficas no son ténues, al tener tan pocos valores implica que la gráfica va a ser muy recta y más recta es donde más diferencia hay entre una y otra. También influye el nodo donde se calculó la gráfica ya que el modelado matemático, aunque si toma en consideración la forma de la pieza, no evalúa una carga puntual sino que considera una carga en el área total, a diferencia del modelado por elemento finito.

Conclusiones

Proponemos un método para relacionar los esfuerzos de transformación, con base en las temperaturas, para aleaciones de CuZnAl con distintos porcentajes de los materiales por usar en la mezcla, y, sus diversos tratamientos térmicos.

Se sometió a comprobación el proceso, para ello se usó el procedimiento con el método de elemento finito. Observamos que las gráficas de esfuerzo-deformación, en ambos métodos, son similares entre sí.

Se concluye que el método es factible, consideramos que se deben de trabajar más las ecuaciones matemáticas; con ello esperamos obtener gráficas con curvaturas con mayor profundidad, eliminando la rigidez en ellas.

Referencias

- Ansys. (2011). *Ansys Student*. Recuperado desde: <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>
- Braz Fernades, F. M. (2003). *Ligas con memoria de forma*. Lisboa, Portugal :Universidad Nova de Lisboa.
- Casciati, F., Faravelli, L. y Hamdaoui, K. (2007). A Base Isolation Device with bars in Shape Memory Alloys . *Proceedings of the First Internacional Conference on Self Headling Materials*, 1-8.
- Devices, I. (2003). *Acerca de nosotros, Intrinsic Devices Incorporated.*: Recuperado desde: <http://www.intrinsicdevices.com/history.html>
- Flor, S. d. (2005). *Ensayos para la caracterización de aleaciones con memoria de forma NiTi*. Barcelona, España: Departament de resistència de Materials i Estructures a l'Enginyeria, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Guilemany, J., Fernández, J. y 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*, 34,281-285.

Lagoudas, C. D. (2008). *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications*. Nueva York, Estados Unidos: Springer Science+Business Media.

Langelaar, M. y van Keulen, F. (2004). Modeling of a Shape Memory Alloy Active Catheter. *Structures, Structural Dynamics & Materials Conference (19-22)*. 45TH AIAA meeting. Palm Springs, California, Estados Unidos: Editorial AIAA Meeting Papers.

Otsuka, K. y Wayman, C. (1998). *Shape Memory Materials*. Reino Unido: Cambridge University Press.

Shaw, J., Churchill, C. y Ladiacola, M. (2008). Tips and Tricks for Characterizing Shape Memory Alloys Wire: part I-Differential Scanning Calorimetry and Basic Phenomena. *Experimental Technique Journal*, 32, 5, Septiembre/Octubre, 55-62.

Shuxhuan, C. Z. (1990). Stabilization of Martensite and Parent Phase Ordering in a Cu-Zn-Al Alloy. *Acta Metalúrgica*, 27,4, 5-10.

Van Humbeeck, J. (2009). Shape Memory Alloys. En M. Schwartz, *Smart Materials*. Nueva York, Estados Unidos: Taylor y Francis Group.

Recibido: 18 de noviembre del 2015.

Reenviado: 17 de febrero del 2016.

Aceptado: 25 de abril del 2016.