

POSIBILIDADES DE APLICACIONES DE MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA

A. Yawny, F.C. Lovey y M. Sade

Centro Atómico Bariloche
8400 San Carlos de Bariloche

RESUMEN

Un importante conjunto de materiales exhiben el llamado efecto memoria de forma (MMF), asociado a una transformación martensítica de baja histéresis. Esta transformación martensítica puede ser inducida por cambios de temperatura, aplicación de esfuerzos externos, o combinaciones de ambos. Estas propiedades resultan muy útiles para aplicaciones tipo sensor-actuador o actuador controlado por temperatura. No obstante, el desarrollo de aplicaciones realistas está sujeto a una serie de limitaciones en cuanto al comportamiento del material: evolución de las temperaturas de transformación, cambios en la histéresis, respuesta a la fatiga en ciclos repetitivos, estabilización de la fase martensítica, etc.

En este trabajo se desarrollará el concepto de un actuador básico basado en materiales con memoria de forma. Se presentarán estudios realizados con aleaciones de Cu-Zn-Al y se analizará la influencia de los factores limitantes en el rendimiento de este tipo de aplicación.

Palabras claves

Memoria de Forma, Transformación Martensítica, Sensores y Actuadores

INTRODUCCION

Una posibilidad de aplicación de los MMF la constituyen las aplicaciones tipo actuador [1]. Un actuador es un dispositivo capaz de realizar trabajo en respuesta a una acción determinada. En nuestro caso, se trata de un dispositivo que reacciona ante cambios de temperatura produciendo el desplazamiento de una carga aplicada. Los actuadores considerados aquí son actuadores térmicos y consisten básicamente en un núcleo monocristalino de Cu-Zn-Al acoplado a la carga a desplazar [2]. Consideramos conveniente descomponer esta última en una contribución que depende de la posición y una contribución cuya magnitud es diferente según el sentido de la transformación. La primera puede representarse por un elemento elástico de rigidez K acoplado en serie al MMF. La segunda componente incluirá los efectos de la fricción y los de una carga neta desplazada durante un ciclo.

Estudiamos los diferentes factores involucrados en el diseño conceptual utilizando como aproximación las características de un ciclo completo de transformación. De esta manera, los efectos sobre el comportamiento a ciclo completo del dispositivo actuador de diferentes factores como ser: rango de temperaturas de actuación, número de ciclos de transformación, nivel de tensión aplicada y fricción pueden ser analizados.

En el caso de las aplicaciones de tipo actuador, los requerimientos son: un bajo valor de la histéresis asociada a la transformación, baja sensibilidad a factores externos como la fricción, larga vida y estabilidad del comportamiento en condiciones de fatiga por la

repetición del ciclado térmico a través de la transformación. Otras características apreciadas son la posibilidad de modificar la respuesta y la disponibilidad de un esquema de diseño adecuado que permita superar las dificultades asociadas con el comportamiento complejo de los MMF.

En este trabajo, presentamos una aproximación sistemática al diseño conceptual de aplicaciones de tipo actuador con monocristales de aleaciones con memoria de forma de Cu-Zn-Al. Estudiamos los diferentes factores involucrados en el diseño conceptual utilizando como aproximación las características de un ciclo completo de transformación.

El motivo de pensar en la utilización de monocristales de MMF de Cu-Zn-Al está basado en que la transformación β - 18 R en estos materiales muestra una histéresis térmica intrínseca de 1 - 2 K con una deformación asociada de aproximadamente 8 %, dependiendo de la orientación del eje tensil respecto del cristal [3]. Entre los MMF disponibles, sólo ciertas aleaciones de Ti-Ni presentan valores de histéresis comparables; son aquellas que presentan la transformación pre-martensítica a la fase R aunque con valores máximos de deformación por debajo del 1% [4]. Los valores típicos para la magnitud de la histéresis en las aleaciones policristalinas, en todas las aleaciones conocidas, están un orden de magnitud por encima de los valores mencionados para los monocristales de Cu-Zn-Al. Por otra parte, en el caso de los materiales policristalinos base Cu, la vida en condiciones de fatiga por la repetición continua de los ciclos de transformación es muy inferior comparada con el caso monocristalino para idénticos porcentajes de transformación [5,6]. Ambos efectos conducen a una disminución del porcentaje de transformación utilizable en el caso de los materiales policristalinos y obligan a la elección de arreglos de flexión y torsión (vigas, resortes) con el fin de conseguir una amplificación del desplazamiento. En estos casos, la no homogeneidad del estado de tensiones provoca una disminución en la eficiencia del uso del material y al mismo tiempo introduce complejidades adicionales en el diseño. Por estos motivos en lo que sigue analizamos el uso de monocristales de MMF de Cu-Zn-Al cargados en tracción uniaxial uniforme.

Transformación Térmica Bajo Carga Aplicada de MMF Monocristalinos de Cu-Zn-Al

Con el fin de elaborar un modelo simplificado sobre el comportamiento de los monocristales de Cu-Zn-Al con efecto memoria presentamos a continuación ciclos térmicos bajo carga, típicos y obtenidos con una muestra plana de longitud 20 mm y sección 1 mm x 1 mm de composición en peso Cu: 77.69 %, Zn: 16.486 %, Al: 7.82 %. La temperatura de transformación espontánea medida: $M_S(0) = 285$ K, el factor de Schmid: $\mu = 0.48$. El tratamiento térmico consistió en un recocido a 1123 K y enfriado al aire hasta 303 K, manteniendo la muestra a esta temperatura durante una semana para reducir el efecto de estabilización de la martensita y aumentar la reproducibilidad de la forma de los ciclos de transformación. La aplicación de la carga se realizó utilizando un resorte elástico acoplado en serie con la muestra de MMF. La Figura 1.A muestra tres ciclos térmicos obtenidos con tres valores de carga diferentes, aplicados variando la longitud inicial de un resorte elástico de rigidez $K = 0.37$ N/m. En la Figura 1.B se grafica la carga aplicada en función de la elongación del MMF, a medida que la muestra se elonga, se produce la relajación de la carga a causa de la rigidez del resorte elástico. Se puede observar que los ciclos de transformación presentan una histéresis térmica $\Delta T_H < 2$ K y la transformación completa transcurre en un rango de temperatura de aproximadamente 4K. Por otra parte, los ciclos de transformación se desplazan hacia menores temperaturas al aumentar la carga aplicada según puede verse en la Figura 1.A. La relación entre la tensión resuelta de transformación y la temperatura está dada por la relación de Clausius - Clapeyron para estos materiales: $d\tau^{\beta-M} / dT = 1$ Mpa [7].

La interacción del MMF con un resorte de mayor rigidez K puede verse en la Figura 1.C donde se dibujan los ciclos de transformación para dos resortes de rigidez $K_1 = 0.37 \text{ N/m}$ y $K_2 = 3.7 \text{ N/m}$ respectivamente. Puede verse que, a medida que avanza la transformación, la mayor relajación de la carga, asociada al resorte más rígido, se traduce en un incremento del rango de temperaturas de transformación.

En los casos representados puede verse que la magnitud de la histéresis permanece constante al aumentar la tensión aplicada utilizando un mismo resorte como así también al cambiar la pendiente de la transformación mediante el uso de un resorte de mayor rigidez.

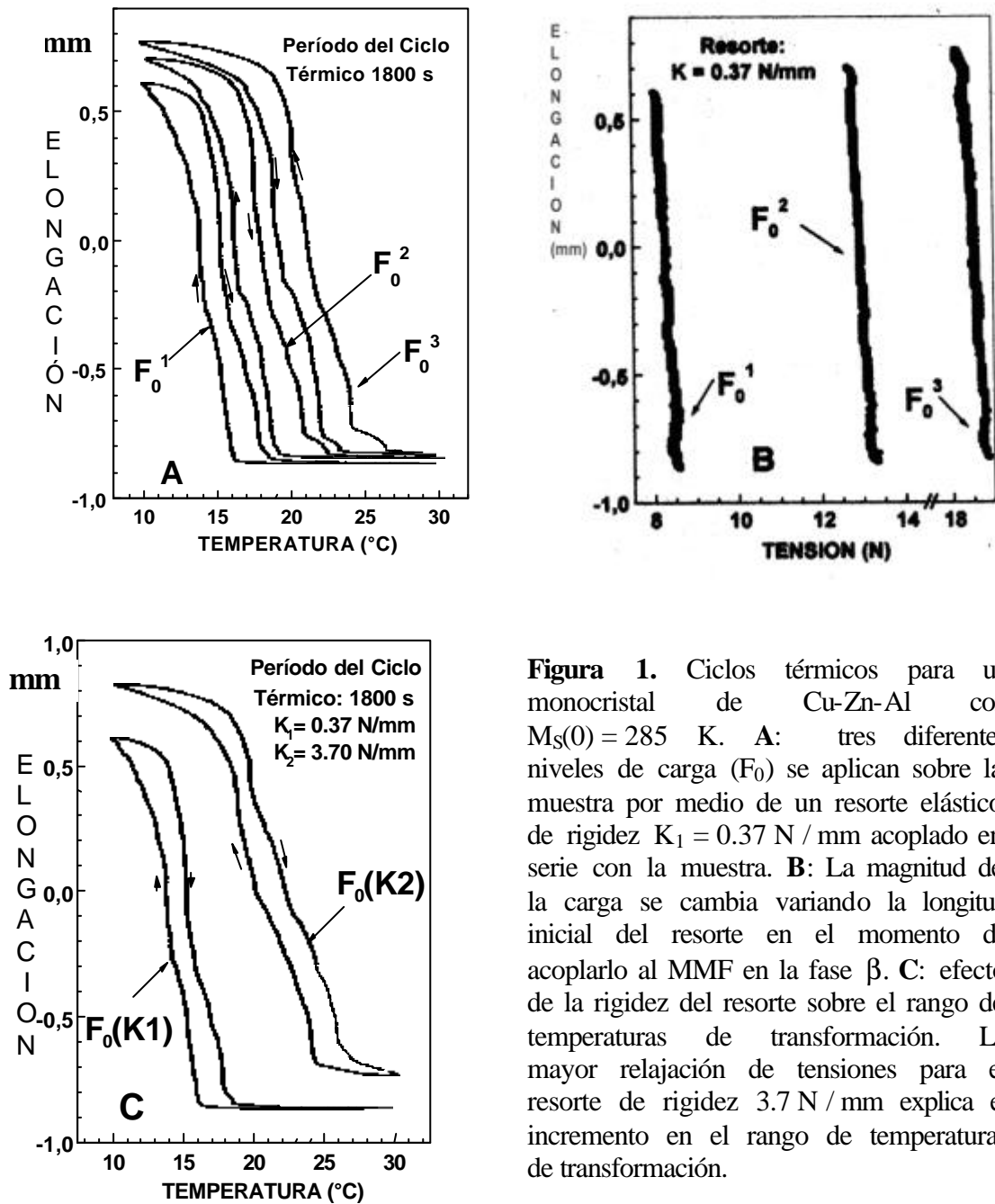


Figura 1. Ciclos térmicos para un monocristal de Cu-Zn-Al con $M_S(0) = 285 \text{ K}$. **A:** tres diferentes niveles de carga (F_0) se aplican sobre la muestra por medio de un resorte elástico de rigidez $K_1 = 0.37 \text{ N/mm}$ acoplado en serie con la muestra. **B:** La magnitud de la carga se cambia variando la longitud inicial del resorte en el momento de acoplarlo al MMF en la fase β . **C:** efecto de la rigidez del resorte sobre el rango de temperaturas de transformación. La mayor relajación de tensiones para el resorte de rigidez 3.7 N/mm explica el incremento en el rango de temperaturas de transformación.

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN SENSOR-ACTUADOR

En esta aplicación, utilizamos la deformación asociada a la transformación martensítica del núcleo de MMF para realizar un trabajo en reacción a un cambio de temperatura, por ejemplo accionar la apertura de una válvula de un radiador convencional de calefacción central por agua caliente (Figura 2). Un dispositivo de este tipo funcionará como un controlador proporcional que tratará de mantener una temperatura constante en un ambiente determinado. A continuación, realizamos un análisis cualitativo del problema propuesto a fin de lograr una visión global del mismo. Un cambio en la elongación del MMF, debido a un cambio de temperatura del ambiente, se traduce en un desplazamiento de la válvula. Este desplazamiento se traduce, a su vez, en una variación de caudal a través del radiador y, en definitiva, en una variación de la potencia P_R entregada por el radiador al ambiente

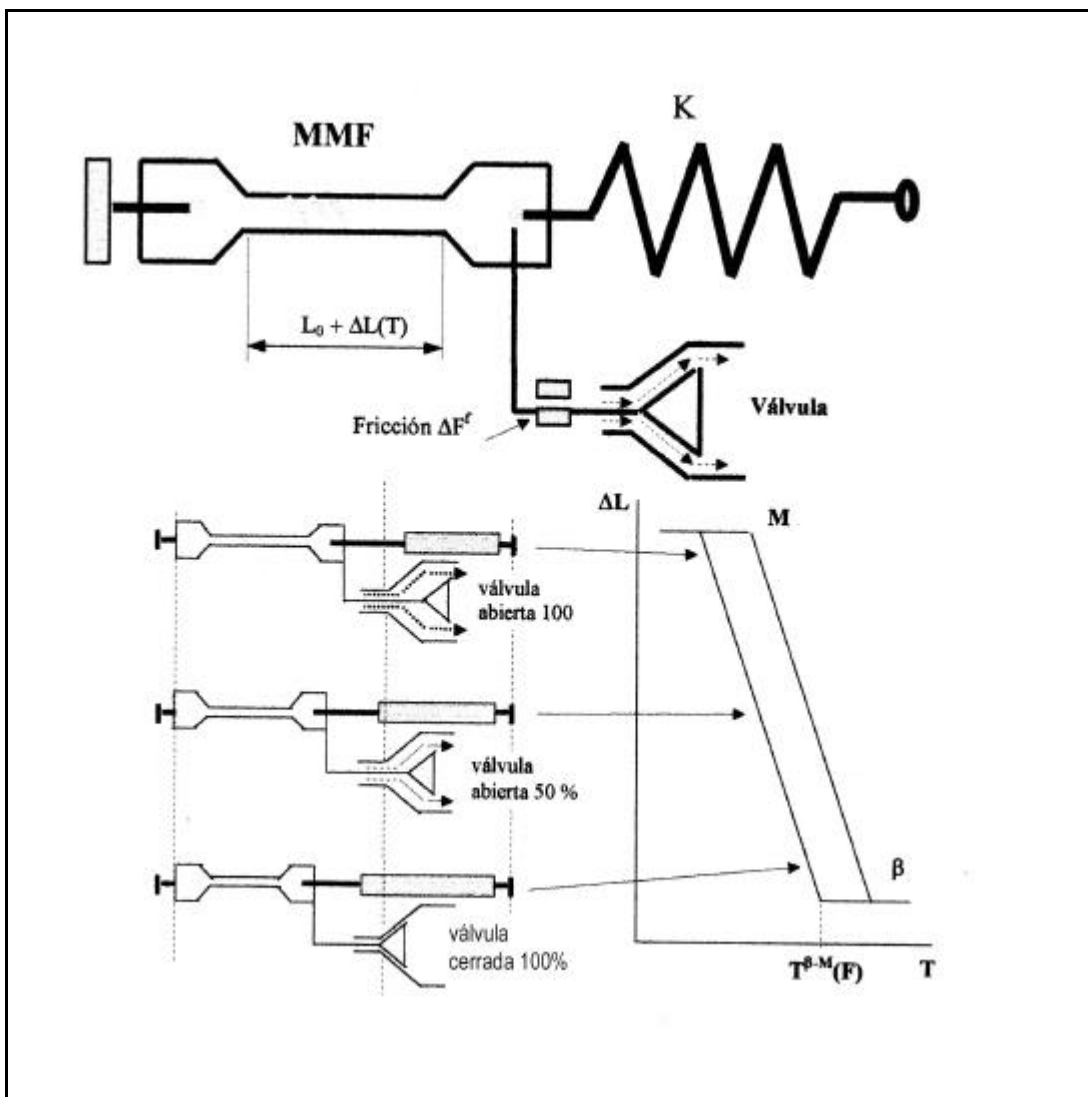


Figura 2. Esquema de un dispositivo sensor actuador (DSA), en el que se utiliza la deformación asociada a la transformación martensítica del núcleo de MMF para modificar la apertura de una válvula de un sistema de calefacción.

Para simplificar el análisis suponemos una relación lineal entre la potencia disipada por el radiador y la elongación del MMF ($P_R - \Delta L$). Considerado una relación lineal ($\Delta L - T$) para el dispositivo sensor-actuador (DSA); tendremos, entonces, una relación lineal entre la potencia entregada por el radiador y la temperatura del ambiente ($P_R - T$). Por otro lado, el ambiente cuya temperatura deseamos controlar, posee una 'curva característica' potencia - temperatura ($P_A - T$). Esquematizamos todo lo anterior en la Figura 3. Por efecto de la histéresis del DSA existirá, en realidad, una 'zona de operación' del sistema en el estado estacionario de ancho ΔT_c , centrada en la temperatura T_c . En este análisis simplificado no tenemos en cuenta la dinámica del sistema, sólo analizamos los estados de equilibrio.

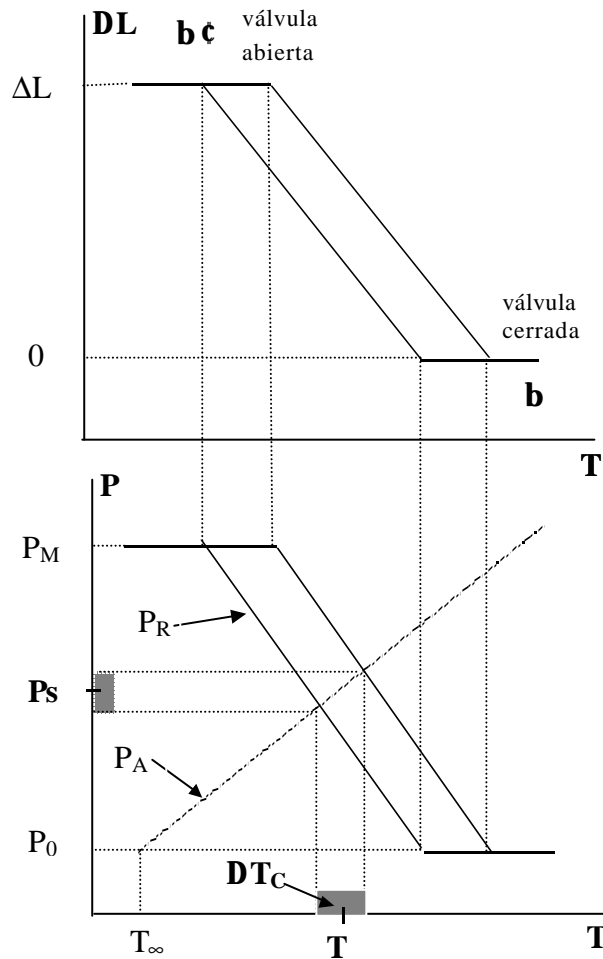


Figura 3. El desplazamiento ΔL del MMF se traduce en una variación de caudal a través del radiador y, por lo tanto, de la potencia P_R entregada por el radiador al ambiente. Suponiendo una relación lineal ($P_R - \Delta L$), tendremos una característica lineal ($P_R - T$). La característica del ambiente es ($P_A - T$). Por efecto de la histéresis del DSA existirá una 'zona de operación' del sistema en el estado estacionario de ancho ΔT_c , centrada en la temperatura T_c .

Como puede verse en la Figura 4a, el ancho ΔT_c es dependiente del ancho de banda de la transformación, ΔT_p . En efecto, a mayor ancho de banda, menor ΔT_c . Esto es ventajoso en dispositivos termostáticos puesto que permite reducir la histéresis global. Sin embargo, en la Figura 4b podemos analizar el efecto del ancho de banda en el corrimiento de la temperatura de equilibrio (δT_c), debido a un desplazamiento de la característica P - T del ambiente. Por ejemplo, si la temperatura del medio ambiente exterior aumenta de T_∞ a T_∞' , la característica de Potencia del ambiente se desplazará hacia temperaturas mayores, con lo cual, para idénticas condiciones del dispositivo actuador, la temperatura de equilibrio se incrementará en δT_c .

La magnitud del desplazamiento δT_c dependerá del ancho de banda de la transformación y será mayor cuando mayor sea el ancho de banda, lo cual va en contra de la calidad del control. Por lo tanto, la elección del ancho ΔT_p será un compromiso entre ambos efectos.

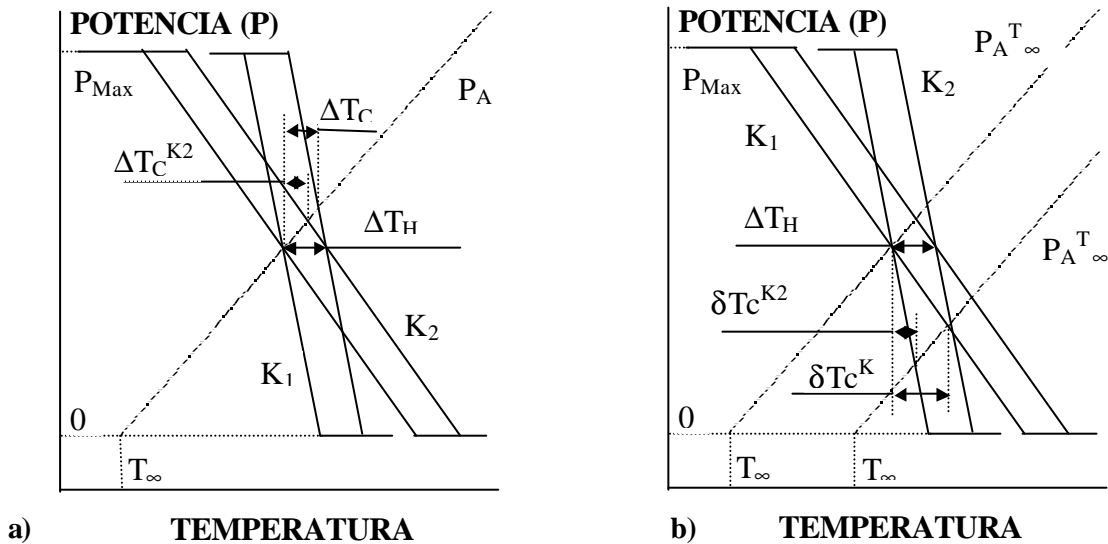


Figura 4. a) El ancho ΔT_c es dependiente del ancho de banda de la transformación, ΔT_p (inclinación del ciclo). A mayor ancho de banda, menor ΔT_c y se reduce la histéresis global. **b)** Efecto del ancho de banda en el corrimiento de la temperatura de equilibrio (δT_c) debido a un desplazamiento de la característica P-T del ambiente. Un aumento en la temperatura del medio ambiente exterior de T_∞ a T_∞' desplaza la característica (P_A -T) del ambiente hacia mayores temperaturas; la temperatura de equilibrio se desplazará en δT_c . A mayor ancho de banda, mayor δT_c .

CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO SENSOR-ACTUADOR

En la Figura 5 se muestran el ciclo 21 completo junto con ciclos parciales superpuestos hasta el punto A donde el dispositivo se mantuvo a temperatura constante durante 180 min. Se continuó luego disminuyendo la temperatura hasta 35.5°C y se retransformó completamente calentando hasta 44°C . Se observa un efecto de estabilización para la porción que permaneció en martensita durante el resto del experimento.

En la Figura 6 se compara la respuesta de un dispositivo comercial con la del dispositivo termostático con MMF acoplados a la válvula comercial correspondiente a aquél actuador. La

diferencia en pendientes puede ser ajustada según se analizó antes utilizando un resorte de mayor rigidez. La diferencia en histéresis se debe principalmente a la sensibilidad a los efectos de fricción del MMF. Estas desventajas suelen ser inevitables en aplicaciones donde el MMF es utilizado como sustitución. Una mejor performance del actuador con MMF puede lograrse con el rediseño de la válvula asociada.

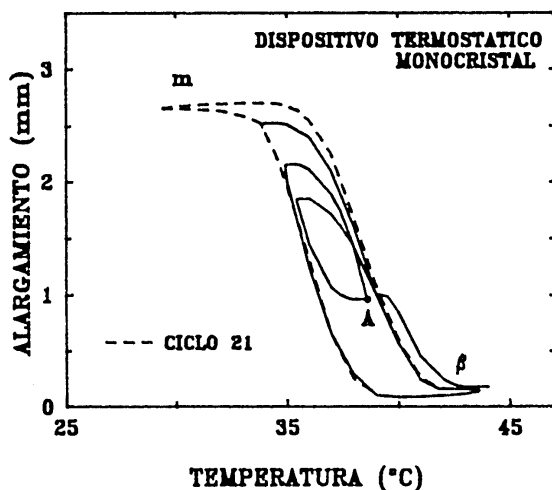


Figura 5. Dispositivo Termostático con Material con Memoria de Forma monocristalino de Cu-Zn-Al: Ciclos parciales y efecto de estabilización al retransformar

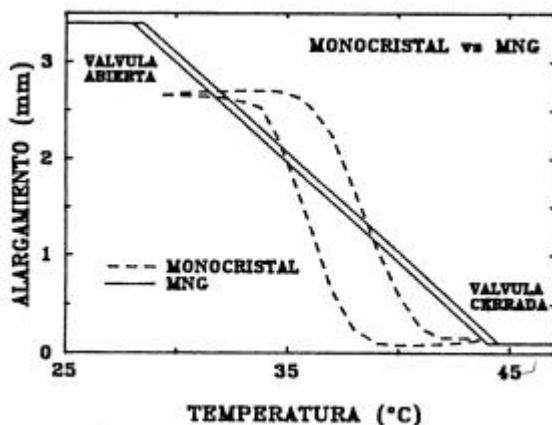


Figura 6. Comparación elongación – temperatura entre el dispositivo comercial y el dispositivo termostático con MMF.

CONCLUSIONES

Presentamos un esquema para el diseño de aplicaciones tipo actuador con materiales con memoria de forma monocristalinos sometidos a tracción uniaxial uniforme. La histéresis y el rango de transformación inherentes al comportamiento de los monocristales de Cu-Zn-Al otorgan una flexibilidad de diseño muy importante. El hecho que la transformación ocurra en un rango muy pequeño de cargas o temperaturas le da características intrínsecas de controlador on-off. Este comportamiento intrínseco puede variarse utilizando la dependencia de la temperatura de transformación con la carga aplicada (Clausius -

Clapeyron). Utilizando distintas magnitudes de la fuerza de fricción puede variarse la histéresis final del dispositivo actuador. Utilizando resortes acoplados de distinta rigidez se puede modificar el rango de temperaturas de transformación obteniéndose así un controlador proporcional cuyo ancho de banda se puede variar.

REFERENCIAS

1. A. Yawny, M. Sade y F. C. Lovey, Actuator applications with single crystals of Cu-Zn-Al shape memory alloys. Proc. Mat. Res. Soc. Symp., Materials Research Society, 459, 369-373, 1997.
2. A. Yawny, M. Sade y F. C. Lovey, Conceptual desing of actuator aplicaciones with Cu-Zn-Al single crystals, Mat. Science Eng., A273-A275, 189-794, 1999.
3. J.L. Pelegrina, M. Rodriguez de Rivera, V. Torra y F.C. Lovey. Hysteresis in Cu-Zn-Al SMA: from high resolution studies to the time dependent modelling and simulation. Acta Metall. Mater., 43, 877, 1995.
4. K. Otsuka. Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann Ltd., 36, 1990.
5. H. Funakubo, Shape Memory Alloys, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 137, 1987.
6. M. Sade, R. Rapacioli y M. Ahlers. Fatigue in Cu-Zn-Al single crystals. Acta Metall., 33, 487, 1985.
7. M. Ahlers. Martensite and equilibrium phases in Cu-Zn and Cu-Zn-Al alloys. Prog. Mat. Sci., 30, 1986.