

# Diseño de una máquina de fatiga para el estudio de alambres con memoria de forma base Ti-Ni

Enrique López Cuéllar

FIME, Universidad Autónoma de Nuevo León, A.P. 076 Suc. "F", Cd. Universitaria C.P. 66450, San Nicolás de los Garza, N.L., México.

e-mail: enlopez\_73@yahoo.com

Carlos J. de Araújo

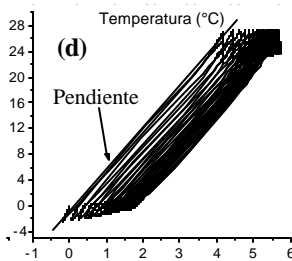
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Paraíba, Caixa Postal: 10069, Cep: 58109-970, Campina Grande, PB, Brasil.

e-mail: carlos@dem.ufpb.br

Gerard Guénin, Michel Morin

GEMPPM-Bât.502, UMR CNRS 5510, INSA de Lyon, Bât. Blaise Pascal, 7 av. Jean Capelle, F-69621 Villeurbanne, France.

e-mail: gerard.guenin@insa-lyon.fr , Michel.Morin@insa-lyon.fr



## ABSTRACT

*Shape memory alloys can be used in the field of activators due to their properties. When shape memory wires are submitted to thermal changes under constant load, the austenite to martensite or martensite to austenite transformations lead to strain ( $\epsilon$ ) and electrical resistivity ( $\Delta\rho$ ) changes. The linear relationship and the hysteresis of  $\Delta\rho$ - $\epsilon$  coupled measurements are two very important parameters because they are related with the precision of the control of position, for example in robotic devices. To follow the behavior of  $\Delta\rho$ - $\epsilon$  coupled measurements, both parameters have to be measured at the same time during thermomechanical cycles. In this work is described a fatigue machine developed by the authors to study this behavior for Ti-Ni wires. The results of  $\Delta\rho$ - $\epsilon$  coupled measurements for two different alloys, Ti-Ni and Ti-Ni-Cu5%, are presented and discussed.*

## KEYWORDS

Fatigue machine, shape memory effect, Ti-Ni, Ti-Ni-Cu5%, activators.

## RESUMEN

*Las aleaciones con memoria de forma pueden emplearse como activadores debido a sus propiedades. Cuando un alambre con memoria de forma es sometido a ciclos térmicos bajo carga constante, las transformaciones austenita  $\rightarrow$  martensita o martensita  $\rightarrow$  austenita provocan un cambio en la deformación ( $\epsilon$ ) y en la resistividad eléctrica ( $\Delta\rho$ ). En el campo de los activadores de aleaciones con memoria de forma, la relación lineal y la histéresis de las curvas  $\Delta\rho$ - $\epsilon$ , son dos parámetros*

*muy importantes que determinan la precisión del control de la posición del activador, por ejemplo en dispositivos de robótica. Para analizar el comportamiento de las curvas  $\Delta\rho-\epsilon$ , ambos parámetros tienen que ser medidos al mismo tiempo durante los ciclos termomecánicos. En este trabajo se describe una máquina de fatiga desarrollada por los autores para el estudio de este comportamiento en alambres base Ti-Ni. Los resultados de las curvas  $\Delta\rho-\epsilon$  para dos aleaciones distintas, Ti-Ni y Ti-Ni-Cu5%, son presentados y discutidos.*

## **PALABRAS CLAVE**

Máquina de fatiga, efecto memoria de forma, Ti-Ni, Ti-Ni-Cu5%, activadores.

## **INTRODUCCIÓN**

Las aleaciones con memoria de forma (AMF) poseen propiedades completamente distintas a las de las aleaciones metálicas comunes como: el efecto memoria de forma, el efecto superelástico, el efecto cauchótico y una capacidad elevada de amortiguamiento.<sup>1-2</sup> El efecto memoria de forma permite contemplar a las AMF como posibles activadores dentro del campo de la robótica.

Cuando un alambre con memoria de forma es sometido bajo ciclos térmicos a esfuerzos constantes, se producen cambios en la deformación y la resistividad eléctrica de la muestra debido a la transformación austenita  $\rightarrow$  martensita. En algunos casos, bajo ciertas condiciones y composiciones de las muestras, se pueden presentar una correlación lineal y una histéresis despreciable en las curvas de la correlación entre la deformación ( $\epsilon$ ) y los cambios relativos de resistividad ( $\Delta\rho/\rho$ ) de la muestra. Si ambas condiciones se dan, el material puede ser contemplado como un fuerte candidato para ser empleado como un activador debido a que el control de la posición depende directamente de ambos parámetros. Lo citado con anterioridad puede resumirse de la siguiente manera, “mientras mayor linealidad y menor histéresis existan en las curvas de  $\epsilon-\Delta\rho/\rho$ , mejor es la calidad del control de la posición”.<sup>3</sup> Además, otro parámetro importante a considerar, es la estabilidad en las propiedades mecánicas, térmicas y eléctrica durante el ciclo de trabajo termomecánico que realiza el activador.

Para estudiar el comportamiento de la correlación entre las medidas de  $\epsilon-\Delta\rho/\rho$  de las aleaciones con memoria de forma, es necesario medir ambas propiedades simultáneamente con una cierta precisión cuando las muestras son sometidas a los ciclos térmicos de trabajo. Con esta finalidad una máquina de fatiga fue diseñada por los autores. En este trabajo se describe el funcionamiento y componentes de dicha máquina, así como el grado de error en las mediciones y los resultados que pueden ser obtenidos. Además se analizan y discuten los resultados de las curvas  $\epsilon-\Delta\rho/\rho$  para una aleación binaria Ti-Ni y una aleación Ti-Ni-Cu5%.

## **DESCRIPCIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA DE FATIGA**

La máquina de fatiga que se describe, fue diseñada con la finalidad de caracterizar el comportamiento mecánico y eléctrico hasta la ruptura de alambres con memoria de forma durante ciclos de efecto de memoria doble sentido asistido (EMDSA).<sup>4-5</sup> El principio de funcionamiento es simple, una carga constante se aplica sobre la muestra y durante los ciclos térmicos de transformación es posible medir la deformación ( $\epsilon$ ) y las variaciones de la resistencia eléctrica ( $\Delta\rho/\rho$ ) de la muestra en función de la temperatura y del número de ciclos.

### **Descripción general de la máquina**

En la figura 1 se muestra un esquema de la máquina de fatiga. La muestra (12) se encuentra fija entre dos pinzas de joyero empleadas como mordazas. Una de las mordazas (10) que se encuentra insertada al eje de tensión (9) es móvil, la otra es fija (11) y está unida a la columna o soporte principal de la máquina (5). La carga se aplica mediante pesas (3) que van unidas a los ejes de tensión (9) mediante un hilo de Nylon (2) y guiadas por un sistema de poleas (1). Este sistema se puede desplazar verticalmente en el vástago (4). El soporte principal (5) y el eje de tensión (9), fueron maquinados en INVAR para minimizar los problemas de dilatación térmica durante los ciclos lentos. Las variaciones de longitud de las muestras son adquiridas con un captor de desplazamiento magnético (8) de tipo LVDT con una precisión de  $\pm 1 \mu\text{m}$ . El valor de la posición (1) del captor de desplazamiento es restado al valor de

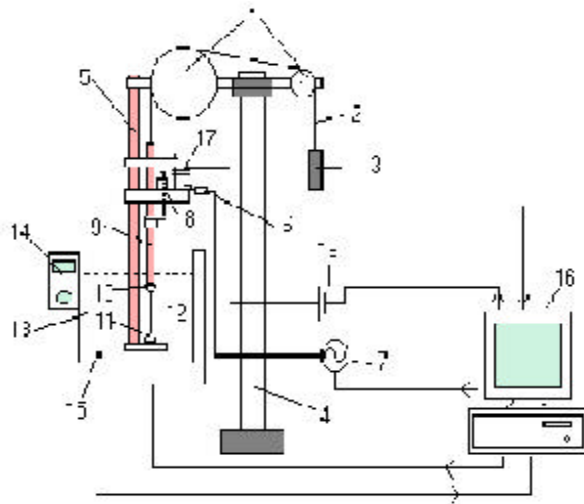


Fig. 1. Esquema de la máquina de fatiga. 1 Sistema de poleas, 2. Hilo de Nylon, 3. Pesas, 4. Vástago, 5. Soporte principal, 6. Contacto móvil, 7. Fuente de CA, 8. Captor LVDT, 9. Eje de tensión, 10. Mordaza móvil, 11. Mordaza fija, 12. Alambre, 13. Baño Rhodorsil 47V50, 14. Cryotermostato HAAKE, 15. Termopar, 16. Computadora, 17. Contacto fijo, 18. Fuente de CD.

la posición al inicio ( $l_i$ ) de la prueba y comparado con la longitud inicial de la muestra ( $l_0$ ) y de esta manera se obtiene la deformación  $\epsilon$  de la muestra, ecuación 1.

$$e = \frac{l - l_i}{l_0} \times 100 \quad (1)$$

Los ciclos de temperatura son realizados ya sea por convección forzada en un medio líquido (ciclos lentos) o bien por efecto Joule en el mismo ambiente mantenido el baño a una temperatura constante e inferior a la temperatura  $M_f$  (ciclos rápidos). Para los ciclos lentos se utiliza un baño de aceite de silicón Rhodorsil 47V50 (13) controlado por un cryotermostato HAAKE (14). El calentamiento por efecto Joule se realiza mediante un transformador de bajo voltaje y alta corriente (15 A max) (7) con un contacto móvil (6) que permite minimizar la fricción. Además, una fuente de corriente directa (18) se emplea para medir los cambios de resistencia eléctrica y se encuentra unida a la máquina por contactos fijos ligeros (17). La máquina se controla desde una computadora (16). El sistema de adquisición de datos esta formado por una interfase AD/DA, Eurosmart PC-MES2, 12 bits.

### Descripción a detalle sobre la obtención de la variación de resistividad

En la figura 2 se muestra un esquema más a detalle de la máquina de fatiga. Durante los ciclos lentos, la fuente de corriente directa es puesta en operación mediante el contacto fijo, lo que provoca el paso de una corriente continua ( $i$ ) muy pequeña a través del alambre ( $<0.1$  A). La caída de tensión ( $U$ ) que genera la resistencia eléctrica del alambre es tomada de las mordazas. “U” es medida y amplificada por un 181 Nanovoltmeter Keithley y es enviada a un sistema de adquisición de datos. Mediante la computadora se controla el cryotermostato y se mide al mismo tiempo la temperatura del baño ( $T$ ), la señal del captor LVDT que corresponde al cambio en la longitud del alambre ( $d$ ) y la señal amplificada de “U”.

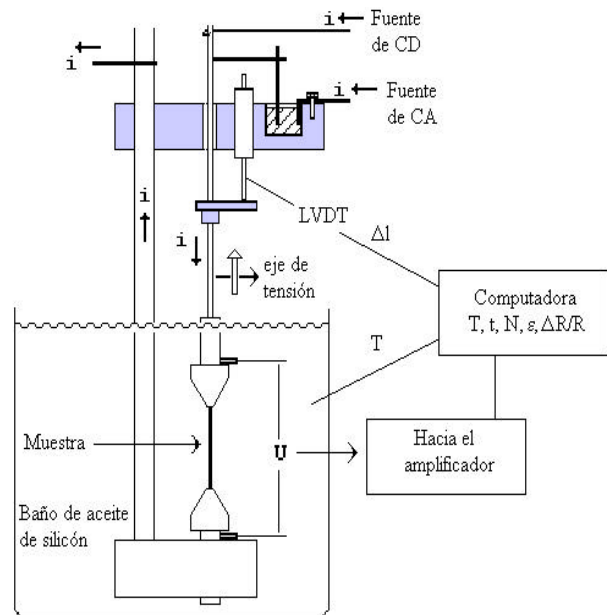


Fig. 2. Detalle de la máquina de fatiga.

El cálculo de la deformación ( $\epsilon$ ) y del cambio de la resistencia eléctrica ( $\Delta R/R$ ) se realizan en comparación a los valores del alambre obtenidos en el estado austenítico a la temperatura máxima del primer ciclo. La siguiente relación se utiliza en el programa para determinar  $\Delta R/R_0$ . Además es posible hacer la medición en función del tiempo ( $t$ ).

$$\frac{\Delta R}{R_0}(T) = \frac{U_{amp}(T) - U_{amp}(T_{max})}{U_{amp}(T_{max})} \times 100 \quad (2)$$

Durante el ciclo térmico bajo esfuerzo, las muestras cambian su forma por lo que la caída de voltaje no solo depende de la variación de la resistividad eléctrica sino también del cambio en la geometría, y éste tiene que contemplarse para el cálculo del cambio de resistividad eléctrica. Para esto se considerará que el cambio en la geometría se da sin cambio de volumen, o sea que se considera que el aumento de la longitud del alambre ( $\epsilon$ ) va acompañado por una reducción del diámetro de tal forma que el cambio de volumen es cero ( $\Delta V=0$ ), y que la dilatación térmica es despreciable.<sup>6</sup> De esta manera, la resistividad eléctrica se puede obtener a partir de la ecuación 3.

$$\frac{\Delta r}{r_0}(T) = \frac{\Delta R}{R}(T) - 2 \times \epsilon(T) \quad (3)$$

### Modos de calentamiento

La máquina de fatiga está diseñada para trabajar en dos modos de calentamiento distintos, por convección o ciclos lentos y por efecto Joule o ciclos rápidos:

- Ciclos por convección (lentos). La muestra se encuentra inmersa en un baño de aceite de silicón con termostato. La temperatura del baño se programa en función de los rangos de temperatura del ciclo térmico a realizar, en este caso entre los 10 a 150° C. La ventaja de este método es que permite medir de manera continua durante el ciclo térmico, la temperatura, la deformación y el cambio de voltaje en los extremos de la muestra. El inconveniente es que su duración es de aproximadamente una hora.
- Ciclos por efecto Joule (rápidos). La muestra sigue sumergida en el baño de aceite de silicón, pero en este modo, el baño es mantenido a una temperatura constante < 10° C. Y esta vez, el calentamiento de la muestra se realiza por efecto Joule, haciendo pasar una corriente a través del alambre que oscila entre 4 a 7 A. El valor de la corriente y de la duración de la pulsación eléctrica son predeterminados de tal forma que se asegure la completa transformación austenítica del alambre.

Debido a la corta duración de estos ciclos, el contacto de calentamiento se realiza vía un contacto eléctrico en un pequeño recipiente con mercurio (figura 2), esto con la finalidad de evitar perturbaciones ocasionadas por posibles frotamientos en la medición de la deformación obtenida por el LVDT. La ventaja de estos ciclos es su duración (12 a 15 ciclos/minuto). La desventaja es que no es posible medir la temperatura del alambre ni el cambio de voltaje en la muestra, solo son obtenidos los valores de deformación a baja y a alta temperatura.

La máquina está diseñada para realizar los dos modos de manera independiente o bien combinarlos. El programa que combina los ciclos se estableció bajo las siguientes condiciones, cuando:

$$N = 2^n \Rightarrow \text{Ciclos lentos}$$

$$N \neq 2^n \Rightarrow \text{Ciclos rápidos}$$

en donde N es el número de ciclo y n es un entero. Por lo que para N = 1, 2, 4, 8, ..., se obtendrán curvas continuas de  $\epsilon$ -T y de  $\Delta R$ -T como las que se muestran en las figuras 3 (a y b), mediante ciclos lentos y en el resto de N, solo se obtendrán las deformaciones a baja y alta temperatura. Este método combinado de ciclos permite seguir el comportamiento de la muestra hasta su ruptura en tiempos relativamente cortos (una semana).

Para poder llevar a cabo la combinación de los ciclos, la computadora está programada para conectar el circuito de la fuente de corriente directa y el nano-voltímetro con amplificador de señal durante los ciclos lentos y desconectar mediante una serie de relevadores, el circuito de corriente alterna. O bien, durante los ciclos rápidos realiza la operación opuesta (figura 1 y 2).

### CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN

La máquina está diseñada para trabajar con aleaciones con transformaciones de fase que oscilen entre una temperatura  $M_f > 15^\circ \text{C}$  y una  $A_f < 135^\circ \text{C}$ . Con un diámetro de muestras entre 0.8 y 0.2 mm y una longitud entre 45 y 25 mm. El grado de error en la medición de la variación  $\epsilon$  y la medición de  $\Delta R/R_0$  es de  $\pm 0.05\%$  y  $\pm 0.1\%$  respectivamente. El coeficiente de dilatación de las mordazas fue estimado entre 26 y  $29 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$ .

Muestra	Composición (%at)	Tratamiento Termomecánico
A	Ti-45.0Ni-5.0Cu	Deformado 30 % y después tratado a 485° C una hora
B	50Ti-50Ni	Deformado por el fabricante y después tratado a 485° C dos horas

Tabla I. Algunas características de las muestras analizadas

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con dos aleaciones distintas. En la tabla I se presentan algunas características de cada muestra.

## RESULTADOS

### Ciclos en modo lento

En la figura 3 se muestra una curva típica de  $\epsilon$ -T y  $\Delta R/R_0$ -T obtenida con la máquina de fatiga de una AMF sometida a un ciclo térmico bajo esfuerzo. En este caso se trata de la muestra A. El ciclo térmico se realizó entre los 10 y 120° C bajo un esfuerzo de 125 MPa. En la figura se pueden observar los distintos parámetros que pueden obtenerse a partir de estas curvas y que son de suma importancia para la caracterización de las AMF y de sus condiciones de trabajo. En la figura 3 (a) se observa como se cuantifican el EMDSA ( $\epsilon_{m-\beta}$ ), la deformación sufrida durante el enfriamiento ( $\epsilon_{\beta-m}$ ) y la deformación plástica ( $\epsilon_p$ ). En la figura 3 (b) además de las variaciones de resistencia eléctrica ( $\Delta R/R_0$ ) se muestran las temperaturas de transformación martensíticas durante el enfriamiento ( $M_s$  y  $M_f$ ) y austeníticas durante el calentamiento ( $A_s$  y  $A_f$ ) y la histéresis térmica de la transformación. Como se mencionó anteriormente, a partir de la información de las curvas  $\epsilon$ -T y  $\Delta R/R_0$ -T puede determinarse también la variación de la resistividad eléctrica del material ( $\Delta\rho/\rho_0$ ) mediante la ecuación 3.

$$\frac{\Delta r}{r_0}(T) = \frac{\Delta R}{R}(T) - 2 \times e(T) \quad (3)$$

Las figuras 4 y 5 muestran las curvas de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T y la correlación entre  $\Delta\rho/\rho_0$ - $\epsilon$  de la muestra A y B respectivamente a 125 MPa.

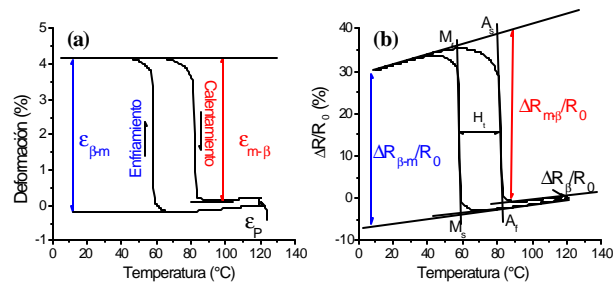


Figura 3. (a y b) Curvas de  $\epsilon$ -T y  $\Delta R/R_0$ -T respectivamente a 125 MPa para la muestra A.

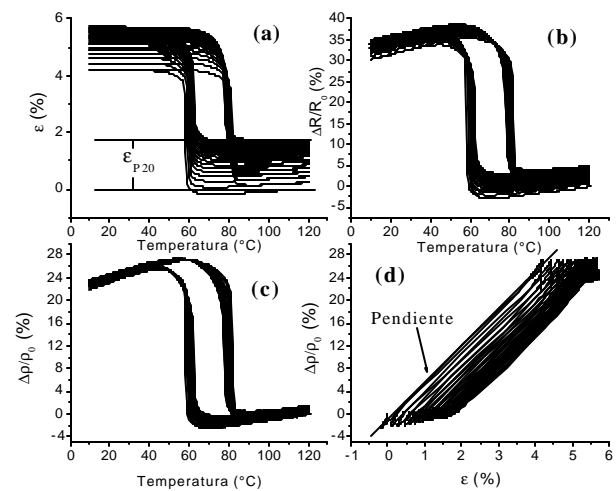


Fig. 4. (a, b y c) Curvas de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T respectivamente de los primeros 20 ciclos térmicos a 125 MPa de la muestra A. (d) Correlación entre  $\Delta\rho/\rho_0$ - $\epsilon$ .

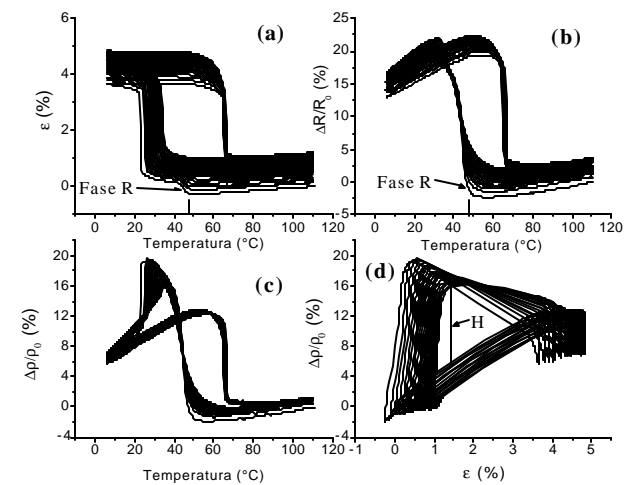


Fig. 5. (a, b y c) Curvas de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T respectivamente de los primeros 20 ciclos térmicos a 125 MPa de la muestra B. (d) Correlación entre  $\Delta\rho/\rho_0$ - $\epsilon$ .

En las figuras 6 y 7 se presenta la continuación de los ciclos térmicos de la muestra A, pero combinando los ciclos del modo lento (por convección) con los ciclos del modo rápido (por efecto Joule). Lo anterior con el objetivo de llegar a la ruptura del material en un tiempo corto y a su vez evaluar la evolución de sus propiedades (punto 2.3)

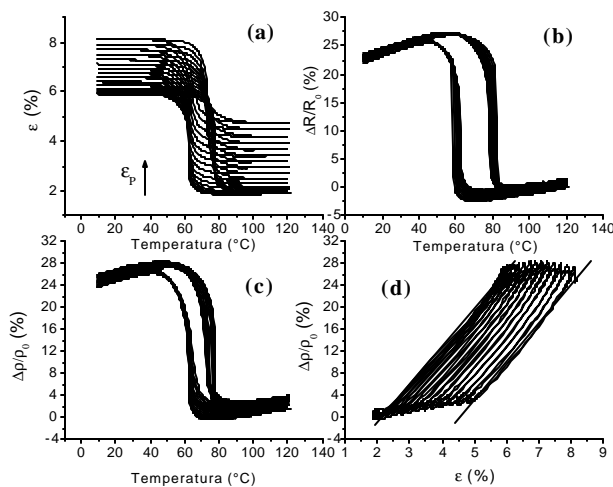


Fig. 6. (a, b y c) Curvas de la muestra A de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T respectivamente a partir del ciclo 21 hasta la ruptura mediante el modo combinado a 125 MPa. (d) correlación entre  $\Delta\rho/\rho_0$ - $\epsilon$ . Ciclos todos los 2<sup>o</sup>.

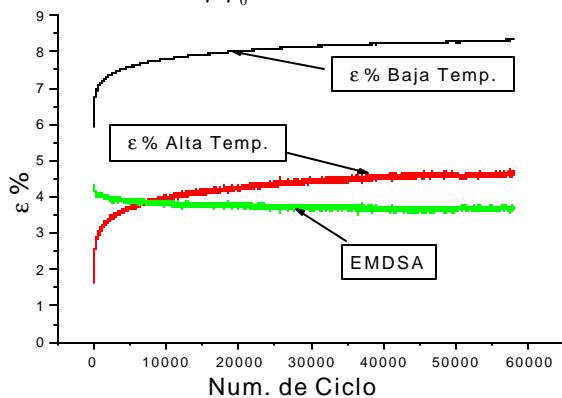


Fig. 7. Curva de la muestra A de “ $\epsilon$ -Número de ciclo térmico por efecto Joule” durante el modo combinado a 125 MPa a partir del ciclo 21 hasta la ruptura del alambre. Ciclos rápidos.

### Ciclos combinados

En las figuras 6 (a, b, c y d) se muestran las curvas de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T y  $\epsilon$ - $\Delta\rho/\rho_0$  respectivamente de la muestra A, del ciclo 21 hasta la ruptura del alambre, mediante el modo de calentamiento lento. En la figura 7 se muestra la curva

de “ $\epsilon$ -Número de ciclo térmico por efecto Joule” o modo de calentamiento rápido. En esta curva se aprecia que los valores de deformación que se obtienen son solamente los valores de las posiciones del captor LVDT a alta y baja temperatura, y la diferencia proporciona la recuperación de deformación, es decir el EMDSA.

### DISCUSIÓN

El equipo está diseñado para trabajar en dos modos distintos de calentamiento: por convección o por efecto Joule. Ambos tipos de ciclos pueden ser combinados con éxito. La precisión de los resultados que se obtienen con la máquina de fatiga es adecuada para el estudio de las AMF. Además con este equipo, la ruptura del material es alcanzada en tiempos cortos obteniendo también la evolución de los parámetros más importantes durante la fatiga termomecánica.

Al observar el comportamiento de la muestra A en la figura 4 se aprecia una transformación simple durante el enfriamiento y el calentamiento de la muestra. Tanto en la curva de  $\epsilon$ -T, como en la de  $\Delta R/R_0$ -T y la de  $\Delta\rho/\rho_0$ -T. Esto bajo las condiciones de trabajo establecidas, se ve reflejado en un comportamiento lineal de la correlación entre los valores de la deformación y del cambio de resistencia eléctrica, así como en una histéresis prácticamente nula en la figura 4 (d). Esto indica por lo tanto que, la posición de un activador elaborado con la aleación A, puede ser localizada con una excelente precisión midiendo el cambio de resistividad eléctrica de la muestra.

El comportamiento de la muestra B es distinto al de la muestra A como se aprecia en la figura 5. En la figura 5 (a) se puede observar durante los primeros ciclos térmicos, una transformación en dos etapas durante el enfriamiento. La primera transformación provoca un pequeño incremento en  $\epsilon$  entre los 47 y 25°C aproximadamente, a esta transformación se le conoce como la fase R.<sup>7</sup> La transformación que se da posteriormente es a la fase martensítica y ésta provoca un incremento mayor de  $\epsilon$ . Durante el calentamiento se observa una transformación simple martensita austenita. En las figuras 5 (b y c) se puede observar que, a diferencia del efecto en la deformación, la fase R provoca un incremento en la resistencia y resistividad eléctrica mucho mayor que el que provoca la transformación a fase martensítica. Lo anterior se ve reflejado en una geometría

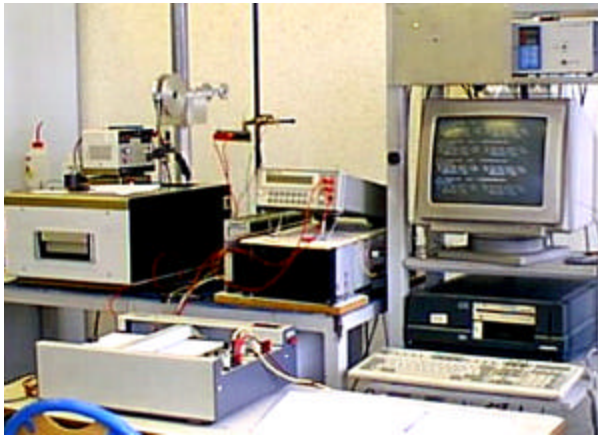


Fig. 8. Fotografía de la máquina de fatiga y su equipo periférico.

triangular de la correlación entre  $\Delta\rho/\rho_0$ -e, debido a la diferente influencia de la fase R sobre ambas propiedades.

Por lo que la muestra B, bajo estas condiciones de trabajo, complica de manera determinante el control de la posición del activador.

Además en la figura 5 (a), se puede hacer otra observación importante. Conforme los ciclos térmicos avanzan, el incremento de  $\epsilon$  ocasionado por la fase R va disminuyendo hasta desaparecer por completo aproximadamente en el ciclo 14. Lo anterior no sucede con la resistencia ni con la resistividad eléctrica del material, ya que la fase R sigue provocando el incremento de ambas, como se puede observar en las figuras 5 (b, c y d). Es decir, el cambio de forma que provoca la fase R (incremento de  $\epsilon$ ), desaparece conforme se introducen dislocaciones ( $\epsilon_p$ ) ocasionadas por los ciclos térmicos bajo esfuerzo (Figura 5 (a)). Pero la introducción de dislocaciones no impide que se de transformación de la fase R y ésta sigue provocando el incremento de resistencia ( $\Delta R/R_0$ ) y resistividad eléctrica ( $\Delta\rho/\rho_0$ ) que se da aproximadamente a los 50°C en las figuras 5 (b y c). La transformación austenita fase R no puede confundirse con la transformación fase R martensita ya que esta última se da hasta los 30°C aproximadamente, como se puede apreciar claramente en la figura 5 (a). Otro fenómeno que se puede observar en ambas muestras, es el aumento clásico de las temperaturas de transformación conforme se avanza en el número de ciclos y la disminución de la histéresis térmica.

Para analizar los resultados que se pueden obtener a partir del ensayo de fatiga, solo se presentan los resultados de la muestra A combinando el tipo de ciclos. En la figura 6 (a, b, c y d) se muestran las curvas de  $\epsilon$ -T,  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T y  $\epsilon$ - $\Delta\rho/\rho_0$  respectivamente desde el ciclo 21 hasta el 32788, respetando la condición de programación establecida anteriormente. En la figura 6 (a) se puede apreciar a simple vista, una evolución fuerte de las curvas en función del número de ciclos, impactando en un aumento de la plasticidad ( $\epsilon_p$ ), en un aumento de las temperaturas de transformación martensíticas ( $M_s$  y  $M_f$ ) y una disminución de la histéresis térmica. La evolución de propiedades térmicas también puede apreciarse en las curvas de  $\Delta R/R_0$ -T,  $\Delta\rho/\rho_0$ -T, sin embargo la introducción de dislocaciones ( $\epsilon_p$ ) parece afectar en menos medida estas propiedades como se aprecia en las figuras 6 (b y d) en la parte derecha-inferior a alta temperatura. Un dato interesante se puede obtener a partir de la figura 6 (d), y es que a pesar de la evolución de las propiedades, la pendiente de la correlación  $\epsilon$ - $\Delta\rho/\rho_0$  permanece constante. Esto quiere decir que si se emplea la medida de variación de resistividad como control de posición, ésta será precisa durante todo el tiempo de vida del activador.

Finalmente, los resultados obtenidos mediante el modo de calentamiento por efecto Joule que se muestran en la figura 7, además de permitir conocer el tiempo de vida del activador, permiten llegar a la ruptura del material en tiempos relativamente cortos (< una semana) y confirmar que los ciclos térmicos se efectúen completamente.

## CONCLUSIONES

- El equipo es capaz de medir simultáneamente la deformación del material y el cambio de resistencia eléctrica durante los ciclos térmicos bajo esfuerzo. El equipo cuenta con dos modos de calentamiento: por convección y por efecto Joule. Ambos pueden combinarse de tal forma que se pueda llegar a la ruptura del material en tiempos cortos y siguiendo la evolución de las propiedades más importantes del activador durante su fatiga termo-mecánica.
- Los parámetros relevantes para el estudio de las AMF que se pueden obtener con este equipo

durante los ensayos son los siguientes: efecto memoria de forma doble sentido asistido EMDSA ( $\epsilon_{\mu-\beta}$ ), deformación sufrida durante el enfriamiento ( $\epsilon_{\beta-\mu}$ ), deformación plástica ( $\epsilon_p$ ). Cambios de resistencia ( $\Delta R/R_0$ ) y resistividad eléctrica ( $\Delta\rho/\rho_0$ ) a alta y baja temperatura, correlación entre la deformación y la resistencia o resistividad eléctrica de la muestra ( $\epsilon-\Delta\rho/\rho_0$ ). Temperaturas de transformación ( $M_s$ ,  $M_f$ ,  $A_s$  y  $A_f$ ) y la histéresis térmica de la transformación. Todo esto en función del número de ciclo, del esfuerzo aplicado, de la composición del material y de su estado inicial. La precisión de las mediciones es satisfactoria para nuestro caso.

- La muestra B (aleación binaria Ti-Ni) no presenta un comportamiento satisfactorio para ser considerada como un activador. La influencia diferente que ejerce la fase R sobre la deformación ( $\epsilon$ ) y el cambio de resistividad ( $\Delta\rho/\rho_0$ ), provoca una curva de correlación  $\epsilon-\Delta\rho/\rho_0$  con una geometría triangular, lo que dificulta el control de la posición del activador.
- La introducción de dislocaciones conforme avanzan los ciclos térmicos bajo esfuerzos, parece inhibir el cambio de forma del alambre producido por la transformación de la fase R. Sin embargo, la transformación de la fase R continúa afectando de igual manera a la resistencia eléctrica del material.
- La muestra A (aleación Ti-45Ni-5Cu) presenta un comportamiento satisfactorio como activador debido a que la pendiente de la correlación  $\epsilon-\Delta\rho/\rho_0$  permanece constante durante todo su período de vida a pesar de que existe una evolución de sus propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas.<sup>8</sup>

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONACYT de México, al CAPES de Brasil y al INSA de Lyon, por su apoyo financiero y técnico durante la realización de este proyecto.

## REFERENCIAS

1. López Cuéllar E. Una introducción a las aleaciones con memoria de forma I. Ingenierías, Julio-Septiembre 2002, Vol. V, No. 16, p. 5-11.
2. López Cuéllar E. Una introducción a las aleaciones con memoria de forma II. Ingenierías, Octubre-Diciembre 2002, Vol. V, No. 7, p. 14-19.
3. Mertmann M., Hornbogen E. Grippers for the Micro Assembly Containing Shape Memory Actuators and Sensors. In European Symposium on Martensitic Transformations. J. PHYS. IV France 7, Colloque C5, 1997, p. C5-621-C4-626.
4. De Araújo, C. J. Comportement cyclique de fils en alliage à mémoire de forme Ti-Ni-Cu: analyse electro-thermomécanique, dégradation et fatigue par cyclage thermique sous contrainte. Thèse d'Etat, INSA de Lyon, Lyon I, 1999, 177p.
5. López Cuéllar, Enrique. Fatigue par cyclage thermique sous contrainte de fils à mémoire de forme Ti-Ni-Cu après différents traitements thermomécaniques. Thèse d'Etat, INSA de Lyon, Lyon I, 2002, 180p.
6. Airoidi G., Ranucci T., Riva G., Sciacca A. The two-way memory effect in a 50at%Ti-40at%Ni-10at%Cu alloy. J. Phys.: Condens. Matter, 1995, vol.7, p 3709-3720.
7. Khelfaoui F. Effet des traitements thermomécaniques sur les transformations displacives de l'alliage Ti-Ni. Thèse d'Etat, INSA de Lyon, Lyon I, 2000, p. 142p.
8. De Araújo C. J., Morin M., Guenin G. Electro-thermomechanical behavior of a Ti-Ni-5.0Cu (at%) alloy during shape memory cycling. Materials Science and Engineering 1999, Vol. A000, p. 1-5.