

Repetibilidad de máquina de termofluencia para microalambres de aleaciones metálicas

Enrique M. López Cuellar, Oscar Ordaz Altamirano, Azael Martínez de la Cruz, Rodolfo Morales Ibarra y Marco A. Garza Navarro

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Posgrado en Ingeniería de Materiales

Enrique.lopezcl@uanl.edu.mx, oscar.ordazalt@uanl.edu.mx, azael.martinezdl@uanl.edu.mx, rodolfo.moralesbr@uanl.edu.mx, marco.garzanr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Una máquina de termofluencia para el estudio de microalambres base Cu y de Al empleados en la industria automotriz, fue desarrollada en nuestro laboratorio. Para poder determinar la confiabilidad de sus mediciones se realizó un estudio de la repetibilidad y grado de precisión de la deformación en alambres de aluminio (AA1120) y de cobre electrolítico de brea tenaz (C11000), en una habitación a temperatura controlada. En este trabajo se presenta la media, desviación estándar y el porcentaje de error de cinco ensayos de deformación para cada aleación durante el enfriamiento desde alta temperatura hasta los 30 °C al medio ambiente.

PALABRAS CLAVE

Repetibilidad, termofluencia, microalambres, aluminio.

ABSTRACT

A creep machine for the study of Cu and Al-based micro-wires used in the automotive industry was developed in our laboratory. To determine the reliability of its measurements, a study was conducted to assess the repeatability and degree of accuracy of the deformation in aluminum (AA1120) and tenacious pitch electrolytic copper (C11000) wires. This was carried out in a temperature-controlled room. In this study, the mean, standard deviation, and percent error of five deformation tests for each alloy during cooling from a high temperature to 30 °C at room temperature are presented.

KEYWORDS

Repeatability, creep, micro-wires, aluminum.

INTRODUCCIÓN

La industria automotriz requiere de materiales ligeros y durables en las distintas partes de los vehículos. Esto ha hecho buscar nuevas aleaciones que cumplan con esto sin que su desempeño se vea afectado. Esto incluye a los alambres y cables conductores de electricidad. Recientemente, con el auge de los autos eléctricos, distintas opciones de alambres finos de aluminio han sido propuestas para el desarrollo de sus arneses.¹⁻³ Sin embargo para introducirlas en el mercado, se requiere que sean probadas para cumplir con ciertas especificaciones cuando éstas son solicitadas bajo diferentes condiciones, por ejemplo de fatiga,⁴ de corrosión⁵ o de termofluencia.⁶⁻⁷ De hecho, un requisito importante es de estos alambres, es su comportamiento de termofluencia bajo condiciones de operación, es decir, cargas mecánicas entre los 20 MPa y 60 MPa y temperaturas entre 70°C y 120°C.

Las máquinas comerciales de termofluencia son diseñadas para muestras macro,⁸ por lo que para poder realizar un estudio en micro alambres o cables empleados en los arneses de los vehículos eléctricos, en nuestro laboratorio fue desarrollada una máquina de ensayos de termofluencia. Esta máquina cuenta con controles y sensores finos de desplazamiento, esfuerzos y temperatura, que permiten aplicar cargas pequeñas, adecuadas para deformar microalambres y poder detectar sus cambios de longitud.

Por otra parte, para todo instrumento de medición, existen dos componentes que son importantes a medir: la repetibilidad y la reproducibilidad. La primera hace referencia a las variaciones en las mediciones ocasionadas por los componentes del equipo y condiciones del ensayo. Por ejemplo, la resolución de sus componentes, o la capacidad para evitar ruidos mecánicos o eléctricos o incluso variaciones en medio ambiente como pudiera ser la temperatura o la humedad. Entre más control se tenga sobre este tipo de variables, la repetibilidad será mayor. Mientras que la reproducibilidad, hacer referencia a los cambios en las mediciones ocasionados por el operador del equipo o bien cambios de equipos para medir una misma muestra. Ambos son importantes para tener resultados confiables.⁹ Las definiciones de acuerdo con la norma NC OIML V2, empleando el Vocabulario internacional de términos generales y básicos de metrología pueden ser consultadas en el trabajo de Paisan *et al.*¹⁰

Como el prototipo desarrollado en este trabajo, forma parte de las actividades de una tesis doctoral (un solo usuario), este estudio se concentró solo en la repetibilidad de la máquina. Para esto la media, desviación estándar y el porcentaje de error de cinco ensayos distintos de deformación; y a distintas temperaturas para las dos aleaciones fueron medidos. Los resultados muestran para los alambres base Cu, un porcentaje de error menor al 4% a temperaturas ya de 35 °C mientras que para los alambres base Aluminio se tiene que alcanzar temperaturas superiores a los 70 °C, sugiriendo así, una especificación de uso de esta máquina por encima de esta temperatura.

METODOLOGÍA

Cinco alambres de Aluminio y de Cobre de 1 mm de diámetro fueron cortados a una longitud de 65, de tal manera que la longitud libre entre las dos mordazas fuera de 55 mm. Para mejorar el agarre de las mordazas con los alambres, los 5 mm de los extremos de ambos lados fueron comprimidos con una prensa. Los ensayos se llevaron a cabo en una sala climatizadas a 20 °C. Los datos de las 5 pruebas fueron capturados y con ellos se obtuvo la media (Med), la desviación estándar (DEs) y el porcentaje de error (%E). El porcentaje de error se calculó de la siguiente manera:

$$\%E = \frac{2DEs}{Med} \times 100 \quad (1)$$

Para los cables de aluminio, el ciclo de barrido fue de temperatura ambiente hasta los 100 °C, mientras que para los de cobre se llegó hasta los 150 °C. El calentamiento se logra incrementando la corriente de la bobina de inducción alcanzando una rapidez aproximada de 1 °C/s. Debido a la alta rapidez de calentamiento, durante el ciclo térmico, la muestra se mantiene a alta temperatura durante 10 minutos, lo cual permite alcanzar una estabilidad en la lectura de la deformación de la muestra. Posteriormente el enfriamiento se da por convección térmica a temperatura ambiente cuando se deja de suministrar corriente a la bobina, por lo que la rapidez de enfriamiento es más lenta que la del calentamiento y no es controlada a través del equipo, logrando bajar la temperatura por ejemplo de 100 a 30 °C en 30 minutos aproximadamente. Debido a que la cantidad de datos es mayor durante el enfriamiento y a que puede dar más tiempo para que la lectura de la deformación de la muestra sea más exacta con respecto a la temperatura, para este estudio se decidió utilizar las lecturas del enfriamiento.

El esquema de la máquina con sus componentes se muestra en la figura 1. A continuación se enumeran estas componentes:

1. Pieza de sistema de carga constante (a través de poleas y pesos)
2. Guías laterales
3. Termopar
4. Mordaza móvil
5. Alambre (muestra)
6. Mordaza fija
7. Sensor de carga
8. Bases antivibración
9. Sensor de desplazamiento (*LVDT*)
10. Bobina de inducción
11. Poleas (figura 2)

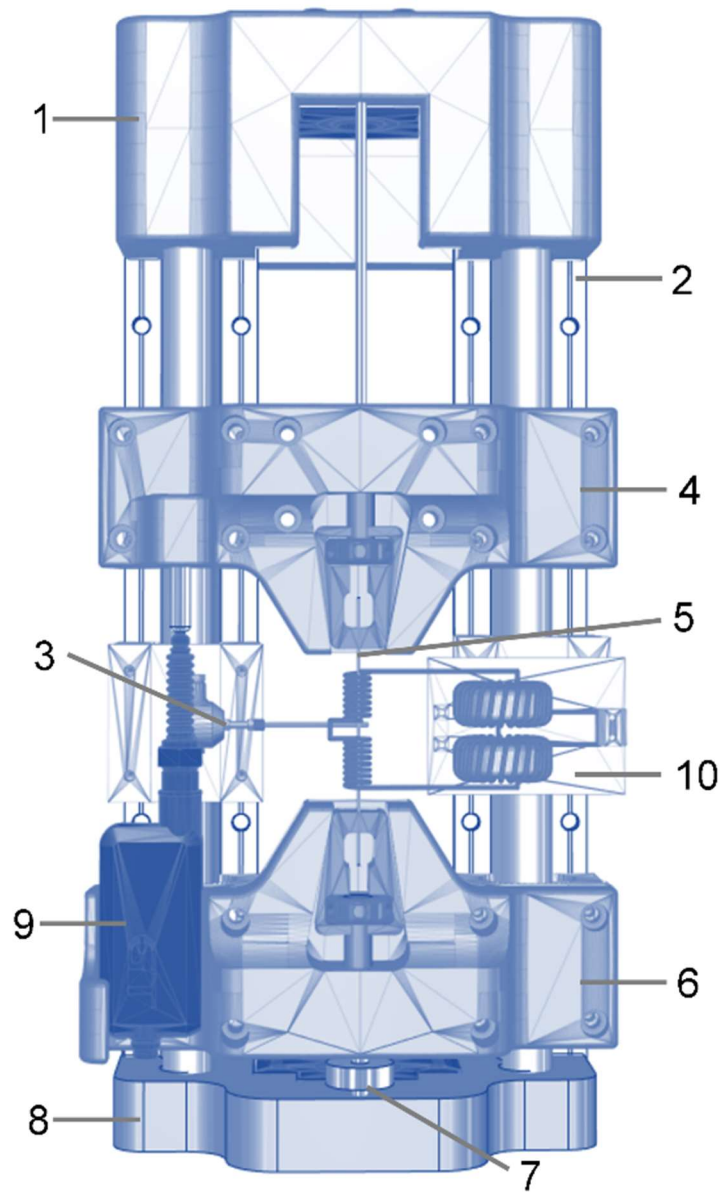


Fig. 1. Esquema de la máquina de termofluencia.

Los alambres fueron colocados en la máquina que se ilustra en la figura 1, es decir, estos pasan por el centro del hueco de la bobina de calentamiento (5). La máquina cuenta con un sistema de carga constante (1) por medio de discos y poleas para aplicar una carga constante a través de un cable que se conecta con la mordaza móvil (4) de la máquina. La configuración del sistema de poleas se puede apreciar en la figura 2 (11), que es un esquema lateral del sistema de carga constante. El calentamiento se logra pasando la muestra (5) a través de una bobina de inducción (10). Y la deformación se mide con un sensor de desplazamiento LVDT (9). La mordaza inferior se mantiene fija (6) y es la que sujeta la muestra para lograr una deformación al aplicarle la carga. La máquina cuenta con dos guías laterales para evitar efectos de torsión en los alambres (2). El equilibrio del sistema se controla mediante un sensor de carga (7) el cual está acoplado a la mordaza inferior. Además, se han instalado bases antivibración (8) con el propósito de absorber parte del ruido. El equipo se encuentra equipado con un sistema de control de temperatura PID, que ofrece una amplia gama de rutas de temperatura configurables y una excelente estabilidad a lo largo de períodos prolongados de tiempo. La temperatura se adquiere a través del termopar (3). El control de la máquina de ensayos de termofluencia se lleva a cabo mediante un programa desarrollado en LabVIEW 8.0. Este programa permite configurar la secuencia de temperatura durante el ensayo y registrar la deformación de la muestra mediante un sensor de posición, así como la adquisición de los valores de temperatura a través de un termopar tipo K.

La masa del cable de la polea y la canasta en donde se aplica la masa (M) indicado en la figura 2, son suficientes para contrarrestar la masa de la mordaza, por lo que se puede considerar que el esfuerzo aplicado sobre los alambres es ≈ 0 MPa. Esto es importante porque permite estar muy cerca de las condiciones de dilatación y por lo tanto alcanzar las condiciones que pudieran presentar mayor % de error en cuanto a las lecturas de deformación.

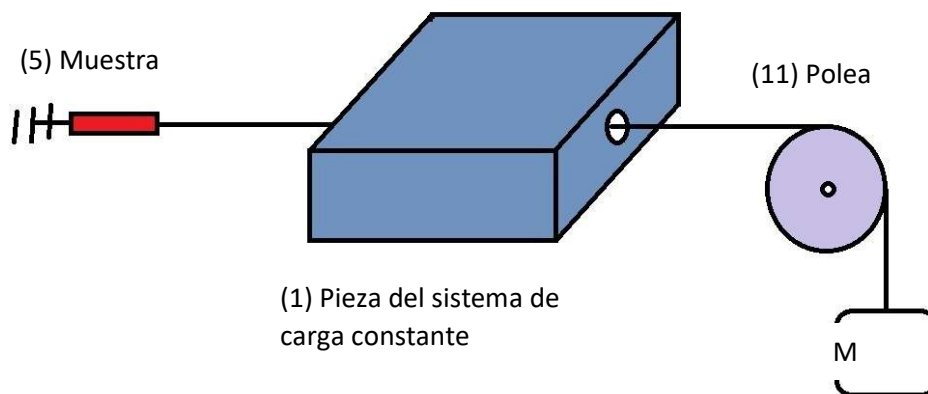


Fig. 2. Esquema lateral del sistema de poleas.

En la figura 3 (a y b) se muestran fotografías de la vista superior y lateral de la máquina desarrollada para este trabajo.

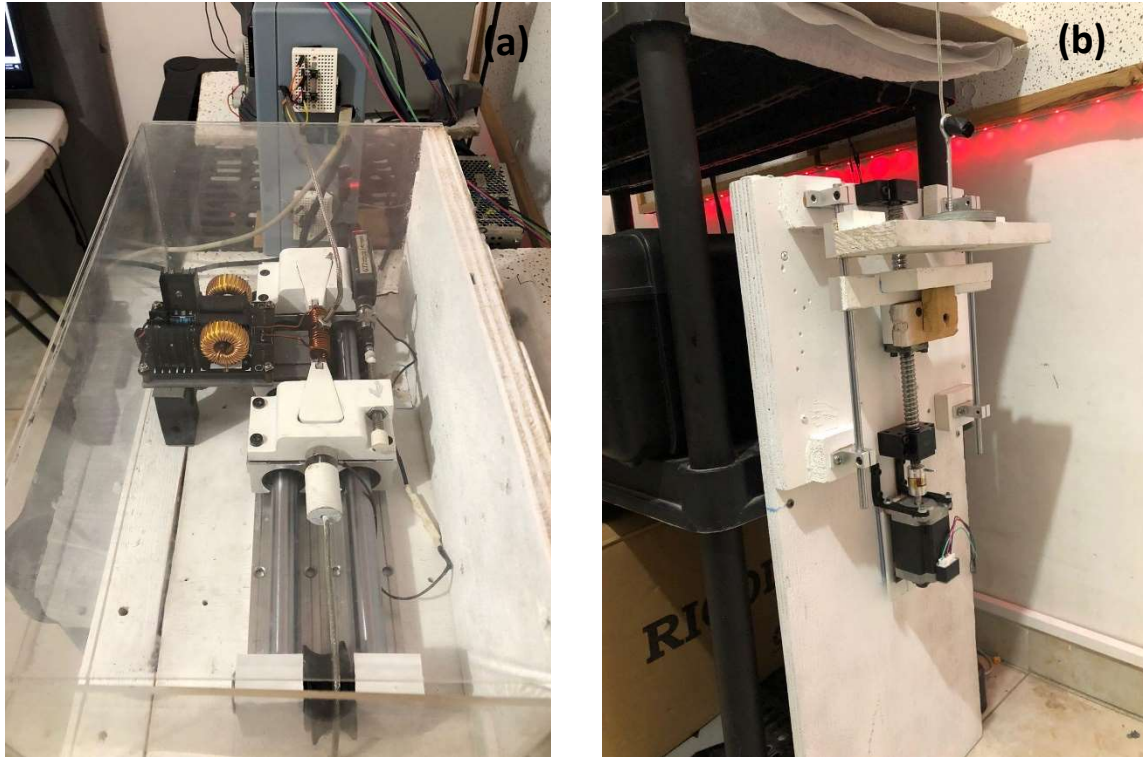


Fig. 3 (a y b). Vista real superior y lateral de la máquina.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 4 y en la figura 5, se muestran las gráficas de la deformación directa en milímetros o cambio en la longitud (Ec. 2) en función de la temperatura para una muestra de Al y una de Cu respectivamente. Las otras cuatro curvas para cada muestra, no se presentan en este artículo por cuestiones de espacio, pero como se mencionará más adelante, su comportamiento entre las de Al fue muy similar al igual que entre las de Cu. Los resultados que se registran en estas figuras son del barrido de calentamiento y enfriamiento.

$$\Delta L = L - L_0 \quad (2)$$

En donde ΔL es la medición directa del captor de desplazamiento al instante, L es la longitud de la muestra al instante y L_0 es la longitud inicial.

Al analizar la deformación registrada de ambos materiales, es claro que esta aumenta de manera casi lineal. No obstante, parece que a bajas temperaturas se aprecia un ligero cambio en la pendiente en ambos casos. Por otro lado al comparar la deformación entre ambas aleaciones en el mismo rango de temperatura entre los 30 °C y 100 °C, el ΔL en el alambre de cobre que va de 0 a 0.2 mm, es mayor que en la del aluminio que solo alcanza los 0.14 mm, lo que es de esperarse debido a que el coeficiente de expansión lineal del Cu ($\alpha=5.1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) es mayor que el del Al ($\alpha=2.3 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

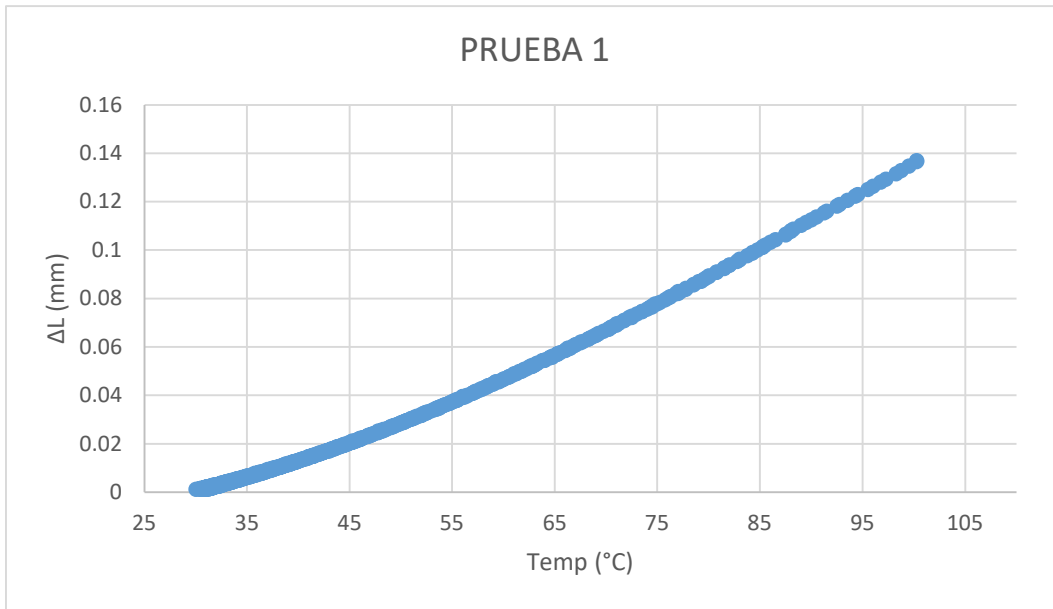


Fig. 4. Gráfica de una muestra de alambre de aluminio de la deformación vs la temperatura.

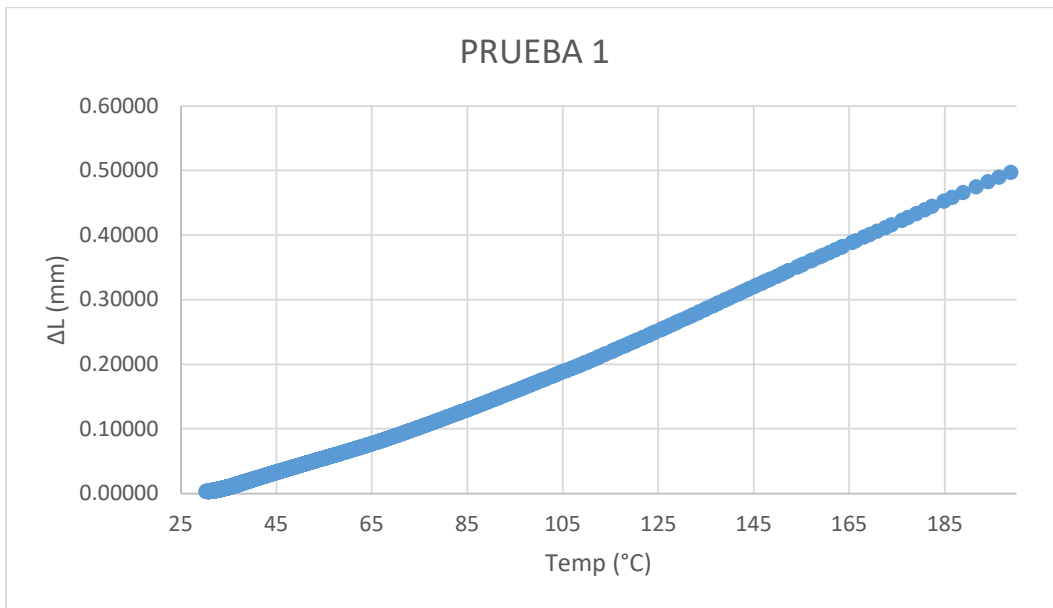


Fig. 5. Gráfica de una muestra de alambre de cobre de la deformación vs la temperatura.

En la tabla I y en la tabla II, se presentan los resultados de deformación (ϵ) que se obtienen a partir de la ecuación 3, de los cinco diferentes alambres cada material respectivamente. En estas mismas tablas además se muestran la media, la desviación estándar y el % de error de la medición de deformación a partir de los cinco ensayos distintos.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

En ambas tablas, se puede observar que la desviación estándar y el % de error (en amarillo) van aumentando conforme la temperatura disminuye y esto es más evidente en los resultados de la tabla 1 que son los del alambre del aluminio, ya que a partir de los 65 °C el error es ya de ~4.5 %, mientras que este mismo rango de error se da hasta los 30 °C para las pruebas realizadas a los alambres de cobre.

En las figuras 6 y 7 se graficaron los resultados de la columna de la media de la deformación activada térmicamente (ϵ) con respecto a la temperatura. De estas graficas entonces la pendiente, corresponde al coeficiente de expansión térmica $\alpha = \epsilon/^\circ\text{C}$ en unidades de $^\circ\text{C}^{-1}$, que puede ser obtenido con este equipo. Las escalas de ambas figuras fueron igualadas para poder ver la diferencia de magnitud de las α , lo que evidencia que la magnitud del α del aluminio es más baja que la del cobre. Los resultados fueron de 2×10^{-5} y 5×10^{-5} para el alambre base Al y base Cu respectivamente, valores cercanos a lo reportado en la literatura para ambos materiales en su estado puro ($\alpha_{\text{Al}}=2.3 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y $\alpha_{\text{Cu}}=5.1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Tabla I. Resultados de los 5 ensayos en los alambres de Al de deformación vs temperatura.

TEMP (°C)	PRUEBA #1 (ϵ)	PRUEBA #2 (ϵ)	PRUEBA #3 (ϵ)	PRUEBA #4 (ϵ)	PRUEBA #5 (ϵ)	MEDIA (ϵ)	DESVIACION ESTANDAR	% de Error
100	0.0016655	0.001661	0.0016677	0.001657	0.0016695	0.0016641	5.102E-06	0.61%
95	0.0015881	0.0015834	0.0015887	0.0015915	0.0015883	0.001588	2.905E-06	0.37%
90	0.0015178	0.0015208	0.0015273	0.0015315	0.0015267	0.0015248	5.476E-06	0.72%
85	0.0014457	0.0014489	0.0014598	0.0014723	0.0014618	0.0014577	1.07E-05	1.47%
80	0.0013824	0.0013774	0.0013782	0.0014071	0.0013919	0.0013874	1.243E-05	1.79%
75	0.0013065	0.0012941	0.0012909	0.001336	0.0013218	0.0013099	1.899E-05	2.90%
70	0.0012283	0.001201	0.0012135	0.0012584	0.0012372	0.0012277	2.205E-05	3.59%
65	0.0011491	0.0011303	0.0011261	0.0011909	0.0011547	0.0011502	2.578E-05	4.48%
60	0.0010642	0.0010341	0.0010459	0.0010905	0.0010772	0.0010624	2.282E-05	4.30%
55	0.0009778	0.0009362	0.0009376	0.0010129	0.0009796	0.0009688	3.234E-05	6.68%
50	0.0008794	0.0008158	0.0008416	0.000919	0.0008778	0.0008667	3.95E-05	9.12%
45	0.0007873	0.0007121	0.0007259	0.0008109	0.000778	0.0007628	4.206E-05	11.03%
40	0.0006689	0.0005891	0.0006107	0.0006966	0.0006685	0.0006467	4.491E-05	13.89%
35	0.0005303	0.000439	0.0004731	0.0005451	0.0005267	0.0005028	4.49E-05	17.86%
30	0.0003224	0.0002485	0.0002988	0.0003596	0.000363	0.0003185	4.738E-05	29.75%

Tabla II. Resultados de los 5 ensayos en los alambres de Cu de deformación vs temperatura.

TEMP (°C)	PRUEBA #1 (ε)	PRUEBA #2 (ε)	PRUEBA #3 (ε)	PRUEBA #4 (ε)	PRUEBA #5 (ε)	MEDIA (ε)	DESVIACION ESTANDAR	% de Error
150	0.0061371	0.0061285	0.0060944	0.006204	0.0061124	0.0061353	4.1729E-05	1.36%
145	0.0058238	0.0056869	0.0057902	0.0058268	0.0058033	0.0057862	5.7503E-05	1.99%
140	0.0055233	0.005446	0.0054815	0.0055011	0.0054985	0.0054901	2.8772E-05	1.05%
135	0.0052093	0.0050835	0.0051785	0.0051897	0.0051884	0.0051699	4.958E-05	1.92%
130	0.0048996	0.0047796	0.0048738	0.0048736	0.0048856	0.0048625	4.7517E-05	1.95%
125	0.0045865	0.0045069	0.0045725	0.0045728	0.0045844	0.0045646	3.2904E-05	1.44%
120	0.0042855	0.0041936	0.0042816	0.0042798	0.0042809	0.0042643	3.9552E-05	1.86%
115	0.0039864	0.0039049	0.0039985	0.0039824	0.0039887	0.0039722	3.8077E-05	1.92%
110	0.0036922	0.0036387	0.003712	0.0036914	0.0037102	0.0036889	2.9668E-05	1.61%
105	0.0034295	0.0033633	0.0034373	0.0034302	0.0034333	0.0034187	3.1138E-05	1.82%
100	0.0031611	0.0030985	0.0031685	0.0031615	0.0031573	0.0031494	2.8718E-05	1.82%
95	0.0028882	0.0028353	0.0028978	0.0028861	0.00289	0.0028795	2.5107E-05	1.74%
90	0.0026207	0.0025745	0.0026418	0.0026259	0.0026222	0.002617	2.5187E-05	1.92%
85	0.0023582	0.0023525	0.0023842	0.0023698	0.0023604	0.002365	1.2389E-05	1.05%
80	0.0021113	0.0020778	0.0021204	0.0021181	0.0021111	0.0021077	1.7221E-05	1.63%
75	0.0018669	0.0018364	0.0018793	0.0018735	0.0018669	0.0018646	1.6603E-05	1.78%
70	0.0016245	0.0016289	0.0016596	0.001639	0.0016273	0.0016359	1.4365E-05	1.76%
65	0.0014029	0.0013911	0.0014122	0.0014235	0.0013945	0.0014048	1.3227E-05	1.88%
60	0.0012185	0.0012184	0.0012202	0.0012208	0.0012096	0.0012175	4.5276E-06	0.74%
55	0.0010024	0.001014	0.0010202	0.0010136	0.0009991	0.0010099	8.803E-06	1.74%
50	0.0008047	0.0008042	0.0008175	0.0008076	0.0008085	0.0008085	5.3349E-06	1.32%
45	0.0006036	0.0005998	0.0006113	0.0006097	0.0006047	0.0006058	4.6519E-06	1.54%
40	0.0004024	0.0004064	0.0003933	0.000397	0.0004055	0.0004009	5.6121E-06	2.80%
35	0.0001822	0.0001895	0.0001824	0.0001807	0.000184	0.0001837	3.4038E-06	3.71%
30	6.418E-05	6.073E-05	0.000064	6.269E-05	6.345E-05	6.301E-05	1.4021E-06	4.45%

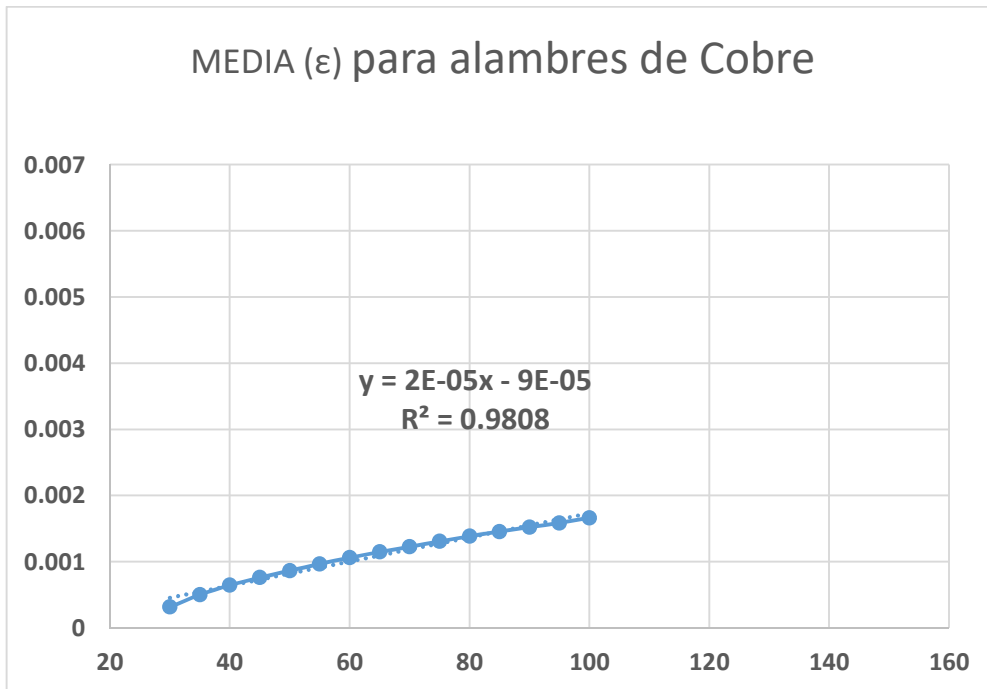


Fig. 6. Deformación vs temperatura de los 5 ensayos para las muestras de cobre.

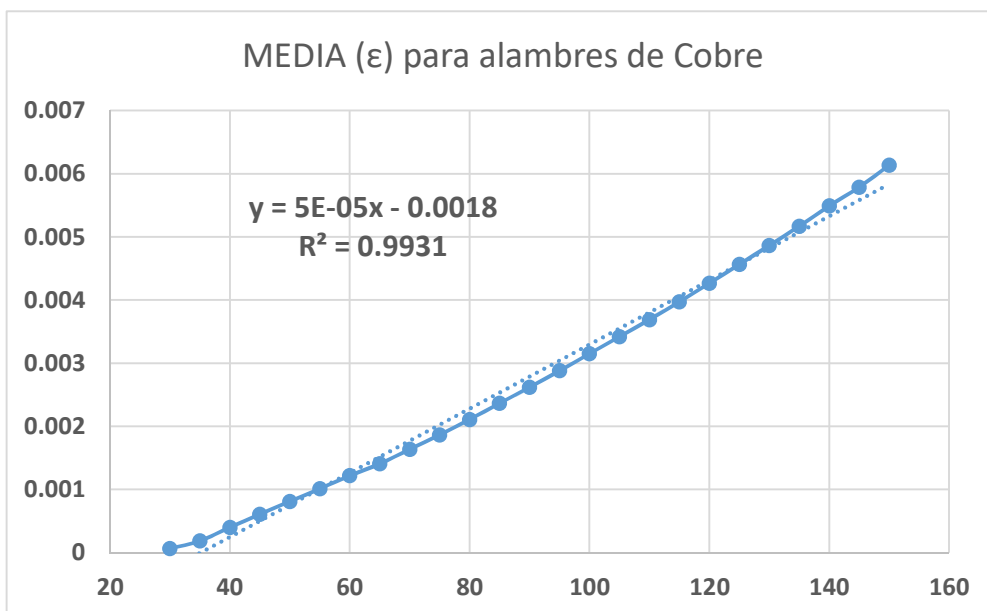


Fig. 7. Deformación vs temperatura de los 5 ensayos para las muestras de cobre.

En la figura 8 se graficaron los resultados obtenidos del % de error de ambos materiales. En naranja los de los alambres base aluminio y en azul los de cobre respectivamente. En ambos casos, como se detectó en las tablas, el error aumenta con respecto a la disminución en la temperatura, no obstante para los alambres de aluminio, este aumento es mayor, tal y como se observa en esta gráfica, llegando a ser de hasta el 30 % a 30 °C. El efecto de la temperatura en ambos casos puede ser explicado debido a las variaciones de temperatura en la sala de ensayos, ya que el enfriamiento se da a condiciones ambientales regulando la temperatura de la sala con un aire acondicionado programado a 25 °C. Por otro lado, el efecto del incremento del % de error con el cambio de

aleación al aluminio se debe a que el coeficiente de expansión térmica de este, es menor casi por un factor de 2, lo que provoca mayores errores entre mediciones cuando la temperatura es inferior a los 70 °C. Al analizar en la tabla 1 el valor de la deformación a 70 °C en el aluminio, éste corresponde a una ϵ de 0.0012277. Al obtener el cambio de la longitud a partir de la $L_0 = 55$ mm con la ecuación 3, se obtiene un $\Delta L = 0.0675235$ mm. Lo anterior indica que cambios inferiores en longitud a esa magnitud magnifican el error en la medición, incluso más que la disminución en la temperatura. Estos resultados sugieren entonces que esta máquina puede ser utilizada con una buena confiabilidad para microalambres de aleaciones de aluminio o algún otro material con un coeficiente de expansión térmica superior al del aluminio por encima de los 70 °C. Y ya que la concepción de la máquina fue realizada para el estudio de los alambres en pruebas de termofluencia con temperaturas superiores a los 100 °C, se puede confirmar que los resultados serían confiables bajo esas condiciones, además de que las deformaciones serían mayores por el esfuerzo aplicado, lo que bajaría aún más el % de error.

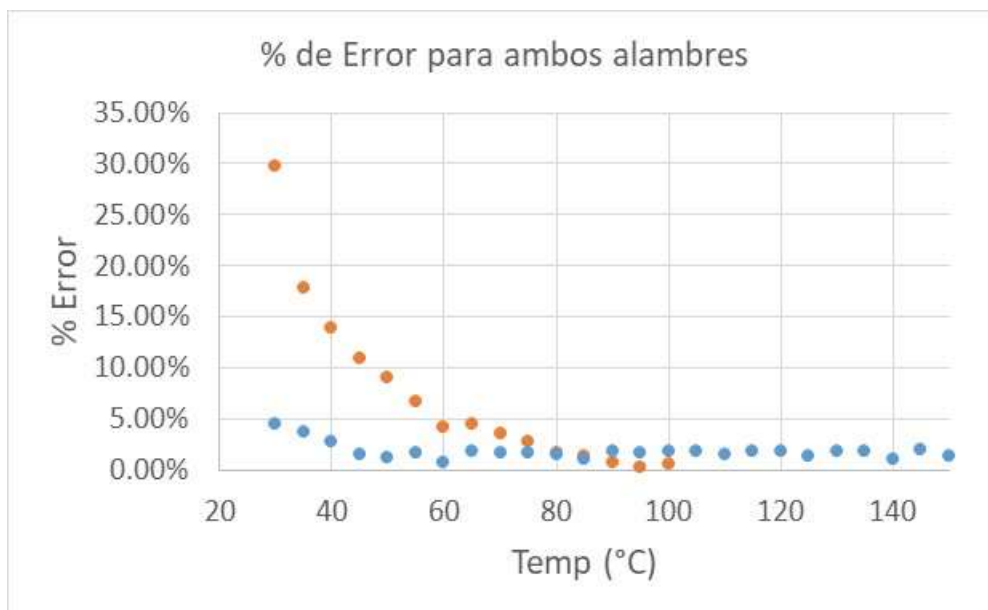


Fig. 8. Porcentaje de error en función de la temperatura para ambas aleaciones.

CONCLUSIONES

El equipo desarrollado mostró tener una aceptable repetibilidad de la deformación medida en función a la temperatura para alambres finos tanto de aluminio como de cobre. Los resultados y los gráficos muestran que las mediciones del % de error para los 5 ensayos en ambas aleaciones son muy similares por encima de los 70 °C. El aumento en el porcentaje de Error en los alambres de aluminio se debe a que su coeficiente de expansión térmica es menor que el del cobre, lo que indica que el cambio de longitud por debajo de esa temperatura para el aluminio, ya se encuentra al límite de la resolución del equipo construido para este trabajo. Por lo que entonces este estudio permitió establecer los límites de uso de la máquina en donde el cambio de longitud debe de ser superior a los 0.0675 mm y las temperaturas superiores a los 70 °C. Lo anterior sugiere que el equipo puede ser empleado para el estudio del efecto de termofluencia para alambres finos de aluminio o de cualquier aleación con un coeficiente mayor al aluminio, ya que estos estudios son a temperaturas más elevadas.

AGRADECIMIENTOS

A la UANL por su apoyo a este proyecto a través del programa PAICYT Clave IT1039-19 y al Conahcyt por la beca de doctorado otorgada a Oscar Ordaz Altamirano.

REFERENCIAS

1. Zhang, J., Peng, J. (2023). A review on aluminum alloy conductors influenced by alloying elements and thermomechanical treatments: Microstructure and properties. *Journal of Materials Research* 38, 1488–1509. <https://doi.org/10.1557/s43578-023-00891-4>
2. Haber, D. (2015). "Lightweight Materials for Automotive Applications: A Review." SAE Technical Paper 2015-36-0219. Ford Motor Company. Evento: 24th SAE Brasil International Congress and Display. Páginas: 9.
3. Koch, S., & Antrekowitsch, H. (Marzo 2007). "Aluminum Alloys for Wire Harnesses in Automotive Engineering." *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, 152(2), 62-67.
4. Makhloufi, A., Aoues, Y., El Hami, A., Radi, B., Pougnet, P., Delaux, D. (2017). Study on the Thermomechanical Fatigue of Electronic Power Modules for Traction Applications in Electric and Hybrid Vehicles (IGBT), Aerospace and Automotive Applications: Simulation, Modeling and Optimization, 213-251. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-260-1.50010-8>.
5. Laurino, A., Andrieu, E., Harouard, J., Odemer, G., Blanc, C. (May 2012). Effect of the Thermomechanical History on the Corrosion Behavior of 6101 Aluminum-Magnesium-Silicon-Iron Alloy in NaCl Solutions, *ECS Transactions*, V. 41, N. 25, p. 93, <https://dx.doi.org/10.1149/1.3697581>
6. Gueydan, A., Hug, E., (2018). Secondary creep stage behavior of copper-clad aluminum thin wires submitted to a moderate temperature level, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 709, 134-138, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.044>.
7. Khatibi, G., Betzwar Kotas, A., Gröger, V., & Weiss, B. (Junio 2005). "A Study of the Mechanical and Fatigue Properties of Metallic Microwires." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28(8), 723-733.
8. Park, J.-H. (July 2002). "Development of Micromechanical Testing Machine and Its Application." *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 25(2), 317-322.
9. Taylor, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements*, Third Edition. Editor: AIP Publishing, University Science Books. Páginas: 380.
10. Paisan, Y.P., Moret, J.P., (2010). La repetibilidad y reproducibilidad en el aseguramiento de la calidad de los procesos de medición. *Tecnología Química* Vol. XXX, No. 2, 117-121. <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543770014.pdf>