

## Máquina para pruebas de termofluencia en elastómeros a diferentes temperaturas A device for creep tests in elastomers at different temperatures

J. A. Sotomayor-del-Moral <sup>a</sup>, J. B. Pascual-Francisco <sup>a,\*</sup>, L. I. Farfán-Cabrera <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Universidad Politécnica de Pachuca, Departamento de Mecatrónica, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Zempoala, Hgo., México, 43830.

<sup>b</sup> Tecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Ave. Eugenio Garza Sada 2501, Monterrey, N.L., México, 64849.

### Resumen

En este trabajo se aplicó el proceso de diseño mecánico para diseñar un dispositivo capaz de realizar pruebas experimentales de creep para diferentes elastómeros en amplio rango de cargas y temperaturas. El dispositivo se compone de dos subsistemas. El primero dispone de una cámara de temperatura con control PI, la cual integra un mecanismo de aplicación de peso muerto para garantizar un esfuerzo constante durante las pruebas. El segundo consiste en el sistema de medición de deformaciones de creep mediante la técnica de correlación digital de imágenes. Para probar el funcionamiento de la máquina se llevaron a cabo pruebas de fluencia con duración de 25 minutos en un elastómero común. Los resultados obtenidos fueron validados mediante pruebas de repetibilidad. Finalmente, las características y arreglo del dispositivo propuesto permiten la ejecución de pruebas de fluencia lenta en una gran variedad de elastómeros para evaluar su comportamiento viscoelástico a largo plazo a diferentes cargas y temperaturas.

**Palabras clave:** Diseño mecánico, viscoelasticidad, fluencia lenta, correlación digital de imágenes, control de temperatura.

### Abstract

In this work, the mechanical design process is applied to achieve a device for experimental creep tests on different elastomers under different loads and temperatures. It consists of two subsystems. The first is a temperature chamber with PI control, which integrates a dead load application mechanism to assure the application of a constant load during the tests. The second consists of the strain measurement system using the digital image correlation technique. To prove its effectiveness, creep tests were carried out on a common elastomer with a duration of 25 minutes. The results obtained are validated by repeatability tests. Finally, the proposed device can be used for creep tests on a wide variety of elastomers to assess their long-term viscoelastic behavior at different loads and temperatures.

**Keywords:** Mechanical design, viscoelasticity, creep, digital image correlation, temperature control.

### 1. Introducción

En el área de la mecánica experimental, existe la necesidad de desarrollar nuevos instrumentos para la caracterización de propiedades mecánicas de los materiales. Particularmente, para la caracterización de propiedades viscoelásticas de materiales elastómeros generalmente se requiere de instrumentos especializados. Para ello, en la actualidad existen en el mercado diferentes equipos sofisticados y prototipos de desarrollo propio para este fin (Cui et al., 2016; Delmastro, 2016). Sin embargo, las máquinas de pruebas mecánicas son de elevado costo y son para uso en una gran variedad de materiales, desde materiales suaves hasta materiales con elevada resistencia (como los metales). En el campo del

estudio de materiales suaves como los elastómeros, estas máquinas están sobradas, por lo que se requiere de dispositivos con tamaño y capacidades de carga y temperatura adecuadas.

El estudio de viscoelasticidad transitoria en elastómeros se puede llevar a cabo desde dos enfoques: fluencia lenta (o creep) y relajación de esfuerzos (Findley et al., 1989; Shaw et al., 2005). El creep es la deformación continua y lenta en un material cuando está sometido bajo la acción de un esfuerzo constante en el tiempo. Por otra parte, la relajación de esfuerzos es la disipación de los esfuerzos en un material cuando sufre una deformación constante. Se ha demostrado que, en ambos enfoques, el comportamiento de los materiales es dependiente no solo del tiempo sino también de la temperatura (Ernst et al., 2003; Tscharnuter et al., 2010). Por

\*Autor para la correspondencia: [juanpascual@upp.edu.mx](mailto:juanpascual@upp.edu.mx)

Correo electrónico: [allan16@micorreo.upp.edu.mx](mailto:allan16@micorreo.upp.edu.mx) (Jonathan Allan Sotomayor-del-Moral), [juanpascual@upp.edu.mx](mailto:juanpascual@upp.edu.mx) (Juan Benito Pascual Francisco), [farfanl@hotmail.com](mailto:farfanl@hotmail.com) (Leonardo Israel Farfán-Cabrera)

lo tanto, conocer el comportamiento viscoelástico de los materiales puede ayudar en la determinación de su desempeño y vida útil (Spathis et al., 2012; Hiddabi et al., 2015).

Para llevar a cabo pruebas de creep en elastómeros es suficiente aplicar una carga desde 100 g hasta 1 kg, dependiendo de la sección transversal de la muestra (González et al., 2021). Mientras que, para una prueba de relajación de esfuerzos, es necesaria una carga desde 500 g hasta 20 kg. Con base en estos requerimientos y trabajos de investigación previos (Cabrera et al., 2018, 2022), en este artículo se aborda el diseño de una máquina para pruebas de creep en elastómeros y que integre un sistema de control de temperatura, desde temperatura ambiente hasta 100 °C. Asimismo, se implementó un sistema de medición de deformaciones mediante la técnica de correlación digital de imágenes (DIC, por sus siglas en inglés). Esta técnica de medición se basa en la comparación y correlación de imágenes de diferentes estados de deformación de un objeto y provee el mapa de deformaciones de toda el área de interés.

A lo largo de este trabajo se describen las diferentes etapas del proceso de diseño mecánico aplicado en el desarrollo de la máquina de pruebas de creep. Para probar la funcionalidad del dispositivo se realizaron pruebas experimentales. Los resultados obtenidos comprueban que el sistema de control de temperatura, el sistema de aplicación de carga y el sistema de medición de deformaciones son adecuados en la caracterización de creep en materiales elastoméricos.

## 2. Proceso de diseño

Para el desarrollo del banco de pruebas de fluencia lenta o creep en elastómeros, se implementó el *proceso de diseño mecánico* descrito en (Ullman, 2010; Cross, 2008). Este proceso consta de 5 etapas importantes, las cuales se presentan en la Figura 1 y se describen a continuación.

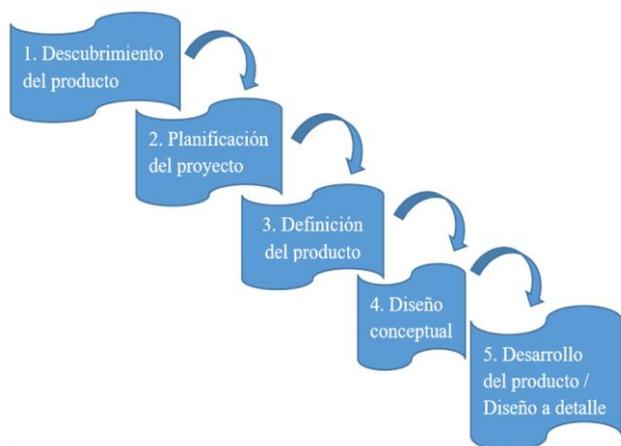


Figura 1: Etapas del proceso del diseño mecánico.

### 2.1. Etapa 1: Descubrimiento del producto

En el campo de la mecánica experimental, particularmente en el área de la viscoelasticidad, se tiene la necesidad de desarrollar una máquina de pruebas de creep en elastómeros. Por lo tanto, atendiendo la primera etapa del proceso del diseño mecánico, se identificó la necesidad de una máquina de termofluencia con fines de investigación.

### 2.2. Etapa 2: Planificación del proyecto

En esta etapa se desarrolla un cronograma de actividades del proceso del diseño. Existen diferentes herramientas para este fin. En este proyecto se realizó un diagrama de Gantt para calendarizar las diferentes tareas para el desarrollo del producto. En la Figura 2 se presenta un extracto del diagrama de Gantt desarrollado en este proyecto.

DIAGRAMA DE GANTT PARA EL DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS

ACTIVIDAD	INICIO DEL PLAN	DURACIÓN DEL PLAN	PORCENTAJE COMPLETADO	PERIODOS SEMANALES															
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1) Descubrimiento del producto.	1	2	100%	█	█														
2) Planificación del proyecto	3	3	100%			█	█	█											
3) Definición del Producto	6	4	100%						█	█	█	█							
4) Diseño conceptual	10	7	100%																
5) Desarrollo del Producto	17	16	80%																
6) Simulaciones	17	16	50%																
7) Pruebas experimentales de creep	33	16	0%																
8) Comprobación de resultados	33	16	0%																

Figura 2: Diagrama de Gantt.

### 2.3. Etapa 3: Definición del producto

Para el desarrollo de esta etapa se utilizó el método de la Casa de la Calidad o QFD (Quality Function Deployment), la cual se presenta en la Figura 4. A partir de los requerimientos del cliente, en el QFD se obtienen las especificaciones de ingeniería, así como también los objetivos y umbrales a alcanzar. Asimismo, se hace una investigación de productos similares en el mercado. El QFD permitió identificar áreas de oportunidad para desarrollar un dispositivo práctico y, sobre todo, que cumpla con los requerimientos de los clientes, quienes en este caso son investigadores en el área de mecánica experimental.

### 2.4. Etapa 4: Diseño Conceptual

Esta etapa se inició con el desglose de funciones. Se creó la *caja negra* (Figura 3) y *caja transparente* o *función global* (Figura 5). En la caja transparente se observan las subfunciones, las entradas y salidas del dispositivo. Esta etapa sirve para identificar más claramente el funcionamiento interno de la máquina por medio de la generación de subfunciones

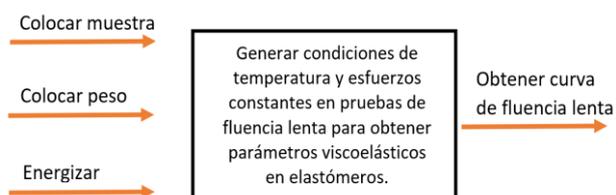


Figura 3: Caja negra o Función Global.

La función global se descompone en subfunciones, las cuales servirán para la generación de una *tabla morfológica* (Figura 6).



empleó una herramienta de CAD. Se crearon tres conceptos de configuración, los cuales se muestran en las Figuras 8, 9 y 10.

Tabla morfológica					
Producto: Banco de pruebas para termofluencia en elastómeros					
Subfunción	Concepto 1	Concepto 2	Concepto 3	Concepto 4	Concepto 5
Sujetar la probeta					
Posicionar el peso muerto					
Generar movimiento lineal del peso muerto					
Transferir peso muerto hacia la probeta					
Transformar energía eléctrica en energía calorífica					
Controlar la temperatura					
Medir deformación					
Medir tiempo de prueba					
Retirar fuerza aplicada en la probeta					
Terminar prueba					

Figura 6: Tabla morfológica de subfunciones.

Tabla 1: Cuadro de conceptos ganadores para subfunciones.

Subfunción	Concepto
Sujetar la probeta	Mordaza tipo cuña
Posicionar el peso muerto	Base metálica
Generar movimiento lineal del peso muerto	Tornillo sin fin 8mm x 500mm
Transferir peso muerto hacia la probeta	Motor a pasos nema 17
Transformar energía eléctrica en energía calorífica	Resistencia tubular para horno, resistencia cerámica (Bobina)
Controlar la temperatura	Termocupla tipo K
Medir deformación	DIC (Correlación digital de imágenes)
Medir tiempo de prueba	Cronómetro incorporado
Retirar fuerza aplicada en la probeta	Tornillo sin fin 8mm x 500mm
Terminar prueba	Parar prueba desde software

Sujetar probeta	Criterios	DATUM			
		Mordaza tipo cuña	Mordaza para ensayo de tracción	Clip bc32	Prensa de metal 3 in
Costo	10	0	1	0	
Peso máximo que soporta	30	0	-1	0	
Dimensiones del dispositivo	5	0	1	-1	
Riesgo de accidentes	10	0	-1	0	
Calidad	15	0	-1	0	
Facilidad de instalación	5	0	-1	0	
Temperatura máxima que soporta	20	0	-1	0	
Facil mantenimiento	5	0	0	0	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>n/a</b>	<b>0</b>	<b>-65</b>	<b>-5</b>

Figura 7: Ejemplo de matriz de Pugh.

Para la selección del diseño conceptual se realizó una comparación entre diseños. El primer diseño conceptual (Figura 8) carece de altura para realizar las pruebas de creep. En el segundo diseño conceptual (Figura 9) se realiza la corrección de altura y se acorta el elevador; sin embargo, las paredes son de material de acrílico. Este material se descartó debido a que no puede soportar las temperaturas elevadas. En este concepto se empleó una resistencia tipo bobina como elemento generador de calor. Se colocó el motor a pasos, pero aún no se define el soporte ni la aislación del calor. Por lo tanto, es necesario realizar un tercer diseño conceptual, el cual se presenta en la Figura 10.

En este último diseño conceptual (definitivo) se mejoran aspectos como el cambio de material en las paredes, los elementos que sujetan el elevador y se colocan los soportes del motor y la puerta de vidrio. Un detalle por destacar es que entre cada pared de la lámina galvanizada se deja espacio para un aislamiento térmico con fibra de vidrio.

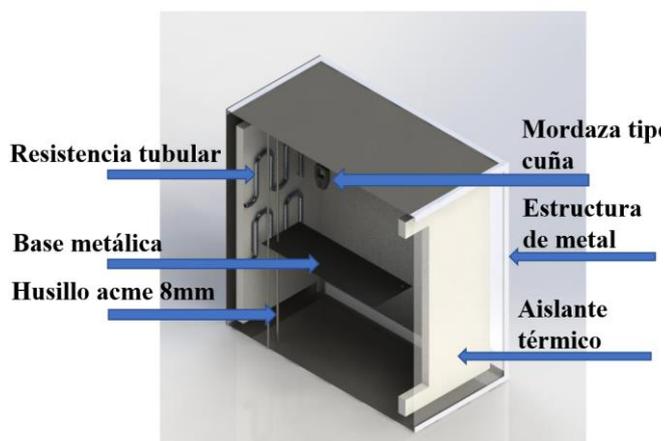


Figura 8: Primer diseño conceptual.

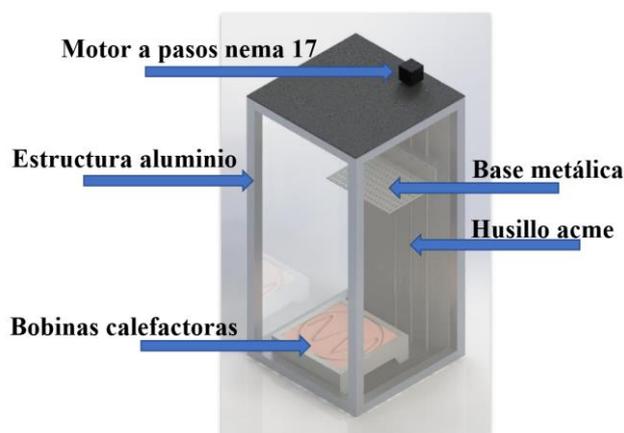


Figura 9: Segundo diseño conceptual.

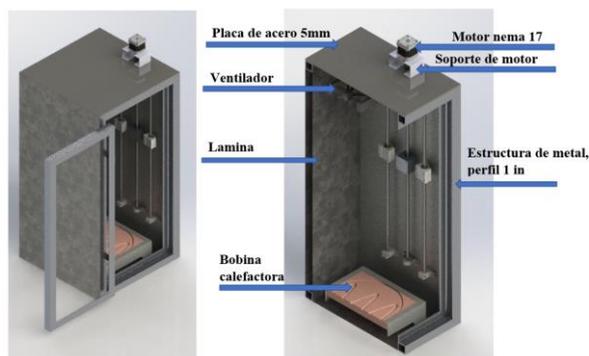


Figura 10: Tercer diseño conceptual.

para elevar el peso muerto junto con el husillo acme de 8 mm de diámetro y 600 mm de largo (Figura 12).

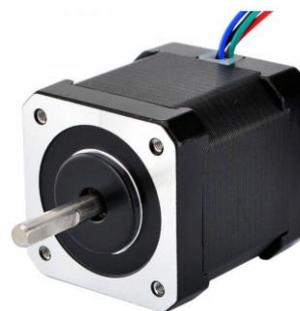


Figura 11: Motor NEMA 17.



Figura 12: Husillo acme de 8mm.

Para saber si la combinación del sistema del motor NEMA y el husillo serán viables, es necesario determinar la carga máxima que el husillo tendrá que soportar. La fuerza máxima que se colocará sobre la base del elevador es de  $15\text{ N} \approx 1.5\text{ kg}$ . Para dejar un factor de seguridad, en este cálculo se considera una masa de  $2\text{ kg} \approx 19.62\text{ kgf}$ . Se aplica la fórmula para determinar el torque de subida expresada en (1).

$$T_u = \frac{P d_p (\mu \pi d_p + L \cos \alpha)}{2 (\pi d_p \cos \alpha - \mu L)} \quad (1)$$

donde  $T_u$  es el torque de subida del sistema del husillo,  $P$  es la carga,  $d_c$  es el diámetro del cojinete (8 mm),  $\mu$  es el coeficiente de fricción de acero con acero lubricado cuyo valor es de 0.15 (Norton, 2011),  $d_p$  es el diámetro de paso de la tuerca (8 mm) y  $L$  es el paso o avance de la tuerca, cuyo valor es de 2 mm. Al sustituir los valores en (1) se tiene que el torque de subida es:

$$T_u = 0.03402\text{ kg} \cdot m = 3.402\text{ kg} \cdot \text{cm}.$$

Se puede observar que  $T_u < T_m$ , es decir, el torque que brinda el motor NEMA 17 es suficiente para elevar 2 kg de peso muerto para las pruebas de creep.

Para el control se usarán dos tarjetas electrónicas: el Arduino UNO y el Arduino NANO. El arduino UNO se empleó para el sistema de control de temperatura. Por otra parte, el arduino NANO se usó para el control de motor del elevador.

Asimismo, se tiene el sensor de temperatura. Este es una parte importante en la instrumentación, ya que con él se medirán las temperaturas elevadas (hasta  $100^\circ\text{C}$ ). Se eligió una *termocupla tipo K* (Figura 13) que es capaz de soportar temperaturas de hasta  $1000^\circ\text{C}$ . También se hace uso del controlador *max 6675* (Figura 14), el cual es un convertidor analógico-digital con resolución de 12 bits, con un rango de medición de  $0.25^\circ\text{C}$  hasta  $1024^\circ\text{C}$ .

### 2.5. Etapa 5: Desarrollo del producto

Finalmente, a partir del diseño conceptual obtenido en la etapa anterior, se procede a desarrollar el prototipo considerando los elementos seleccionados.

### 3. Descripción de partes elementales

Una de las partes esenciales del proyecto es la instrumentación. Aquí se identificarán los elementos a usar para el control de temperatura y motor. Como primera parte se tiene el motor *NEMA 17*, el cual se presenta en la Figura 11, es un motor bipolar a pasos capaz de generar un par de torsión de  $T_m = 42\text{ Ncm} = 4.2\text{ kgf} \cdot \text{cm}$ , lo cual hace que este motor sea ideal



Figura 13: Termocupla tipo K.

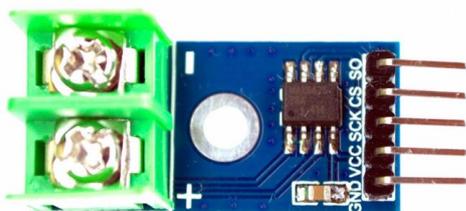


Figura 14: Controlador max 6675.

Una vez establecida la etapa de control, se procede a seleccionar la fuente de generación de calor. Se eligieron dos bobinas cerámicas de 1000 watts insertadas en un ladrillo cerámico para propagar el calor generado. Para integrar estos elementos al sistema, es necesaria una etapa de potencia entre las resistencias y la electrónica de control, por lo que se selecciona un relevador de estado sólido o *SSR* (Figura 15) de 60 A. El consumo de ambas bobinas es de 2000 W, por lo que, aplicando la fórmula de potencia (2), y considerando un voltaje de 127 V, el consumo de corriente de éstas es:

$$P = VI, \tag{2}$$

de (2) se determina que  $I = 15.75$  A; por lo tanto, se observa que la corriente demandada por las bobinas es menor que la corriente de trabajo del relevador.



Figura 15: Relevador SSR de 60 A.

#### 4. Identificación del sistema

Realizada la instrumentación y construida la cámara de temperatura, se procede a caracterizar el sistema por función de transferencia. Para lograrlo, es necesario obtener de modo experimental una gráfica entre el tiempo y la temperatura (Figura 16).

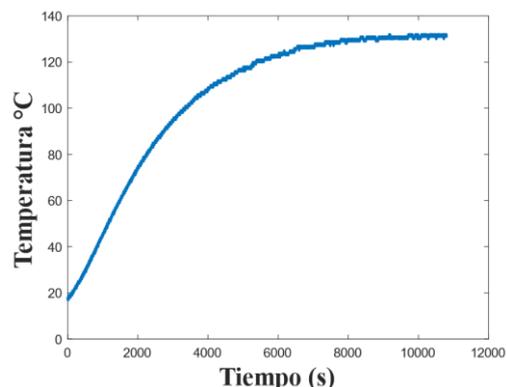


Figura 16: Datos experimentales obtenidos.

Teniendo la salida del sistema (temperatura) de forma experimental, se procede a exportar los resultados al software Matlab, en donde se hará un procesamiento de datos y, por medio de la herramienta de identificación de sistema se podrá estimar una función de transferencia que describa el comportamiento del sistema. A continuación, en la Figura 17 se presenta la identificación del sistema obtenida, en donde se ajustó la curva a un modelo de primer grado.

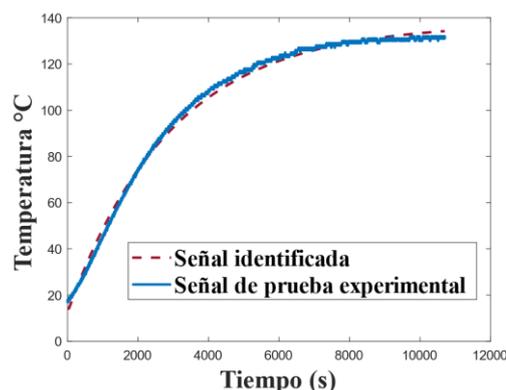


Figura 17: Función obtenida a través de la herramienta de identificación del sistema.

La identificación de este sistema se realizó con una aproximación al 93.77%, lo cual se puede considerar como aproximación aceptable. La función de transferencia obtenida es:

$$G(s) = \frac{1.3749}{2932.7s+1} (e^{-30s}). \tag{3}$$

Para aplicar el control en este sistema se empleó la herramienta de *PID Tune* del *simulink*. Se sintoniza un control PI con la función obtenida hasta observar que el sistema sea lo más rápido y estable posible. Se realizaron simulaciones con un control PI en continuo y con un PID en discreto, obteniendo casi el mismo resultado. Por lo tanto, por practicidad se optó por usar un control PI. Las constantes  $K_p$  y  $K_i$  del control PI obtenidas fueron 9.0320372007055 y 0.00369376424961309, respectivamente. Se encontró que con estos valores el sistema se estabiliza y llega al valor de entrada de una forma más rápida.

### 5. Diagrama y construcción

Para comprender más el diseño conceptual mostrado en la Figura 10, en la Figura 18 se muestra un diagrama del arreglo experimental para pruebas de creep.

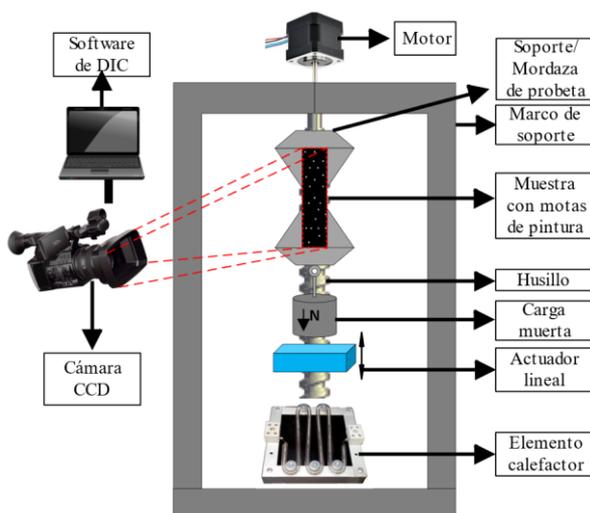


Figura 18: Diagrama de máquina de creep.

En este diagrama se presentan diferentes elementos esenciales para el funcionamiento de la máquina de creep.

El motor a pasos conectado al husillo se encarga de desplazar verticalmente una plataforma en donde se coloca un determinado peso. Mediante un gancho, el peso es soportado en la probeta, la cual está sujeta por mordazas en ambos extremos. La aplicación de la carga muerta en una prueba de creep se lleva a cabo cuando la carga muerta es desplazada hacia abajo hasta que finalmente cuelga de la probeta. Debido a que en este proyecto se aplica la técnica de correlación digital de imágenes, la probeta es moteada con pintura blanca en aerosol. Por lo tanto, este sistema de medición se coloca en la parte externa de la cámara de temperatura. Cabe mencionar que toda la parte de electrónica y algunos elementos esenciales para el funcionamiento de la máquina se encuentran en la parte externa. Esto se debe a que la temperatura interna máxima que alcanza la máquina supera la temperatura de funcionamiento de estos elementos.

En la Figura 19 se presenta la máquina construida e instrumentada montada en un experimento de creep.

### 6. Pruebas de fluencia lenta

Para comprobar el funcionamiento de la máquina, se realizaron pruebas de creep en un elastómero comercialmente común (Viton® o FKM). Es un caucho sintético de fluoropolímero habitualmente utilizado en la fabricación de juntas tóricas. Este elastómero es elegido por su alta resistencia térmica ya que puede trabajar a una temperatura de 205°C sin perder sus propiedades mecánicas (Flitney, 2017).

#### 6.1. Condiciones de pruebas

Las pruebas se llevaron a cabo a tres temperaturas diferentes (25, 50 y 80 °C). Las probetas fueron cortadas de una placa comercial de 3 mm de espesor en formas rectangulares de 80

mm de largo, 8.3 mm de ancho. Se emplearon dos cargas muertas con de 5 y 10 N, provocando un esfuerzo normal de 200 y 400 kPa, respectivamente. La validación de los resultados se hizo mediante pruebas de repetibilidad. Se llevaron a cabo tres pruebas de creep para cada esfuerzo y cada temperatura con una duración de 25 minutos. La medición de las deformaciones unitarias de creep se llevó a cabo mediante la implementación de la técnica de correlación digital de imágenes. Se ocupó de un equipo comercial de la marca Dantec Dynamics. La toma de imágenes se realizó a una velocidad de 1 fps. El software integrado al equipo permite medir las deformaciones unitarias sobre toda la superficie de la muestra para cada instante de adquisición.

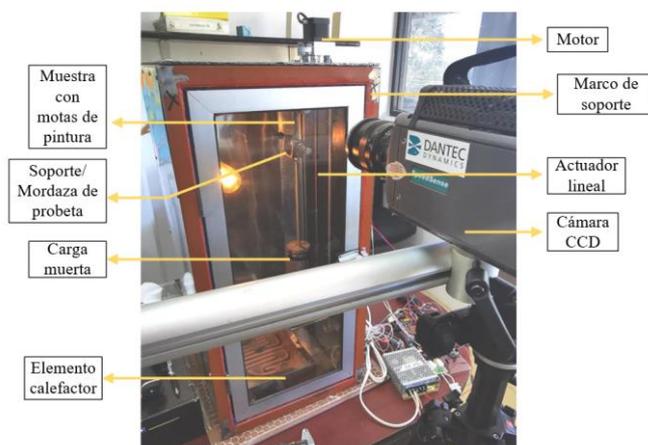


Figura 19: Arreglo experimental construido.

### 7. Resultados y análisis de resultados

#### 7.1. Resultados del control de temperatura

Con el control PI obtenido, se comprueba que el control es eficaz en simulación y se aplica al sistema real. Por adquisición de datos se obtuvo el control del sistema físico con el fin de poder corroborar su correcto funcionamiento. Se realizaron pruebas de control para 50, 80 y 100 °C. En las Figuras 20, 21 y 22 se ilustran los resultados obtenidos para estas temperaturas.

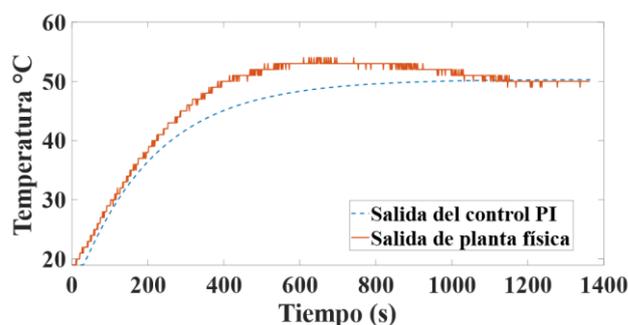


Figura 20: Gráfica de planta física de temperatura ambiente a 50°C y control PI.

Se observó que el control de temperatura programado para la cámara de temperatura funciona correctamente. En la Figura 20 se muestra una gráfica de la planta física, de temperatura ambiente a 50 °C, se observa que el control hace que la temperatura alcance los 50°C aproximadamente a los 400 segundos (Salida de planta física), se observa que tiene un leve

pico hasta 52°C aproximadamente y se estabiliza aproximadamente en el segundo 1200, también se aprecia que el sistema físico trata de comportarse como el control PI.

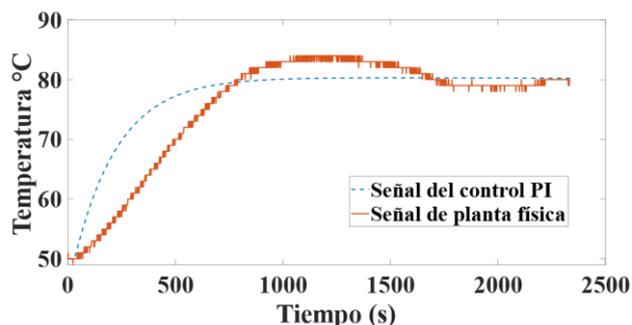


Figura 21: Gráfica de planta física de 50°C a 80°C y control PI.

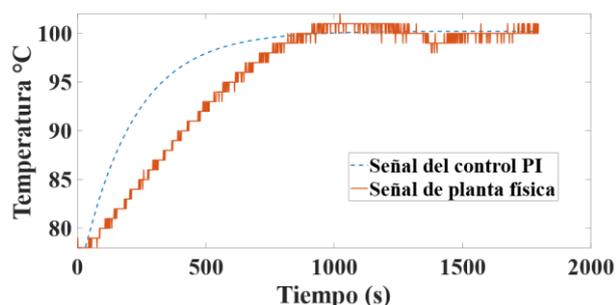


Figura 22: Gráfica de planta física de 79°C a 100°C y control PI.

En la Figura 21 se muestra el funcionamiento del control de temperatura de 50°C a 80°C, se observó que tiene un ligero pico hasta 83°C, pero se logra estabilizar aproximadamente a los 2200 segundos, sin embargo, el sistema tiene un comportamiento más lento al tratar de llegar a la temperatura deseada. Este comportamiento se puede dar por los elementos físicos, y al tratarse de una temperatura elevada es más lento el sistema. En la Figura 22 se muestra el funcionamiento del control de 79°C a 100°C, se observa casi el mismo comportamiento de la gráfica de la Figura 21, con la diferencia de que este presenta un pico menos agresivo logrando estabilizarse aproximadamente a los 1000 segundos. Estas gráficas nos dan una vista del comportamiento del control PI de temperatura programado. Al observar y analizar las gráficas obtenidas, se determinó que el control funciona de manera correcta con un margen de error +/- 5% y es viable para su uso en las pruebas de creep.

### 8. Resultados de pruebas de creep

En la Figura 23 se muestran las gráficas de las pruebas de repetibilidad para los dos esfuerzos de normales aplicados y para las tres temperaturas. El promedio de las desviaciones estándar de estas pruebas se reporta en la Tabla 2. De acuerdo a la Tabla 2 se puede observar que la mínima dispersión de datos se tiene en la prueba de 200 kPa y 50 °C, mientras que la máxima se obtuvo para la prueba a 400 kPa y 80 °C. La dispersión de los datos obtenidos se debe principalmente a los pequeños movimientos de cuerpo rígidos provocados por el sistema de aplicación de la carga. Se pudo constatar mediante un termómetro infrarrojo que la temperatura definida es

constante a lo largo de las pruebas, por lo que se puede descartar una variación de la temperatura. Otra posible razón de las dispersiones observadas es la poca iluminación de las probetas, lo cual puede provocar errores de medición con el equipo de DIC. Aun con estas pequeñas variaciones, se pudo obtener una clara tendencia de las deformaciones de creep durante el tiempo de las pruebas.

En la Figura 24 se muestran las gráficas de creep promediadas. Se puede observar que, como es de esperar, hubo un aumento en la deformación de creep cuando se aumenta la temperatura. A partir de estas curvas es posible obtener un modelo matemático para cada condición de esfuerzo y temperatura, como se describe en (González, 2021) y realizar caracterizaciones avanzadas como las realizadas en (Cabrera, 2022).

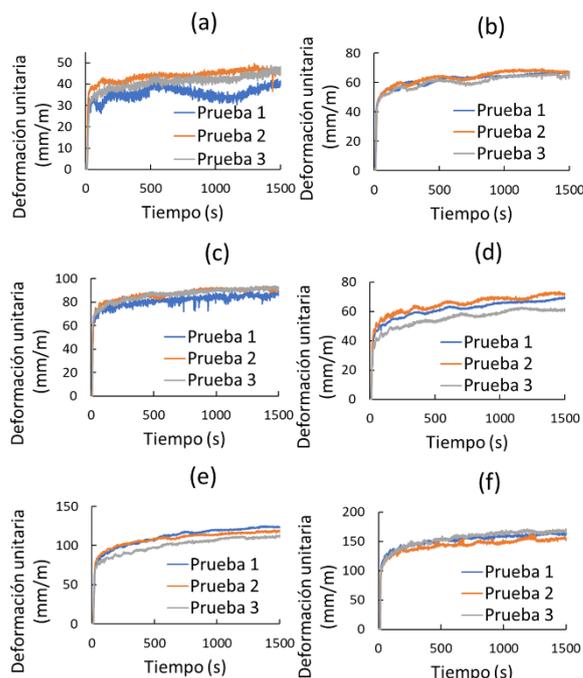


Figura 23: Pruebas de repetibilidad para: (a)-(c), 200 kPa a 25, 50 y 80 °C, respectivamente; (d)-(f) 400 kPa a 25, 50 y 80 °C, respectivamente.

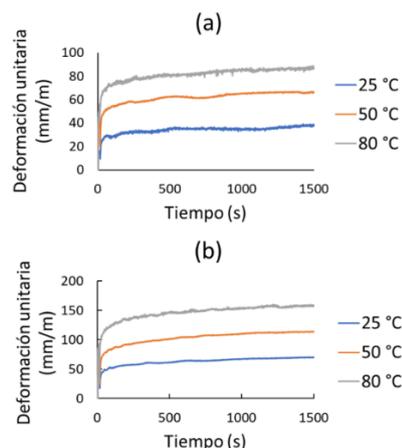


Figura 24: Curvas de creep promedio para (a) 200 kPa, (b) 400 kPa, a diferentes temperaturas.

Tabla 2: Desviaciones estándar de las deformaciones unitarias para las pruebas de repetibilidad (mm/m).

Esfuerzo (kPa)	25 °C	50 °C	80 °C
200	4.3	1.8	3.2
400	4.8	5.9	6.1

## 9. Conclusiones

En este trabajo se abordó el proceso de diseño de una plataforma para pruebas de creep en elastómeros que integra un sistema de control de temperatura, un sistema de aplicación de fuerza y un sistema de medición de deformaciones con correlación digital de imágenes. Se realizaron pruebas de repetibilidad para probar la efectividad de la máquina. Los resultados obtenidos muestran que el sistema de control de temperatura es estable y se obtienen curvas características de creep. Finalmente, se puede concluir que, con base en los resultados, el prototipo puede ser utilizado para caracterizaciones viscoelásticas en otros materiales elastoméricos.

## Referencias

- Al-Hiddabi S. A., Pervez T., Qamar S. Z., Al-Jahwari F. K., Marketz F., Al-Houqani S., van de Velden M., (2015). Analytical model of elastomer seal performance in oil wells. *Applied Mathematical Modelling* 39(10–11), 2836–2848. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.10.028>
- Amador-González E., Sotomayor-del-Moral J. A., Pascual-Francisco J. B., Farfán-Cabrera L. I., (2021). Medición y obtención de modelo de fluencia lenta en elastómeros. *Páidi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI* 9(17), 108–113. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7136>
- Brostow W., (2009). Reliability and prediction of long-term performance of polymer-based materials. *Pure Applied Chemistry* 81(3), 417–432. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-08-08-03>
- Cross N., (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. fourth ed., The McGraw-Hill Companies, England.
- Cui H. R., Tang G. J., Shen Z. B., (2016). Study on the viscoelastic poisson's ratio of solid propellants using digital image correlation method. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 41 (5), 835–843. <https://doi.org/10.1002/prep.201500313>
- D. Tschamuter, M. Jerabek, Z. Major, Time-dependent poisson's ratio of polypropylene compounds for various strain histories. *Materials Mechanics of Time-Dependent Materials Mechanics*, 15 (2010) 15–28. <https://doi.org/10.1007/s11043-010-9121-x>
- Delmastro J. I., (2006). *Diseño de máquina para ensayos de Creep, Creep-Fatiga y falla por carga sostenida*, tesis de doctorado, Universidad Nacional de Cuyo, Ciudad de Mendoza, Argentina.
- Ernst L.J., Zhang G.Q., Jansen K.M.B., Bressers H.J.L., (2003). Time- and Temperature-Dependent Thermo-Mechanical Modeling of a Packaging Molding Compound and its Effect on Packaging Process Stresses. *Journal of Electronic Packaging, Transactions of the ASME* 125(4), 539–548. <https://doi.org/10.1115/1.1604156>
- Farfán-Cabrera L. I., Pascual-Francisco J. B., (2022). An Experimental Methodological Approach for Obtaining Viscoelastic Poisson's Ratio of Elastomers from Creep Strain DIC-Based Measurements, *Experimental Mechanics* 62, 287–297. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00792-9>
- Farfán-Cabrera L. I., Pascual-Francisco J. B., Gallardo- Hernández E. A., Susarrey-Huerta O., (2018). Application of digital image correlation technique to evaluate creep degradation of sealing elastomers due to exposure to fluids. *Polymer Testing* 65, 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.11.017>
- Findley W. N., Lai J. S., Onaran K., (1989). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, first edition, Dover publications, New York, pp. 1–7.
- Flitney R. K., (2007). *Seals and Sealing Handbook*. fifth ed., Butterworth-Heinemann,
- Luo R., (2019). Creep prediction with temperature effect and experimental verification of rubber suspension components used in rail vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 233(11), 3950–3963. <https://doi.org/10.1177/0954406218809143>
- Luo R., (2015). Creep simulation and experiment for rubber springs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 230(2), 681–688. <https://doi.org/10.1177/1464420715576558>
- Norton R. L., (2011). *Diseño de Máquinas: Un Enfoque Integrado*. fourth ed., Pearson Educación, México.
- Pandini S., Pegoretti A., (2008). Time, temperature, and strain effects on viscoelastic Poisson's ratio of epoxy resins. *Polymer Engineering and Science* 48, 1434–1441. <https://doi.org/10.1002/pen.21060>
- Pascual-Francisco J. B., Farfán-Cabrera L. I., Susarrey-Huerta O., (2020). Characterization of tension set behavior of a silicone rubber at different loads and temperatures via digital image correlation. *Polymer Testing* 81, 106226. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106226>
- Sahu R., Patra K., Szpunar J., (2015). Experimental study and numerical modelling of creep and stress relaxation of dielectric elastomers. *Strain* 51, 43–54. <https://doi.org/10.1111/str.12117>
- Shaw M. T., Macnight W. J., (2005). *Introduction to Polymer viscoelasticity*, third edition, Wiley, New Jersey, pp. 19–23.
- Spathis G., Kontou E., (2012). Creep failure time prediction of polymers and polymer composites. *Composites Science Technology*, 72(9), 959–964. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2012.03.018>
- Ullman D., (2010). *The Mechanical Design Process*. fourth ed., The McGraw-Hill Companies, New York.