

## Medición y obtención de modelo de fluencia lenta en elastómeros Measuring and obtaining creep model in elastomers

E. Amador-González <sup>a</sup>, 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, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Ex-Hacienda de Santa Bárbara, C. P. 43830, Zempoala, Hidalgo, México.

<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 la técnica de correlación digital de imágenes para la medición de deformaciones unitarias en un material de caucho. El material estudiado se sometió a experimentos de fluencia lenta o creep de corto plazo, con una duración de 10 minutos. Las deformaciones unitarias medidas en ese periodo de tiempo fueron graficadas y, mediante la implementación de un modelo viscoelástico, se obtuvieron las funciones de creep, con las cuales es posible predecir las deformaciones para tiempos prolongados. Se comprobó que el comportamiento de creep en el caucho se ajusta al modelo viscoelástico de Burgers. Asimismo, los resultados obtenidos demostraron que la técnica de correlación digital de imágenes es una herramienta poderosa para la evaluación de viscoelasticidad en los elastómeros.

### Palabras Clave:

Correlación digital de imágenes, deformación unitaria, modelos de creep, viscoelasticidad.

### Abstract

In this paper, digital image correlation technique was implemented for strain measurement in a rubbery material. This material was tested under short-term creep experiments for 10 minutes. The strains measured were plotted and, by employing a viscoelastic model, creep functions were obtained, which can be used to predict strain for longer times. It was demonstrated that the creep behavior of rubber can be fitted to the Burgers viscoelastic model. Also, results obtained demonstrate that digital image correlation technique is a powerful tool for the assessment of viscoelasticity in elastomers.

### Keywords:

Digital image correlation, strain, creep models, viscoelasticity.

### 1. Introducción

En la actualidad, los polímeros han tenido un papel relevante en la industria y en la vida cotidiana. Particularmente, los elastómeros son ampliamente utilizados en la maquinaria y en la industria del automóvil debido a su alta capacidad de compliancia y sellado. Cuando están en servicio, estos elementos mecánicos generalmente se encuentran bajo ciertas condiciones de cargar o deformación durante periodos prolongados. En función de estas condiciones, las propiedades viscoelásticas de los elastómeros pueden estudiarse desde dos enfoques: 1) fluencia lenta (o creep), en donde el esfuerzo es constante en el tiempo y se miden las deformaciones, y 2) relajación de esfuerzos, en donde la deformación es constante y se mide la disminución de los esfuerzos. Estos dos enfoques de viscoelasticidad permiten evaluar el comportamiento dependiente del tiempo de los polímeros. Por lo tanto, el estudio de estos fenómenos permite complementar la caracterización mecánica de los elastómeros.

Convencionalmente, para medir las deformaciones en experimentos de creep, los instrumentos que se usan para la medición de las deformaciones son galgas extensométricas (Pandini y Pegoretti, 2011). Sin embargo, el uso de estas herramientas provoca errores de medición, particularmente porque los elastómeros son excesivamente deformables, y la colocación de galgas causa penetración en este tipo de materiales. Por lo tanto, se tiene que explorar otras técnicas de medición para evitar estos errores. Recientemente, se han empezado a utilizar nuevas y novedosas técnicas de medición como lo son: la técnica de Moiré (O'Brien et al., 2007), la interferometría de moteado láser (Yang et al., 2014), shearography (Pascual-Francisco et al., 2017) y correlación digital de imágenes (DIC) (Pascual-Francisco et al., 2020). Estas técnicas se conocen como técnicas de no contacto y de campo completo. Particularmente, la DIC ha adquirido mucha popularidad en las últimas décadas ya que permite la medición de desplazamientos y de deformaciones unitarias en 1D, 2D y 3D (Pan et al., 2009, Szczepek et al.,

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

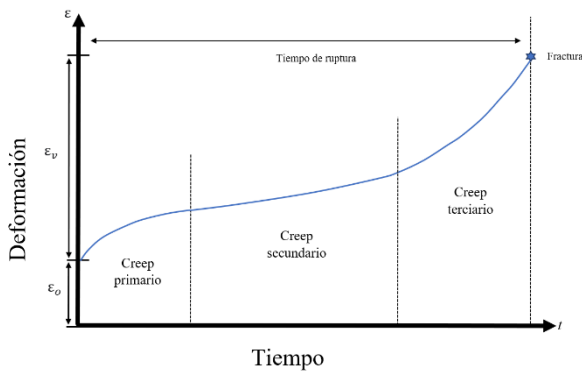
Correo electrónico: [enriqueamadoring@gmail.com](mailto:enriqueamadoring@gmail.com) (Enrique Amador González), [allan16@micorreo.upp.edu.mx](mailto:allan16@micorreo.upp.edu.mx) (Jonathan Allan Sotomayor-del Moral), [juanpascual@upp.edu.mx](mailto:juanpascual@upp.edu.mx) (Juan Benito Pascual Francisco),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

2011). Por tal motivo, la DIC es ampliamente usada en la industria y en la mecánica experimental (Castillo et al., 2019, Górszczyk et al., 2019, Malesa et al., 2013, Malesa et al., 2015). En este trabajo se usa esta técnica para medir deformaciones unitarias uniaxiales en experimentos de creep de corto plazo (10 minutos) en un material de caucho (VMQ), para diferentes estados de esfuerzo axial. A partir de los datos obtenidos se determinan los modelos viscoelásticos de las deformaciones en el tiempo. La obtención de los modelos de creep son útiles para predecir las deformaciones unitarias para tiempos posteriores. Los resultados obtenidos demuestran que la técnica DIC es efectiva en la medición de deformaciones de creep en elastómeros. Asimismo, se pudo observar que el comportamiento del caucho estudiado se ajusta al modelo viscoelástico de 4 elementos de Burgers para Creep.

**2. Teoría**

**2.1. Creep**

Uno de los conceptos más importantes en el estudio de materiales viscoelásticos es la fluencia lenta, mejor conocida como Creep, que se puede definir como la deformación lenta y continua de un material cuando está sujeto a la acción de esfuerzos constantes durante largos periodos de tiempo. La respuesta en función de la deformación, como se ejemplifica en la Figura 1, se divide en tres etapas; 1) Creep primario, región en la cual se genera una deformación instantánea ( $\epsilon_o$ ) y posteriormente comienza una curva de deformación viscosa ( $\epsilon_v$ ), la cual se caracteriza por transcurrir de forma muy lenta y decreciente, formando una concavidad negativa; 2) Creep secundario, en donde la deformación viscosa se estabiliza, de modo que la velocidad de deformación se vuelve casi constante; 3) Creep terciario, en esta última sección la curva de deformación viscosa incrementa de forma crítica hasta ocasionar la ruptura.



**Figura 1: Gráfica del comportamiento de Creep**

Un experimento de creep completo, es decir que llegue a la ruptura del material estudiado, debe cumplir con las tres características descritas. Sin embargo, en numerosos materiales los experimentos pueden durar miles de horas, es por ello que existen modelos matemáticos mediante los cuales se puede predecir la curva de comportamiento tras recabar únicamente los datos de la primera etapa de creep.

**2.2. Modelos de viscoelasticidad**

Por definición, un elemento viscoelástico es el resultado de combinar en un mismo instante de tiempo los fenómenos de elasticidad y viscosidad. El comportamiento elástico se presenta en materiales cuya respuesta en el tiempo es de tipo lineal elástica y comúnmente se representa por medio de un resorte o muelle. Por lo tanto, si el resorte es excitado con un esfuerzo, mediante la ley

de Hooke se puede caracterizar matemáticamente al elemento. Por otra parte, el comportamiento viscoso se presenta en materiales cuya respuesta se encuentra en función del tiempo y comúnmente se representa mediante un cilindro embolo o amortiguador. Al excitar el elemento, la ley de la viscosidad de Newton describe de forma adecuada el comportamiento del mismo. Con base en estos elementos, y dependiendo de la configuración en que se coloquen, se pueden crear numerosos de modelos matemáticos. Los modelos fundamentales de viscoelasticidad son los modelos de Maxwell, Kelvin-Voigt y Burgers para el fenómeno de fluencia lenta o Creep.

**2.3. Modelo de Maxwell**

Es uno de los modelos fundamentales para la caracterización de los fenómenos viscoelásticos. Se conforma de un resorte y un amortiguador, conectados en serie. Bajo esta configuración, la deformación total del sistema ( $\epsilon$ ) equivale a la suma de la deformación plástica ( $\epsilon_o$ ) y viscosa ( $\epsilon_v$ ), es decir:

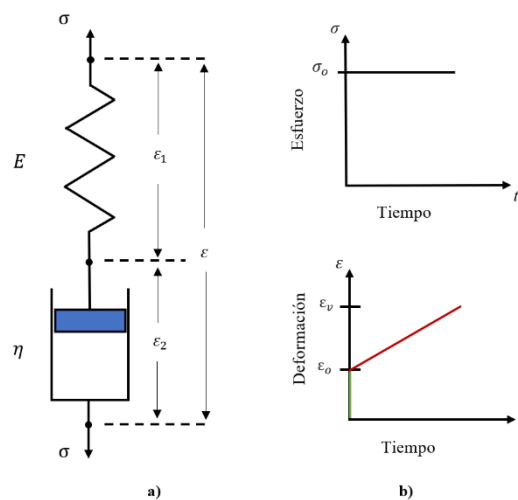
$$\epsilon = \epsilon_o + \epsilon_v \tag{1}$$

Asimismo, la magnitud del esfuerzo aplicado ( $\sigma$ ) en cada elemento es la misma. Por lo tanto, al sustituir la ley de Hooke y la ley de viscosidad de Newton, se obtiene la ecuación general del modelo de Maxwell; la cual consiste en una ecuación diferencial en términos de la deformación.

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \tag{2}$$

Dado que en los fenómenos de fluencia lenta el esfuerzo se mantiene constante ( $\sigma = cte = \sigma_o$ ), al integrar la ecuación diferencial se obtiene una igualdad que representa la ecuación general del modelo de Maxwell para comportamientos de fluencia.

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_o}{\eta} t + \epsilon_o \tag{3}$$



**Figura 2: Representación del modelo de Kelvin-Voigt y su respuesta en términos de  $\epsilon$  a causa de un esfuerzo  $\sigma_o$ .**

Esto implica que, cuando el material trabaja bajo condiciones de esfuerzo constante, se produce una respuesta de deformación inmediata debido al elemento elástico, seguido de una respuesta lineal creciente en el tiempo, debido a elemento viscoso. Esto se aprecia con mayor claridad en la en la Figura 2. La Figura 2a,

representa la configuración en serie de los elementos presentes en el modelo de Maxwell. Por su parte en la Figura 2b, la primera gráfica representa el esfuerzo constante aplicado en un intervalo de tiempo, mientras que la segunda gráfica muestra el efecto del esfuerzo ( $\sigma_0$ ) en el modelo; donde el segmento verde corresponde a la deformación instantánea y el segmento rojo a la deformación viscosa.

Este modelo explica la deformación elástica inicial que sufre un material, sin embargo, no describe de manera adecuada la fluencia viscosa.

2.4. Modelo de Kelvin-Voigt

Consiste en la unión en paralelo de un resorte y amortiguador. Debido a esta configuración, la magnitud total del esfuerzo en el sistema equivale a la suma de los esfuerzos en elementos individuales.

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{4}$$

A demás, la magnitud de la deformación total ( $\varepsilon$ ) es la misma que experimenta el componente viscoso ( $\varepsilon_2$ ) y el elemento elástico ( $\varepsilon_1$ ). Al sustituir directamente las leyes de Hooke y la ley de viscosidad de Newton en las condiciones anteriores, se obtiene la ecuación general del modelo de Kelvin-Voigt.

$$\sigma = E\varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \tag{5}$$

Para estudiar los fenómenos de fluencia, de manera análoga al caso anterior, el esfuerzo se mantiene constante ( $\sigma = cte = \sigma_0$ ), de modo que, al sustituir el valor del esfuerzo y resolver la ecuación resultante (una ecuación diferencial no homogénea de primero orden), se obtiene la igualdad que representa la ecuación general del modelo de Kelvin- Voigt para el comportamiento fluencia lenta.

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - e^{-\frac{E t}{\eta}}\right) \tag{6}$$

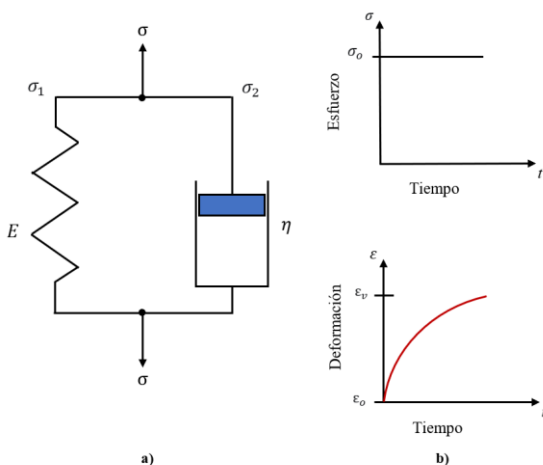


Figura 3: Representación del modelo de Kelvin-Voigt y su respuesta en términos de  $\varepsilon$  a causa de un esfuerzo  $\sigma_0$ .

De manera gráfica esto representa que, cuando se trabaja en condiciones de esfuerzo constante, surge una fluencia creciente con el paso del tiempo de tipo exponencial, sin manifestar una deformación instantánea. En la Figura 3 se expone tal comportamiento. La sección izquierda (Figura 3a) muestra la

configuración en paralelo de los elementos elástico y viscoso, como indica el modelo de Kelvin- Voigt. Por su parte, en la sección derecha (Figura 3b), el primer gráfico señala la aplicación de esfuerzo un constante ( $\sigma_0$ ), cuya repercusión se aprecia en el segundo gráfico; una curva exponencial de color rojo que equivale al comportamiento de creep viscoso. Por lo tanto, este modelo representa muy bien los el fenómeno de fluencia viscoso, sin embargo, se ve limitado al no caracterizar el comportamiento elástico.

2.5. Modelo de Burgers

Este modelo toma como base los de Maxwell y Kelvin, es decir se conforma de 4 elementos. Su configuración consiste en un modelo de Maxwell conectado en serie con un modelo de Kelvin (Figura 4a), por lo que la deformación total del sistema corresponde a la suma de las deformaciones en cada modelo. Al sumar las ecuaciones generales de los modelos simples, se obtiene la ecuación característica para el comportamiento de creep (Findley et al., 1989).

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E_1} + \frac{\sigma_0}{\eta_1} t + \frac{\sigma_0}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}\right) \tag{7}$$

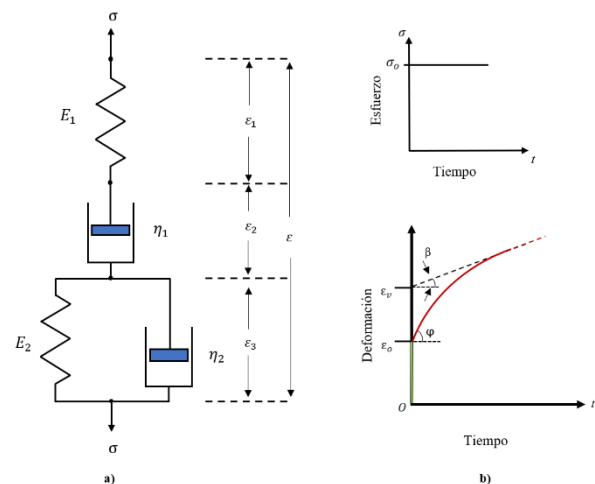


Figura 4: Representación del modelo de Burger y su respuesta en términos de  $\varepsilon$  a causa de un esfuerzo  $\sigma_0$ .

En la Figura 4b se indica mediante un código de colores la correlación entre los elementos de la ecuación característica y la respuesta en términos de deformación, a causa del escuerzo constante. El primer parámetro de la ecuación corresponde a la deformación instantánea, segmento verde, el segundo parámetro corresponde a la pendiente formada en la zona alejada de la curva de fluencia con crecimiento exponencial, segmento punteado de color rojo, el cuarto parámetro corresponde a la deformación máxima capaz de conseguir el sistema desde la deformación instantánea hasta tomar un valor asintótico en la pendiente, segmento entre la línea punteada negra y el segmento verde, y el cuarto parámetro corresponde a la geometría de la curva exponencial hallada entre la deformación instantánea y la pendiente lineal, segmento rojo sin puntear. Cabe señalar que, la gráfica tiempo-deformación es de suma importancia, ya que la información que proporciona permite calcular las constantes elásticas, es decir  $E_1$  y  $E_2$ , y las constantes viscosas, es decir  $\eta_1$  y  $\eta_2$ , mediante las siguientes ecuaciones:

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{0\varepsilon_0} \tag{8}$$

$$E_2 = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o \varepsilon_p} \quad (9)$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma_o}{\tan(\beta)} \quad (10)$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_o}{\tan(\phi) - \tan(\beta)} \quad (11)$$

Con base en este modelo es posible obtener una respuesta viscoelástica de mayor exactitud para el comportamiento de creep.

### 3. Experimentación

#### 3.1. Instrumento de medición

En este trabajo se empleó la técnica de medición de correlación digital de imágenes (DIC, por sus siglas en inglés). La DIC es una técnica de medición óptica de campo completo y de no contacto que se ha venido desarrollando durante las últimas tres décadas. Se compone de un sistema de adquisición de imágenes y un software de procesamiento de imagen. Se basa en la comparación de imágenes sucesivas y el seguimiento de puntos o marcas hechas sobre la superficie del objeto bajo estudio. Aplicando algoritmos de correlación puede proveer el campo de desplazamientos y de deformaciones unitarias para diferentes etapas de deformación. En este trabajo se utilizó equipo comercial de DIC. Este equipo consta de una cámara CCD y un software de procesamiento de imágenes.

#### 3.2. Material

El material que se estudió en este trabajo fue un caucho de silicona (VMQ). Este material fue elegido para su estudio porque es de los más comúnmente utilizados como sellos dinámicos o estáticos, y es de los más fáciles de adquirir. Las muestras que se probaron, cuyas dimensiones son de 60x5 mm, fueron extraídas de una lámina comercial de 2 mm de espesor, de color negro. Las probetas fueron rociadas con pintura blanca en spray para generar los patrones de moteado que se requiere para la técnica de medición DIC.

#### 3.3. Arreglo experimental

Para llevar a cabo la experimentación se utilizó el arreglo experimental que se muestra en la Figura 5. Este arreglo se conforma de dos partes principales: el sistema de aplicación de la carga y el sistema de medición. En el sistema de aplicación de la carga se tiene un marco de carga, sobre el cual se sujeta la muestra. En el extremo inferior de la probeta se coloca la carga muerta, la cual garantizará un esfuerzo axial constante a lo largo de la prueba. La colocación de la carga muerta se lleva a cabo mediante un mecanismo hidráulico para evitar lo más posible las vibraciones, las cuales pueden provocar errores en las mediciones. Inicialmente, antes de la prueba, la pesa descansa sobre el cilindro hidráulico 1 y es sujeta a la muestra mediante un clip y una cuerda flexible. Cuando se inicia la prueba, el cilindro 2 es desplazado hacia arriba y el cilindro 1 hacia abajo, de tal manera que la carga es completamente transferida sobre la probeta. Cuando concluye la prueba, el émbolo del cilindro 2 es empujado hacia abajo y hará que el cilindro 1 retire la carga de la probeta. Por otra parte, el sistema de medición lo conforma el equipo de correlación digital de imágenes.

#### 3.4. Condiciones de prueba

En este trabajo se realizaron pruebas de creep de corto plazo (10 minutos) a temperatura ambiente (22 °C), para tres esfuerzos normales diferentes. Durante las pruebas, el software capturó imágenes a una velocidad de dos cuadros por segundo y las almacena en la memoria de la computadora para su posterior

procesamiento. Las cargas utilizadas fueron de 1, 2 y 3 N, provocando en las probetas un esfuerzo axial de 98.1, 196.2, 294.3 kPa, respectivamente.

Para cada esfuerzo se realizaron tres pruebas de repetibilidad, utilizando probetas diferentes. La sincronización de la adquisición y la aplicación de la carga muerta se hizo manualmente.

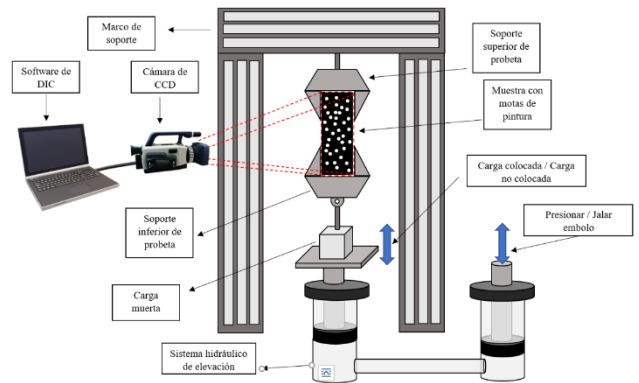


Figura 5: Arreglo experimental para pruebas de Creep.

### 4. Resultados y discusiones

#### 4.1. Creep Experimental

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la distribución de deformaciones obtenidas con la técnica DIC. Se crea una máscara rectangular sobre la imagen de la probeta y se obtiene un promedio de la deformación para cada medición. Al graficar el valor de las deformaciones para diferentes tiempos finalmente se obtiene la curva de creep para las tres cargas aplicadas.

En la Figura 7 se muestran los resultados de repetibilidad de las curvas de creep para los tres esfuerzos en la dirección axial ( $\varepsilon_y$ ). Las curvas obtenidas muestran una tendencia similar, por lo que las pruebas de repetibilidad arrojaron resultados similares, con un promedio de desviación estándar de 2.1, 1.7 y 1.2 mm/m, respectivamente para los tres esfuerzos.

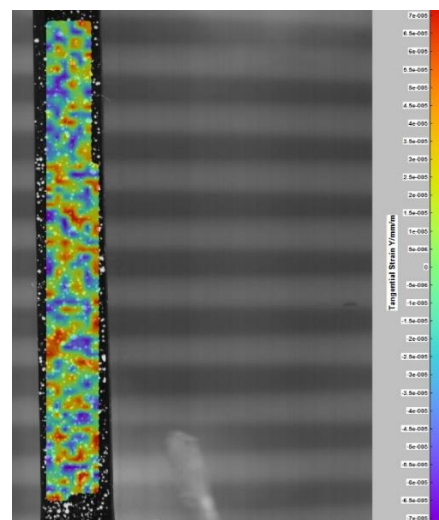
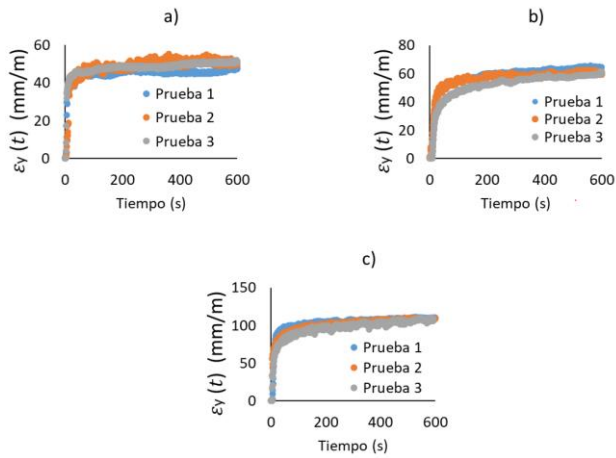


Figura 6: Ejemplo de mapa de deformaciones unitarias obtenidas con DIC.

Las ligeras diferencias entre las pruebas de repetibilidad pueden deberse a factores como: 1) movimientos de cuerpo rígido, generados durante la aplicación de la carga muerta; 2) la no



homogeneidad de los patrones de moteado en las probetas; 3) el campo de visión de la cámara CCD.



**Figura 7: Resultados de las pruebas de repetibilidad para los tres estados de esfuerzo considerados: a) 98.1 kPa, b) 196.2 kPa, c) 294.3 kPa.**

4.2. *Determinación de modelos*

Con la finalidad de obtener una curva representativa de creep para cada carga, se obtienen los promedios de las pruebas de repetibilidad. A partir de cada curva representativa se puede obtener el modelo de creep empleando el modelo de Burgers de cuatro elementos. Debido a que el comportamiento de creep del material estudiando se asemeja al modelo de 4 elementos de Burgers, las ecuaciones a obtener serán los correspondientes este modelo. De acuerdo al modelo de Burgers, se deben obtener los parámetros elásticos y viscosos de las curvas obtenidas experimentalmente, como se describió en la sección anterior. Para encontrar el parámetro elástico  $E_1$ , se debe medir el segmento  $O\varepsilon_0$  y usar (8).  $E_2$  se calcula con (9), para lo cual se debe identificar el punto  $\varepsilon_v$ , en el cual pasa la línea discontinua tangente a la curva de creep. Para  $\eta_1$ , se debe medir el ángulo  $\beta$  en la gráfica y usar (10). Finalmente,  $\eta_2$  se calcula con (11), para lo cual se debe medir el ángulo  $\phi$ , que es el ángulo que forma la parte viscosa inicial de la gráfica. Los parámetros obtenidos para los tres esfuerzos se reportan en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de Ceep

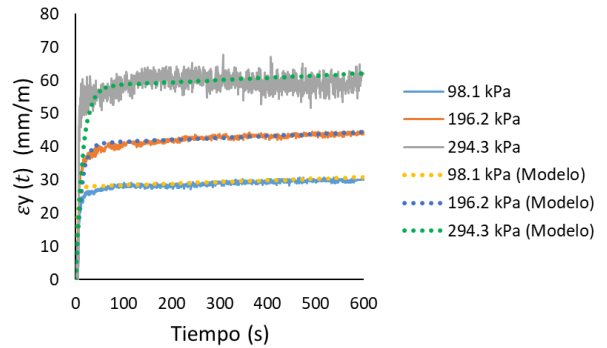
Esfuerzo (kPa)	$E_1$	$E_2$	$\eta_1$	$\eta_2$
98.1	5.03	11.60	20437.50	45.49
196.2	5.60	5.96	15822.58	13.54
294.3	5.25	8.59	31308.51	111.55

Sustituyendo estos parámetros en el modelo de Burgers se obtienen finalmente las funciones de creep para los tres esfuerzos. En la Tabla 2 se muestran estas ecuaciones.

Tabla 2. Funciones de Creep obtenidas

Esfuerzo (kPa)	Función de creep
98.1	$\varepsilon_y(t) = 19.5 + 0.0048 t + 8.45(1 - e^{-0.255 t})$
196.2	$\varepsilon_y(t) = 35 + 0.0124 t + 32.87(1 - e^{-0.44 t})$
294.3	$\varepsilon_y(t) = 56 + 0.0094 t + 45.9(1 - e^{-0.077 t})$

En la Figura 8 se muestran las gráficas de los modelos obtenidos y los resultados experimentales. Se puede observar que las curvas de los modelos se ajustan muy bien a los resultados experimentales.



**Figura 8: Gráfica de deformaciones de creep experimentales y de los modelos.**

Se puede observar además que, bajo los esfuerzos considerados en este trabajo, el material tiene un comportamiento viscoelástico lineal, ya que las deformaciones son proporcionales al esfuerzo. La deformación máxima para 98.1 kPa es alrededor de 30 mm/m; luego, para 196.2 kPa, la deformación máxima es de 45 mm/m, y para 294.3 kPa el máximo es 60 mm/m. Por lo tanto, el incremento entre los esfuerzos consecutivos es de 15 mm/m, comprobándose la condición de viscoelasticidad lineal (Findley et al., 1989, Lakes, 1999).

5. **Conclusiones**

En este trabajo se implementó la técnica de correlación digital de imágenes para la medición de deformaciones unitarias uniaxiales en creep para un material de caucho. Se realizaron experimentos de creep de corto plazo aplicando tres valores diferentes de esfuerzo normal. A partir de los resultados experimentales se obtuvo, mediante el modelo de Burgers, las funciones de deformación unitaria en el tiempo para las tres cargas usadas. Se observó que los modelos obtenidos se ajustan a los resultados experimentales. A partir de las funciones de creep obtenidas es posible determinar las deformaciones unitarias para periodos de tiempo prolongados. Por lo tanto, la importancia de este trabajo recae precisamente en la posibilidad de predecir deformaciones para periodos largos, a partir de experimentos de corto plazo. Asimismo, los modelos de creep obtenidos también pueden ser útiles en situaciones en donde el efecto viscoelástico es considerado en el diseño de elementos mecánicos hechos de material de caucho. Finalmente, la metodología implementada en este trabajo puede ser extendida para el estudio de otros materiales elastoméricos y para otras propiedades viscoelásticas como la relación de Poisson viscoelástica, lo cual es un tópico de interés en la mecánica experimental.

Referencias

Castillo E. R., Allen T., Henry R., Griffith M., Ingham J., (2019). Digital image correlation (DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civil infrastructure. *Compos. Struct.*, 212, 43-57. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.024  
 Findley W.N., Lai J. S., Onaran K., (1989). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. Dover publications, New York.

- Górszczyk, J., Malicki, K., Zych, T., (2019). Application of Digital Image Correlation (DIC) Method for Road Material Testing. *Materials*, 12(15), 2349.  
DOI: 10.3390/ma12152349
- Lakes, R.S., (1999). *Viscoelastic Solids* (1st ed.). CRC Press, Boca Raton.  
DOI: 10.1201/9781315121369
- Malesa M., Malowany K., Tomczak U., Siwek B., Kujawińska M., Siemińska-Lewandowska Anna., (2013). Application of 3D digital image correlation in maintenance and process control in industry. *Comput. Ind.*, 64 (9), 1301-1315.  
DOI: 10.1016/j.compind.2013.03.012
- Malesa M., Kujawińska M., Malowany K., Lusa T., (2015). Application of Multi-camera DIC System for Measurements of Industrial Structures. *Proc. Eng.*, 114, 453-460.  
DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.092
- O'Brien D.J., Sottos N.R., White S.R., (2007). Cure-dependent Viscoelastic Poisson's Ratio of Epoxy. *Exp. Mech.* 47, 237–249.  
DOI: 10.1007/s11340-006-9013-9.
- Pan B., Qian K., Xie H., Asundi A., (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Meas. Sci. Technol.* 20(6), 062001.  
DOI: 10.1088/0957-0233/20/6/062001
- Pandini S., Pegoretti A., (2011). Time and temperature effects on Poisson's ratio of poly(butylene terephthalate). *Exp. Polym. Let.* 5(8), 685-697.  
DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.67
- Pascual-Francisco J.B., Barragán-Pérez O., Susarrey-Huerta O., Michtchenko A., Martínez-García A., Farfán-Cabrera L.I., (2017). The effectiveness of shearography and digital image correlation for the study of creep in elastomers. *Mater. Res. Express.* 4 (11), 115301.  
DOI: 10.1088/2053-1591/aa94ee
- Pascual-Francisco J. B., Farfan-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. *Polym. Test.* 81, 106226.  
DOI: 10.1016/j.polymertesting.2019.106226
- Szczepanek D., Malesa M., Kujawińska M., (2011). 2D and 3D Digital Image Correlation Method and Its Application for Building Structural Elements Investigation. In: Jabłoński R., Březina T. (eds) *Mechatronics*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 769-776.  
DOI: 10.1007/978-3-642-23244-2\_92.
- Yang, L., Xie, X., Zhu, L., (2014). Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement. *Chin. J. Mech. Eng.* 27, 1–13.  
DOI: 10.3901/CJME.2014.01.001