



## Efecto del glutaraldehído en las propiedades viscoelásticas de hidrogeles de carboximetilcelulosa

### Effect of the glutaraldehyde on the viscoelastic properties of carboxymethyl cellulose hydrogels

Juárez-Hernández Jocelyn Arlet  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Departamento de Mecatrónica, México  
Correo: [2131219914@micorreo.upp.edu.mx](mailto:2131219914@micorreo.upp.edu.mx)  
<https://orcid.org/0009-0003-3137-3790>

Subervier-Ortiz Laura  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Laboratorio de Nanotecnología, Sistemas Biológicos y Aplicaciones Industriales, México  
Correo: [subervier@upp.edu.mx](mailto:subervier@upp.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0001-5350-127X>

Villanueva-Ibáñez Maricela  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Laboratorio de Nanotecnología, Sistemas Biológicos y Aplicaciones Industriales, México  
Correo: [villanueva@upp.edu.mx](mailto:villanueva@upp.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-3209-8340>

Farfan-Cabrera Leonardo Israel  
Tecnológico de Monterrey  
Escuela de Ingeniería y Ciencias, México  
Correo: [farfanl@tec.mx](mailto:farfanl@tec.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-5008-5888>

Pascual-Francisco Juan Benito  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Departamento de Mecatrónica, México  
Correo: [juanpascual@upp.edu.mx](mailto:juanpascual@upp.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-8812-7190>

Jaramillo-Loranca Blanca Estela  
Universidad Politécnica de Pachuca  
Laboratorio de Nanotecnología, Sistemas Biológicos y Aplicaciones Industriales, México  
Correo: [bejarami@upp.edu.mx](mailto:bejarami@upp.edu.mx)  
<https://orcid.org/0000-0003-3812-5426>

#### Resumen

En este trabajo se estudia el comportamiento de fluencia lenta (creep) en hidrogeles de carboximetilcelulosa con diferentes niveles de concentración de glutaraldehído (3 %, 4 % y 5 %) como entrecruzante. Se realizaron pruebas de fluencia lenta a 20 °C con un esfuerzo constante de tensión de 0.025 MPa, con duración de 20 minutos. La medición de las deformaciones unitarias a lo largo del tiempo se llevó a cabo con un equipo de correlación digital de imágenes, el cual permite la medición de deformaciones de campo completo. Las curvas características de creep obtenidas se ajustaron al modelo reológico de Burgers para determinar los parámetros viscoelásticos de los hidrogeles estudiados. Comparando los parámetros viscoelásticos de los hidrogeles, se observó que el porcentaje de concentración de glutaraldehído afecta las propiedades elásticas y viscosas de este tipo de materiales. En general, se observó una disminución de los parámetros elásticos y viscosos con el aumento de la concentración de glutaraldehído.

**Descriptor:** Hidrogel, carboximetilcelulosa, glutaraldehído, curva de creep, parámetros viscoelásticos.

#### Abstract

In this work the creep behavior of carboxymethyl cellulose hydrogels with different concentration of glutaraldehyde (3 %, 4 % and 5 %) as crosslinker is studied. Creep tests at 20 °C, with a tension constant stress of 0.025 MPa and 20 minutes-duration were carried out. Creep strain measurement during the tests time was conducted using the digital image correlation technique, which allows to measure the whole-field strain maps. The obtained characteristic creep curves were fitted to the rheological burgers model in order to determine the viscoelastic parameters of the tested hydrogels. By comparing the calculated viscoelastic parameters, it was observed that the concentration of glutaraldehyde as crosslinker affects the elastic and viscous properties of the hydrogels. Overall, it was found that the viscoelastic parameters of the hydrogels decrease with the percentage of glutaraldehyde.

**Keywords:** Hydrogel, carboxymethyl cellulose, glutaraldehyde, creep curve, viscoelastic parameters.

## INTRODUCCIÓN

Los hidrogeles son materiales viscoelásticos cuyas propiedades se ven influenciadas por la variación en la concentración tanto del polímero como del agente entrecruzante (Cacopardo *et al.*, 2019). Son polímeros hidrofílicos tradicionalmente reticulados, cuya principal función es su capacidad de hinchamiento y de retención de enorme volumen de agua (Michailova, 2000). Los hidrogeles se forman por el entrecruzamiento de polímeros naturales o sintéticos que integran una red tridimensional mediante enlaces covalentes o interacciones físicas. Los hidrogeles derivados de celulosa, particularmente la carboximetilcelulosa (CMC), son ampliamente usados en las industrias de alimentos y farmacéutica, principalmente por sus propiedades espesantes y gelificantes. Su popularidad se debe a que son materiales no tóxicos, de fácil manejo y compactación, relativamente baratos, estables, y disponibles en varios grados de viscosidad (Yang, 2022). Para su obtención es necesario elegir un polímero y un agente entrecruzante que conforme la red con una estructura definida (Worthington *et al.*, 2015). Dependiendo de la aplicación deseada, se puede modificar la concentración del polímero o el agente entrecruzante. De esta manera, se puede regular y manipular su estructura y función (Nasution *et al.*, 2022).

Los métodos para la obtención de los hidrogeles generalmente se basan en el entrecruzamiento físico y químico. El primero ocurre sin la necesidad de un agente reticulante y para que ocurra la síntesis, el hidrogel se encuentra en una fase líquida y cambia a gel ocasionado por un cambio en el ambiente, como la concentración iónica, el pH o la temperatura (Sánchez *et al.*, 2022). El segundo ocurre a través de enlaces covalentes y tales procesos son irreversibles. Pueden ser por medio de reacciones enzimáticas, como un agente entrecruzante, mediante radiación, polimerización o por reacciones químicas (Aswathy *et al.*, 2020). Los hidrogeles también pueden formar compósitos, resultado de la combinación de materiales orgánicos, inorgánicos y poliméricos, con la finalidad de ampliar su campo de aplicación. A estos hidrogeles se les pueden incorporar aditivos dentro de su estructura para conferirles nuevas propiedades como una respuesta magnética, eléctrica, mecánica, actividad antibacteriana, entre otros (Antonio *et al.*, 2015).

La caracterización de los hidrogeles puede ser en términos de su estructura, de su composición química (Patiño, 2020; Ramirez *et al.*, 2016), sus características físicas y reológicas (Garzón *et al.*, 2009; Puente *et al.*, 2022) y de sus propiedades mecánicas (Czerner *et al.*, 2015; Garzón *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2020). Las propiedades

reológicas de los hidrogeles son de suma importancia cuando se emplean en una aplicación específica, ya que de estas depende el comportamiento o resistencia del material (Uzuner *et al.*, 2016).

Numerosos estudios se han centrado en la caracterización del módulo cuasiestático elástico (E), revelando que su aumento está asociado con un incremento en la concentración de agente entrecruzante. Mattei *et al.* (2017) concluyeron que, para una concentración de polímero constante, los hidrogeles más reticulados no sólo exhiben mayor rigidez, sino que también experimentan cambios concomitantes en su viscoelasticidad. Este aumento en la rigidez resulta de los incrementos en los módulos elásticos, tanto instantáneos como de equilibrio, y conlleva una transición en su comportamiento viscoelástico hacia uno más elástico, todo ello en respuesta al aumento en la concentración de glutaraldehído (GA), que conduce a un mayor grado de reticulación (Mattei *et al.*, 2017). Esto guarda una relación directa con la porosidad del hidrogel: Un aumento en la cantidad de agente entrecruzante hace que los materiales se vuelvan más porosos, frágiles, con menor capacidad de gelificación y una reducción en su fuerza intrínseca (Selvakumaran *et al.*, 2016).

En este trabajo se propone el estudio del comportamiento viscoelástico de hidrogeles de carboximetilcelulosa con diferentes porcentajes de concentración de GA como entrecruzante, en términos de la fluencia lenta (creep). Asimismo, se evalúa el efecto que produce la concentración de GA en los parámetros viscoelásticos de los hidrogeles hidratados.

## FENÓMENO DE FLUENCIA LENTA

El fenómeno de fluencia lenta o creep ocurre cuando un material está sometido bajo la acción de un esfuerzo normal (en tensión o compresión) durante periodos prolongados y a una temperatura constante. El material bajo estas condiciones tiende a deformarse continuamente e incluso puede llegar a romperse si el tiempo es suficientemente largo. La curva completa de creep de un material se divide en tres etapas (Findley *et al.*, 1989). La primera se conoce como creep primario o primera etapa de creep. En esta etapa ocurre la deformación instantánea, seguida de una deformación que aumenta a una tasa decreciente. Después, en la etapa secundaria, la deformación crece a una velocidad constante, que se caracteriza por un crecimiento lineal. Por último, en la tercera etapa o fluencia terciaria, la deformación se produce a un ritmo creciente y termina en la fractura del material

Para caracterizar un material viscoelástico en términos de creep, se pueden realizar pruebas de corta o lar-

ga duración. Una prueba de creep consiste en someter una probeta del material bajo un esfuerzo constante, el cual se puede lograr colocando un peso muerto a la probeta (Farfan & Pascual, 2022). La medición de las deformaciones unitarias que sufre el material a lo largo de la prueba se puede llevar a cabo mediante cualquier técnica de medición, ya sea mediante galgas extensométricas, video extensometría, o incluso técnicas más sofisticadas como interferometría láser y correlación digital de imágenes.

Las curvas experimentales de creep de materiales viscoelásticos pueden ser ajustados a modelos reológicos estándares para caracterizar sus propiedades elásticas y viscosas, siempre y cuando las curvas de creep presentan las primeras dos etapas de creep (Pascual *et al.*, 2020). Uno de los modelos más comunes para este fin es el modelo de creep de Burgers (Pascual *et al.*, 2023). Este modelo se caracteriza por cuatro parámetros viscoelásticos: Dos parámetros viscosos y dos parámetros elásticos. El modelo reológico de Burgers consta de conexión en serie de un modelo de Maxwell con un modelo de Kelvin-Voigt, como se muestra en la Figura 1. Las deformaciones por creep  $\varepsilon(t)$  pueden ser expresadas mediante la ecuación 1:

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

Donde:

$\sigma_0$  = esfuerzo constante aplicado  
 $E_1$  y  $E_2$  = parámetros elásticos  
 $\eta_1$  y  $\eta_2$  = parámetros viscosos

A partir de la curva de creep mostrada en la Figura 1, los parámetros viscoelásticos pueden ser calculados mediante la ecuación 2:

$$\begin{aligned} E_1 &= \frac{\sigma_0}{0\varepsilon_0} \\ E_2 &= \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_V} \\ \eta_1 &= \frac{\sigma_0}{\tan(\beta)} \\ \eta_2 &= \frac{\sigma_0}{\tan(\varphi) - \tan(\beta)} \end{aligned} \quad (2)$$

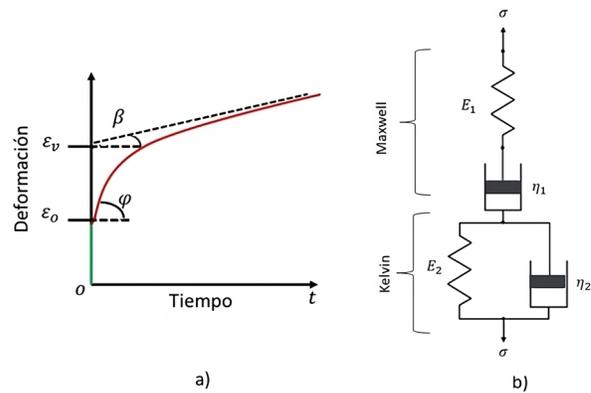


Figura 1. a) Curva de creep característica del modelo de Burgers, b) modelo reológico de 4 elementos de Burgers

En el modelo de Burgers,  $E_1$  representa la respuesta elástica del resorte conectado en serie, y está asociada a la deformación instantánea (segmento verde en la Figura 1a). El parámetro elástico  $E_2$  pertenece a la máxima deformación antes de la iniciación de la etapa secundaria de creep, es decir, antes del crecimiento lineal de la deformación de creep. El parámetro viscoso  $\eta_1$  está asociado a la pendiente de la recta donde el crecimiento de la deformación es lineal. Por último, el parámetro  $\eta_2$  se asocia con la velocidad de crecimiento de la deformación entre la deformación instantánea y la iniciación de la etapa secundaria de creep.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### SÍNTESIS DE LOS HIDROGELES

Se obtuvieron hidrogeles de carboximetilcelulosa de grado alimenticio, con grado de sustitución entre 0.4 y 0.9, y pureza entre 60 y 80 %, conforme a la metodología propuesta por Antonio *et al.* (2015), con ligeras modificaciones. Principalmente, las modificaciones fueron las condiciones respecto a temperatura y tiempo de síntesis (en Antonio *et al.* (2015) el tiempo y síntesis fue de 30 min y 80 °C, respectivamente). Se disolvió 1.2 g de CMC en un volumen final de 40 mL de agua, bajo agitación constante durante 1 hora a 80 °C. La plancha de calentamiento con agitación utilizada fue el modelo SP131325 de la marca Barnstead Thermolyn International. Alícuotas de la anterior solución se mezclaron con diferentes volúmenes de glutaraldehído (GA) para obtener concentraciones finales de 3 %, 4 % y 5 % en un volumen final de 40 mL. Estas soluciones se mantuvieron en condiciones de reflujo, protegidas de la luz durante 2 h a 80 °C. Una vez concluida la síntesis, los hidrogeles se secaron lentamente a 45 °C durante 1 semana hasta obtener un xerogel. Posteriormente, los xe-

rogeles se hidrataron a 50 % de su máximo índice de hinchamiento para obtener láminas con espesor promedio de 1.2 mm, de las cuales se obtendrían muestras rectangulares para los ensayos de creep (Figura 2). Las probetas rectangulares ensayadas se cortaron en rectángulos de 17 mm de ancho por 200 mm de largo.

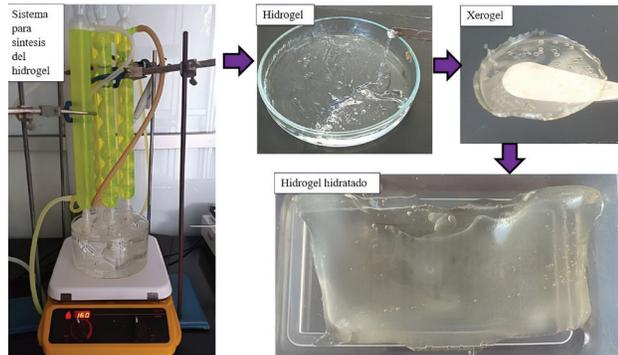


Figura 2. Sistema para utilizado para la obtención del hidrogel de CMC

#### CONDICIONES DE PRUEBA Y ARREGLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se consideran tres tipos de hidrogeles a base de carboximetilcelulosa con tres diferentes porcentajes de GA como entrecruzante (3 %, 4 % y 5 %). Los ensayos de creep para cada material tuvieron una duración de 20 minutos a un esfuerzo constante de 25 kPa, y a temperatura ambiente (20 °C). Las muestras fueron pintadas con pintura en aerosol de color negro para generar el patrón de moteado requerido por el sistema de medición por correlación digital de imágenes. El arreglo experimental implementado se muestra en la Figura 3. La probeta rectangular se fija en la parte superior mediante una mordaza. Para la carga muerta se emplea un gancho con pesa que se coloca en la mordaza que sujeta la probeta en la parte inferior. En el estado inicial, el gancho reposa sobre el elevador, de tal manera que la carga muerta está desconectada de la probeta. Para aplicar la carga, el sistema electromecánico acciona el elevador para desplazarlo hacia abajo, de tal manera que el peso muerto quede colgando de la muestra. Para retirar la carga de la muestra, el elevador se acciona para desplazarlo hacia arriba hasta que el peso quede desconectado de la mordaza inferior. El sistema de adquisición se programa de tal manera que se toma una imagen cada minuto durante la prueba, mediante la cámara USB de la marca ELP modelo ELP-USB8MP02G-SFV(5-50). En este trabajo se implementó el software libre *Ncorr* (MATLAB) para procesamiento de imágenes y medición de deformaciones. Para cada material, se hicieron dos pruebas de repetibilidad, usando probetas diferentes y sin historial de carga.

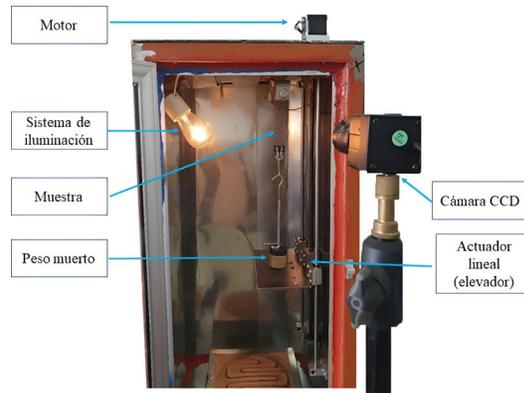


Figura 3. Máquina para ensayos de creep

#### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El mapa de deformaciones que se obtiene mediante el software *Ncorr* permitió obtener un promedio de deformaciones unitarias sobre toda la superficie de las muestras de hidrogel, en la dirección vertical, para cada tiempo de muestreo. Un ejemplo del mapa de deformaciones obtenidas se muestra en la Figura 4.

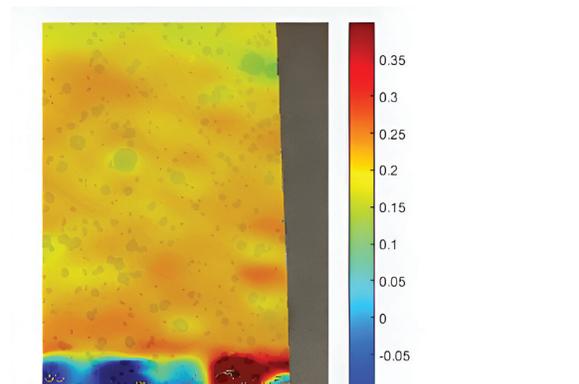


Figura 4. Mapa de deformaciones obtenidas con el software *Ncorr*

Los valores de deformación unitaria para cada tiempo se graficaron para obtener las curvas de creep de cada muestra ensayada. En la Figura 5 se presentan los promedios de las curvas de creep de cada material ensayado. Las barras de error representan las desviaciones estándar de las pruebas de repetibilidad. Es posible observar que la concentración de glutaraldehído en los hidrogeles tiene fuerte efecto en su resistencia ante creep o fluencia lenta; es decir, a mayores concentraciones de glutaraldehído en los hidrogeles se tiene un incremento en las deformaciones de creep.

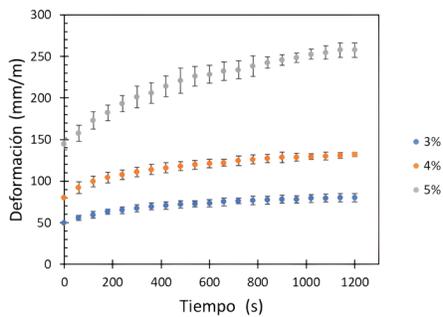


Figura 5. Curvas experimentales de creep de los hidrogeles con diferente porcentaje de GA

Las propiedades viscoelásticas de cada hidrogel pueden obtenerse ajustando el modelo de Burgers a las curvas de creep promedio mostradas en la Figura 5. De esta manera, se puede hacer una comparación cuantitativa del efecto de la concentración de GA en las propiedades viscoelásticas de los hidrogeles. En la Figura 6 se muestran las curvas de creep del modelo de Burgers ajustadas a los datos experimentales. Cada curva muestra el respectivo coeficiente de correlación. Los parámetros viscoelásticos, elásticos y viscosos de cada material, obtenidos con el modelo de Burgers, se reportan en la Tabla 1.

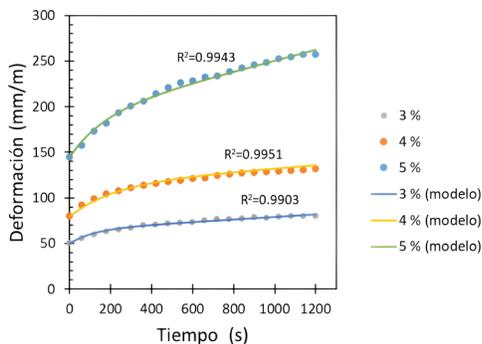


Figura 6. Curvas de creep del modelo de Burgers ajustadas a los datos experimentales

Tabla 1. Parámetros viscoelásticos de los hidrogeles ensayados

Parámetros	Hidrogel 3 %	Hidrogel 4 %	Hidrogel 5 %
$E_1$ (MPa)	0.5	0.31	0.17
$E_2$ (MPa)	1.66	0.71	0.54
$\eta_1$ (MPa.s)	1790.37	1432.24	420.79
$\eta_2$ (MPa.s)	197.50	157.35	94.15

La Tabla 1 pone en evidencia que todos los parámetros viscoelásticos de los hidrogeles disminuyen con el incremento en la concentración de GA como entrecruzante. El parámetro elástico  $E_v$ , el cual es el equivalente del módulo de elasticidad para un material puramente

elástico, tiene un valor de 0.5 MPa para el hidrogel a 3 % de GA, 0.31 MPa para el de 4 % y 0.17 MPa para el de 5 %. La disminución de los parámetros viscosos y elásticos de los hidrogeles indica que existe un decaimiento de la resistencia de estos materiales con el aumento de la concentración de GA, lo cual también se hace evidente en las curvas de creep mostradas en las Figuras 5 y 6. Este comportamiento puede atribuirse al aumento en la porosidad en los hidrogeles con el aumento de la concentración de GA.

En la Figura 7 se observa la morfología de los xerogeles entrecruzados con 3 y 5 % de GA. El análisis en microscopía electrónica de barrido (MEB) muestra hidrogeles con una superficie rugosa y con poros de diferentes tamaños y formas. El equipo utilizado para este análisis fue el modelo JSM 6010LA de la marca JEOL. El hidrogel con 3 % de GA presenta poros de tamaño comprendido entre 296 nm y 2  $\mu$ m. Por su parte, el hidrogel entrecruzado con 5 % de GA presentó un intervalo de tamaño de poro más amplio que va de 165 nm hasta 2.741  $\mu$ m. Cabe mencionar que para asegurarse de que los poros observados no sean solamente superficiales, las muestras de xerogel se seccionaron y se analizaron en diferentes ángulos. En todas direcciones analizadas se observaron morfologías similares, por lo que se concluye que los poros están presentes y son homogéneos en todo el volumen del material.

Por lo tanto, el decaimiento en las propiedades viscoelásticas con el aumento de la concentración de GA se debe que, a mayor porcentaje de GA mayor será el tamaño de los poros en el xerogel. Una vez hidratado el xerogel (convertido en hidrogel), aquel con más poros tendrá mayor capacidad de hinchamiento y absorción de agua, lo cual se traduce en más espacios que están siendo sustituidos por agua (u otra sustancia), lo que a su vez se ve reflejado en un debilitamiento mecánico del material. Este debilitamiento mecánico se puede observar en el fenómeno de fluencia de los hidrogeles estudiados. En la Figura 7 se puede observar que el hidrogel con mayor contenido de GA sufrió más deformaciones.

Por otro lado, la disminución de la resistencia mecánica de los hidrogeles con el aumento de la concentración de GA se puede observar en la relación de Poisson. Gracias a que la técnica de correlación digital de imágenes permite la medición simultánea de deformaciones en dos direcciones ortogonales, en este trabajo también se midieron las deformaciones transversales para calcular la relación de Poisson de los materiales estudiados. La relación de Poisson es el cociente de la deformación transversal y la longitudinal. En la Figura 8 se muestran los resultados de la relación de Poisson para cada tiempo de muestreo. Se observa que la relación de Poisson

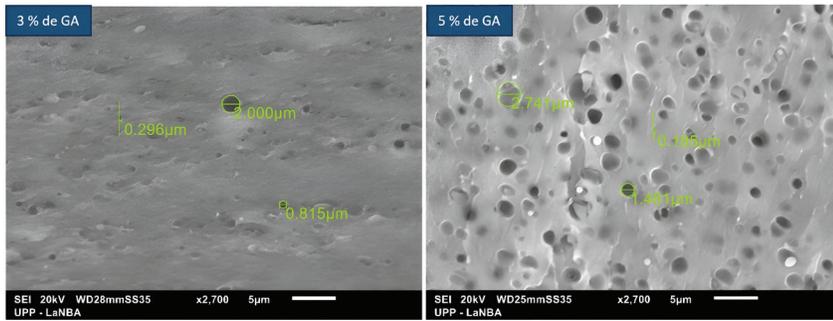


Figura 7. Morfología de las muestras de hidrogel con 3 y 5 % de GA

aumenta con el tiempo, como es esperado para un material viscoelástico. A partir de los datos de cada tiempo de muestreo, se calculó el promedio de la relación de Poisson de los hidrogeles de 3, 4, 5 % de glutaraldehído, obteniéndose valores de  $0.33 \pm 0.03$ ,  $0.37 \pm 0.03$  y  $0.40 \pm 0.01$ , respectivamente. Estos valores comprueban nuevamente la disminución de la resistencia de los hidrogeles con el aumento de concentración de glutaraldehído, ya que un material más resistente tiende a tener una relación de Poisson más baja.

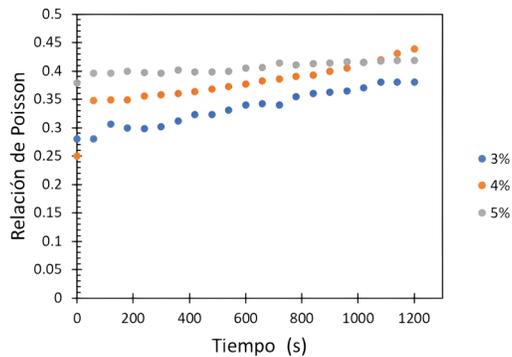


Figura 8. Relación de Poisson de los hidrogeles de 3, 4 y 5 % de GA

### CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el comportamiento de hidrogeles con diferentes concentraciones de glutaraldehído bajo el fenómeno de creep. Se llevaron a cabo pruebas de creep a 25 kPa con duración de 1200 s, a temperatura ambiente. Se implementó la técnica de correlación digital de imágenes para medir las deformaciones para cada tiempo de muestreo. Los resultados fueron ajustados al modelo reológico de Burgers para encontrar los parámetros viscoelásticos de cada hidrogel. Los resultados obtenidos comprobaron que el incremento de la concentración de glutaraldehído como entrecruzante disminuye las propiedades elásticas y viscosas de los hidrogeles, provocando un decaimiento en su resistencia mecánica. Este comportamiento se debe a que el incremento de GA provoca un aumento en la porosidad

del hidrogel. Finalmente, el decaimiento en la resistencia a creep significó también un aumento en la relación de Poisson de los hidrogeles.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONAHCYT por el otorgamiento de la beca de posgrado 656438.

### REFERENCIAS

Antonio, R., Purata, N., Ramos, C., & Sosa, N. (2015). Incorporación del fármaco ketoprofeno en un gel de carboximetilcelulosa. *Revista de Tecnología e Innovación*, 2(4), 887-893.

Aswathy, S. H., Narendrakumar, U., & Manjubala, I. (2020). Commercial hydrogels for biomedical applications. *Heliyon*, 6(4), e03719. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03719>

Cacopardo, L., Guazzelli, N., Nossa, R., Mattei, G., & Ahluwalia, A. (2019). Engineering hydrogel viscoelasticity. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 89, 162-167. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.09.031>

Czerner, M., Fellay, L. S., Suárez, M. P., Frontini, P. M., & Fasce, L. A. (2015). Determination of elastic modulus of gelatin gels by indentation experiments. *Procedia Materials Science*, 8, 287-296. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.04.075>

Farfan, L. I., & Pascual, J. B. (2022). An experimental methodological approach for obtaining viscoelastic poisson's ratio of elastomers from creep strain DIC-Based measurements. *Experimental Mechanics*, 62(2), 287-297. <https://doi.org/10.1007/s11340-021-00792-9>

Findley, W. N., Lai, J. S., & Onaran, K. (1989). *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. Nueva York: Dover publications.

Garzón, M. de L., Tecante, A., Ramírez Gilly, M., & Palacios, J. (2009). Comportamiento viscoelástico de disoluciones y tabletas hidratadas de hidroxipropilmetil celulosa, carboximetil celulosa sódica y sus mezclas. *Revista mexicana de ingeniería química*, 8(3), 307-318.

Li, Z., Liu, Z., Ng, T. Y., & Sharma, P. (2020). The effect of water content on the elastic modulus and fracture energy of hydrogel. *Extreme Mechanics Letters*, 35, 100617. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2019.100617>

- Mattei, G., Cacopardo, L., & Ahluwalia, A. (2017). Micro-Mechanical viscoelastic properties of crosslinked hydrogels using the nano-epsilon dot method. *Materials*, 10(8), 889. <https://doi.org/10.3390/ma10080889>
- Michailova, V. (2000). Water uptake and relaxation processes in mixed unlimited swelling hydrogels. *International Journal of Pharmaceutics*, 209(1-2), 45-56. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(00\)00536-6](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(00)00536-6)
- Nasution, H., Harahap, H., Dalimunthe, N. F., Ginting, M. H. S., Jaafar, M., Tan, O. O. H., Aruan, H. K., & Herfananda, A. L. (2022). Hydrogel and effects of crosslinking agent on cellulose-based hydrogels: A review. *Gels*, 8(9), 568. <https://doi.org/10.3390/gels8090568>
- Pascual, J. B., Farfan, L. I., & Susarrey-ñ, 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>
- Pascual, J. B., Susarrey, O., Farfan, L. I., & Flores, R. (2023). Creep properties of a viscoelastic 3D printed sierpinski Carpet-Based fractal. *Fractal and Fractional*, 7(8), 568. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7080568>
- Patiño, D. (2020). Crosslinked carboxymethyl cellulose-SiO<sub>2</sub> hydrogels fabrication: Composition and thermal stability towards biomedical applications. *IPSA Scientia, Revista Científica Multidisciplinaria*, 5(1), 60-71. <https://doi.org/10.25214/27114406.935>
- Puente, J. G., Hernández, C. L., Reyes Melo, M. E., Rentería, F. Y., & Miranda, I. Y. (2022). Estudio reológico de soluciones poliméricas de carboximetil celulosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(2), 1-10. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2022.23.2.012>
- Ramírez, A., Benítez, J. L., Rojas de Astudillo, L., & Rojas de Gásque, B. (2016). Materiales polímeros de tipo hidrogeles: revisión sobre su caracterización mediante FTIR, DSC, MEB, MET. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 36(2), 108-130.
- Sánchez, P., Jiménez, M., Romero, A., & Pérez, V. (2022). Novel trends in hydrogel development for biomedical applications: a review. *Polymers*, 14(15), 3023. <https://doi.org/10.3390/polym14153023>
- Selvakumaran, S., Muhamad, I. I., & Abd Razak, S. I. (2016). Evaluation of kappa carrageenan as potential carrier for floating drug delivery system: Effect of pore forming agents. *Carbohydrate Polymers*, 135, 207-214. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.08.051>
- Uzuner, S., Tezel, G. B., & Cakmak, A. K. (2016). Effect of temperature, gum concentration and gum ratio on creep-recovery behaviour of carboxymethyl cellulose -guar gum mixtures: modelling with RSM and ANN. *Italian Journal of Food Science*, 28, 271-286.
- Worthington, P., Pochan, D. J., & Langhans, S. A. (2015). Peptide hydrogels-versatile matrices for 3D cell culture in cancer medicine. *Frontiers in Oncology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fonc.2015.00092>
- Yang, D. (2022). Recent advances in hydrogels. *Chemistry of Materials*, 34(5), 1987-1989. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.2c00188>

#### Cómo citar:

Juárez-Hernández, J. A., Subervier-Ortiz, L., Villanueva-Ibañez, M., Farfan-Cabrera, L. I., Pascual-Francisco, J. B., & Jaramillo-Loranca, B. E. (2024). Efecto del glutaraldehído en las propiedades viscoelásticas de hidrogeles de carboximetilcelulosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25 (03), 1-7. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.3.022>