

# **EVALUACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN MATERIALES AUXÉTICOS MEDIANTE UN SISTEMA DE VISIÓN**

## *MECHANICAL PROPERTIES EVALUATION OF AUXETIC MATERIALS USING A VISION SYSTEM*

**Luis Gerardo Ramírez Ruiz**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*m2203021@celaya.tecnm.mx*

**Luis Alejandro Alcaraz Caracheo**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx*

**Ramón Rodríguez Castro**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*ramon.rodriguez@itcelaya.edu.mx*

**Roberto Edu Arriaga Medina**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*roberto.arriaga@itcelaya.edu.mx*

**Alejandro Israel Barranco Gutiérrez**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alejandro.bg@celaya.tecnm.mx*

**Recepción:** 3/octubre/2023

**Aceptación:** 27/noviembre/2023

### **Resumen**

El interés en las estructuras de material tipo auxético ha aumentado de manera significativa en los últimos años dentro del ámbito científico y tecnológico. Este tipo de material presenta un comportamiento novedoso no convencional debido a un coeficiente de Poisson negativo que a su vez permite que las estructuras contengan propiedades mecánicas ajustables como los son la resistencia a la deformación y la resistencia a esfuerzos cortantes por mencionar algunos ejemplos. En el presente proyecto se estudiaron las estructuras de material plegado donde se analizó el coeficiente de Poisson en función de la densidad relativa con el objetivo de comprender y verificar el comportamiento auxético que de manera analítica algunos

autores han mencionado. Para ello se realizaron experimentos en probetas de aluminio plegado sometidas a carga cuasi estática y mediante un sistema de visión se midió la deformación longitudinal y transversal, con el fin de conocer su respuesta mecánica.

**Palabras Clave:** Auxético, Correlación de imágenes digitales, Material plegado, Poisson, Sistema de visión.

## **Abstract**

*The Interest in auxetic structures has increased significantly in recent years within the scientific and technological area. This type of material presents a novel and unconventional behavior due to a negative Poisson's ratio that allows the structures to contain adjustable mechanical properties such as resistance to deformation and resistance to shear stress, to mention a few examples. In the present project, the crumpled material structures were studied, and the Poisson ratio was analyzed as a function of the relative density with the objective of understanding and verifying the auxetic behavior that some authors have mentioned analytically. Experiments were carried out on crumpled aluminum specimens subjected to quasi-static load tests and using a computer vision system, the longitudinal and transverse deformation was measured, in order to know their mechanical response.*

**Keywords:** Auxetic, Digital Image Correlation, Crumpled material, Poisson, Computer vision system.

## **1. Introducción**

Hoy en día el avance tecnológico obliga a descubrir nuevos materiales y estructuras en el ámbito de la ingeniería debido a que en un futuro los materiales actuales pueden ser sustituidos por otros en los que se tengan mejores propiedades físicas, como lo son la absorción de impactos, la resistencia a la deformación y el peso de estos materiales por mencionar algunos ejemplos. Las estructuras auxéticas en la actualidad son una alternativa a los materiales convencionales debido a sus propiedades físicas, las cuales pueden ser modificadas simplemente con cambiar algún parámetro en el diseño de la estructura [Barillas, 2020].

El coeficiente de Poisson es una relación entre las deformaciones transversal y longitudinal, a través de este parámetro se mide el comportamiento elástico de los materiales cuando son sometidos a cargas de tracción y compresión. Comúnmente si a un material se le aplica una carga y se estira en dirección axial, en su sección transversal tiende a ocurrir lo contrario, es decir esta última disminuye ocurriendo lo mismo en el caso opuesto a si la longitud del material disminuye, la sección transversal tiende a crecer [Sierra Soraluze, 2017]. Estos novedosos materiales y estructuras auxéticas tienen la principal característica de un coeficiente de Poisson negativo lo cual no sucede en la mayoría de los materiales convencionales, por lo tanto, ocurre una situación donde si un material se estira, su sección transversal tiende a crecer y si la longitud disminuye, la sección transversal también lo hace [Jiménez Espada, 2017].

El comportamiento de las estructuras auxéticas no ha sido comprendido del todo hoy en día, si bien se cuenta con un amplio estudio en diferentes tipos de estas estructuras, aún se desconoce el comportamiento de muchas otras [Tabernero Salguero, 2019].

En particular uno de los materiales auxéticos interesantes para su estudio son los catalogados como plegados [Mazaev et al., 2020] los cuales reportan una relación de Poisson en función de su densidad [Bouaziz et al., 2013], sin embargo, no se cuenta con afirmaciones experimentales de que este tipo de estructuras plegadas pertenezcan a la categoría de auxéticas. Por otro lado, la innovación en sistemas de medición también se adapta a las necesidades tecnológicas de la actualidad y en muchas ocasiones no es factible utilizar métodos convencionales como lo son galgas, extensómetros, mediciones por láser, etc., por mencionar algunos ejemplos. Los métodos de visión computacional son una alternativa en la actualidad debido a que se pueden realizar mediciones de campo completo, no se necesita un contacto directo con la muestra y también son muy precisos en cuanto a resultados [Jones & Iadicola, 2018]. Para medir deformaciones en materiales como los plegados no es posible hacerlo con métodos convencionales debido a su compleja estructura no plana y es por ello por lo que utilizar un sistema de visión es la mejor alternativa para este proyecto.

## 2. Métodos

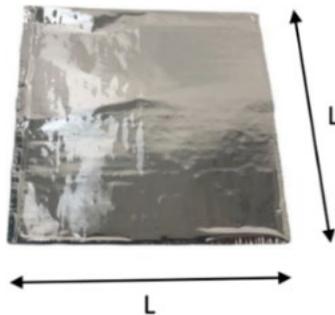
De acuerdo con [Olufsen et al., 2020] Existen softwares comerciales para correlación de imágenes digitales lo cual es un método de visión computacional capaz de lograr la medición de deformaciones en superficies de campo completo sin contacto directo con la muestra, sin embargo, generalmente estos son de alto costo, como por ejemplo ISISys, VIC y GOMcorrelate pero también algunos otros de uso libre como DICe y nCorr. Para este proyecto se utilizó el software DICe debido a su interfaz de uso intuitivo y es capaz de ejecutar correlación de imágenes estéreo con dos cámaras [Turner et al., 2015].

### Pruebas en probetas de aluminio plegado

La creación de probetas de aluminio plegado se lleva a cabo siguiendo la ecuación 1 en la cual tenemos la longitud del lado de una hoja cuadrada de aluminio (Figura 1) en función de la densidad relativa ( $\rho_r$ ) de la probeta dónde  $L$  es el lado de la hoja,  $e$  es el espesor de la hoja,  $A_b$  es el área de la base de la probeta,  $a$  es la altura de la probeta.

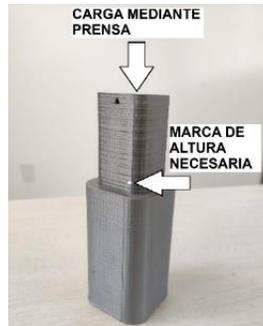
$$L = \sqrt{\frac{\rho_r A_b a}{e}} \quad (1)$$

Una vez que se tiene la cantidad de aluminio en función de la densidad para la probeta que se fabricará, se procede a envolver y comprimir dentro de un molde (Figura 2) con la ayuda de una prensa, para posteriormente dejar relajar la probeta por un día para su análisis.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1 Hoja de aluminio utilizada para probetas de material plegado.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 2 Compresión de probeta mediante un molde ejerciendo presión con una prensa.

### **Densidades de prueba**

Según informa [Bouaziz et al., 2013] de manera analítica, las probetas de aluminio plegado muestran un comportamiento auxético cuando se componen de densidades relativas por debajo de 0.15 es por ello por lo que se decidió realizar pruebas experimentales con las siguientes densidades: 0.05, 0.07, 0.09, 0.13, 0.17, 0.21 y 0.24. Una vez que se aplica la metodología para la creación de probetas de aluminio plegado, mediante la utilización de una pintura color negro mate en aerosol, se aplica el moteado necesario para ejecutar la técnica de correlación de imágenes digitales (DIC) (Figura 3).



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 3 Probeta con moteado aplicado.

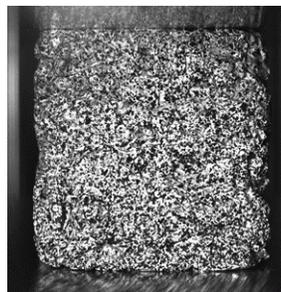
Para las pruebas a compresión se utiliza una cámara Prosilica GT2750 y una máquina universal Zwick/Roell Z050. Se coloca la probeta de aluminio plegado y se establece el entorno como se puede observar en la figura 4.

Un ejemplo de la imagen de la probeta que se adquiere mediante la cámara por medio del sistema de visión se muestra en la figura 5.



Fuente: elaboración propia.

Figura 4 Probeta colocada en la máquina universal para adquirir fotografías.

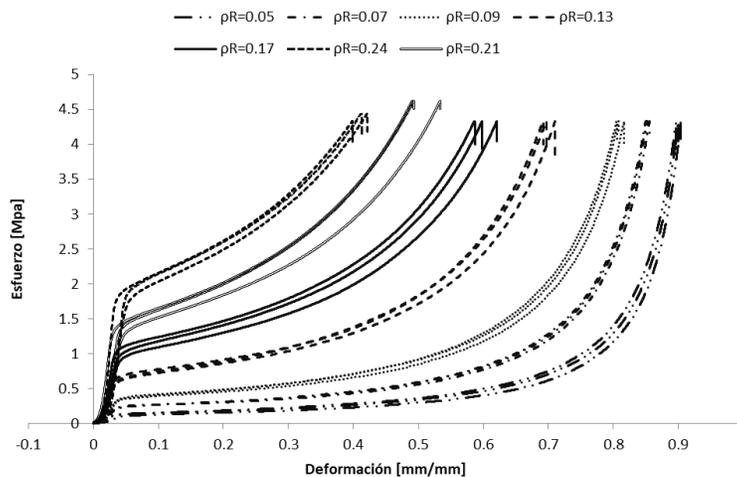


Fuente: elaboración propia.

Figura 5 Imagen adquirida de la probeta en la máquina universal.

### 3. Resultados

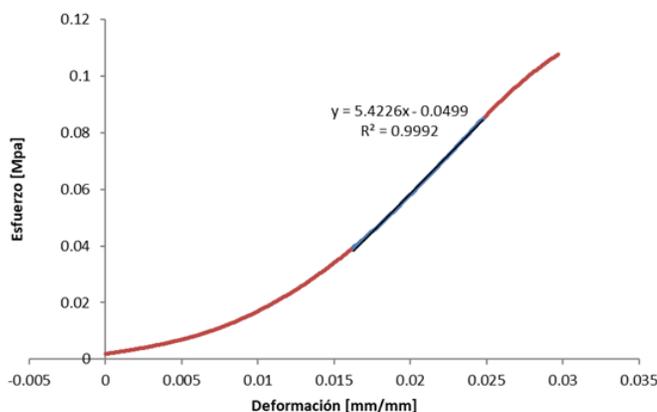
La figura 6 muestra la relación esfuerzo contra deformación de las 3 muestras de cada una de las densidades relativas de las probetas cubicas de aluminio plegado.



Fuente: elaboración propia.

Figura 6 Gráficas esfuerzo-deformación de todas las densidades analizadas.

Se obtuvieron los módulos elásticos de cada una de las probetas cúbicas con diferentes densidades, para esto se utilizaron cada una de las gráficas esfuerzo deformación de la figura 6. El primer paso fue hacer una ampliación en la región elástica y después se utilizó una línea de tendencia para poder obtener el módulo de Young como se muestra en la figura 7. En la tabla 1 observamos el módulo de Young obtenido en las tres muestras de cada una de las densidades utilizadas para probetas de aluminio plegado.



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Ejemplo de obtención del módulo elástico.

Tabla 1 Valores obtenidos del módulo elástico en cada probeta.

Densidad Relativa	0.05	0.07	0.09	0.13	0.17	0.21	0.24
ME1	5.4226	10.807	16.448	33.315	44.349	72.411	108.16
ME2	3.5647	9.859	17.873	31.12	45.22	65.86	90.85
ME3	5.1125	10.599	15.027	28.773	56.24	66.72	96.71
<b>Modulo Elástico</b>	4.699	10.421	16.449	31.069	48.603	68.330	98.573

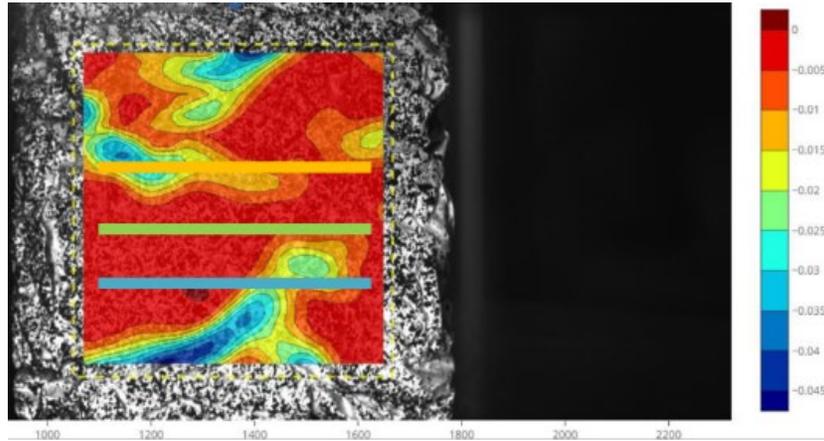
Fuente: elaboración propia.

## Resultados Coeficiente de Poisson

Los Coeficientes de Poisson se calculan a partir de las deformaciones transversales y axiales en la probeta, para ello se han obtenido 3 mediciones (arriba centro y abajo) con líneas horizontales de las cuales se calculan sus deformaciones. Una vez obtenidos los valores de deformaciones se aplican promedios para obtener un coeficiente de Poisson a partir de la ecuación 2. En la figura 8 observamos el mapa de colores para la deformación Axial de una probeta sometida a compresión

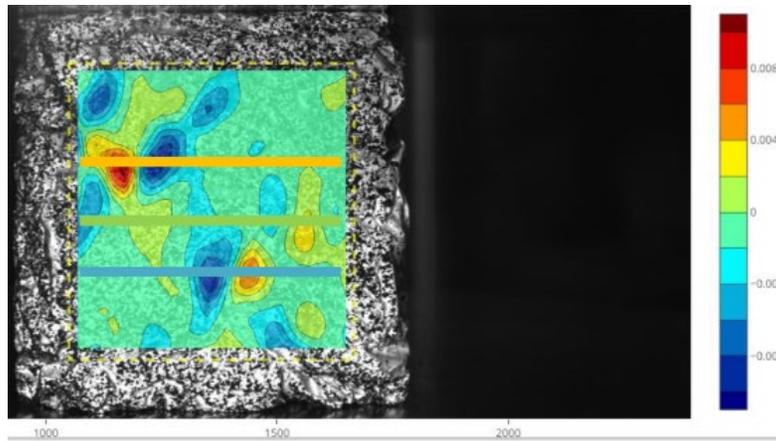
y en la figura 9 observamos la deformación transversal. En la tabla 2 tenemos los datos obtenidos para calcular el coeficiente de Poisson.

$$v = - \frac{\text{def transversal}}{\text{def axial}} \quad (2)$$



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Deformaciones axiales de probeta sometida a compresión.



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 Deformaciones transversales de probeta sometida a compresión.

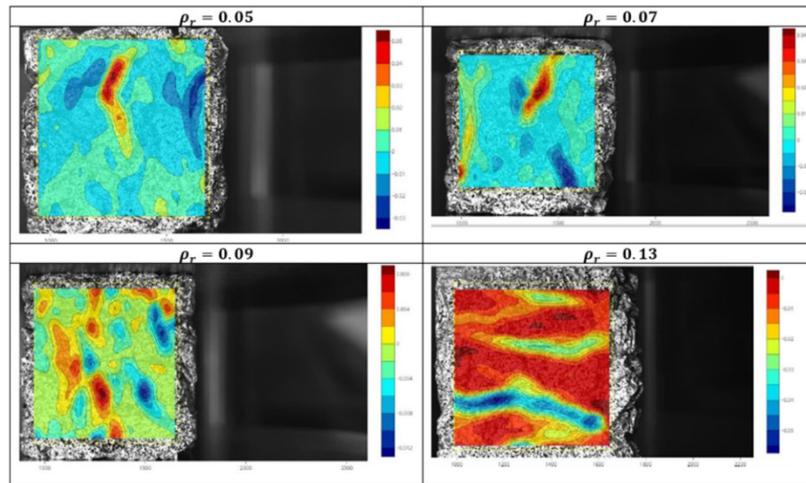
Tabla 2 Datos obtenidos para calcular el coeficiente de Poisson a partir de deformaciones axiales y transversales.

Línea	Deformación transversal	Deformación Axial	Coefficiente de Poisson
Arriba	-0.00109447	-0.013280102	-0.082241425
Centro	-0.00153763	-0.02186023	-0.07033898
Abajo	-0.00093911	-0.011066706	-0.08485891
		<b>V promedio</b>	<b>-0.07920405</b>

Fuente: elaboración propia.

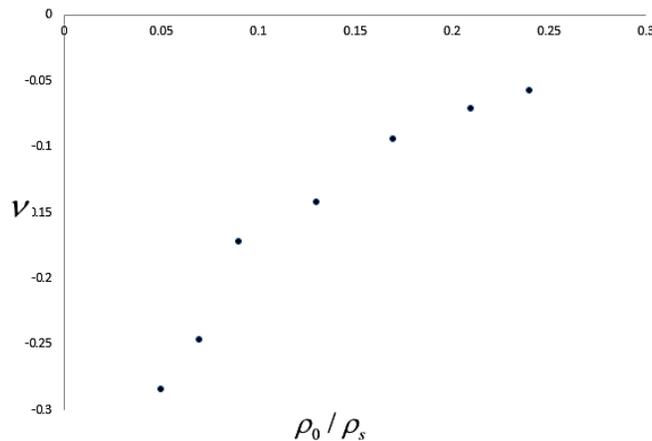
En la figura 10 tenemos un ejemplo del mapa de colores en deformación transversal para las densidades 0.05, 0.07, 0.09 y 0.13 donde observamos que el comportamiento auxético predomina en cada una de estas debido a que se muestra una deformación con signo negativo.

Una vez obtenidos los coeficientes de Poisson a partir de las deformaciones axiales y transversales de cada una de las probetas, se calcula la media de las 6 muestras de cada densidad (0.05, 0.07, 0.09, 0.13, 0.17, 0.21, 0.24), obteniendo así los valores para la gráfica de coeficiente de Poisson vs densidad relativa que se muestra en la figura 11.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10 Deformaciones en probetas de densidades 0.05, 0.07, 0.09 y 0.13.



Fuente: elaboración propia.

Figura 11 Gráfica de coeficiente de Poisson vs densidad relativa.

## **4. Discusión**

Los materiales de aluminio plegado presentan un comportamiento auxético con valores de coeficiente de Poisson entre -0.3 y -0.05 con las densidades de 0.05, 0.07, 0.09, 0.13, 0.17, 0.21 y 0.24. Se siguió una metodología propuesta en este documento para poder analizar experimentalmente las deformaciones en una superficie rugosa como la que presentan los materiales plegados de aluminio los cuales presentan un comportamiento auxético dependiendo de la densidad de la probeta. En este proyecto se logró comprobar experimentalmente que con densidades relativas de aproximadamente 0.25 los materiales plegados de aluminio se encuentran en el límite de un coeficiente de Poisson negativo por lo que a partir de densidades más grandes se observará un comportamiento convencional. El variar parámetros en la metodología que se empleó, por ejemplo, la densidad, tiempo de relajación antes de la prueba, forma de envolver el material para introducirlo en el molde, etc. puede modificar el comportamiento de los materiales plegados.

## **5. Conclusiones**

Utilizando la técnica DIC se observó que los Materiales Plegados tienden a tener un comportamiento auxético dependiendo de su densidad. Con la tecnología de correlación de imágenes digitales (DIC) se pueden medir deformaciones y desplazamientos sin tener contacto directo en superficies de muestras que presentan deformaciones ya sea porque están sometidas a cargas de tensión o compresión siempre y cuando se siga la metodología de forma correcta para aplicar el método, por ejemplo, apoyándose de los consejos de la “guía para la buena práctica de DIC” [Jones & Iadicola, 2018].

El aluminio plegado puede considerarse como un potencial metamaterial auxético con algunas ventajas como bajas densidades y bajos costos en cuanto a su fabricación. En un futuro se pueden tener alternativas de aplicación de estos metamateriales por ejemplo en equipo deportivo, áreas automotriz, aeronáutica, ferroviaria, entre muchas otras donde se requieran materiales con buenas características mecánicas, tales como resistencias a la deformación, a esfuerzos

cortantes, elasticidad, entre otras y que también a su vez sean ligeros y por cuestiones de costos su proceso de fabricación no implique un alto impacto económico.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Barillas, M. (2020). Materiales Auxéticos: una breve descripción y avances en la reducción de la concentración de esfuerzos.
- [2] Bouaziz, O., Masse, J. P., Allain, S., Orgéas, L., & Latil, P. (2013). Compression of crumpled aluminum thin foils and comparison with other cellular materials. *Materials Science and Engineering: A*, 570, 1–7.
- [3] Jiménez Espada, R. (2017). Modelización de estructuras auxéticas.
- [4] Jones, E. M. C., & Iadicola, M. A. (2018). A good practices guide for digital image correlation. *International Digital Image Correlation Society*, 10.
- [5] Mazaev, A. v, Ajenez, O., & Shitikova, M. v. (2020). Auxetics materials: classification, mechanical properties and applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 747(1), 012008.
- [6] Olufsen, S. N., Andersen, M. E., & Fagerholt, E. (2020).  $\mu$ DIC: An open-source toolkit for digital image correlation. *SoftwareX*, 11, 100391.
- [7] Sierra Soralupe, A. (2017). Diseño, construcción y caracterización de un material auxético.
- [8] Taberero Salguero, A. (2019). Estudio de estructuras auxéticas sometidas a impacto.
- [9] Turner, D., Crozier, P., & Reu, P. (2015). Digital image correlation engine. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA.