



# Efecto de sección de vigas en la auxeticidad de estructuras fabricadas por *m*SLA

Celia Rufo-Martín<sup>1</sup>, Diego Infante-García<sup>2</sup>, José Díaz-Álvarez<sup>1</sup>, Henar Miguélez<sup>1</sup>, George Youssef<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Carlos III de Madrid, [crufo@ing.uc3m.es](mailto:crufo@ing.uc3m.es), [jodiaz@ing.uc3m.es](mailto:jodiaz@ing.uc3m.es), [mhmiguel@ing.uc3m.es](mailto:mhmiguel@ing.uc3m.es)

<sup>2</sup> Instituto de Ingeniería Mecánica y Biomecánica– I2MB, Departamento de Ingeniería Mecánica y Materiales, Universitat Politècnica de València. [dieingar@upv.es](mailto:dieingar@upv.es)

<sup>3</sup> Experimental Mechanics Laboratory, Department of Mechanical Engineering, San Diego State University, [gyoussef@sdsu.edu](mailto:gyoussef@sdsu.edu)

---

*En los últimos años las estructuras auxéticas, caracterizadas por su coeficiente de Poisson negativo, se han convertido en un gran atractivo por sus buenas respuestas a esfuerzos a compresión y de impacto. Su habilidad de para absorber estas energías ha dado lugar a múltiples investigaciones tanto para desarrollar nuevas geometrías como para optimizar las ya existentes. No obstante, el comportamiento mecánico de estas estructuras está ligado al material con el que fueron fabricadas, destacando hasta el momento los polímeros flexibles que permitan la recuperación de la forma inicial. En este trabajo, proponemos una nueva estructura 3D fabricada con una resina rígida usando la técnica de *m*SLA y que, debido a sus elementos geométricos, permite la recuperación tras los esfuerzos mecánicos. La llamada estructura “S-shaped” se sometió a ensayos de compresión para evaluar el cambio de respuesta mecánica (rigidez), de simetrías y de auxeticidad (coeficiente de Poisson negativo) en función de la anchura de los pilares (1, 2 y 3 mm). Adicionalmente, los ensayos estuvieron instrumentados con correlación de imágenes digitales (DIC). Los resultados de los experimentos demostraron que estas nuevas estructuras son capaces de soportar fuerzas de entre 460 y 1250 veces su peso para fracciones volumétricas de 1.2 a 9.7 %. Además, las contribuciones del material rígido se suprimen para los casos con menor anchura de viga, que se explica con los mecanismos de deformación asociados a movimientos de sólido rígido. Por último, el comportamiento auxético de las estructuras “S-shaped” no se ve apenas afectado en función de la sección de la viga, con valores de coeficiente de Poisson en torno a -0.2. Este trabajo demuestra que las nuevas estructuras presentadas son una opción excelente para aplicaciones donde la ligereza sea una necesidad sin comprometer buen comportamiento mecánico, así como para abrir nuevos caminos a investigaciones con distintos materiales u optimizaciones.*

---

## 1. Introducción

Las estructuras auxéticas son una clase de metamateriales con comportamiento mecánico peculiar, beneficioso para aplicaciones como las protecciones en deportes o incluso para implantes biomédicos [1-2]. El fundamento detrás de esto se basa en su contracción dentro del plano para esfuerzos de tracción y su expansión bajo compresión (coeficiente de Poisson negativo) [3]. En los últimos años, estos metamateriales han estado en auge, con multitud de investigaciones enfocadas en el desarrollo de nuevas geometrías [4]. En el trabajo presentado previamente por Rufo-Martín et al. se desarrolló una nueva monoestructura en 3D, pero no se consideraron los efectos de su conexión con otras monoestructuras adyacentes [5], lo que constituye el principal objetivo de esta contribución.

Un coeficiente normal del Poisson en materiales está interrelacionado de manera inversa entre las deformaciones laterales y axiales, de modo que una compresión axial conlleve una dilatación lateral, y al revés [3]. Este fenómeno está basado en la conservación del volumen, dando lugar a mecanismos de absorción de energía a través de la deformación del material. No obstante, la auxeticidad (coeficiente de Poisson negativo) emerge puramente como respuesta a los fenómenos cinéticos axiales y laterales, por lo que, aunque el coeficiente de Poisson sea una respuesta de material, se pueda obtener comportamientos auxéticos con metamateriales y metaestructuras. Es decir, el comportamiento auxético se suele encontrar en piezas fabricadas mediante un diseño estratégico estructural, como por ejemplo sólidos celulares estructurados o estocásticos [6]. Como se mencionó previamente, una de las características más deseadas de las estructuras auxéticas son sus propiedades de absorción de energía, en especial para mitigar cargas de impacto. Por ejemplo, Deng and Qin desarrollaron una re-entrant modificada, con una energía específica de absorción de hasta 0.9 J/g a 10 m/s, con un coeficiente de Poisson de -0.5 [7]. Qi *et al.* combinaron estructuras re-entrant hexagonales con una estructura sándwich, consiguiendo una energía específica de absorción de superficie de 0.46 kJ · m<sup>2</sup>/kg [8]. Por último, Xi *et al.* también modificaron la estructura base de una re-entrant, añadiendo asimetrías, llegando a una eficiencia de 0.4-0.7 kJ/kg para velocidades de ensayo entre 3 y 5 mm/s [9]. Estos son algunos de los muchos ejemplos [10-11] que hay donde estudian la absorción de energía y la mitigación de impacto.

Aunque el comportamiento auxético de algunos sólidos como las espumas haya avanzado mediante calor y presión [12], para las metaestructuras la fabricación aditiva ha sido la catalizadora de su expansión [13]. Con la facilidad para el diseño y fabricación de estructuras mediante la producción capa a capa de geometrías complejas, los ingenieros disponen de mucha más libertad para crear topologías conceptuales, entre ellas las metaestructuras auxéticas con propiedades a demanda. En la revisión de literatura presentada por Uribe-Lam et al. se subdividieron las técnicas de fabricación de estructuras en fabricadas “por filamento”, “por polvo” y “por resina” [14]. El foco de este trabajo está puesto en la impresión de resina, que facilita la creación de estructuras complejas mediante el fotopolimerizado de una resina capa a capa, y aunque este tipo de impresión tenga muchas ventajas, algunas de sus características inherentes pueden limitar los diseños: al tener que aguantar el peso en sí mismo, de existir voladizos hay que utilizar soportes y se pueden acumular tensiones residuales en ciertas zonas debido al movimiento y a la succión de la plataforma de impresión [15].

La novedad de este trabajo se basa en mostrar el proceso de apilado para una monoestructura 3D *S-shaped* y su comportamiento en base a los atributos geométricos para obtener una poliestructura auxética final. El apilado se basa en un simple proceso de repetición por reflejo en los tres sentidos ortogonales conectando las monoestructuras por unos pequeños pilares. Estos pilares actúan como una nueva restricción cuando las monoestructuras rotan sus vigas rectilíneas durante la compresión. Adicionalmente, el diseño se fabricó aditivamente usando una impresora de resina mSLA, con diferentes secciones de viga para analizar su comportamiento en función de la anchura (vigas de sección cuadrada). Finalmente, las poliestructuras se ensayaron a compresión para evaluar sus capacidades de absorción de energía, y los mecanismos locales (simetrías axiales y transversales) que conducen a la auxeticidad en 3D.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Diseño de la estructura

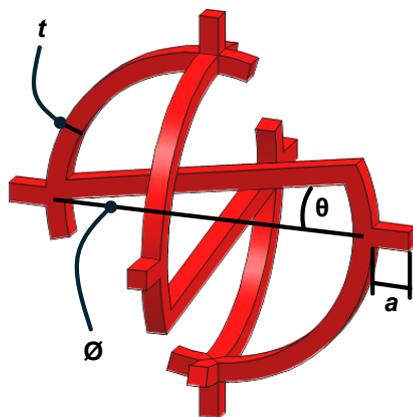
La novedad de este trabajo se basa en desarrollar una nueva metaestructura 3D auxética con un material rígido y aumentar así las posibilidades de elección en función de los casos de carga que puedan encontrarse. La búsqueda tras las estructuras auxéticas, como mencionado previamente en la introducción, viene de su capacidad para absorber energía al deformarse hacia dentro (coeficiente negativo de Poisson) ante un impacto, por lo que son estructuras muy cotizadas actualmente en aplicaciones de defensa y biomédicas. No obstante, para la última las contracciones laterales muy pronunciadas o el uso de materiales que no recuperen su forma inicial se desaconsejan ya que pueden provocar un desacople del implante con el tejido circundante e incluso segundas cirugías. Por tanto, aquí se presenta una estructura ligera y alejada de los mecanismos de deformación convencionales. La geometría aplicada, poliestructura, está basada en una forma de S definida previamente en 2D y en 3D como monoestructuras [5-16]. En el primer trabajo que los autores ya investigaron estas geometrías [5], demostraron que estas estructuras

tienen un comportamiento más regido por movimientos de sólido rígido que de deformación del material, aunque no se tuvo en cuenta el apilarlas y evaluar los efectos que esas restricciones mecánicas imponen.

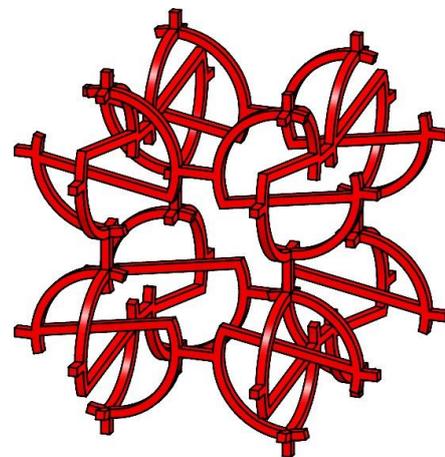
La monoestructura base, diseñada con el software comercial Solid Edge, está caracterizada por dos planos ortogonales donde dos arcos que conforman parte de una circunferencia de  $\varnothing 16$  mm y se unen por una recta, siendo todas las vigas de sección cuadrada (**Figura 1a**). La viga recta está a su vez colocada  $\theta=10^\circ$  con respecto a la diagonal, pero a una excentricidad del centro de  $e = 1.8$  mm. Esta excentricidad se introdujo en la dirección normal a la viga hacia un sentido en un plano, y hacia el otro en el segundo. De ese modo, se evitan que las vigas rectas estén unidas en el centro y esto impida un movimiento libre descendente cuando la carga esté aplicada hasta el que llegue la densificación. Además, para poder unir las monoestructuras más tarde, se le añadieron puntos de conexión en sus seis lados, con una longitud de  $a = 2$  mm. Para evaluar el efecto de la sección de la viga, se prepararon tres diseños con una anchura de  $t = 1$  mm, 2 mm y 3 mm, denominados también como  $t1$ ,  $t2$  y  $t3$  por sencillez.

Por otro lado, el esquema de apilamiento es sencillo. Se buscaba tener una topología periódica por lo que se realizaron tres reflejos de la estructura con respecto a tres de sus puntos de conexión (tres planos ortogonales). Así, la estructura final, en la **Figura 1b**, se compone por ocho monoestructuras y dos alturas. No obstante, recalcar que al haber dos sentidos de excentricidad en la viga, hay dos tipos de planos, según si se observa desde la vista frontal o el alzado.

(a) **monoestructura  $t = 1$  mm**



(b) **poliestructura  $t = 1$  mm**



**Figura 1.** (a) Monoestructura para  $t = 1$  con sus dimensiones características. (b) La poliestructura para la misma sección de viga a partir de reflejar la geometría base con respecto a los tres planos ortogonales.

## 2.2. Impresión por mSLA de las poliestructuras

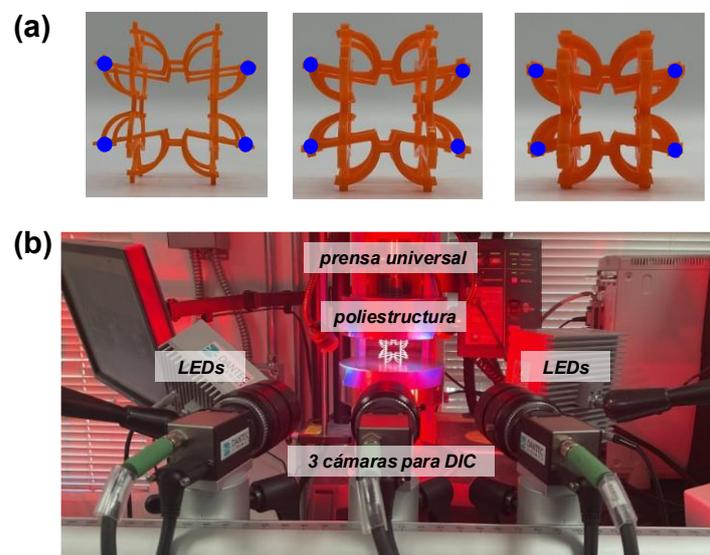
Las poliestructuras *S-shaped* se fabricaron aditivamente con la resina Prusament tough resin de Prusa con una impresora de fotopolimerización mSLA, HALOT-MAGE de Creality. Se prepararon tres tandas en función de la anchura de los pilares:  $t = 1$  mm, 2 mm y 3 mm (**Figura 2**). Para poder imprimir las poliestructuras, los modelos CAD de Solid Edge se transformaron a STL y así definir luego los archivos de impresión en el programa nativo de la impresora usada, el HALOT BOX de Creality con parámetros de impresión definidos en trabajos anteriores [5]. Las impresiones se caracterizaron por un tiempo de exposición inicial de 30 s, seguido por 2.6 s para el resto de las capas y con una altura de capa de  $5 \mu\text{m}$ . Al terminar la impresión se realizó un post-procesado en el que se lavaron las piezas primero con agua para quitar impurezas, luego en una solución pura de IPA para eliminar restos de resina sin polimerizar y se cortaron más tarde los soportes que sujetaban las vigas en voladizo. Finalmente, se volvieron a meter en IPA para retirar restos que los soportes hubieran impedido limpiar y, tras secarse, se colocaron en una cámara de curado de Prusa durante 5 minutos. En la **Figura 2** se puede observar el estado final de las probetas una vez limpias y sin soportes.



**Figura 2.** Impresora mSLA y estación de curado usados para la fabricación de las probetas analizadas. Se imprimieron probetas de distintas anchuras,  $t = 1$  mm, 2 mm y 3 mm.

### 2.3. Caracterización mecánica

Para poder analizar la auxeticidad de las poliestructuras en diferentes escenarios de carga, se realizaron ensayos cuasiestáticos para los tres tipos de estructuras. Al ser una estructura dominadas por los movimientos de sólido rígido, en ambos ensayos se monitorizarán los puntos resaltados en la **Figura 3a**. Los ensayos cuasiestáticos de compresión se llevaron a cabo en una prensa universal, Instron 5843, utilizando una célula de carga de 1 kN con una velocidad de la cruceta de 1 mm/min hasta 10 mm de desplazamiento, lo que equivale a un 20 % de la altura total de la probeta. Para poder evaluar las mecánicas locales de la poliestructura se realizó una correlación digital de imágenes (*digital image correlation*, DIC) con tres cámaras de alta resolución (Dantec Dynamics, GigE) como se describe en la **Figura 3b**. Para poder analizar correctamente las imágenes, las poliestructuras se pintaron de blanco y evitar reflejos, además de pintar a mano los puntos de la **Figura 3a** con un rotulador negro.



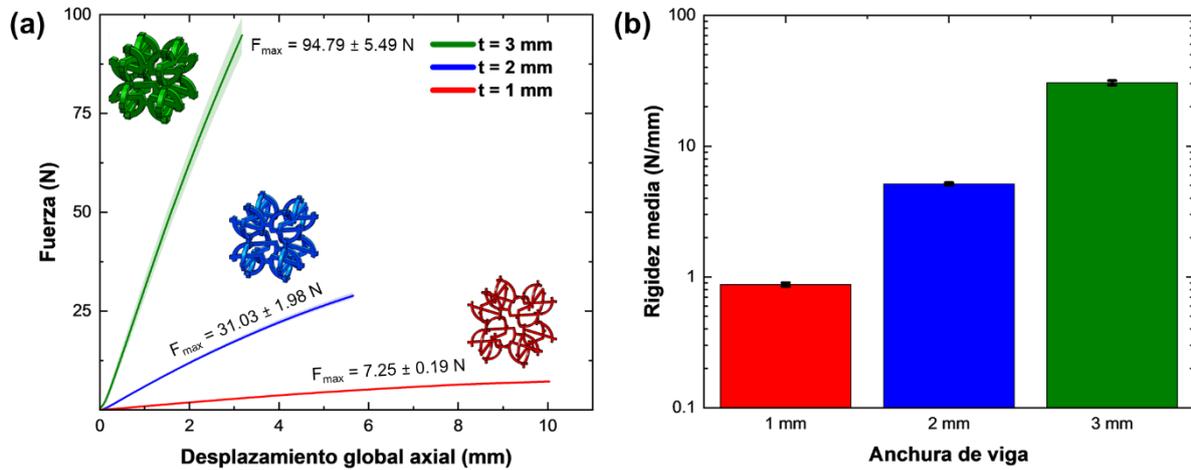
**Figura 3.** (a) Los puntos de seguimientos para el *digital image correlation*. (b) Montaje del ensayo cuasiestático de compresión con el DIC 3D.

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Respuesta cuasiestática

La respuesta cuasiestática a 1 mm/min de compresión de las estructuras se ve reflejada en las curvas de fuerza-desplazamiento en la **Figura 4a**. Se puede observar que la sección de las vigas de las estructuras rige el

comportamiento a compresión, aumentando la rigidez de las poliestructuras conforme se aumenta la  $t$ . Esto se debe a un aumento en la densidad volumétrica de la estructura, asemejándose más al comportamiento base de la resina utilizada ( $E = 1.6$  GPa). En general se puede asumir que el comportamiento es monótonico casi lineal. Se descartaron los datos posteriores a la primera propagación de fractura para  $t_2$  y  $t_3$ , llegando a un máximo de 94.79 N y 31.03 N respectivamente, aunque estos continuaron densificándose hasta los 10 mm del ensayo. En el caso de la rigidez, recogida en la **Figura 4b**, se puede observar un gran cambio en función de la anchura de la viga, con  $0.87 \pm 0.03$  N/mm,  $5.14 \pm 0.12$  N/mm y  $30.48 \pm 1.12$  N/mm para  $t_1$ ,  $t_2$  y  $t_3$ , respectivamente. La capacidad de absorción de fuerzas para estas poliestructuras es muy reseñable, ya que con un único gramo de resina pueden soportar 4.6 N, 7.6 N y 12.3 N ( $\times 460$ ,  $\times 775$  y  $\times 1250$  veces su peso, respectivamente).



**Figura 4.** (a) Curvas de fuerza-desplazamiento para las tres configuraciones de poliestructura estudiadas y (b) la rigidez extraída de las mismas en función de la anchura de viga.

Además, se puede calcular la energía específica absorbida  $SEA$  siguiendo la ecuación

$$SEA = \frac{\int F}{m}$$

integrando la fuerza desde el inicio del ensayo hasta la primera fractura y dividiéndose por la masa de las poliestructuras. De este modo, se puede obtener los valores recogidos junto con los valores máximos de fuerza, la masa  $m$  y la fracción volumétrica  $vol$ . en la **Tabla 1**. Como se puede ver, la  $SEA$  disminuye con el aumento de  $t$ , lo que se explica debido al cambio de dinámicas locales durante la compresión. Las poliestructuras de  $t = 1$  mm están completamente gobernadas por movimientos de sólido rígido mientras que al aumentar la sección se desbloquea localmente el efecto del material (una resina rígida). De ese modo, las tensiones que se concentran en las bisagras (unión entre las vigas arqueadas y la recta) provocan nucleaciones y propagaciones de grieta. No obstante, los valores recogidos para todas las configuraciones son extraordinarios, asemejándose e incluso superando a otros en literatura fabricados con materiales flexibles o dúctiles [17-18].

**Tabla 1.** Valores de fuerza máxima, masa, fracción volumétrica y energía específica absorbida en función del ancho de las vigas de las poliestructuras.

anchura de viga	$F_{max}$ (N)	$m$ (g)	$vol$ (%)	$SEA$ (kJ/kg)
1 mm	7.25	1.57	1.2	26.49
2 mm	31.03	4.09	4.6	21.06
3 mm	94.79	8.45	9.7	17.20

En cuanto a la rotura de las estructuras, como se puede observar en la **Figura 5**, la fractura siempre apareció en torno a las bisagras, en la zona de conexión entre monoestructuras adyacentes. Esto se debe a la constricción que produce la unión, impidiendo que la viga del centro continúe girando. No obstante, aunque las poliestructuras fracturasen de ese modo, pueden seguir comprimiéndose hasta que la fuerza se elimine, que regresan a su estado original cerrándose la fractura.

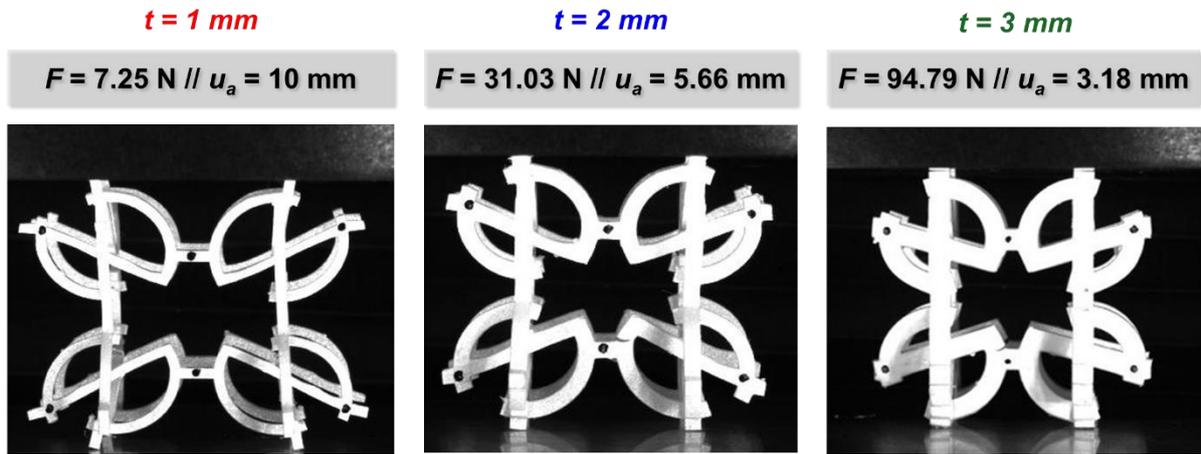


Figura 5. Estado de las poliestructuras  $t1$ ,  $t2$  y  $t3$  en el último momento registrado en las gráficas de fuerza-desplazamiento de la Figura 4a.

### 3.2. Simetría y auxeticidad de las poliestructuras

Para analizar y entender el comportamiento auxético de las poliestructuras es necesario primero entender los desplazamientos que ocurren de manera global; es decir, qué ocurre axial y transversalmente. Para ello, se definieron dos simetrías, definidas a continuación.

$$Simetría_{transversal} = \frac{\bar{X}_{izquierda}}{\bar{X}_{derecha}}$$

$$Simetría_{axial} = \frac{\bar{Y}_{superior}}{\bar{Y}_{inferior}}$$

Por tanto, la simetría transversal se calculó como la media de los desplazamientos en el eje x de los dos puntos de seguimiento de la izquierda entre los de la derecha; mientras que la simetría axial se define por la media entre el desplazamiento en eje y de los dos puntos del nivel superior y los del nivel inferior. Por tanto, las simetrías ideales para un comportamiento auxético son  $Simetría_{transversal} = -1$ , debido a la contracción lateral y  $Simetría_{axial} = 1$  por la propia naturaleza de compresión.

En la Figura 6a se pueden ver los resultados de las simetrías axiales (línea sólida) y transversales (línea discontinua) para las tres configuraciones estudiadas. De manera global se puede observar que la simetría axial es consistente independientemente de la anchura de viga, con valores similares a la simetría ideal axial durante toda la duración del ensayo de compresión. Ya que esta simetría depende puramente de la fuerza aplicada por la célula de carga el resultado simplemente sigue el desplazamiento de la máquina. Aunque no se aprecie por la escala de la imagen, tras la aparición de la fractura, esta simetría se pierde momentáneamente al experimentar un comportamiento de resorte, produciendo un movimiento instantáneo opuesto al de compresión. No obstante, al poco recupera la inercia de la compresión recuperando simetría entre el lado superior e inferior de la poliestructura.

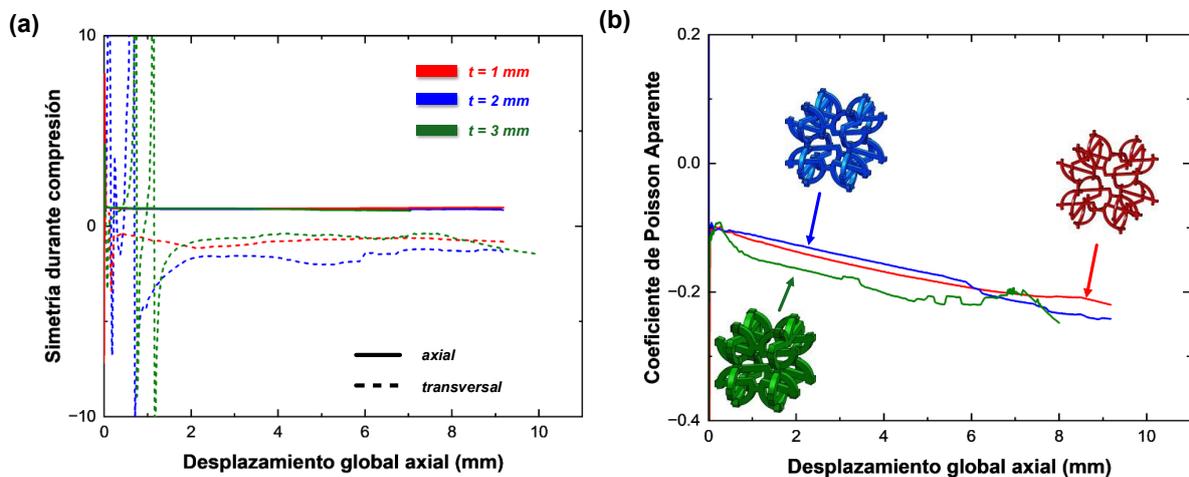


Figura 6. (a) Simetrías transversales y axiales en función de la anchura de la sección de la viga. (b) Coeficiente de Poisson aparente de las poliestructuras.

Por otro lado, la simetría transversal es mucho más susceptible a los pequeños movimientos que se produzcan en la poliestructura. Además, se pueden ver dos regiones diferenciadas en la figura: una primera zona de acomodación a las nuevas fuerzas de compresión y una homogeneización posterior. Al principio las pequeñas diferencias y errores fruto de la impresión 3D hacen que las estructuras necesiten acomodarse a las cargas, tambaleándose hasta centrarse. Una vez pasado este momento, las poliestructuras comienzan a cobrar un movimiento más simétrico, en torno a -1 (por auxeticidad lado izquierdo y derecho se mueven en sentidos opuestos hacia el centro) hasta el final del ensayo. Cabe destacar que aquellas poliestructuras con menor sección experimentaron regiones de acomodación más reducidas en el tiempo, rápidamente tendiendo hacia el -1, mientras que  $t_2$  y  $t_3$ , debido a su rigidez, su oposición al movimiento (rigidez) hizo que se retrasara más.

En cuanto al comportamiento auxético, representado por el coeficiente de Poisson aparente en la **Figura 6b**, hay un par observaciones principales. Primero, es que el comportamiento auxético es inherente a la forma S-shaped, de modo que la anchura de viga no contribuye. De este modo la media del coeficiente de Poisson aparente a final del ensayo es de  $-0.22 \pm 0.2$ . Además, el comportamiento auxético es lineal, incrementando de manera monótona conforme la estructura se comprime. De hecho, ya que el coeficiente de Poisson aparente está relacionado con las simetrías, este presenta perturbaciones en los mismos momentos que la simetría transversal, en especial para el caso de  $t = 3$  mm, que experimenta su primera fluctuación en torno a la fractura. No obstante, en todos los casos el coeficiente de Poisson aparente se mantuvo negativo durante toda la compresión hasta fin de ensayo.

Finalmente, recalcar que la auxeticidad se mantuvo hasta desplazamientos relativamente elevados, incluso pasada la fractura. Esto es importante ya que normalmente el comportamiento auxético está relacionado con, además de la simetría geométrica, con un comportamiento flexible del material. Por el contrario, en este trabajo, la auxeticidad se obtuvo simplemente por diseño, superando el límite del material mediante rigideces reducidas.

## 4. Conclusiones

En este estudio se ha presentado un apilado para unas monoestructuras auxéticas en 3D denominadas S-shaped. El diseño se imprimió en 3D con *mSLA* en material rígido para varias secciones de viga y evaluar así su efecto en las propiedades mecánicas. Las poliestructuras se sometieron a ensayos cuasi-estáticos de compresión con DIC para monitorizar los movimientos locales. Así, se pudo observar que, aunque los especímenes reportasen bajos valores de rigidez, eran capaces de soportar hasta cargas 1250 veces superiores a su peso, en el caso de  $t_3$ . Adicionalmente, se vio que estas poliestructuras demostraron tener muy buenas propiedades de energía específica absorbida, donde destacó la de menor sección con  $\sim 26.5$  kJ/kg. Además, el análisis de simetría demostró que una vez pasada una región de acomodación inicial, se mantuvo la relación ideal para la dirección axial y transversal, aunque esta última fuera más sensible a cambios bruscos (fractura en las vigas). Estas simetrías, a su vez, se convirtieron en coeficientes de Poisson aparentes negativos independientemente de la sección de las vigas, alcanzando valores de hasta -0.2. Por tanto, las poliestructuras S-shaped demuestran ser una buena opción para diseños auxéticos, incluso aun siendo fabricadas con materiales rígidos, desbloqueando la opción de este tipo de diseños indistintamente del material.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación interna de movilidad de la Universidad Carlos III de Madrid, y al MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y la European Union NextGenerationEU/PRTR por respaldar el proyecto PDC2021-121368-C21, al MCIN/AEI/10.13039/501100011033 por los proyectos PID2020-112628RA-I00 y PID2020-118480RB-C22, y a la Generalitat Valenciana por el CIAPOS/2021/271. Adicionalmente también agradecer el apoyo de la National Science Foundation bajo el proyecto n°. 2035663, del U.S. Department of Defense (proyectos W911NF1410039, W911NF1810477, W911NF2310150, and N00174-23-1-0009), y del programa de estancias senior de Fulbright US-Spain.

## 6. Referencias

- [1] Haid D., Foster L., Hart J., Greenwald R., Allen T., Sareh P., Duncan O., “Mechanical metamaterials for sports helmets: structural mechanics, design optimisation, and performance”, *Smart Materials and Structures*, **32**, 113001 (2023).
- [2] Shirzad M., Zolfagharian A., Bodaghi M., Nam S. Y., “Auxetic metamaterials for bone-implanted medical devices: Recent advances and new perspectives”, *European Journal of Mechanics – A/Solids*, **98**, 104905 (2023).
- [3] Saxena K. K., Das R., Calius E. P., “Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review”, *Advanced Engineering Materials*, **18(11)**, 1847-1870 (2016).

- [4] Emmanuel Owoichoечи Momoh E. O., Jayasinghe A., Hajsadeghi M., Vinai R., Evans K. E., Kripakaran P., Orr J., “A state-of-the-art review on the application of auxetic materials in cementitious composites”, *Thin-Walled Structures*, **196**, 111447 (2024).
- [5] Rufo-Martín C., Infante-García D., Díaz-Álvarez J., Miguélez H., Koohbor B., Youssef G., “Development, 3D printing, and mechanics of novel auxetic unit cell monostructures”, *Thin-Walled Structures*, **208**, 112859 (2025).
- [6] Martínez J., “Random Auxetic Porous Materials from Parametric Growth Processes”, *Computer-Aided Design*, **139**, 103069 (2021).
- [7] Deng X., Qin S., “In-plane energy absorption characteristics and mechanical properties of novel re-entrant honeycombs”, *Composite Structures*, **313**, 116951 (2023).
- [8] Qi C., Pei L., Remennikov A., Yang S., Liu J., Wang J., Liao X., “Parametric study and optimization of the protect system containing a re-entrant hexagon cored sandwich panel under blast impact”, *Composite Structures*, **252**, 112711 (2020).
- [9] Xi H., Xu J., Cen S., Huang S., “Energy Absorption Characteristics of a Novel Asymmetric and Rotatable Re-entrant Honeycomb Structure”, *Acta Mechanica Solida Sinica*, **34(4)**, 550–560 (2021).
- [10] Najafi M., Ahmadi H., Liaghat G., “Experimental investigation on energy absorption of auxetic structures”, *Materials Today: Proceedings*, **34**, 350–355 (2021).
- [11] Bohara R. P., Linforth S., Nguyen T., Ghazlan A., Ngo T., “Anti-blast and -impact performances of auxetic structures: A review of structures, materials, methods, and fabrications”, *Engineering Structures*, **276**, 115377 (2023).
- [12] Lakes R. S., “Negative-Poisson’s-Ratio Materials: Auxetic Solids”, *Annual Review Of Materials Research*, **47(1)**, 63–81 (2017)
- [13] Joseph A., Mahesh V., Harursampath D., “On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review”, *Advances in Manufacturing*, **9**, 342-368 (2021).
- [14] Uribe-Lam E., Treviño-Quintanilla C. D., Cuan-Urquizo E., Olvera-Silva O., “Use of additive manufacturing for the fabrication of cellular and lattice materials: a review”, *Materials and Manufacturing Processes*, **36(3)**, 257-280 (2021).
- [15] Yang Y., Liu B., Liu X., Li X., Wang G., “Manufacturability identification based on the slice for vat photopolymerization”, *Journal of Manufacturing Processes*, **120**, 837-853 (2024).
- [16] Meena K., Singamneni S., “A new auxetic structure with significantly reduced stress concentration effects”, *Materials & Design*, **173**, 107779 (2019).
- [17] Yin H., Zhang W., Zhu L., Meng F., Liu J., Wen G., “Review on lattice structures for energy absorption properties”, *Composite Structures*, **304**, 116397 (2023).
- [18] T. Gärtner, S. J. Van Den Boom, J. Weerheijm, and L. J. Sluys, “Geometric effects on impact mitigation in architected auxetic metamaterials”, *Mechanics of Materials*, **191**, 104952, (2024).