



MODELADO Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE DIFERENTES NÚCLEOS DE ESTRUCTURA SÁNDWICH PRODUCIDOS MEDIANTE FABRICACIÓN ADITIVA

Brochado, E. C.¹; Seriacopi, V.²; Bordinassi, E.C.³; Lebrao, G.W.⁴; Tovar, J.C.⁵;

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, emeldo.caballerob@unilibre.edu.co.

²Instituto de Tecnología de Mauá, Sao Paulo, vanessa.seriacopi@maua.br.

³Instituto de Tecnología de Mauá, Sao Paulo, ecb@maua.br.

⁴Instituto de Tecnología de Mauá, Sao Paulo, guinet@maua.br.

⁵Ingeniería Naval, Universidad tecnológica de Bolívar, jcabrera@edu.co.

RESUMEN

El presente estudio evalúa la capacidad de absorción de energía de estructuras en condiciones de flexión y compresión, utilizando núcleos con geometrías auxéticas y no auxéticas, con vistas a su posible aplicación en la industria naval. Se realizó modelado computacional y simulaciones por elementos finitos, junto con ensayos mecánicos. Las geometrías fueron procesadas mediante fabricación aditiva con filamento PET en una impresora 3D CREALITY. Las muestras fueron sometidas a ensayos de compresión y de flexión en tres puntos, utilizando una máquina universal INSTRON EMIC 23-50. Los resultados mecánicos indican que los núcleos y paneles con geometrías auxéticas exhiben una tasa de absorción de energía mejorada, llegando aproximadamente al 70% en compresión, permitiendo la identificación y optimización de las geometrías más eficientes para cada tipo de núcleo. La comparación entre los resultados de las simulaciones numéricas y los datos experimentales muestra son consistentes, con diferencias numéricas inferiores al 15%.

Palabras clave: núcleo de estructura sandwich, modelado, caracterización mecánica, fabricación aditiva 3D.

INTRODUCCIÓN

Las estructuras sándwich compuestas han ganado interés en diversas aplicaciones industriales, como la aeroespacial, automotriz, naval y de embalaje, según los investigadores Saseendran et al. (2021) y Li. et al. (2022). De acuerdo Zhang et al. (2021), son de interés por su baja densidad, alta resistencia y excelente

capacidad de absorción de energía frente a impactos. Castanie et al. (2020) mencionan que estas estructuras están conformadas por dos láminas delgadas exteriores separadas por un núcleo liviano, dependiendo sus propiedades mecánicas de los materiales, la geometría de las láminas y la configuración del núcleo.

En los últimos años, se han estudiado ampliamente los modos de falla y la respuesta a la flexión de estructuras sándwich con diferentes núcleos, como corrugados (SUN et al., 2023), honeycomb (LI et al., 2021; QIN et al., 2023), espuma metálica (WANG et al., 2023) y redes (ZHOU et al., 2022). Estos estudios han mostrado que la configuración y geometría del núcleo determinan propiedades mecánicas, como la absorción de energía y la resistencia a la flexión, como evidencian en investigaciones previas (XIA et al., 2022; ZAHARIA et al., 2020; YAZDANI SARVESTANI et al., 2018; FARROKHABADI et al., 2020). Una configuración de núcleo prometedora son las estructuras auxéticas, las cuales exhiben una relación de Poisson negativa, expandiéndose lateralmente bajo compresión axial (ZHANG et al., 2020). Esta característica confiere propiedades mecánicas superiores, como mayor resistencia al cizallamiento (JIN et al., 2019), resistencia a la indentación (HU et al., 2019), incremento en la tenacidad a la fractura y absorción de energía (ZHANG et al., 2022; LINFORTH et al., 2021). Con los avances en la tecnología de impresión 3D, se han desarrollado y estudiado diversas estructuras auxéticas, como re-entrantes (WEI et al., 2021); quirales (KAI et al., 2022; MICHALSKI; STREK, 2022); y giratorias (MROZEK; STREK, 2022), entre otras. Según estos estudios, los núcleos de geometría auxética en estructuras sándwich muestran un comportamiento distintivo bajo cargas mecánicas, despertando un gran interés por su promisorio potencial en aplicaciones de ingeniería.

Varios estudios han analizado la dependencia de los núcleos auxéticos en las propiedades de flexión de estructuras sándwich, tanto experimental como numéricamente, (NAMVAR et al., 2023; NAJAFI et al., 2022; LI, W. et al., 2022; ZHAO et al., 2021).

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento mecánico a compresión y flexión de núcleos de estructuras sándwich con geometrías convencionales (círculo y elipse), auxéticas (re-entrantes) e híbridas (bicell), fabricados por impresión 3D en PET, analizando el efecto de la geometría en la absorción de energía, validando los resultados experimentales mediante simulaciones por elementos finitos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño de los núcleos de estructuras sándwich se realizaron en Solidworks 2022-2023, dos con geometrías convencionales (círculo y elipse), uno auxético (honeycomb re-entrante) y otro híbrido (bicell). Las geometrías de cada celda unitaria se muestran en la Figura 1 y sus dimensiones (d: diámetro del círculo; e1 y e2: ejes menor y mayor de la elipse; t: espesor de las celdas re-entrante y bicell; h: altura) en la Tabla 1. Los perfiles de cada núcleo se ilustran en la Figura 2.

Figura 1. Geometrías de las celdas unitarias de cada núcleo: (a) círculo, (b) elipse, (c) honeycomb reentrante y (d) bicell.

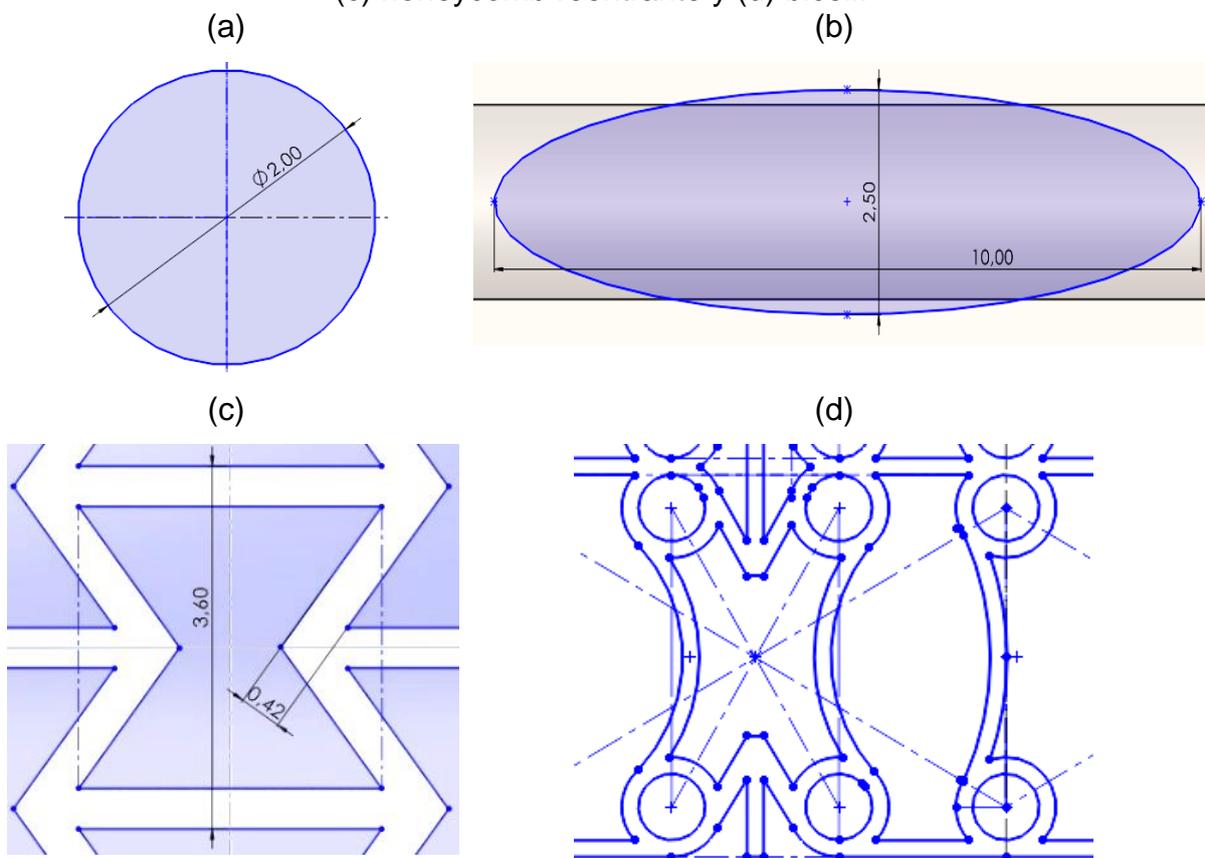
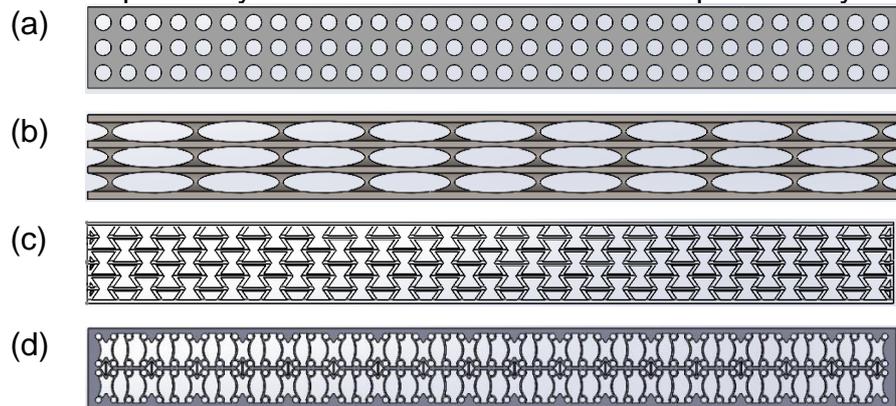


Tabla 1. Parámetros geométricos de celdas unitarias en un núcleo.

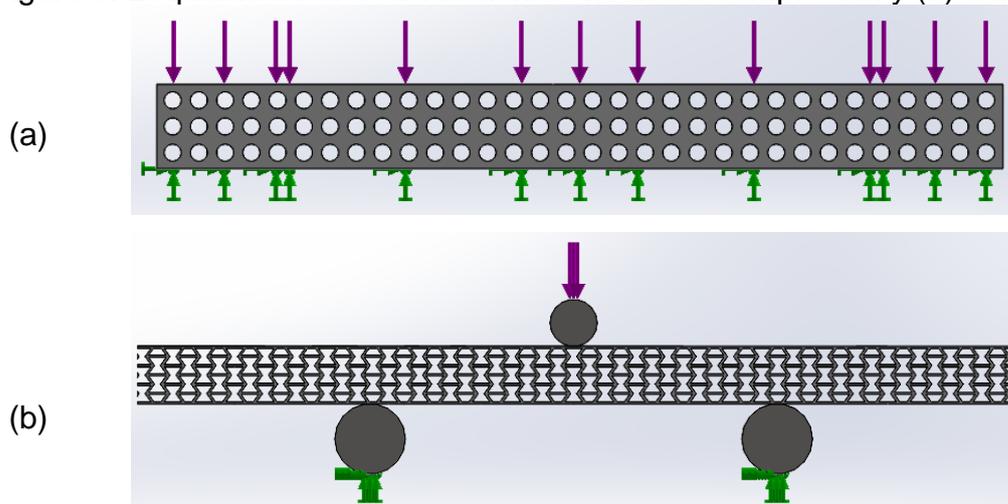
Parámetro	círculo	elipse	re-entrante	bicell
d (mm)	2,0			
e1 (mm)		2,5		
e2 (mm)		10,0		
t (mm)			0,42	1,0
h (mm)			3,6	0,8

Figura 2. Perfiles de núcleos de diferentes geometrías: (a) circular, (b) elíptico, (c) reentrante y (d) bicelular, con dimensiones de 100 mm x 100 mm x 10 mm para ensayos de compresión y de 10 mm x 10 mm x 100 mm para ensayos de flexión.



En las Figuras 3 (a) y 3 (b) se muestran esquemas de las simulaciones a flexión en tres puntos y compresión en el plano, recreadas en Solidworks. Se modelaron cuatro núcleos con geometrías uniaxial y cuatro biaxial, con el objetivo de evaluar su comportamiento mecánico bajo compresión y flexión. Se aplicaron condiciones de contorno realistas, se consideró como material PET para los núcleos y se generó una malla sobre la estructura con refinamiento en áreas críticas. Los resultados simulados fueron validados al ser comparados con datos experimentales, para garantizar la robustez del modelo.

Figura 3. Esquema de una simulación de núcleo a compresión y (b) a flexión.



Los núcleos se fabricaron en una impresora 3D CREALITY, extruyendo filamento de PET capa por capa, los parámetros de impresión se registraron en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros para el proceso de impresión del filamento PET.

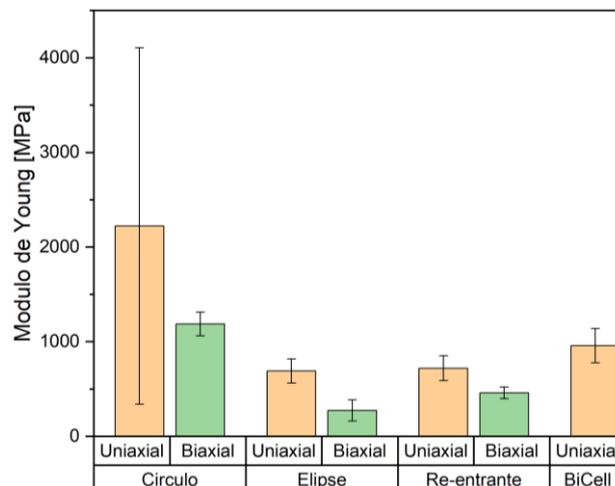
Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura de impresión	[°C]	215
Temperatura de sustrato	[°C]	70
Diámetro de la boquilla	[mm]	0,4
Espesor de la capa	[mm]	0,2
Velocidad de impresión	[mm/s]	50

Se evaluó el comportamiento mecánico de las estructuras sándwich mediante pruebas de compresión cuasi estática según ASTM C365/C 365M-05 en una máquina universal INSTRON EMIC 23-50, utilizando una celda de carga de 50 kN a 0,5 mm/min, aplicando la carga en dirección -y sobre la muestra en el plato inferior. También se realizaron pruebas de flexión a tres puntos conforme a ASTM C393/C393M, colocando las muestras sobre dos soportes fijos separados por 70 mm y a una velocidad de desplazamiento de 2,0 mm/min. Se llevaron a cabo una prueba de compresión, así como tres pruebas de flexión a tres puntos a cada una de las configuraciones individuales de núcleos.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

El módulo de Young a flexión de cada núcleo fue calculado automáticamente por el software de la máquina universal, y los resultados experimentales, que incluyen el promedio de tres ensayos y su desviación estándar (DE), se registraron en la Figura 4, que presenta una comparación de los valores obtenidos del módulo de Young a flexión para cada núcleo.

Figura 4. Módulo de Young para núcleos de diversas geometrías.



El análisis indica que el núcleo con geometría circular uniaxial presenta el módulo de elasticidad más alto (2221,53 MPa), aunque con una alta desviación estándar (1883,51 MPa), lo que refleja una considerable variabilidad. En contraste, los núcleos con geometría elíptica y re-entrante tienen módulos significativamente más bajos (690,25 MPa y 719,42 MPa, respectivamente), lo que sugiere menor rigidez. El núcleo circular biaxial muestra mayor consistencia (1186,28 MPa) en comparación con el uniaxial. Estos resultados confirman la influencia de la geometría y la calidad de fabricación en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos tipo sándwich, coincidiendo con estudios previos. Se recomienda explorar el núcleo Bicell Biaxial y optimizar el proceso de fabricación en la impresión 3D.

La absorción de energía (EA) es calculada para estimar la capacidad de los núcleos de absorber energía antes de la falla, integrando el área bajo la curva de fuerza-desplazamiento obtenida en ensayos de compresión y/o flexión, utilizando la ecuación (1).

$$EA = \int_0^{\delta} F d\delta \quad (1)$$

donde, F denota la carga aplicada a la muestra antes de la falla y δ el desplazamiento máximo. Las Figuras 5(a), 5(b), 5(c) y 5(d) presentan las curvas experimentales de fuerza-desplazamiento, mientras que los resultados de la absorción de energía (EA) se ilustran en las Figuras 6(a) y 6(b).

Los resultados de los ensayos de compresión y flexión demuestran que la geometría del núcleo tiene un impacto significativo en la capacidad de absorción de energía. El núcleo elíptico uniaxial logró la mayor absorción en compresión con 114,98 J, seguido por el elíptico biaxial con 88,39 J, mientras que el núcleo circular presentó 32,43 J (uniaxial) y 53,36 J (biaxial). Los núcleos reentrantes y bicelulares mostraron valores intermedios, destacando el reentrante uniaxial con 57,10 J. En flexión, el núcleo circular biaxial alcanzó 0,64 J y el reentrante biaxial 1,11 J, lo que resalta la importancia de la geometría en la resistencia a la flexión. Estos hallazgos subrayan que la geometría es crucial para la absorción de energía en estructuras ligeras y resistentes. Los valores de absorción de energía (EA) obtenidos de los ensayos de compresión en núcleos de diferentes geometrías fueron validados mediante análisis por elementos finitos (MEF). Se observó una aceptable concordancia entre los valores experimentales y los resultados del MEF, con un porcentaje de error que no superó el 15%, como se observa en la Tabla 4. Esto representa un grado de confiabilidad entre

ambos enfoques metodológicos en la caracterización del comportamiento a compresión de los núcleos evaluados.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los núcleos a compresión en el plano.

Geometría	Absorción de energía [J]			Geometría	Absorción de energía [J]		
	Exp. (Media)	MEF	% Error		Exp. (Media)	MEF	% Error
	Uniaxial				Biaxial		
Circulo	32,43	37,26	12,96	Circulo	53,36	55,73	4,25
Elipse	114,98	118,45	2,93	Elipse	88,39	91,12	3
Re-entrante	57,1	63,16	9,59	Re-entrante	57,06	58,69	2,78
BiCell	46,74	48,56	3,75	BiCell	-----	-----	-----

Figura 5. Curvas de fuerza-deformación de núcleos (a) uniaxiales a compresión; (b) biaxiales a compresión; (c) uniaxiales a flexión; (d) biaxiales a flexión.

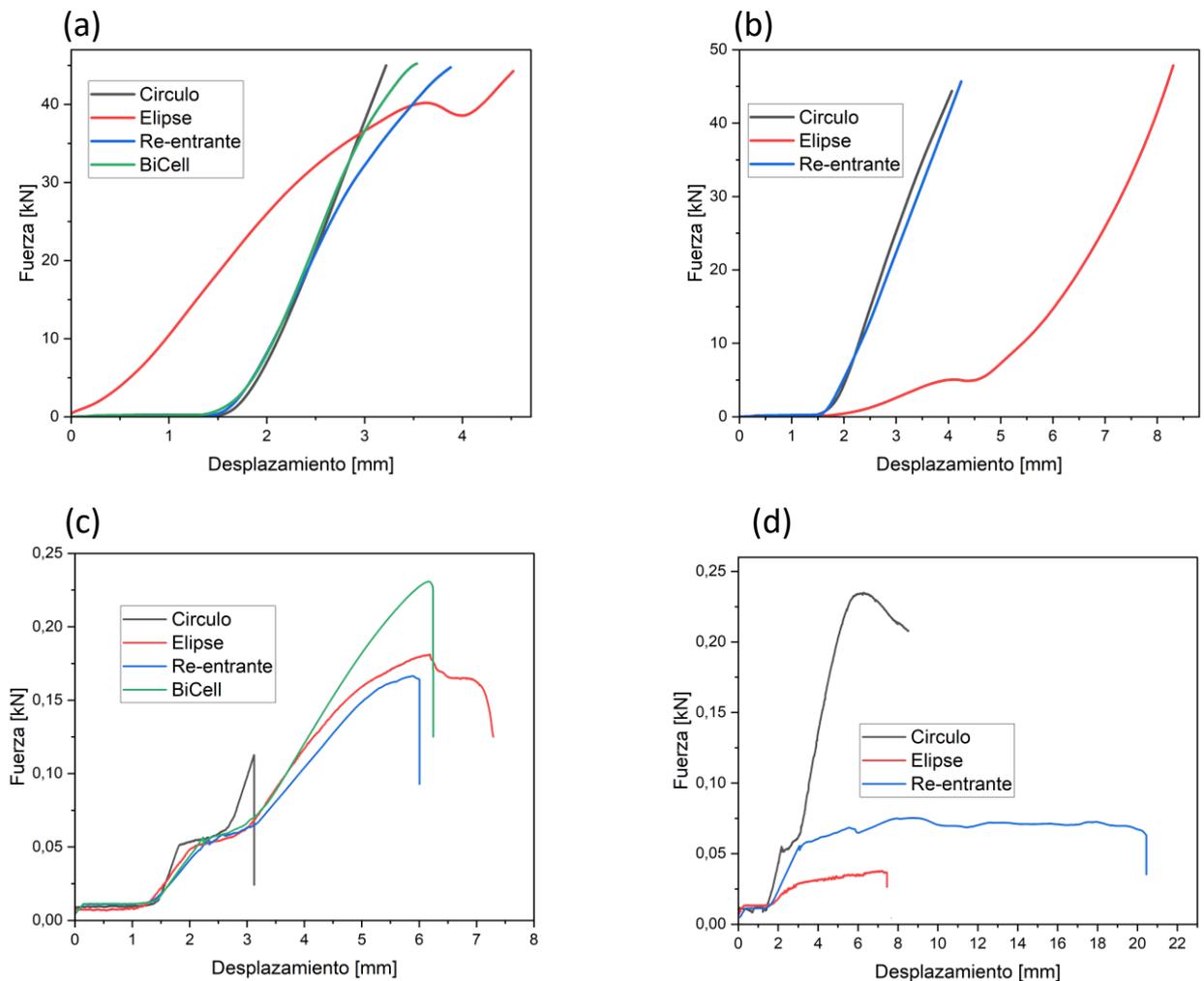
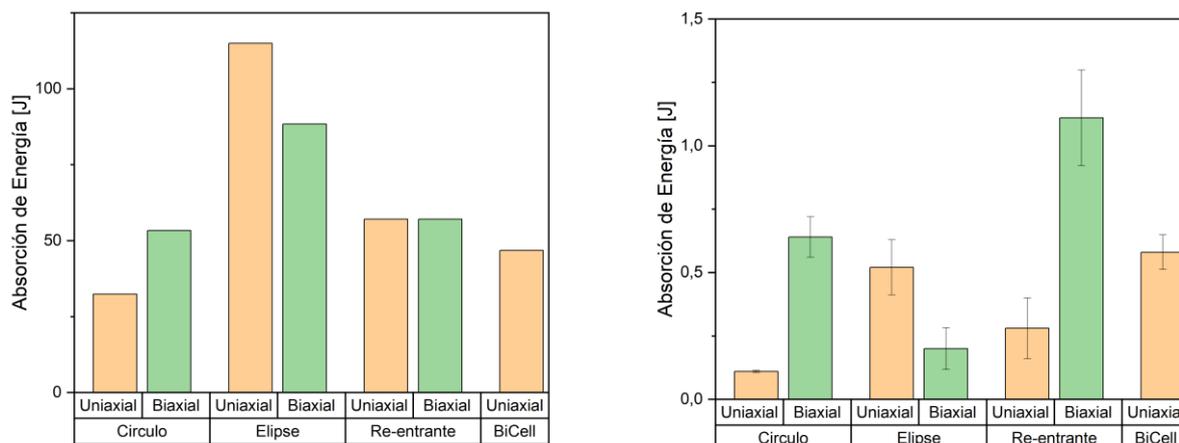


Figura 6. Absorción de energía por núcleos (a) compresión; (b) flexión.



Un parámetro fundamental en la caracterización de las propiedades mecánicas de un núcleo para compuestos sándwich es la resistencia a la compresión en el plano, la cual fue calculada utilizando la ecuación (2) según la norma ASTM C 365/C 365M y reportada con tres cifras significativas en la Tabla 5.

$$F_z = \frac{P_{max}}{A} \quad (2)$$

donde, F_z es la resistencia máxima a compresión [MPa], P es la carga máxima registrada antes de la falla [N] y A es el área de la sección transversal del núcleo [mm²].

Tabla 5. Resistencia a la compresión de núcleos con diferentes geometrías.

Geometría	Carga máxima [N]	Área [mm ²]	Resistencia a compresión [MPa]	Geometría	Carga máxima [N]	Área [mm ²]	Resistencia a compresión [MPa]
	Uniaxial				Biaxial		
Circulo	45	1	45	Circulo	44,396	1	44,396
Elipse	44,279	1	44,279	Elipse	45,681	1	45,681
Re-entrante	44,751	1	44,751	Re-entrante	47,857	1	47,857
BiCell	45,228	1	45,228	BiCell	-----	-----	-----

Los núcleos evaluados, una muestra de cada geometría, mostraron resistencias a compresión similares, indicando que las propiedades del material son más relevantes que las diferencias geométricas en la carga máxima antes del fallo. Sin embargo, otras propiedades como rigidez, capacidad de absorción de energía y

deformación pueden variar según la geometría del núcleo, lo que impacta el rendimiento en aplicaciones específicas. Por lo tanto, como trabajo futuro se sugiere realizar ensayos adicionales para analizar el efecto de las diferentes geometrías en el comportamiento del material bajo diversas condiciones de carga, con el objetivo de optimizar el diseño para aplicaciones específicas.

CONCLUSIÓN

Las pruebas de compresión y flexión en estructuras sándwich con núcleos impresos en 3D (PET) demuestran la importancia del diseño del núcleo en la absorción de energía para aplicaciones estructurales. El núcleo bicell uniaxial destaca con una carga promedio de 69,97 J, mientras que la elíptica supera entre las configuraciones biaxiales con una carga promedio de 79,65 J. La mejora del rendimiento mediante extrusión biaxial resalta la necesidad de optimizar el diseño del núcleo. Aunque las estructuras mostraron resistencia a la compresión similar, otras propiedades como rigidez y absorción de energía varían según la geometría del núcleo, afectando su rendimiento en aplicaciones específicas. Este estudio evaluó la absorción de energía a compresión y flexión, encontrando variaciones entre los dos ensayos. Se validó la absorción de energía (EA) de los núcleos uniaxiales y biaxiales sometidos a compresión mediante un modelo de simulación por elementos finitos, encontrando una notable concordancia entre los resultados experimentales y numéricos, con un porcentaje de error que no superó el 15%, lo cual puede representar confiabilidad de los datos y permitir deducir el comportamiento de los materiales compuestos tipo sándwich bajo cargas de compresión. Es recomendable realizar a futuro, ensayos adicionales para evaluar el efecto de diferentes geometrías del núcleo bajo diversas condiciones de carga, con el fin de optimizar el diseño para aplicaciones concretas.

REFERENCIAS

CASTANIE, B.; BOUVET, C.; GINOT, M. Review of composite sandwich structure in aeronautic applications. *Composites Part C: Open Access*, [s. l.], v. 1, p. 100004, 2020.

FARROKHABADI, A.; AHMAD TAGHIZADEH, S.; MADADI, H.; NOROUZI, H.; ATAEI, A. Experimental and numerical analysis of novel multi-layer sandwich panels under three point bending load. *Composite Structures*, [s. l.], v. 250, p. 112631, 2020.

KAI, L.; XIAOFEI, C.; PENG, Z.; WENWANG, W.; YING, L. Dynamic mechanical performances of enhanced anti-tetra-chiral structure with rolled cross-section ligaments under impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, [s. l.], v. 166, p. 104204, 2022.

LI, W.; ATSUSHI, D.; OH, Y. H.; JIRATHEARANAT, S.; WU, Z. A.; CHUA, B. W. Influences of skin thickness, core topology, depth and direction on flexural deformation and ductile failure of Al honeycomb-based sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, [s. l.], v. 239, p. 109957, 2022.

LI, M.; SANG, L.; XIONG, Z.; HOU, W. Design and optimisation of vehicle frontal bumper beam with alternative carbon fibre-reinforced plastics in corrugated sandwich structure. *International Journal of Crashworthiness*, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13588265.2021.1981189>. Acesso em: 22 abr. 2024.

LI, Y.; WANG, F.; JIA, S.; MA, X.; ZHANG, Y. Numerical and Experimental Investigation of Static Four-point Bending Response of Honeycomb Sandwich Structure: Failure Modes and the Effect of Structural Parameters. *Fibers and Polymers*, [s. l.], v. 22, n. 6, p. 1718–1730, 2021.

LINFORTH, S.; NGO, T.; TRAN, P.; RUAN, D.; ODISH, R. Investigation of the auxetic oval structure for energy absorption through quasi-static and dynamic experiments. *International Journal of Impact Engineering*, [s. l.], v. 147, p. 103741, 2021.

MICHALSKI, J.; STREK, T. Numerical analysis of an auxetic anti-tetrachiral sandwich panel subjected to steady-state harmonic base motion. *Vibrations in Physical Systems*, [s. l.], v. Vol. 33, n. nr 3, 2022. Disponível em: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-d2fc3001-466e-48a1-af4d-d7e41e466844>. Acesso em: 22 abr. 2024.

MROZEK, A.; STREK, T. Numerical Analysis of Dynamic Properties of an Auxetic Structure with Rotating Squares with Holes. *Materials*, [s. l.], v. 15, n. 24, p. 8712, 2022.

NAJAFI, M.; AHMADI, H.; LIAGHAT, G. Investigation on the flexural properties of sandwich beams with auxetic core. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 61, 2022.

NAMVAR, N.; MOLOUKZADEH, I.; ZOLFAGHARIAN, A.; DEMOLY, F.; BODAGHI, M. Bio-inspired design, modeling, and 3D printing of lattice-based scale model scooter decks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s. l.], v. 126, n. 7, p. 2887–2903, 2023.

QIN, Q.; CHEN, S.; BAI, C.; WANG, Y.; ZHANG, W. On influence of face sheet distributions on low-velocity impact failure of metal honeycomb core sandwich plates. *Thin-Walled Structures*, [s. l.], v. 182, p. 110202, 2023.

SASEENDRAN, V.; VARATHARAJ, P.; PERERA, S.; SENEVIRATNE, W. Damage initiation and fracture analysis of honeycomb core single cantilever beam sandwich specimens. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, [s. l.], v. 23, n. 7, p. 2923–2943, 2021.

SUN, H.; YUAN, H.; ZHANG, Jing; ZHANG, Jianxun; DU, J.; HUANG, W. Dynamic response of multilayer sandwich beams with foam-filled trapezoidal corrugated and foam cores under low-velocity impact. *Engineering Structures*, [s. l.], v. 286, p. 116080, 2023.

WANG, H.; SHAO, J.; ZHANG, W.; YAN, Z.; HUANG, Z.; LIANG, X. Three-point bending response and energy absorption of novel sandwich beams with combined re-entrant double-arrow auxetic honeycomb cores. *Composite Structures*, [s. l.], v. 326, p. 117606, 2023.

WEI, L.; ZHAO, X.; YU, Q.; ZHANG, W.; ZHU, G. In-plane compression behaviors of the auxetic star honeycomb: Experimental and numerical simulation. *Aerospace Science and Technology*, [s. l.], v. 115, p. 106797, 2021.

XIA, F.; DURANDET, Y.; TAN, P. J.; RUAN, D. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores. *Thin-Walled Structures*, [s. l.], v. 179, p. 109723, 2022.

YAZDANI SARVESTANI, H.; AKBARZADEH, A. H.; MIRBOLGHASEMI, A.; HERMENEAN, K. 3D printed meta-sandwich structures: Failure mechanism, energy absorption and multi-hit capability. *Materials & Design*, [s. l.], v. 160, p. 179–193, 2018.

ZHANG, W.; QIN, Q.; LI, K.; LI, J.; WANG, Q. Effect of stepwise gradient on dynamic failure of composite sandwich beams with metal foam core subject to low-velocity impact. *International Journal of Solids and Structures*, [s. l.], v. 228, p. 111125, 2021.

ZHANG, Y.; REN, X.; HAN, D.; CHENG, X.; JIANG, W.; ZHANG, X. G.; ZHANG, X. Y.; XIE, Y. M. Static and dynamic properties of a perforated metallic auxetic metamaterial with tunable stiffness and energy absorption. *International Journal of Impact Engineering*, [s. l.], v. 164, p. 104193, 2022.

ZHAO, X.; WEI, L.; WEN, D.; ZHU, G.; YU, Q.; MA, Z. D. Bending response and energy absorption of sandwich beams with novel auxetic honeycomb core. *Engineering Structures*, [s. l.], v. 247, p. 113204, 2021.

ZHOU, X.; LI, J.; QU, C.; BU, W.; LIU, Z.; FAN, Y.; BAO, G. Bending behavior of hybrid sandwich composite structures containing 3D printed PLA lattice cores and magnesium alloy face sheets. *The Journal of Adhesion*, [s. l.], v. 98, n. 11, p. 1713–1731, 2022.

MODELING AND MECHANICAL CHARACTERIZATION OF DIFFERENT SANDWICH STRUCTURE CORES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

This study evaluates the energy absorption capacity of structures under bending and compression conditions, using cores with auxetic and non-auxetic geometries, with a view to their possible application in the naval industry. Computational modelling and finite element simulations were performed, together with mechanical testing. The geometries were processed by additive manufacturing with PET filament on a CREALITY 3D printer. The samples were subjected to compression tests and three-point bending tests, using an INSTRON EMIC 23-50 universal machine. The mechanical results indicate that the cores and panels with auxetic geometries exhibit an improved energy absorption rate, reaching approximately 70% in compression, allowing the identification and optimization of the most efficient geometries for each type of core. The comparison between the results of the numerical simulations and the experimental data shows a good agreement, with numerical differences less than 15%.

Keywords: sandwich structure core, modeling, mechanical characterization, 3D additive manufacturing.