

Efecto de la rapidez de deformación en la respuesta viscoelástica de estructuras auxéticas de ABS y PLA impresas en 3D

Jesús Gabino Puente-Córdova^A, Flor Yanhira Rentería-Baltiérrez^B,
Mario Alberto Bello-Gómez^A, Nasser Mohamed-Noriega^A

^AUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

^BUniversidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Químicas, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

flor.renteriabtz@uanl.edu.mx, mario.bellogm@uanl.edu.mx,
nasser.mohamednr@uanl.edu.mx, Autor de correspondencia: jesus.puentecr@uanl.edu.mx

RESUMEN

Los materiales auxéticos se caracterizan por presentar una relación de Poisson negativa, lo que les permite expandirse transversalmente cuando son sometidos a tensión y contraerse al ser comprimidos. Este comportamiento, que no depende del material base sino de la geometría interna, ha despertado un creciente interés debido a su capacidad de absorción de energía y amortiguamiento mecánico. En este trabajo se fabricaron estructuras auxéticas cúbicas mediante manufactura aditiva por impresión en 3D, utilizando ácido poliláctico (PLA) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) como materiales base. La respuesta viscoelástica de ambos polímeros se caracterizó mediante análisis mecánico dinámico (DMA), mientras que el comportamiento mecánico de las estructuras se evaluó mediante ensayos de compresión uniaxial a diferentes velocidades de deformación. Los resultados muestran que, a temperatura ambiente, las estructuras auxéticas fabricadas en ABS presentan una mayor sensibilidad a la rapidez de deformación en comparación con las de PLA. Esta diferencia se atribuye directamente al mayor factor de pérdida ($\tan \delta$) del ABS, lo que indica una mayor capacidad de disipación de energía. El estudio evidencia que la respuesta mecánica macroscópica de estructuras auxéticas impresas en 3D está estrechamente relacionada con las propiedades viscoelásticas del polímero base, proporcionando una visión clara y didáctica sobre la interacción entre material y geometría en este tipo de metamateriales.

PALABRAS CLAVE

Auxético, estructura, viscoelasticidad, PLA, ABS.

ABSTRACT

Auxetic materials are characterized by a negative Poisson's ratio, which allows them to expand laterally when stretched and contract when compressed. This unusual behavior does not arise from the base material itself, but from a specifically designed internal geometry, making auxetic structures attractive for energy absorption and vibration damping applications. In this work, cubic auxetic structures were fabricated by 3D printing using polylactic acid (PLA) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS) as base polymers. The viscoelastic behavior of both materials was characterized by dynamic mechanical analysis (DMA), while the mechanical response of the auxetic structures was evaluated through uniaxial compression tests at different deformation rates. The results show that, at room temperature, auxetic structures manufactured from ABS exhibit a stronger dependence on deformation rate compared to those made from PLA. This behavior is directly associated with the

higher loss factor ($\tan \delta$) of ABS, indicating a greater internal energy dissipation capacity. These findings highlight the direct relationship between the viscoelastic properties of the base polymer and the macroscopic mechanical response of 3D-printed auxetic structures, offering an accessible and educational perspective suitable for an academic engineering audience.

KEYWORDS

Auxetic, structure, viscoelasticity, PLA, ABS.

INTRODUCCIÓN

Los materiales convencionales poseen una característica mecánica intuitiva: cuando se estiran en una dirección, se adelgazan o contraen en las direcciones perpendiculares. Este comportamiento se describe por una relación de Poisson positiva ($0 < \nu < 1$). Sin embargo, en las últimas décadas, ha emergido una clase fascinante de "metamateriales" conocidos como materiales auxéticos, los cuales desafian esta lógica¹. Un material auxético al ser sometido a una tensión longitudinal, se expande transversalmente; de manera análoga, al ser comprimido, se contrae transversalmente (se densifica), ver figura 1. Este comportamiento atípico se explica debido a una relación de Poisson negativa ($-1 < \nu < 0$). Es importante destacar que esta propiedad no es intrínseca del material base, sino el resultado de una microestructura o geometría interna diseñada estratégicamente.

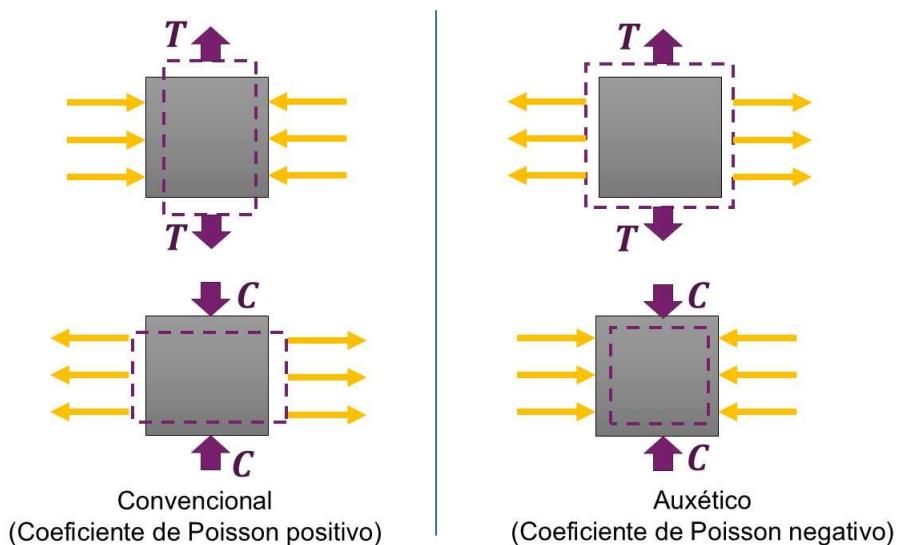


Fig. 1. Representación esquemática de la respuesta mecánica de un material convencional y uno auxético bajo cargas de tensión y compresión.

El término auxético, derivado del griego *auxetikos* (que significa "aquel que tiende a aumentar"), fue acuñado formalmente en 1991 por el profesor Ken Evans y colaboradores². Gracias a sus propiedades únicas, como la alta absorción de energía ante impactos y el eficaz amortiguamiento de vibraciones mecánicas, los materiales auxéticos son candidatos ideales para aplicaciones de alto rendimiento, entre las que destacan equipos de protección personal³, implantes biomédicos^{4,5}, componentes automotrices y aeroespaciales^{6,7}, y estructuras con control de deformación^{8,9}.

La literatura científica ha explorado estas estructuras desde varias perspectivas. Roderic Lakes en 1987 fue pionero al reportar experimentalmente la fabricación de espumas con relación de Poisson negativa, demostrando la viabilidad de estos metamateriales¹⁰. Con la llegada de la manufactura aditiva (impresión 3D), la complejidad en el diseño de geometrías auxéticas se ha expandido exponencialmente, permitiendo a investigadores como Wang et al. estudiar la influencia de los parámetros de impresión FDM (modelado por deposición fundida) en las propiedades mecánicas de estructuras 3D¹¹. Más recientemente, la investigación se ha centrado en su comportamiento dinámico. Koohbor et al. reportaron que estructuras auxéticas de tipo *rotating square*, impresas por

estereolitografía, exhiben una dependencia significativa de la respuesta mecánica con la rapidez de deformación ($\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$), incluyendo endurecimiento y variaciones en el coeficiente de Poisson¹². En particular, pocos estudios han correlacionado directamente parámetros viscoelásticos, como el módulo de almacenamiento y el factor de pérdida obtenidos mediante DMA, con la dependencia del comportamiento mecánico respecto a la rapidez de deformación en estructuras auxéticas impresas en 3D. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es caracterizar y comparar la respuesta viscoelástica en compresión uniaxial de cubos auxéticos impresos en 3D, utilizando dos polímeros termoplásticos típicos en FDM: ácido poliláctico (PLA) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Se realizaron ensayos mecánicos en función de la rapidez de deformación y se relaciona el comportamiento mecánico macroscópico con las propiedades termomecánicas y viscoelásticas de los materiales sólidos obtenidas mediante análisis mecánico dinámico (DMA). A diferencia de trabajos previos, este estudio establece una correlación cuantitativa directa entre parámetros viscoelásticos y la sensibilidad a la rapidez de deformación en estructuras auxéticas.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para evaluar la influencia de las propiedades viscoelásticas del material en la respuesta mecánica de las estructuras auxéticas, se diseñó un protocolo experimental dividido en tres etapas: (1) fabricación de probetas y estructuras auxéticas, (2) caracterización termomecánica de los materiales base, y (3) ensayos de compresión en función de la rapidez de deformación.

Se utilizaron dos filamentos comerciales de 1.75 mm de diámetro para la manufactura aditiva: ácido poliláctico (PLA) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Las probetas de ensayo consistieron en cubos de 40 x 40 x 40 mm con una microestructura auxética interna de tipo reentrante, y un espesor de pared de 1 mm (ver figura 2).

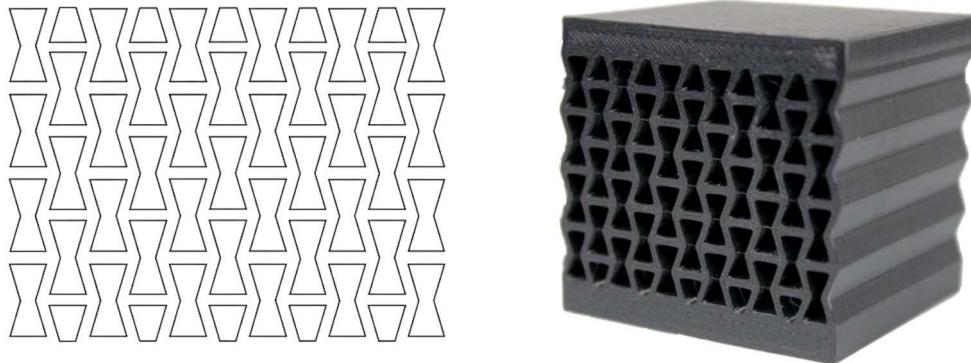


Fig. 2. Geometría auxética y cubo impreso mediante FDM.

La fabricación se llevó a cabo mediante FDM en una impresora 3D Elegoo Neptune IV. Los parámetros de impresión se presentan en la tabla I, los cuales se mantuvieron constantes para ambos materiales, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante para asegurar una calidad dimensional.

Tabla I. Parámetros de impresión FDM utilizados para cubos auxéticos.

| | Temperatura de extrusión (°C) | Temperatura de cama (°C) | Altura de capa (mm) | Velocidad de impresión (mm/s) | Porcentaje de relleno (%) |
|-----|-------------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|---------------------------|
| PLA | 215 | 60 | 0.2 | 200 | 100 |
| ABS | 270 | 110 | 0.2 | 60 | 100 |

Para correlacionar la respuesta mecánica macroscópica con las propiedades moleculares de los polímeros base, se realizó un análisis mecánico dinámico (DMA) utilizando un equipo DMA8000 de Perkin Elmer. Se prepararon probetas rectangulares (6 x 4 x 0.6 mm) de PLA y ABS. Las muestras se analizaron en modo tensión a una frecuencia constante de 1 Hz. Se utilizó un barrido de temperatura de 20 a 160°C con una rampa de calentamiento de 2°C/min. De estos ensayos se obtuvo el módulo

elástico complejo $E^* = E' + iE''$, considerando para el análisis el módulo de almacenamiento E' (componente elástica) y el módulo de pérdida E'' (componente viscosa). El factor de pérdida se analiza empleando tan δ , que se define como la razón entre E'' y E' . Los parámetros viscoelásticos obtenidos representan propiedades intrínsecas del material que gobiernan su respuesta dependiente del tiempo, independientemente del modo de carga.

Las pruebas de compresión uniaxial se realizaron en una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X equipada con una celda de carga de 10 kN. Las probetas se precargaron con un valor de 20 N, y posteriormente se comprimieron en la dirección de fabricación. Para evaluar el efecto viscoelástico, los ensayos se ejecutaron a tres velocidades relativas de desplazamiento: 1 mm/min, 10 mm/min y 100 mm/min. Se registraron continuamente los datos de fuerza y desplazamiento hasta un valor máximo de 15 mm o hasta la falla de la estructura (figura 3).

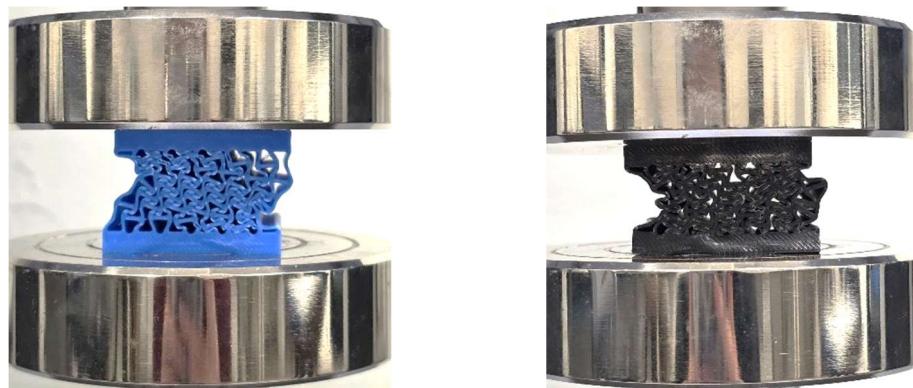


Fig. 3. Cubos auxéticos comprimidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Respuesta viscoelástica del PLA y ABS

En la figura 4 se presentan los resultados de DMA para el PLA, donde se observa que el módulo de almacenamiento E' disminuye a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, a partir de 80°C se observa un incremento considerable en E' . Posteriormente, a temperaturas mayores a 140°C se tiene un decaimiento considerable de la componente elástica; estos tres procesos corresponden a la manifestación mecánica de la transición vítrea, a la cristalización fría y el flujo del PLA, respectivamente¹³. El fenómeno de la transición vítrea está asociado con un cambio conformacional que involucra un aumento de los grados de libertad de las cadenas poliméricas, es decir, el material pasa de un estado de baja movilidad molecular (estado vítreo) a un estado de alta movilidad molecular (estado elastómerico o cauchótico)¹⁴. Bajo estas condiciones, se genera un incremento del volumen libre, lo cual permite que las cadenas poliméricas del PLA puedan reagruparse para formar entidades ordenadas, dando paso a la formación de lamelas y posterior crecimiento de esferulitas¹⁵. Esta condición implica una morfología semicristalina, es decir, una mezcla intima de fase amorfá y fase cristalina, y, en consecuencia, esto genera un incremento significativo en E' . A medida que aumenta la temperatura, la energía térmica que se añade al material genera la fusión de los cristales de PLA y comienza el proceso de flujo. Esto último es un aspecto fundamental por considerar en los procesos de transformación del PLA (inyección, extrusión e impresión 3D).

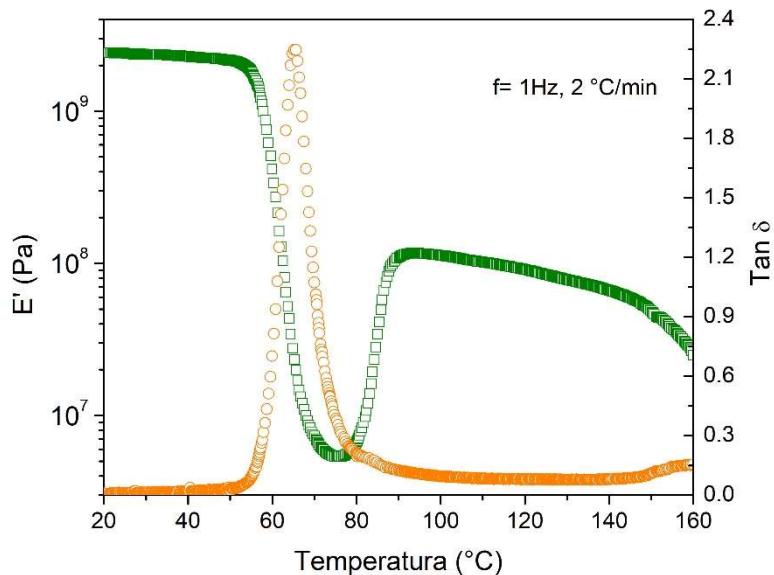


Fig. 4. Módulo de almacenamiento E' y factor de pérdida $\tan \delta$ para el PLA.

Respecto a $\tan \delta$, cada uno de los procesos implica un máximo o un pico, lo cual está asociado con la disipación de energía¹⁶. Si tomamos el primer pico a $\sim 65^\circ\text{C}$, este valor se asocia directamente con la temperatura de transición vítrea T_g . A $\sim 84^\circ\text{C}$ se observa un pico superpuesto de menor amplitud, asociado con el proceso de cristalización fría. Por encima de 160°C , $\tan \delta$ tiende a aumentar, lo cual implica el proceso del flujo viscoso.

El comportamiento viscoelástico del ABS mediante DMA se presenta en la figura 5. Para este material, se observa una respuesta similar al PLA en la región de la transición vítrea, especialmente en la forma en que E' disminuye con el incremento de la temperatura y los procesos cooperativos de la movilidad molecular. La T_g del ABS es mayor que la del PLA; esta se manifiesta alrededor de los $\sim 113^\circ\text{C}$ (máximo de $\tan \delta$). Una vez que el ABS atraviesa esta temperatura de transición, se manifiesta el proceso de flujo¹⁷.

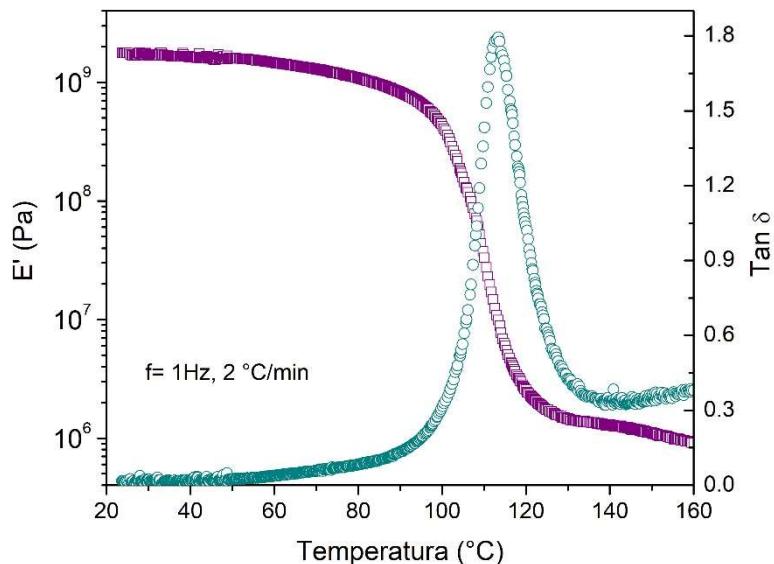


Fig. 5. Módulo de almacenamiento E' y factor de pérdida $\tan \delta$ para el ABS.

En la tabla II se presentan los parámetros viscoelásticos para el PLA y ABS: Tg, la temperatura de transición vítrea, calculada a partir del módulo de pérdida (E'') y $\tan \delta$; y los valores de E' , E'' y $\tan \delta$ a una temperatura de 25°C. En ambos materiales, la Tg determinada a partir del máximo de E'' es inferior a la obtenida a partir del máximo de $\tan \delta$, lo cual es consistente con la naturaleza cooperativa de las relajaciones moleculares. Los resultados de la tabla II revelan que el ABS presenta una Tg significativamente mayor que el PLA, lo que refleja su mayor estabilidad térmica. A 25°C, el PLA exhibe un mayor E' , indicando una respuesta más rígida, mientras que el ABS presenta valores superiores de E'' y $\tan \delta$, lo que evidencia una mayor capacidad de disipación de energía.

Tabla II. Parámetros viscoelásticos del PLA y ABS.

| Material | Tg @ E'' | Tg @ $\tan \delta$ | $E' @ 25^\circ C$ | $E'' @ 25^\circ C$ | $\tan \delta @ 25^\circ C$ |
|----------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|
| PLA | 58.83°C | 65.56°C | 2.39×10^9 Pa | 2.21×10^7 Pa | 0.009 |
| ABS | 99.62°C | 113.38°C | 1.76×10^9 Pa | 2.63×10^7 Pa | 0.015 |

Respuesta mecánica de cubos auxéticos

El comportamiento mecánico característico bajo compresión de estructuras reticulares puede dividirse en tres etapas bien definidas (figura 6): una región de deformación elástica lineal, una región de deformación plástica y una etapa final de densificación. Estas etapas son comunes en materiales celulares y estructuras auxéticas, y reflejan la evolución progresiva del colapso de las celdas internas bajo una carga externa. Durante la región elástica, la respuesta fuerza–desplazamiento es aproximadamente lineal y está dominada por el módulo elástico del material base y por la geometría de la celda unitaria. Al incrementarse la carga, se alcanza un umbral crítico a partir del cual se pierde la estabilidad de los elementos estructurales internos, marcando el inicio de la deformación plástica.

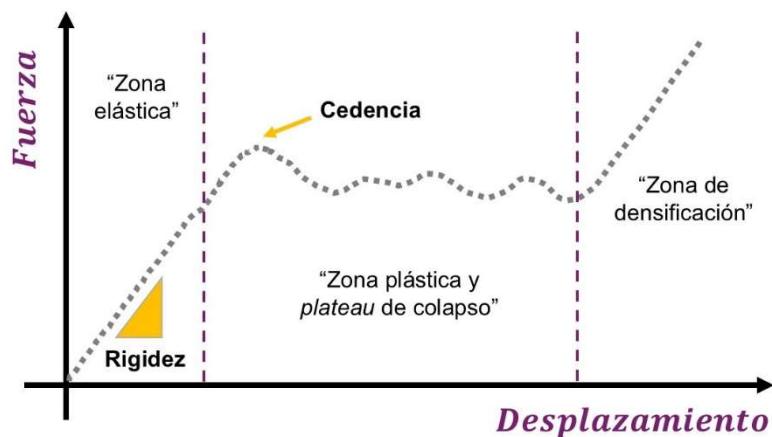


Fig. 6. Representación esquemática de curva fuerza–desplazamiento para una estructura auxética bajo compresión uniaxial.

En la figura 7a se presentan las curvas fuerza–desplazamiento de las estructuras auxéticas fabricadas en PLA, mientras que la figura 7b presenta los resultados para las estructuras de ABS, ambas ensayadas a velocidades de 1, 10 y 100 mm/min. En ambos materiales se observa la secuencia característica de deformación descrita previamente. Inicialmente, las estructuras almacenan energía de manera reversible en la región elástica; posteriormente, tras alcanzar un pico de fuerza, se produce una caída asociada al pandeo local de las celdas internas, lo que señala el inicio de la deformación plástica. A continuación, las curvas exhiben una región de meseta o plateau, en la cual el desplazamiento aumenta con incrementos relativamente pequeños en la fuerza aplicada. Esta etapa corresponde al colapso progresivo de las celdas auxéticas y está asociada a una absorción estable de energía. Finalmente, al aumentar el desplazamiento, las estructuras entran en la fase de densificación,

donde los elementos internos entran en contacto, restringiendo la deformación adicional y provocando un incremento pronunciado de la fuerza y de la rigidez aparente.

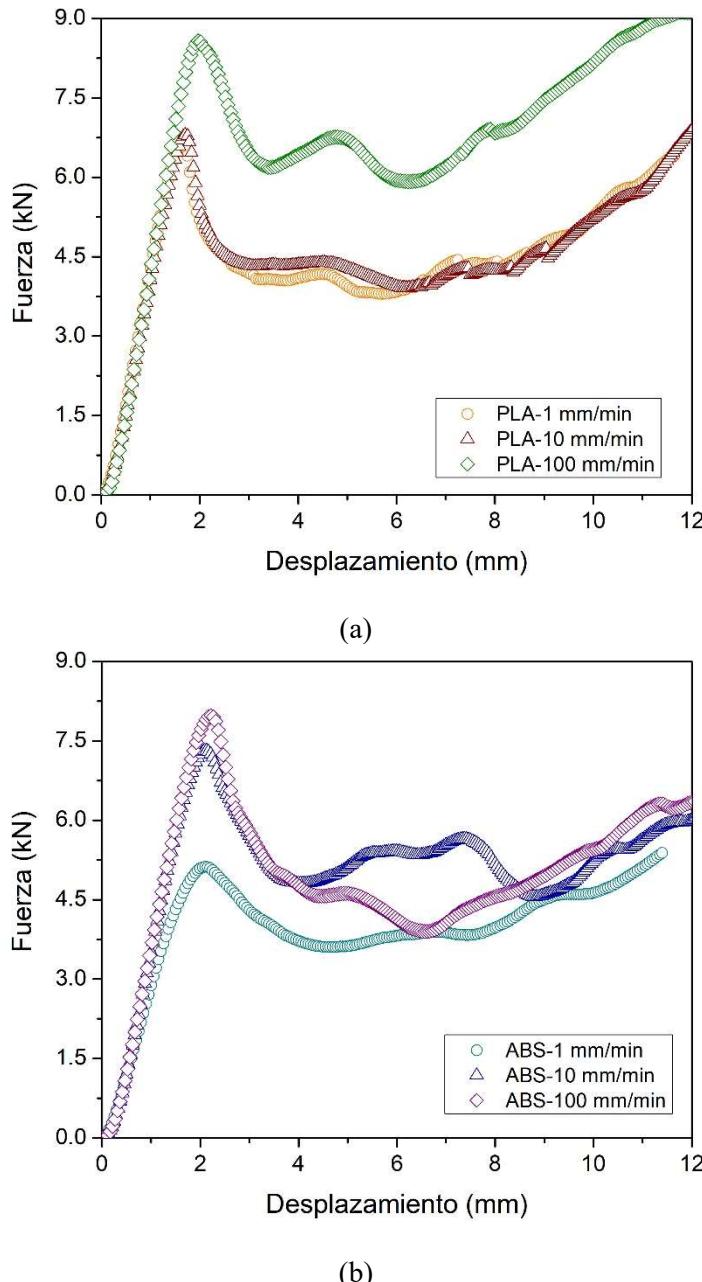


Fig. 7. Curvas de fuerza-desplazamiento bajo compresión uniaxial para las estructuras auxéticas fabricadas en (a) PLA y (b) ABS, en función de la velocidad de deformación.

Aunque las estructuras de PLA y ABS presentan la misma secuencia global de deformación, se observan diferencias claras en la magnitud de la fuerza, en la pendiente inicial y en la sensibilidad a la rapidez de deformación, lo cual se atribuye a las diferencias intrínsecas en rigidez, ductilidad y comportamiento viscoelástico de ambos polímeros. Desde el punto de vista micromecánico, los elementos o barras que componen las estructuras auxéticas pueden colapsar bajo compresión mediante distintos mecanismos que compiten entre sí: fluencia, pandeo y fractura. El mecanismo dominante es aquel que presenta el umbral de esfuerzo más bajo. En estructuras dominadas por

flexión, el pandeo de las barras internas suele controlar la respuesta, dando lugar a una meseta o “plateau” de carga relativamente constante. En contraste, en estructuras dominadas por tensión, la deformación puede requerir esfuerzos fluctuantes conforme progresó el colapso de las celdas.

Durante la etapa de densificación pueden identificarse distintos modos de falla: (a) colapso sucesivo de celdas, (b) propagación de grietas a través de la red estructural y (c) cizallamiento diagonal^{18,19}. La propagación de grietas suele iniciarse a partir de defectos preexistentes, mientras que el cizallamiento diagonal puede provocar una reducción inicial significativa de la resistencia, seguida de un reforzamiento relativamente uniforme conforme avanza la densificación. Finalmente, la resistencia y la rigidez a compresión dependen fuertemente del tipo de comportamiento de la celda unitaria. Para una porosidad constante, un aumento en el tamaño de la celda incrementa la esbeltez de las barras, favoreciendo el pandeo y reduciendo la resistencia global. En este contexto, las estructuras dominadas por flexión tienden a ser más flexibles, mientras que aquellas dominadas por tensión presentan mayores niveles de rigidez y resistencia a la compresión²⁰.

En la tabla III se presentan los valores pico de fuerza ($F_{máx}$) y la deformación máxima correspondiente al valor pico de fuerza ($\delta_{máx}$) alcanzada antes de la falla o densificación para ambos materiales. Los resultados evidencian una clara dependencia de la velocidad de deformación, aunque la magnitud de este efecto varía considerablemente entre el PLA y el ABS. El PLA demostró ser el material con mayor capacidad de carga absoluta en todas las velocidades evaluadas. A 100 mm/min, la estructura de PLA soportó una carga máxima de 8.58 kN, superando los 8.01 kN del ABS. Sin embargo, al analizar la sensibilidad a la velocidad, el ABS exhibe un comportamiento viscoelástico más pronunciado. Para el PLA, el incremento de velocidad de 1 a 100 mm/min resultó en un aumento de fuerza del 29.4% (de 6.63 a 8.58 kN). En contraste, el ABS experimentó un endurecimiento mucho más drástico, con un aumento del 56.3% en su carga máxima (pasando de 5.12 a 8.01 kN) bajo las mismas condiciones. Este hallazgo confirma que, si bien el PLA es intrínsecamente más rígido, el mecanismo de resistencia del ABS está fuertemente gobernado por los tiempos de relajación molecular. A altas velocidades (100 mm/min), las cadenas poliméricas del ABS no tienen tiempo suficiente para reacomodarse, resultando en una respuesta más rígida que casi iguala la resistencia del PLA. Respecto a la deformación máxima, los datos corroboran la naturaleza más dúctil del ABS. Mientras que el PLA falló a desplazamientos menores (entre 1.63 y 1.98 mm), indicando una fractura frágil prematura, el ABS permitió consistentemente mayores niveles de deformación (hasta 2.22 mm a 100 mm/min). Es notable que, para ambos materiales, la deformación máxima aumentó ligeramente con la velocidad, lo cual sugiere que la mayor rigidez inducida por la velocidad no comprometió la ductilidad de la estructura, un aspecto favorable para aplicaciones de absorción de energía.

Tabla III. Valores máximos de carga $F_{máx}$ y deformación $\delta_{máx}$ registrados para las estructuras de PLA y ABS bajo compresión uniaxial a velocidades de 1, 10 y 100 mm/min.

| Muestra | $F_{máx}$ (kN) | $\delta_{máx}$ (mm) |
|---------|----------------|---------------------|
| PLA-1 | 6.63 | 1.63 |
| PLA-10 | 6.81 | 1.71 |
| PLA-100 | 8.58 | 1.98 |
| ABS-1 | 5.12 | 2.11 |
| ABS-10 | 7.32 | 2.09 |
| ABS-100 | 8.01 | 2.22 |

Para cuantificar el efecto viscoelástico, se calculó la rigidez equivalente y la energía absorbida hasta el valor pico de fuerza. Los resultados se presentan en la figura 8, confirmando lo discutido anteriormente: la rigidez del ABS experimenta un notable incremento del 36% al pasar de 1 a 10 mm/min (de ~3.38 a ~4.62 kN/mm). Por el contrario, la rigidez del PLA permanece virtualmente idéntica en el mismo rango (5.11 vs 5.06 kN/mm), una variación despreciable.

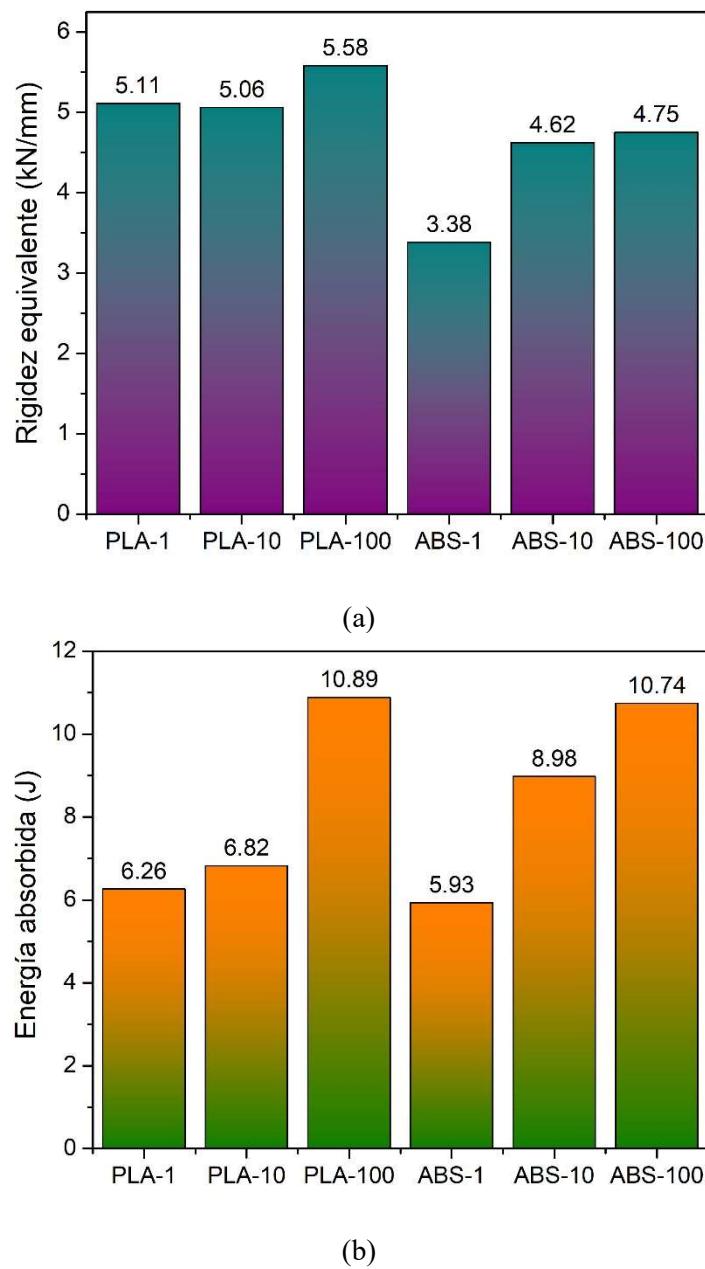


Fig. 8. (a) Rígidez equivalente y (b) energía absorbida, para los cubos de PLA y ABS en función de la velocidad de deformación.

La capacidad de absorción de energía de las estructuras auxéticas se evaluó calculando la energía mecánica absorbida hasta el valor máximo de fuerza, definida como el área bajo la curva fuerza–desplazamiento. Este parámetro es particularmente relevante para aplicaciones de absorción de impacto y amortiguamiento mecánico, ya que integra tanto la rigidez como la extensión de la deformación plástica. Los resultados muestran que tanto las estructuras de PLA como las de ABS son capaces de absorber cantidades significativas de energía antes de alcanzar la falla estructural. Sin embargo, se observa una diferencia clara en la forma en que la energía absorbida depende de la rapidez de deformación.

En el caso del PLA, la energía absorbida hasta el pico de fuerza presenta variaciones relativamente pequeñas al aumentar la velocidad de ensayo. Esto es consistente con su baja sensibilidad a la rapidez

de deformación, derivada de su comportamiento predominantemente vítreo a temperatura ambiente, donde los mecanismos de disipación viscoelástica son limitados. Por el contrario, las estructuras auxéticas de ABS muestran un incremento apreciable de la energía absorbida al aumentar la rapidez de deformación. A velocidades bajas, la estructura tiene mayor capacidad de disipar energía mediante mecanismos viscoelásticos, lo que conduce a una respuesta más blanda y a valores menores de fuerza máxima. A velocidades más altas, estos mecanismos no tienen tiempo suficiente para activarse, resultando en una respuesta más rígida y en una mayor energía absorbida antes del colapso. Este comportamiento refuerza la idea de que la absorción de energía en estructuras auxéticas impresas en 3D no depende únicamente de la geometría celular, sino también del carácter viscoelástico del material base y de la escala temporal del proceso de deformación.

Correlación entre DMA y respuesta mecánica

La marcada diferencia en la dependencia de la rapidez de deformación entre el ABS y el PLA se explica directamente por sus propiedades viscoelásticas intrínsecas, presentadas en la tabla II. El factor de pérdida ($\tan \delta$), es una medida directa del amortiguamiento, es decir, de la capacidad de un material para disipar energía internamente. A la temperatura de ensayo (25°C), $\tan \delta$ del ABS (0.015) es $\sim 67\%$ mayor que el del PLA (0.009). En el caso del PLA, el bajo valor de $\tan \delta$ indica que el material se encuentra profundamente en su estado vítreo (por debajo de su T_g de $\sim 65^\circ\text{C}$), donde las cadenas poliméricas carecen de movilidad molecular de largo alcance. Al no disponer de mecanismos activos de relajación molecular, el material responde como un sólido elástico casi ideal; por ello, su rigidez es insensible a la rapidez de aplicación de la carga, ya sea 1 mm/min o 10 mm/min.

Por el contrario, el valor de $\tan \delta$ del ABS, aún por debajo de la T_g ($\sim 113^\circ\text{C}$), confirma la presencia de mecanismos activos de relajación secundarios. De acuerdo con el principio de superposición tiempo-temperatura, un ensayo lento (1 mm/min) ofrece tiempo suficiente para que dichas relajaciones ocurran, permitiendo al material disipar energía y comportarse de manera relajada (blanda), con una rigidez menor (3.38 kN/mm). En cambio, durante un ensayo rápido (100 mm/min), el tiempo disponible es insuficiente para que se desarrollem estas relajaciones, lo que “congela” los mecanismos internos de amortiguamiento y provoca una respuesta no relajada (más rígida), reflejada en una mayor rigidez (4.75 kN/mm). En consecuencia, la alta sensibilidad a la rapidez de deformación observada en la estructura de ABS es una manifestación macroscópica directa de su amortiguamiento a nivel molecular.

CONCLUSIONES

En este trabajo se fabricaron estructuras auxéticas cúbicas mediante impresión en 3D, utilizando PLA y ABS como materiales base. Los resultados confirman que es posible obtener geometrías auxéticas funcionales a partir de polímeros termoplásticos comerciales, manteniendo parámetros de impresión controlados. El análisis mecánico dinámico (DMA) permitió identificar diferencias claras en el comportamiento viscoelástico de ambos materiales a temperatura ambiente. En particular, el ABS presentó un factor de pérdida ($\tan \delta$) significativamente mayor que el PLA, lo que indica una mayor capacidad de disipación de energía asociada a mecanismos de relajación molecular activos, aún por debajo de su temperatura de transición vítreo.

Los ensayos de compresión uniaxial mostraron que las estructuras auxéticas fabricadas en ABS presentan una dependencia de la rigidez con respecto a la rapidez de deformación, mientras que las estructuras de PLA exhiben una respuesta mecánica prácticamente independiente de la velocidad de carga en el rango analizado. Este comportamiento evidencia que, aunque la geometría auxética define el modo de deformación global, las propiedades viscoelásticas del polímero base controlan la sensibilidad temporal de la respuesta mecánica. La correlación directa entre los resultados de DMA y los ensayos mecánicos demuestra que la respuesta macroscópica de estructuras auxéticas impresas en 3D puede interpretarse y anticiparse a partir de parámetros viscoelásticos fundamentales, como el módulo de almacenamiento y el factor de pérdida. En este sentido, este estudio refuerza la importancia

de considerar no solo la geometría, sino también el comportamiento viscoelástico dependiente del tiempo del material base durante el diseño de metamateriales poliméricos y estructuras auxéticas.

REFERENCIAS

1. L.-Q. Wang, J.-Z. Tong, Z.-S. Pan, K. E. Evans e J. Shen, “Poisson’s ratio control in auxetic metamaterials under large tensile strains,” *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 304, p. 110637, 2025.
2. Y. Zhang, W. Z. Jiang, W. Jiang, X. Y. Zhang, J. Dong, Y. M. Xie, K. E. Evans e X. Ren, “Recent Advances of Auxetic Metamaterials in Smart Materials and Structural Systems,” *Advanced Functional Materials*, vol. 35, p. 2421746, 2025.
3. Y. Liu, C. Zhao, C. Xu, J. Ren e J. Zhong, “Auxetic meta-materials and their engineering applications: a review,” *Engineering Research Express*, vol. 5, p. 042003, 2023.
4. V. A. Lvov, F. S. Senatov, A. A. Veveris, V. A. Skrybykina e A. D. Lantada, “Auxetic Metamaterials for Biomedical Devices: Current Situation, Main Challenges, and Research Trends,” *Materials*, vol. 15, p. 1439, 2022.
5. M. Sun, X. Hu, L. Tian, X. Yang e L. Min, “Auxetic Biomedical Metamaterials for Orthopedic Surgery Applications: A Comprehensive Review,” *Orthopaedic Surgery*, vol. 16, pp. 1801-1815, 2024.
6. D. V. Truong, H. Nguyễn, R. Fangueiro, F. Ferreira e Q. Nguyễn, “Auxetic materials and structures in the automotive industry: Applications and insights,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, p. 07316844251334174, 2025.
7. A. S. Patir, O. B. Ceylan, B. Sari, H. Kenan e I. Sen, “Re-entrant Chiral Auxetic: An Optimal Lightweight Design and Enhanced Performance for Aerospace Structural Parts,” *Digitalization in Additive Manufacturing*, pp. 715–729, 2025.
8. M. Wallbanks, M. F. Khan, M. Bodaghi, A. Triantaphyllou e A. Serjouei, “On the design workflow of auxetic metamaterials for structural applications,” *Smart Materials and Structures*, vol. 31, p. 023002, 2022.
9. A. Joseph, V. Mahesh e D. Harursampath, “On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review,” *Advances in Manufacturing*, vol. 9, p. 342–368, 2021.
10. B. Schürger, J. Bocko, P. Frankovský, I. Delyová e J. Kostka, “Directional Auxetic Behavior of Mechanical Metamaterials: Material-Dependent and Geometry-Driven Mechanisms,” *Materials*, vol. 18, p. 5103, 2025.
11. X.-T. Wang, B. Wang, X.-W. Li e L. Ma, “Mechanical properties of 3D re-entrant auxetic cellular structures,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vols. %1 de %2131-132, pp. 396-407, 2017.
12. B. Koohbor, K. Z. Uddin, M. Heras, G. Youssef, D. Miller, S. Sockalingam, M. A. Sutton and T. Kiel, “Strain rate sensitivity of rotating-square auxetic metamaterials,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 195, pp. 1-13, 2025.
13. M. Cristea, D. Ionita e M. M. Iftime, “Dynamic Mechanical Analysis Investigations of PLA-Based Renewable Materials: How Are They Useful?,” *Materials*, vol. 13, p. 5302, 2020.
14. T. R. Giri e R. W. Mailen, “Thermomechanical behavior of polymeric periodic structures,” *Additive Manufacturing*, vol. 49, p. 102512, 2022.
15. Y. Zhang, Z. Wang, F. Jiang, J. Baia e Z. Wang, “Effect of miscibility on spherulitic growth rate for double-layer polymer films,” *Soft Matter*, vol. 9, pp. 5771-5778, 2013.
16. R. Hedayati, M. Alavi e M. Sadighi, “Effect of Degradation of Polylactic Acid (PLA) on Dynamic Mechanical Response of 3D Printed Lattice Structures,” *Materials*, vol. 17, p. 3674, 2024.
17. A. Pellegrini, M. E. Palmieri, F. Lavecchia, L. Tricarico e L. M. Galantucci, “Auxetic behavior of 3D-printed structure made in acrylonitrile butadiene styrene and carbon fiber-reinforced polyamide,” *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 9, p. 461–469, 2024.

18. I. Maskery, N. Aboulkhair, A. Aremu, C. Tuck e I. Ashcroft, “Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices,” *Additive Manufacturing*, vol. 16, pp. 24-29, 2017.
19. B. Nečemer, J. Kramberger, T. Vuherer e S. Glodež, “Fatigue crack initiation and propagation in re-entrant auxetic cellular structures,” *International Journal of Fatigue*, vol. 126, pp. 241-247, 2019.
20. D. Faraci, L. Driemeier e C. Comi, “Bending-Dominated Auxetic Materials for Wearable Protective Devices Against Impact,” *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, vol. 7, p. 425–435, 2021.