TecnoLógicas

Influencia de parámetros de impresión 3D (FDM) relacionados con el consumo de material en las propiedades mecánicas de estructuras bioinspiradas

Influence of 3D Printing (FDM) Parameters Related to Material Consumption on the Mechanical Properties of Bioinspired Structures

Camila Peñafiel[1]; Laura Daniela Hernández-Quiroz[1]; Mario Fernando Muñoz-Vélez[2,3]

[1]Pontificia Universidad Javeriana, Cali - Colombia
[2]Escuela de Ingeniería de Materiales, Cali - Colombia
[3]Universidad del Valle, Cali – Colombia

Correspondencia: mario.fernando.munoz@correounivalle.edu.co

Recibido: 05 Agosto 2025 **Aceptado:** 23 Junio 2026 **Disponible:** 26 Junio 2026

Cómo citar / How to cite
C. Peñafiel, L. D. Hernández Quiroz, and M. F. Muñoz-Vélez, "Influencia de parámetros de impresión 3D (FDM) relacionados con el consumo de material en las propiedades mecánicas de estructuras bioinspiradas," *TecnoLógicas*, vol. 29, no. 66, e3603, 2026.
https://doi.org/10.22430/22565337.3603

CC BY NC SA

Resumen

Esta investigación evaluó el efecto combinado del porcentaje y el patrón de relleno sobre las propiedades mecánicas específicas de piezas fabricadas en PLA estándar, mediante modelado por deposición fundida (FDM). Como metodología, se seleccionaron dos patrones bioinspirados, madera y bambú, mediante el proceso de jerarquía analítica (AHP), y se diseñaron probetas con tres niveles de relleno: 25 %, 50 % y 75 %. Las muestras fueron fabricadas por FDM y se evaluaron a compresión e impacto según las normas ASTM D695 y D256. Además, se determinó la densidad aparente para calcular propiedades mecánicas específicas, como la resistencia a compresión y la energía absorbida por unidad de densidad aparente. Los resultados mostraron que el desempeño mecánico no dependió únicamente del porcentaje de relleno, sino también de su combinación con la geometría interna del patrón. El patrón bambú, con 50 % de relleno, presentó el mejor comportamiento específico en impacto, mientras que las muestras 50 M y 75 M (50 % y 75 % con patrón de madera, respectivamente) destacaron en compresión. Asimismo, las configuraciones de mayor porcentaje de relleno evidenciaron una rigidización local, que redujo la deformación plástica de los materiales. Finalmente, se concluyó que los patrones bioinspirados pueden emplearse como estrategia de diseño para mejorar la eficiencia estructural de piezas impresas por FDM, especialmente cuando se requiere reducir peso y consumo de material sin afectar el desempeño mecánico.

Palabras clave

Absorción de energía, diseño biomimético, estructuras bioinspiradas, impresión tridimensional, resistencia a compresión.

Abstract

This research evaluated the combined effect of infill percentage and infill pattern on the specific mechanical properties of standard PLA parts manufactured by fused deposition modeling (FDM). Two bioinspired patterns, wood and bamboo, were selected through the Analytic Hierarchy Process (AHP), and specimens were designed with three infill levels: 25%, 50%, and 75%. The samples were fabricated by FDM and tested under compression and impact loading according to ASTM D695 and ASTM D256 standards, respectively. In addition, the apparent density of each configuration was determined to calculate specific mechanical properties, including compressive strength and absorbed energy per unit apparent density. The results showed that mechanical performance was not exclusively governed by infill percentage but also by its interaction with the internal geometry of the pattern. The bamboo-inspired pattern with 50% infill exhibited the best specific impact performance, whereas the 50M and 75M configurations (50% and 75% wood-inspired patterns, respectively) showed the highest specific performance under compression. Furthermore, configurations with higher infill percentages exhibited local stiffening effects that reduced the plastic deformation capacity of the structures. Overall, the findings indicate that bioinspired infill patterns can be used as a design strategy to improve the structural efficiency of FDM-printed components, particularly in applications where weight reduction and material savings are required without compromising mechanical performance.

Keywords

Energy absorption, biomimetic design, bio-inspired structures, three-dimensional printing, compressive strength.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha sido fundamental impulsar el crecimiento económico y la innovación tecnológica para enfrentar retos del siglo XXI, como la protección del medio ambiente y la sostenibilidad de las cadenas de suministro. En este contexto, la impresión 3D o manufactura aditiva (AM) se ha consolidado como una alternativa de fabricación capaz de procesar diversos materiales y producir componentes personalizados con geometrías complejas, favoreciendo una utilización más eficiente de los recursos de manufactura [1], [2].

La adopción de la impresión 3D ha aumentado en los últimos años, con aplicaciones en la fabricación de componentes, piezas y prototipos en diferentes áreas del conocimiento. Esta tecnología permite la conformación de objetos con geometrías complejas y puede reducir tiempos y costos de producción frente a métodos tradicionales de manufactura [3]. Entre las distintas técnicas de AM, el modelado por deposición fundida (FDM) es una de las más utilizadas debido a su bajo costo y facilidad de implementación. No obstante, este proceso presenta desafíos asociados al consumo de material, los tiempos de fabricación y la generación de residuos, especialmente cuando no se optimizan de forma adecuada parámetros de impresión como el porcentaje y el patrón de relleno [4], [5].

En el ámbito académico y profesional, la optimización de los parámetros de impresión 3D es crucial para minimizar los desechos y mejorar la eficiencia del proceso. Recientemente, se han realizado estudios sobre el impacto de parámetros como el porcentaje y el patrón de relleno en las propiedades mecánicas de las piezas producidas. Por ejemplo, algunas investigaciones han evaluado la resistencia a la compresión de piezas impresas por FDM utilizando materiales como PLA, ABS y PLA reforzado con fibra de carbono, y han concluido que el patrón de relleno y la densidad afectan significativamente el comportamiento mecánico [6]. De manera similar, también se realizaron pruebas de impacto en muestras impresas por FDM fabricadas con material Onyx reforzado con fibra de vidrio, con 30 %, 40 % y 50 % de porcentaje de relleno, así como con patrones de capa triangulares, rectangulares y hexagonales [7]. A partir de estos resultados, se encontró que un mayor porcentaje de relleno y el uso de patrones hexagonales mejoran la absorción de energía bajo cargas de impacto. Tales hallazgos confirman que la eficiencia estructural de las piezas impresas depende de una combinación adecuada de parámetros de proceso, más allá del simple aumento en la cantidad de material utilizado.

Estudios recientes han confirmado, además, que el desempeño mecánico de piezas impresas por FDM/FFF depende no solo del porcentaje de relleno, sino también de la

configuración geométrica interna del patrón. Por ejemplo, en PLA impreso en 3D se ha evaluado el efecto de patrones triangulares, *grid* (rejilla) y *honeycomb* (panal de abeja) en configuraciones multicapa con porcentajes de relleno de 20 % y 50 %, y se ha evidenciado que la arquitectura interna modifica de manera importante la respuesta a tracción y compresión. Estos resultados refuerzan la idea de que la eficiencia mecánica no depende exclusivamente de la cantidad de material, sino también de su distribución dentro de la estructura [8].

Por otro lado, la biomimética ha cobrado relevancia como un enfoque innovador en el diseño de patrones de relleno inspirados en estructuras presentes en la naturaleza. Este enfoque optimiza la distribución de materiales y mejora significativamente el desempeño mecánico de los productos impresos mediante tecnología FDM, aprovechando las soluciones eficientes que la naturaleza ha perfeccionado a lo largo del tiempo. En este sentido, se ha evidenciado que el uso de patrones helicoidales, inspirados en la estructura del exoesqueleto del camarón mantis, en placas fabricadas por impresión 3D incrementa en un 20 % la resistencia a cargas estáticas en comparación con configuraciones geométricas convencionales [9]. De manera complementaria, también se ha demostrado que estructuras internas basadas en el caparazón de tortuga, al presentar baja densidad y una orientación óptima, mejoran significativamente la relación resistencia/peso en piezas elaboradas mediante tecnología FDM [10]. Asimismo, se han analizado las propiedades morfológicas del fruto *Lecythis minor* (conocido como “olla de mono”), destacando que su simetría, curvaturas internas y orientación de fibras favorecen el comportamiento mecánico frente a tracción, compresión e impacto, lo que lo convierte en un referente prometedor para el diseño biomimético de elementos de protección personal [11]. De igual manera, se ha demostrado que estructuras bioinspiradas impresas en PLA, basadas en morfologías naturales como alas de escarabajo y estructuras tipo camarón mantis, pueden mejorar la respuesta a compresión y la absorción de energía mediante configuraciones internas ligeras y geométricamente eficientes [12]. En este contexto, la aplicación conjunta de estrategias de diseño bioinspirado y la optimización de parámetros en procesos de manufactura aditiva permite minimizar el uso de material, los tiempos de fabricación, los costos asociados y la generación de residuos, sin comprometer el rendimiento estructural ni las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas [13].

Más recientemente, la literatura ha mostrado un interés creciente en arquitecturas bioinspiradas impresas en 3D, orientadas a mejorar la resistencia mecánica y la absorción de energía. En este sentido, se ha reportado que trayectorias bioinspiradas tipo Bouligand pueden ofrecer una absorción específica de energía superior a la de patrones rectilíneos y mejorar la tenacidad de placas impresas en 3D [14]. De manera complementaria, en tubos bambú-inspirados fabricados por FDM se ha observado que la energía absorbida mejora al incrementar el porcentaje de relleno, aunque la mejor absorción específica puede alcanzarse a valores intermedios, como 30 %, en lugar de los niveles más altos [15]. También, en estructuras bioinspiradas monomaterial con heterogeneidad mecánica se han reportado incrementos de hasta 283 % en resistencia al impacto y 322 % en absorción de energía frente a configuraciones homogéneas [16]. Estos resultados respaldan la exploración de configuraciones bioinspiradas para mejorar la eficiencia estructural de piezas impresas, especialmente cuando se busca equilibrar peso, respuesta mecánica y disipación de energía.

Aún con los avances reportados sobre la influencia del porcentaje y el patrón de relleno en el comportamiento mecánico de piezas impresas por FDM, todavía es necesario estudiar el efecto combinado de patrones bioinspirados, con diseños a partir de morfologías naturales y distintos niveles de relleno sobre propiedades mecánicas específicas, especialmente bajo cargas de compresión e impacto. En este sentido, los patrones tradicionales de relleno no siempre aprovechan estrategias geométricas inspiradas en estructuras naturales. Por ello, la bioinspiración representa una alternativa para explorar configuraciones internas con mejor relación entre desempeño mecánico y peso. Además, en este estudio se empleó el proceso de jerarquía analítica (AHP) para seleccionar las estructuras naturales usadas como base del diseño, considerando criterios geométricos, mecánicos y de viabilidad de implementación. Así, el objetivo del presente estudio fue evaluar la influencia del porcentaje y del patrón de relleno

sobre la resistencia al impacto y a la compresión de muestras impresas con PLA estándar, para disminuir el consumo de material sin comprometer el desempeño estructural.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Selección de estructuras bioinspiradas en función del modo de carga

Para cada modo de carga evaluado (compresión e impacto), se identificaron inicialmente cuatro alternativas bioinspiradas mediante revisión bibliográfica. Luego, se seleccionó la alternativa más adecuada mediante AHP, considerando los criterios de selección, sus pesos relativos y una escala de puntuación de 0 a 2, resumidos en la Tabla 1. Los criterios, pesos y escalas fueron definidos en el marco de esta investigación con apoyo de asesores y expertos. Para establecer la importancia relativa de cada criterio, se construyó una matriz de comparación por pares, a partir de la cual se establecieron los pesos porcentuales a través del vector propio resultante (Material suplementario, Tabla A8) [17].

Tabla 1. Criterios de selección y escala de ponderación del método AHP. Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de comparación por pares del método AHP (Material suplementario, Tabla A8).

Criterio de selección	Peso	Valor	Escala
C1: Área equivalente de vacíos	32 %	0	Porcentaje de vacíos bajo (0–33.3 %)
		1	Porcentaje de vacíos medio (>33.3–66.6 %)
		2	Porcentaje de vacíos alto (>66.6–100 %)
C2: Resistencia mecánica del biomaterial según el modo de trabajo	32 %	0	0 a 49 MPa (comp.) o kJ/m² (imp.)
		1	50 a 79 MPa (comp.) o kJ/m² (imp.)
		2	Mayor a 90 MPa (comp.) o kJ/m² (imp.)
C3: Complejidad para adoptar o replicar la estructura al proceso de impresión	19 %	0	Nivel de dificultad bajo
		1	Nivel de dificultad medio
		2	Nivel de dificultad alto
C4: Accesibilidad al entorno natural del biomaterial para la obtención de una muestra	12 %	0	Nivel de acceso al entorno natural bajo
		1	Nivel de acceso al entorno natural medio
		2	Nivel de acceso al entorno natural alto
C5: Similitud geométrica con patrones de relleno en UltiMaker Cura 5.4.0	5 %	0	Nivel de similitud geométrica baja
		1	Nivel de similitud geométrica media
		2	Nivel de similitud geométrica alta

Para la definición del Criterio 1 (área equivalente de vacíos), se empleó una imagen representativa por cada alternativa natural, seleccionada a partir de micrografías con microscopio electrónico de barrido (SEM) o imágenes de microtomografía computarizada de rayos X (Micro-CT) reportadas para los biomateriales evaluados en la literatura [18]-[25]. La selección se realizó priorizando imágenes con adecuada resolución, presencia de escala y una visualización clara de la distribución interna de vacíos del biomaterial. Posteriormente, cada imagen fue calibrada en el software ImageJ (National Institutes of Health, Bethesda, EE. UU.), se delimitó el área global de análisis y se estimó el área total ocupada por vacíos, con el fin de calcular el porcentaje de vacíos equivalente de cada alternativa. A partir de los valores obtenidos, las alternativas se clasificaron en tres niveles para el criterio C1: bajo (0–33.3 %), medio (>33.3–66.6 %) y alto (>66.6–100 %). Estos intervalos se emplearon como rangos operativos para diferenciar las alternativas dentro del proceso AHP.

Para el Criterio 2, relacionado con la resistencia mecánica del biomaterial según el modo de trabajo, se realizó una revisión de la literatura con el fin de recopilar valores de resistencia a

compresión e impacto para cada estructura natural evaluada [18]-[25]. Con base en estos datos, se definieron tres niveles de ponderación: bajo (0 a 49 MPa o kJ/m²), medio (50 MPa a 79 MPa o kJ/m²) y alto (> 90 MPa o kJ/m²). Estos rangos se utilizaron únicamente como criterios de clasificación interna del modelo AHP, no como umbrales generales del comportamiento mecánico de los biomateriales.

El Criterio 3 correspondió a la dificultad técnica para adaptar cada patrón natural al diseño CAD y al proceso de impresión FDM. Para ellos se consideraron la complejidad geométrica, el número de operaciones necesarias para construir el patrón y su viabilidad de fabricación. La dificultad se clasificó como baja cuando la estructura podía reproducirse a partir de geometrías simples y repetitivas; media cuando requería ajustes geométricos intermedios o combinación de entidades; y alta cuando involucraba geometrías irregulares, múltiples operaciones de modelado o restricciones de impresión por FDM.

Por su parte, el Criterio 4 se definió por medio de la factibilidad de recolección directa de una muestra representativa del patrón, considerando la disponibilidad geográfica del biomaterial y su accesibilidad en condiciones normales de campo. Se consideró una accesibilidad baja cuando la obtención de la muestra dependía de una distribución geográfica restringida o de condiciones de acceso limitadas; media cuando el biomaterial estaba disponible, pero su recolección requería condiciones logísticas intermedias; y alta cuando la muestra podía obtenerse fácilmente en el entorno natural o mediante acceso local directo.

Finalmente, para el Criterio 5 se estimó el nivel de correspondencia geométrica entre los patrones naturales y los patrones de relleno predeterminados disponibles en UltiMaker Cura 5.4.0, mediante una comparación visual cualitativa. Se consideró una similitud baja cuando la correspondencia entre la geometría natural y los patrones de relleno fue limitada; media cuando se identificaron coincidencias parciales en la forma general o en la distribución interna; y alta cuando se observó una correspondencia marcada en la geometría predominante y en la organización estructural del patrón.

2.2 Evaluación de la influencia del porcentaje y del patrón de relleno en la resistencia a la compresión de los materiales impresos

Para ello, se capturaron imágenes a aumentos de 2x, 3x y 4x mediante un estereomicroscopio ZEISS Stemi 305 (Carl Zeiss Microscopy Deutschland GmbH, Oberkochen, Alemania), lo que permitió emular y sintetizar las características geométricas predominantes de los biomateriales. A partir de este análisis, se desarrollaron patrones de relleno tridimensionales utilizando el software SolidWorks (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Francia) y manteniendo una relación geométrica coherente para obtener tres niveles de densidad: 25 %, 50 % y 75 %.

Posteriormente, se modelaron las probetas de compresión siguiendo las especificaciones de la norma ASTM D695, con una sección transversal de 12.7 mm × 12.7 mm y una altura de 25.4 mm [26]. Las probetas para los ensayos de impacto se diseñaron siguiendo la norma ASTM D256 [27], con un espesor de 3 mm, un ancho de 12.7 mm y una longitud total de 63.5 mm. La distancia desde la superficie lateral hasta el centro de la muesca fue de 31.8 mm, con una abertura en ángulo de 45° y una profundidad de muesca de 2.5 mm.

Durante la fabricación de las probetas se mantuvieron constantes las condiciones de impresión: velocidad de impresión de 45 mm/s, diámetro de boquilla de 0.4 mm, altura de capa de 0.2 mm, ancho de pared de 1.2 mm, espesor de capas superior e inferior de 0.8 mm, temperatura de extrusión de 200 °C y temperatura de cama de 50 °C. Se adoptó un diseño factorial 2×3, considerando dos factores: el patrón de relleno (dos niveles) y el porcentaje de relleno (tres niveles). Para cada combinación experimental se fabricaron seis probetas, con el fin de aumentar la confiabilidad estadística de los resultados. Las variables de respuesta evaluadas fueron la resistencia y el módulo de elasticidad a compresión (calculado en la región elástica, zona lineal, de las curvas esfuerzo vs deformación), así como la energía absorbida en los ensayos de impacto. Las muestras fueron fabricadas mediante FDM, utilizando impresoras

Dremel DigiLab 3D40 (Dremel, Racine, EE. UU.) y el software UltiMaker Cura 5.4.0 (UltiMaker B.V., Utrecht, Países Bajos), con filamento PLA estándar. Para mitigar la influencia de factores externos, la fabricación se realizó en dos lotes de impresión distribuidos entre dos impresoras. En cada equipo se fabricaron probetas correspondientes a todas las combinaciones experimentales de patrón y porcentaje de relleno, con el fin de evitar que un posible efecto asociado a la impresora quedara confinado a una única configuración. Asimismo, se controlaron variables como la calibración de la impresora, la temperatura ambiente, el tiempo entre impresiones, la ventilación, el nivel de humedad y el estado del filamento.

Los ensayos de compresión se llevaron a cabo en dos máquinas universales: una Instron 3366 (Instron, Norwood, EE. UU.), equipada con una celda de carga de 10 kN, y una Tinius Olsen H50KS (Tinius Olsen, Horsham, EE. UU.), equipada con una celda de 50 kN, a una velocidad de ensayo de 1.3 mm/min ± 0.3 mm/min [26], debido a que la capacidad de la celda de 10 kN no fue suficiente para ensayar algunas probetas con mayor porcentaje de relleno. Por su parte, para la caracterización a impacto Izod de las muestras evaluadas se utilizó una máquina de prueba de péndulo Tinius Olsen Model Impact 304 (Tinius Olsen, Horsham, EE. UU.). En este ensayo se implementó un martillo pendular de 37.06 N de peso y un radio de 335.203 mm, a una velocidad de aproximadamente 3.5 m/s y una altura de caída de 610 mm ± 2 mm [27]. Además, se estimó la densidad aparente (ρ_a) de cada muestra mediante la Ecuación (1):

$$\rho_a = m / v_a \tag{1}$$

En la ecuación, m es la masa de la muestra y v_a es su volumen aparente. A partir de este valor, se calcularon propiedades mecánicas específicas (resistencia/densidad aparente) para comparar el desempeño relativo entre configuraciones. El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA con prueba de comparación múltiple de Tukey, usando el software Minitab® 21.4.2 (Minitab, LLC, State College, EE. UU.), con el fin de identificar diferencias significativas entre los grupos evaluados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Selección de patrones de relleno bioinspirados para impresión 3D

Las alternativas propuestas (4 por cada modo de trabajo) corresponden a biomateriales que gracias a su morfología estructural han sido elementos de estudio para evaluar su rendimiento mecánico bajo cargas de compresión o impacto según revisión literaria previa (Tabla 2). Para seleccionar la mejor alternativa, se utilizó el método AHP basado en los criterios de selección con sus respectivas escalas de ponderación.

Tabla 2. Alternativas en función del modo de trabajo.
Fuente: elaboración propia a partir de la literatura reportada en [18]-[25].

Modo de trabajo	Alternativas			
	A1	A2	A3	A4
Compresión	Esponja marina (*Euplectella aspergillum*) [18]	Nuez de Brasil (*Berthollectia excelsa*) [19]	Alas anteriores del escarabajo (*Beetle Elytra*) [20]	Madera (*Larix principis-rupprechtii*) [21]
Impacto	Coco (*Cocos nucifera*) [22]	Cuernos del borrego cimarrón (*Ovis canadensis*) [23]	Bambú [24]	Astas de alce [25]

En la Tabla 3 se muestran las propiedades obtenidas y los valores definidos después del análisis de cada una de las alternativas en función de cada criterio de selección. En los criterios C3 y C5, los valores 0, 1 y 2 representan el nivel (bajo, medio y alto, respectivamente) de la alternativa frente a dichos criterios.

Tabla 3. Puntuación de alternativas por cada criterio de selección.
Fuente: elaboración propia a partir de la información reportada en [18]-[25].

Criterios	Alternativas compresión				Alternativas impacto			
	A1	A2	A3	A4	A1	A2	A3	A4
C1 (%)	(0) 32.28	(0) 1.23	(1) 52.66	(1) 54.95	(0) 14.56	(0) 7.52	(1) 46.44	(0) 5.41
C2 (MPa/kJ/m^2)	(0) 39.7	(2) 140.4	(0) 38.82	(0) 44.90	(0) 28	(1) 75	(1) 63.54	(1) 60
C3	0	2	1	0	0	2	1	2
C4	0	0	2	2	2	0	2	0
C5	2	0	0	0	0	0	0	0

Es importante resaltar que la alternativa 1 tuvo el puntaje más alto en el criterio C5, debido a que en su morfología se dio una importante correlación con el patrón 'Octeto' presente en el software UltiMaker Cura 5.4.0.

La metodología AHP aplicada se detalla en el material suplementario, donde se calculó el vector propio de cada alternativa en relación con los distintos criterios de evaluación. Los resultados obtenidos se organizaron en una matriz de decisión de dimensiones 5 × 4, a partir de la cual se generó un vector de decisión final que permitió identificar la alternativa con la mayor puntuación total para cada modo de trabajo. Las Tablas 4 y 5 presentan las respectivas matrices de decisión utilizadas para los ensayos de compresión e impacto.

Tabla 4. Matriz de decisión (compresión). Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de comparación por pares de los criterios (Material suplementario, Tabla A8) y de las matrices de comparación de alternativas para compresión (Material suplementario, Tablas A10-A14).

Alternativa	Vector propio					Vector de decisión final
	C1	C2	C3	C4	C5	
A1 (Esponja marina)	0.08	0.10	0.39	0.06	0.62	0.17
A2 (Nuez de Brasil)	0.08	0.70	0.05	0.06	0.12	0.28
A3 (Alas de escarabajo)	0.42	0.10	0.16	0.44	0.12	0.25
A4 (Madera)	0.42	0.10	0.39	0.44	0.12	0.30
Vector propio criterios	0.32	0.32	0.19	0.12	0.05	

Tabla 5. Matriz de decisión (Impacto). Fuente: elaboración propia a partir de la matriz de comparación por pares de los criterios (Material suplementario, Tabla A8) y de las matrices de comparación de alternativas para impacto (Material suplementario Tablas A15-A20).

Alternativa	Vector propio					Vector de decisión final
	C1	C2	C3	C4	C5	
A1 (Coco)	0.12	0.06	0.52	0.45	0.25	0.22
A2 (Cuernos-borrego)	0.12	0.31	0.07	0.05	0.25	0.17
A3 (Bambú)	0.62	0.31	0.34	0.45	0.25	0.43
A4 (Astas de alce)	0.12	0.31	0.07	0.05	0.25	0.17
Vector propio criterios	0.32	0.32	0.19	0.12	0.05	

Aunque el modelo AHP determinó que la estructura bioinspirada en la madera (30 %) y el bambú (43.2 %) eran las alternativas más favorables para compresión e impacto, respectivamente, se evaluaron las dos alternativas seleccionadas bajo ambos modos de carga.

Esto se hizo con el propósito de analizar la influencia de distintos patrones de relleno en la rigidez estructural, la tenacidad, la cantidad de energía absorbida a impacto y la resistencia a compresión en función de la densidad aparente de las piezas impresas.

Los autores [28] analizaron la respuesta al impacto de diferentes especies de madera, entre ellas la caoba africana, el nogal negro y el arce azucarero, los cuales presentaron resistencias al impacto de 42.33 kJ/m², y 29 kJ/m², respectivamente. A partir de los resultados obtenidos, los autores concluyeron que la capacidad de absorción de energía está influenciada tanto por la densidad como por la organización mesoestructural del material. Asimismo, atribuyeron este comportamiento a características anatómicas como la disposición de las vetas, la distribución de vasos y la presencia de radios leñosos, que favorecen la disipación de energía durante la carga por impacto.

De manera similar, [29] estudiaron en el 2021 la influencia de los nodos del bambú sobre sus propiedades mecánicas bajo diferentes orientaciones de carga respecto a la dirección de la fibra natural. Los resultados mostraron incrementos en la resistencia a la compresión asociados con la presencia de nodos, principalmente cuando la carga se aplicó en dirección perpendicular a la fibra Estas características estructurales motivaron su selección como referente biológico para el diseño de patrones de relleno evaluados en este estudio.

3.2 Diseño de patrones de relleno a partir de las características morfológicas de las alternativas seleccionadas

A partir de las morfologías de las alternativas seleccionadas, se desarrollaron los modelos geométricos de relleno empleados para analizar el efecto combinado del patrón y el porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas. En la Figura 1a, se observa que el tamaño, la forma y la distribución de los haces vasculares del bambú varían según la zona del culmo. En las regiones periféricas, los haces presentan un menor tamaño y un espaciado reducido entre ellos, mientras que en la sección media del culmo estos son de mayor tamaño y se encuentran más separados entre sí. En cuanto al patrón morfológico característico de este biomaterial, se identificó que los haces vasculares ubicados en la periferia adoptan una geometría aproximada a un rombo, como se muestra en la Figura 1a. Por su parte, la madera de pino silvestre (*Pinus sylvestris*), mostrada en la Figura 1b, exhibe un patrón morfológico compuesto por estructuras hexagonales definidas por tres dimensiones: x (longitud diagonal), z (longitud vertical) y t (espesor del borde), este último relacionado con el grosor de la fibra de madera. Cabe resaltar que tanto el diseño microestructural como las propiedades mecánicas de la madera dependen en gran medida de la especie o clase analizada [23]. Estas observaciones sirvieron como base para la emulación geométrica de los patrones naturales en el proceso de diseño de los rellenos bioinspirados para impresión 3D.

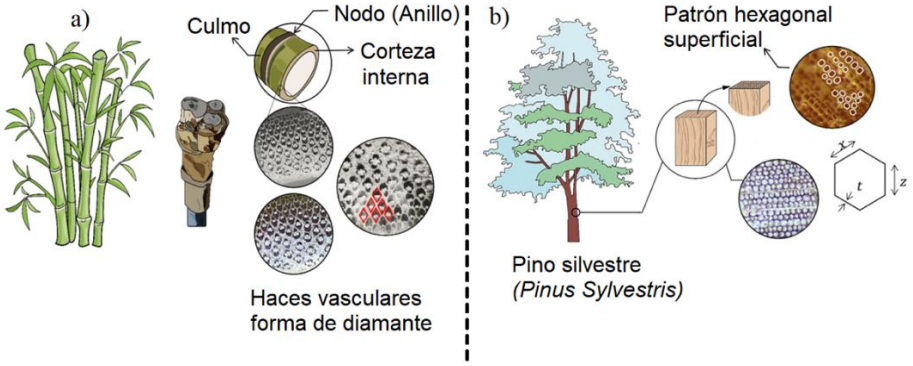


Figura 1. Representación esquemática y micrografías ópticas de las muestras de (a) bambú y (b) madera de pino silvestre. Fuente: elaboración propia a partir de micrografías ópticas obtenidas en este estudio.

Una vez identificada la morfología natural de las muestras, se replicaron sus patrones estructurales utilizando la herramienta de procesamiento de imágenes ImageJ (National

Institutes of Health, Bethesda, EE. UU.) y de diseño asistido por computador con SolidWorks (Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay, Francia), para desarrollar las geometrías de las probetas para ensayos de compresión e impacto. A partir de la caracterización microestructural de una muestra de madera, se determinaron las dimensiones promedio de su estructura hexagonal (0.02 mm en el eje x y 0.03 mm en el eje z), obtenidas de 40 mediciones (Figura 2a), las cuales se emplearon para modelar una celda unitaria en SolidWorks (Figura 2b). Esta fue escalada con una separación mínima de 0.2 mm entre figuras, garantizando compatibilidad con el diámetro de la boquilla de impresión 3D y permitiendo así un patrón de relleno continuo y preciso (Figura 2c).

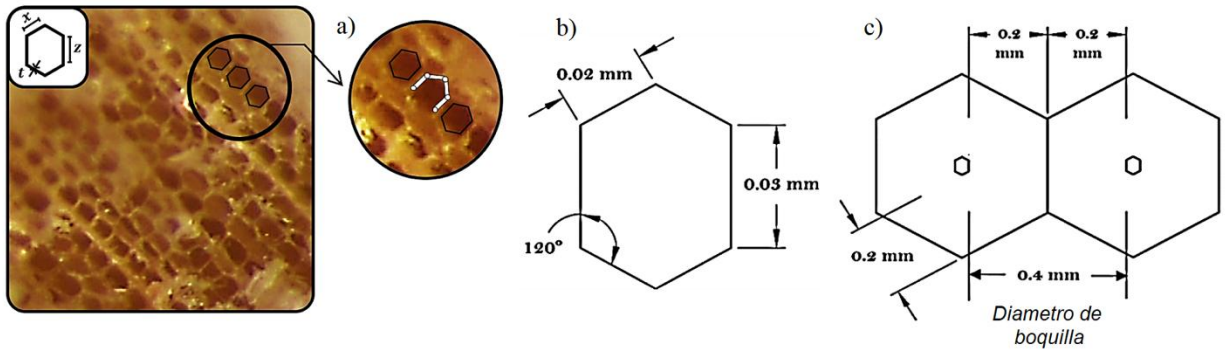
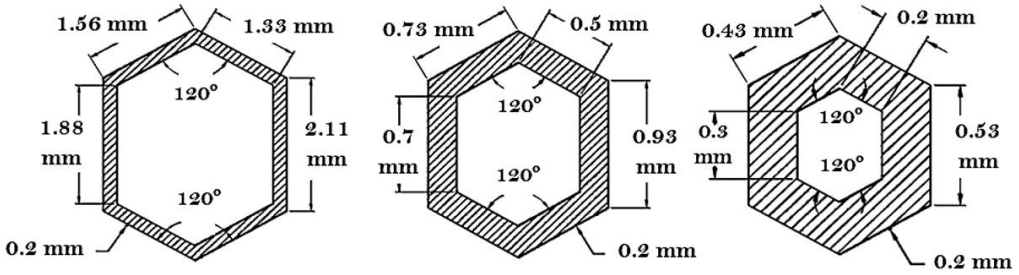


Figura 2. (a) Caracterización y dimensión geométrica del hexágono, (b) diseño estructural con medidas principales y ángulos internos, (c) definición dimensional del espesor superficial de la figura teniendo en cuenta el diámetro de la boquilla de la impresora 3D. Fuente: elaboración propia.

Después de definido el espesor de la figura geométrica (t = 0.2 mm), se procedió a escalar el hexágono interior con el objetivo de ajustar la relación entre el área de la zona sombreada (correspondiente al hexágono con un orificio central) y el área superficial total de la celda unitaria. Este procedimiento permitió obtener configuraciones que representaran los tres niveles de porcentaje de relleno evaluados, manteniendo constante el espesor estructural de 0.2 mm en todos los casos. Este valor se definió con base en el diámetro de la boquilla (0.4 mm), para asegurar la viabilidad de impresión en las zonas de unión entre hexágonos (Figura 3).



Área superficial con agujero central	1.95	0.81	0.41
Total area superficial	7.79	1.62	0.55
Porcentaje de relleno	0.25 **(25%)**	0.50 **(50%)**	0.75 **(75%)**

Figura 3. Análisis dimensional de la figura geométrica (hexágono) para cada porcentaje de relleno. Fuente: elaboración propia.

De forma similar al procedimiento aplicado al patrón bioinspirado en la madera, se emplearon las dimensiones obtenidas a partir de la caracterización morfológica del bambú para el diseño de la celda unitaria correspondiente. En este caso, se estimaron las dimensiones principales del rombo característico del material (Figura 4a) y se definió una distancia fija de

separación de 0.2 mm entre el rombo externo y el rombo interno. Este valor fue seleccionado estratégicamente para asegurar una distancia mínima de 0.4 mm entre las zonas vacías del patrón, equivalente al diámetro de la boquilla de impresión, garantizando así la viabilidad del modelo durante el proceso de fabricación (Figura 4b). Una vez definido el modelo estructural, se procedió a escalar las entidades geométricas del patrón con el fin de ajustar sus dimensiones de acuerdo con los porcentajes de relleno establecidos (Figura 5).

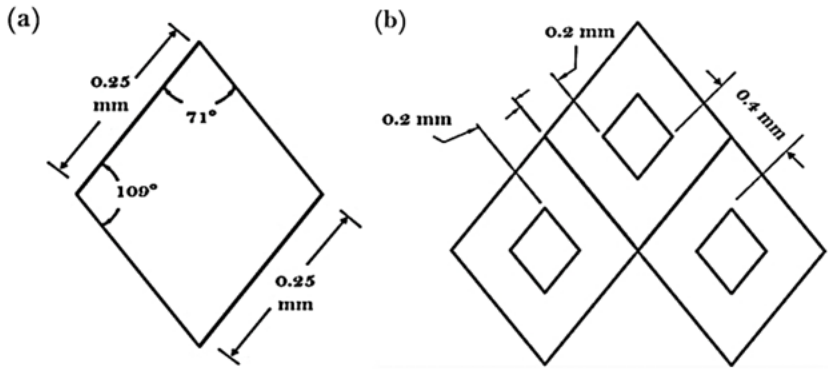
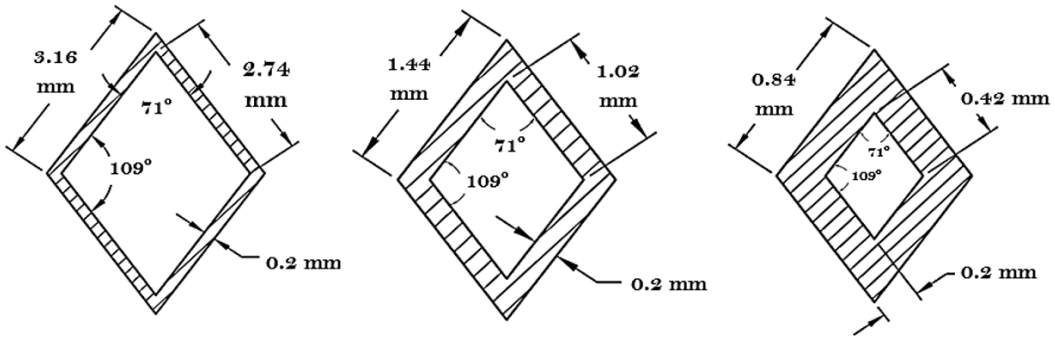


Figura 4. Caracterización y dimensión geométrica del rombo: (a) diseño estructural con medidas principales y ángulos internos; (b) definición dimensional del espesor de la figura.
Fuente: elaboración propia.



Área superficial con agujero central	2.35	0.98	0.50
Total area superficial	9.42	1.96	0.67
Porcentaje de relleno	0.25 **(25%)**	0.50 **(50%)**	0.75 **(75%)**

Figura 5. Análisis dimensional de la figura geométrica (rombo) para cada porcentaje de relleno.
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, a partir de las dimensiones geométricas definidas para cada porcentaje de relleno, se generó un patrón lineal mediante la repetición del número necesario de instancias. Este patrón fue utilizado para construir la geometría completa de las probetas. Como ejemplo representativo, en la Figura 6 se ilustran las configuraciones internas generadas para las probetas de impacto. La nomenclatura empleada identifica el tipo de patrón de relleno (M: madera, B: bambú) y el porcentaje de relleno (25 %, 50 % y 75 %), permitiendo visualizar las variaciones geométricas asociadas al diseño experimental.

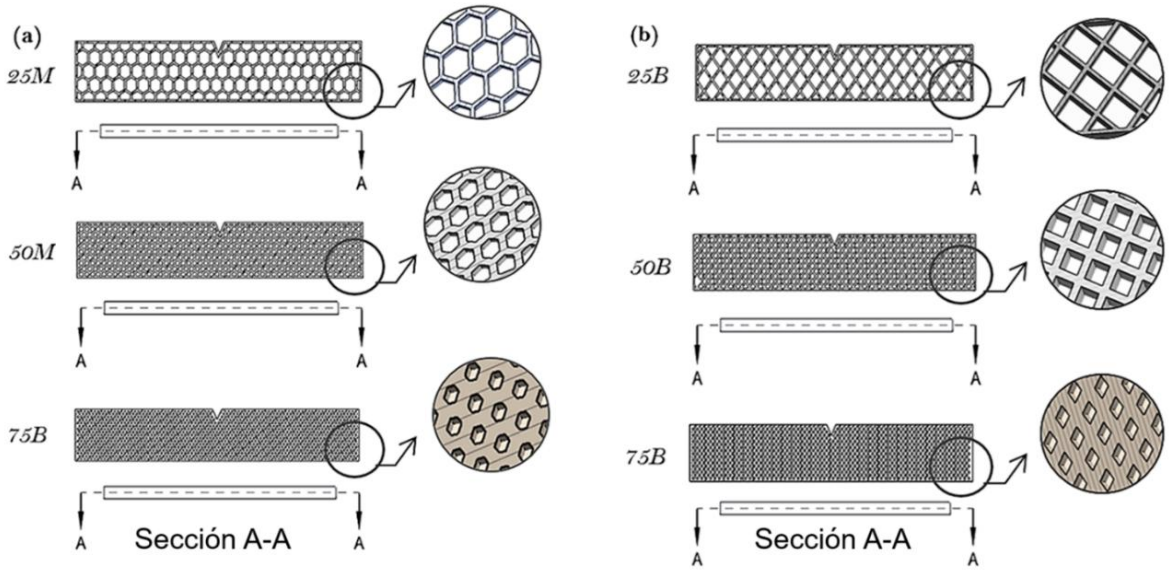


Figura 6. Representación esquemática de las configuraciones internas en probetas de impacto con diferentes patrones y porcentajes de relleno. Fuente: elaboración propia.

3.3 Evaluación de la influencia del porcentaje y del patrón de relleno en las propiedades de los materiales impresos

3.3.1 Determinación de la densidad aparente de las combinaciones patrón-porcentaje de relleno

Con el propósito de evaluar las propiedades específicas en las combinaciones de porcentaje y patrón de relleno se determinó la densidad aparente promedio para cada combinación en función de la propiedad mecánica evaluada. En la Figura 7 se muestra la densidad aparente determinada para las probetas de compresión e impacto. Aquí es posible evidenciar que en todos los casos las muestras de 75 % de relleno, exhibieron una mayor densidad aparente promedio. Esto era esperado debido a que, al aumentar el porcentaje de relleno, se reduce el área superficial de vacíos incrementando la cantidad de material requerido.

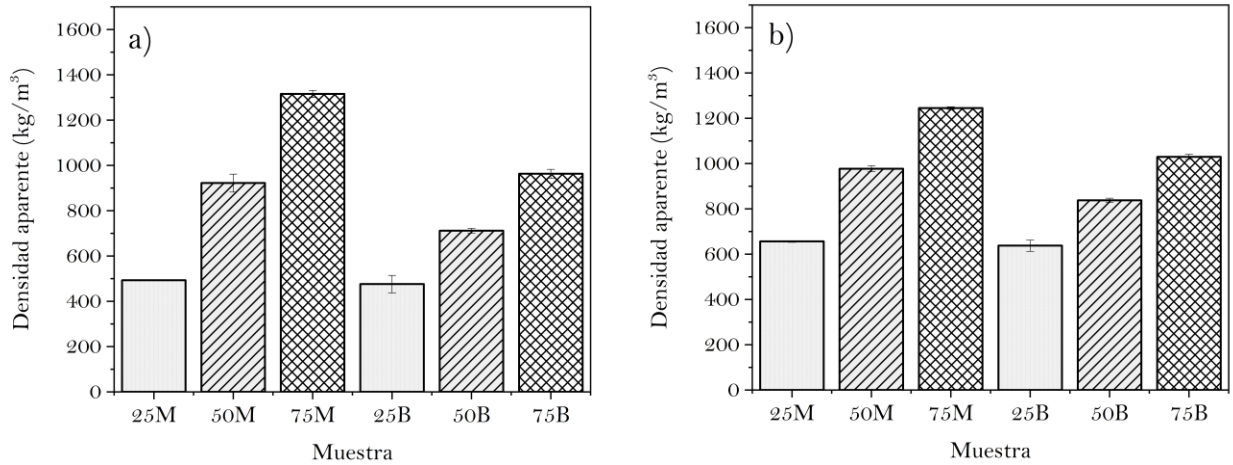


Figura 7. Densidad aparente promedio de muestras de a) compresión y b) impacto, por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7a se observa que las muestras de compresión 25 M y 25 B presentan densidades aparentes promedio similares, con una diferencia de 17.18 kg/m³. Por otro lado, en las muestras 75 M y 75 B hay una diferencia de 352.45 kg/m³, siendo 75 M la de mayor densidad aparente promedio (1315.56 kg/m³). Además, en la Figura 7b se evidencia en las probetas de impacto que, al incrementar el porcentaje de relleno en cada una de las combinaciones de parámetros de impresión considerados, la densidad aparente también aumenta. Esto sugiere que, si bien ambos patrones responden al incremento del relleno, la geometría interna influye en la eficiencia con la que se distribuye el material, afectando directamente la densidad aparente final de la pieza impresa.

3.3.2 Caracterización mecánica de las probetas impresas

Propiedades a compresión: a partir de los datos obtenidos en el ensayo de compresión, se obtuvieron las curvas representativas de esfuerzo-deformación de las probetas impresas en función del porcentaje y patrón de relleno (Figura 8). En la Figura 8a se presentan las curvas esfuerzo-deformación de las muestras con patrón bioinspirado en bambú. Se observa que la muestra con 25 % de relleno exhibe una mayor deformación plástica en comparación con las muestras con 50 % y 75 % de material. Esto podría deberse a que las probetas con 25 % de relleno tienen un mayor espacio vacío, lo que proporciona una mayor capacidad de deformación a medida que aumenta la carga de compresión. En contraste, las muestras con 50 % y 75 % de relleno, al tener una mayor densidad aparente de material, reducen el espacio disponible para el movimiento de los segmentos, aumentando la rigidez estructural y limitando la deformación. Además, se puede notar que la muestra con 75 % de relleno falla bruscamente al alcanzar el esfuerzo máximo de compresión, a diferencia de las muestras con 25 % y 50 % de relleno.

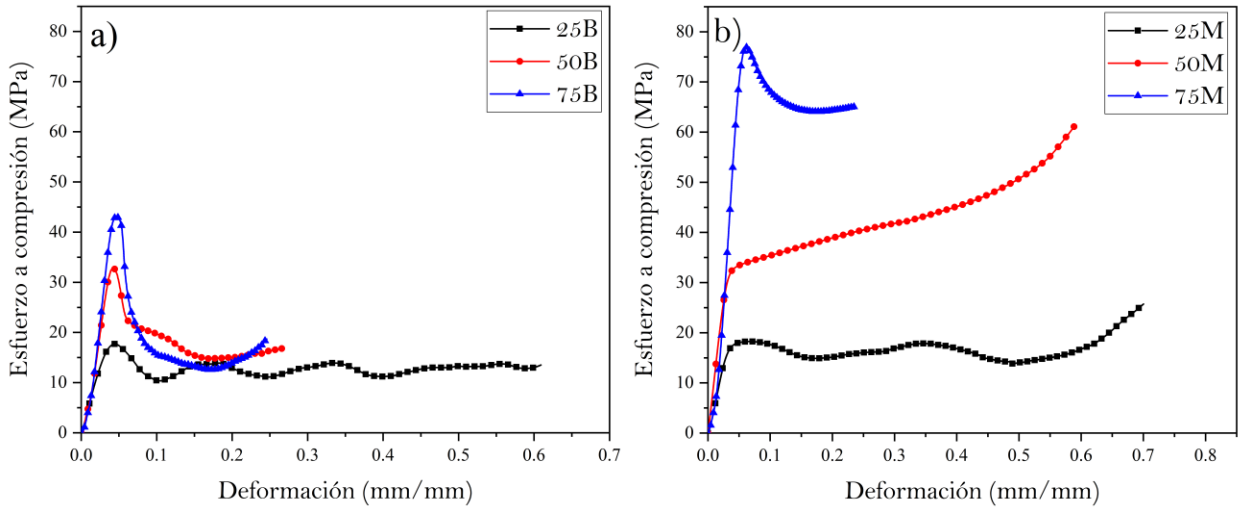


Figura 8. Curvas esfuerzo-deformación: (a) muestras 25B, 50B y 75B; (b) muestras 25M,50M y 75M. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 8b se ilustra que, en las curvas esfuerzo-deformación de las muestras con patrón bioinspirado en madera, la de 75 % de relleno obtuvo la mayor resistencia bajo cargas de compresión, sin colapsar tras alcanzar el esfuerzo máximo, lo que sugiere una mayor capacidad estructural para soportar cargas de compresión en comparación con las demás muestras. Además, se observa una similitud en el esfuerzo máximo a compresión entre las muestras 25 M y 25 B, lo cual podría estar relacionado con la similitud en sus densidades aparentes.

En la Figura 9 se observan las propiedades específicas promedio a compresión. Las letras sobre cada barra corresponden a los grupos homogéneos determinados mediante la prueba de comparación múltiple de Tukey; por tanto, las muestras que comparten al menos una letra no presentan diferencias significativas entre sí. En la Figura 9a se observa la resistencia específica promedio a compresión. La muestra 50 M presentó el mayor valor, con 0.065 MPa/kg/m³. Aunque en esta configuración se da una diferencia del 9 % con respecto a la muestra 75 M, el análisis estadístico no evidenció diferencias significativas entre ambas. Asimismo, las muestras 50 B y 75 B presentaron valores semejantes y no mostraron diferencias significativas entre sí. De manera similar, la muestra 25 M tampoco presentó diferencias significativas frente a las muestras 50 B y 75 B en esta propiedad. Esto sugiere que una muestra con 25 % de relleno y un patrón bioinspirado en madera puede ofrecer un comportamiento comparable al de muestras con 50 % y 75 % de relleno con patrón bioinspirado en bambú, manteniendo un menor peso.

Por otro lado, en la Figura 9b se evidencia que la muestra 50 B alcanzó el valor máximo de módulo de elasticidad específico (0.0015 GPa/kg/m³). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas al compararla con las muestras 25 B, 75 M y 75 B, según los grupos homogéneos definidos por la prueba de Tukey. En este sentido, puede inferirse que la muestra 25 B presenta una rigidez estructural relativa comparable a la de las muestras 50 B, 75 B y 75 M, pese a contar con el menor porcentaje de relleno evaluado.

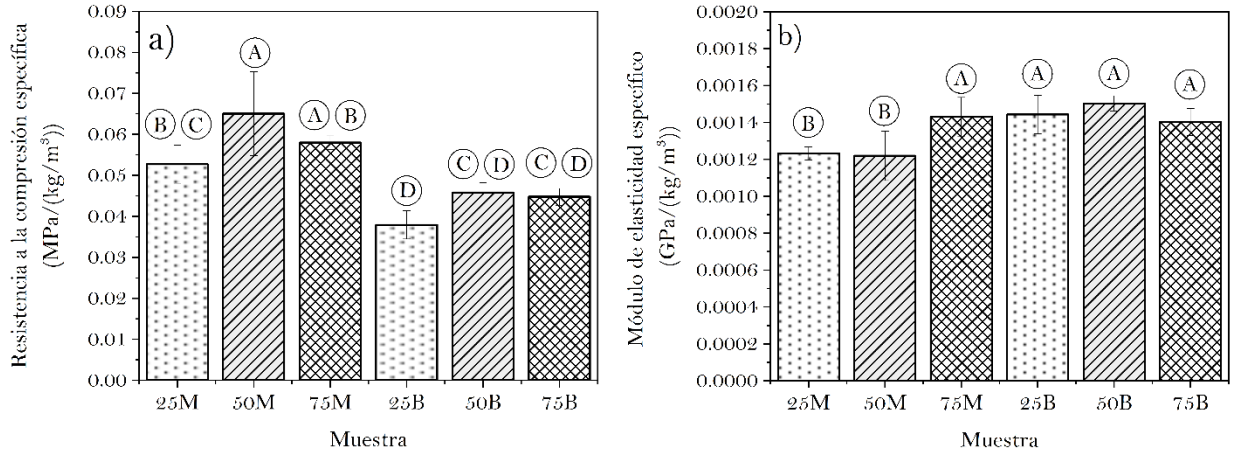


Figura 9. Propiedades específicas a compresión: (a) resistencia a la compresión/densidad aparente; (b) módulo de elasticidad/densidad aparente. Fuente: elaboración propia.

Estos resultados son consistentes con estudios recientes que han mostrado que el comportamiento mecánico de piezas impresas por FDM/FFF no depende exclusivamente del porcentaje de relleno, sino también de la arquitectura interna del patrón. Por ejemplo, se ha reportado que combinaciones multicapa de patrones convencionales como triangular, grid y honeycomb en PLA pueden incrementar significativamente el desempeño mecánico, alcanzando mejoras de hasta 64 % en tracción y 47 % en compresión frente a configuraciones individuales, lo que evidencia que la distribución interna del material puede ser más determinante que el simple aumento de la densidad aparente [8]. De manera complementaria, estudios recientes sobre estructuras bioinspiradas impresas en 3D han mostrado que el desempeño bajo compresión y absorción de energía depende en gran medida de la geometría interna y de la eficiencia estructural de la arquitectura seleccionada, más que del incremento aislado de material [13]. En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio refuerzan la idea de que la eficiencia mecánica bajo compresión depende de la interacción entre geometría del patrón y contenido de material, y no únicamente del incremento del porcentaje de relleno.

De este modo, la selección de la combinación óptima de porcentaje y patrón de relleno depende de los requerimientos de la aplicación. La Tabla 6 resume las configuraciones más convenientes en función del equilibrio entre resistencia específica a la compresión, rigidez estructural y consumo de material.

Tabla 6. Síntesis de configuraciones recomendadas según el criterio de desempeño en compresión. Fuente: elaboración propia.

Criterio de selección	Configuración recomendada	Justificación
Alta resistencia específica con bajo consumo de material	50M	Presentó el mayor valor de resistencia específica a la compresión
Alta rigidez estructural	75M o 50B	Mostraron comportamiento favorable en términos de módulo de elasticidad específico y/o rigidez relativa
Reducción de material con desempeño comparable	25M o 25B	Alcanzaron propiedades específicas comparables a configuraciones más densas, con menor consumo de material

Propiedades a impacto: a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de impacto tipo Izod, se determinaron los valores de energía absorbida, los cuales fueron posteriormente normalizados con respecto a la densidad aparente de cada muestra. Esta relación permitió calcular la propiedad específica de impacto, entendida como la energía absorbida por unidad de densidad aparente. La Figura 10 presenta los valores obtenidos de esta propiedad en función del patrón y porcentaje de relleno considerados.

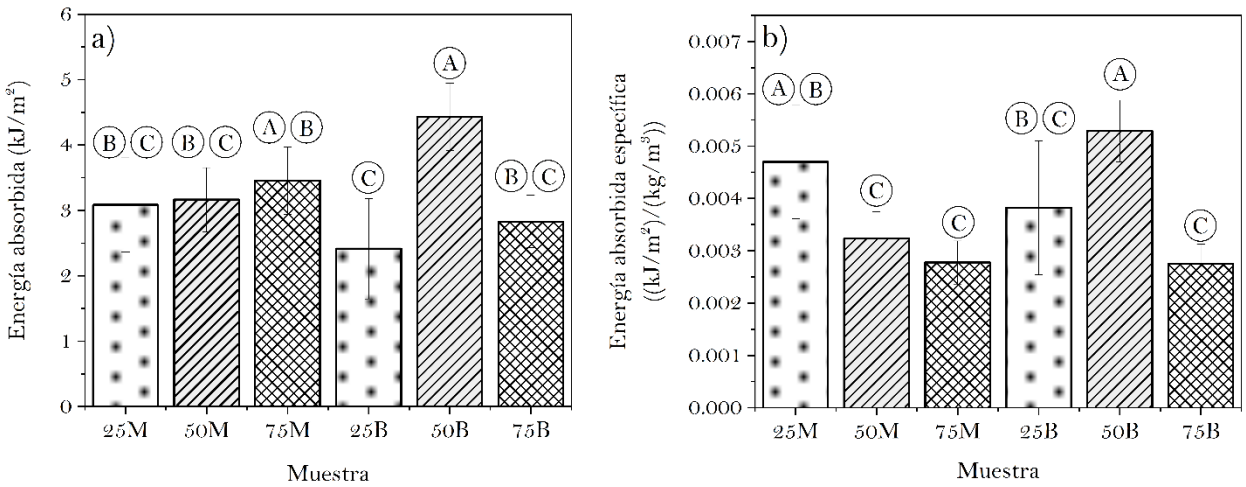


Figura 10. Propiedades a Impacto en función del porcentaje y patrón de relleno: (a) energía absorbida por cargas de impacto; (b) energía absorbida/densidad aparente. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 10a se observa que las probetas con el patrón de relleno bioinspirado en madera (25 M, 50 M y 75 M) no presentan diferencias significativas en los valores de energía absorbida. En contraste, las probetas con el patrón basado en la morfología del bambú (25 B, 50 B y 75 B) muestran variaciones más marcadas, destacándose la muestra 50B con la mayor absorción de energía (4.43 kJ/m²) y la muestra 25 B con el valor más bajo (2.42 kJ/m²).

Por su parte, la Figura 10b presenta la relación entre la energía absorbida y la densidad aparente, lo que permite evaluar la eficiencia mecánica en términos de propiedad específica de impacto. En este análisis, las configuraciones 50 B y 25 M se destacan como las más favorables, al presentar una mayor absorción de energía por unidad de densidad aparente. En las muestras con 75 % de relleno, el tipo de patrón tuvo una menor incidencia sobre la

propiedad específica de impacto. Además, la muestra 25 M evidenció una energía absorbida específica superior a la de 75 M, aun cuando se empleó un 50 % menos de material. Este comportamiento sugiere que el patrón bioinspirado en madera, combinado con un bajo porcentaje de relleno, favorece la eficiencia del material frente a cargas de impacto.

Estos resultados muestran que incrementar el porcentaje de relleno no necesariamente mejora el desempeño a impacto, ya que una mayor densificación interna puede limitar la ductilidad y disminuir la capacidad de disipación de energía. La tendencia observada en las configuraciones bioinspiradas tipo bambú es consistente con trabajos previos que han mostrado que la absorción de energía en estructuras impresas en 3D no depende únicamente del incremento de material, sino de la interacción entre la geometría interna, el porcentaje de relleno y la forma en que se distribuyen las zonas de soporte dentro del patrón. En particular, se ha reportado que trayectorias bioinspiradas tipo Bouligand (arquitectura helicoidal en capas rotadas sucesivamente) pueden ofrecer una absorción específica de energía superior a la de patrones rectilíneos, especialmente a porcentajes de relleno intermedios y altos [14]. De igual forma, en tubos bambú-inspirados fabricados por FDM se ha observado que la energía absorbida mejora al incrementar el porcentaje de relleno, aunque la mejor absorción específica se alcanza a 30 %, en lugar de 40 %, lo que evidencia que un mayor contenido de material no garantiza la mejor eficiencia mecánica [15]. Asimismo, en estructuras bioinspiradas monomaterial con heterogeneidad mecánica se han reportado incrementos de hasta 283 % en resistencia al impacto y 322 % en absorción de energía frente a configuraciones homogéneas [16]. En el presente trabajo, este comportamiento se manifestó en la superioridad de 50 B frente a 75 B en términos de desempeño específico, lo cual sugiere que el aumento del relleno en la configuración 75 B pudo inducir rigidización local y limitar la deformación plástica necesaria para disipar energía de manera más eficiente.

Con el fin de profundizar en la comprensión de este comportamiento, se analizó la zona de fractura de las probetas 50 B y 75 B evaluando la sección transversal de los modelos 3D y con observaciones mediante microscopía óptica, para identificar diferencias morfológicas asociadas al modo de fractura (Figura 11).

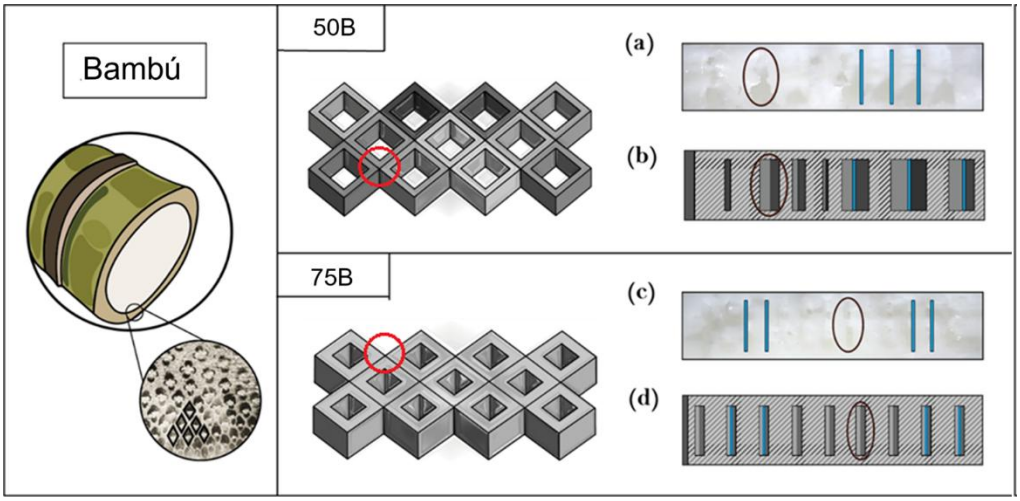


Figura 11. Fractura en probetas de impacto con patrón bioinspirado en bambú: (a, c) micrografías ópticas de la zona de fractura y (b, d) vistas transversales del modelo 3D para 50B y 75B.
Fuente: elaboración propia.

La Figura 11b muestra una vista en corte de la sección transversal del modelo 3D de la muestra 50 B en la zona de fractura, próxima a la región de la entalla. Esta vista permite relacionar de manera aproximada la geometría interna del patrón con la zona de fractura observada en la probeta física (Figura 11a). En la parte posterior del patrón se identifica una región nodal, asociada a la unión entre los vértices de cuatro segmentos de la geometría

interna. En este estudio, dicha región fue interpretada como un punto de apoyo, cuya ubicación aproximada se indica mediante círculos rojos. Las líneas azules se emplean como marcas esquemáticas para resaltar los elementos del patrón en la vista transversal. Una representación equivalente para la configuración 75B se presenta en las Figuras 11c y 11d.

La ubicación de los puntos de apoyo cambia entre configuraciones. En 50 B se encuentran más alejados de la zona de fractura, mientras que en 75 B aparecen más próximos a dicha región. Esta diferencia reduce el tamaño característico de la celda, aproxima las regiones nodales al plano de fractura e incrementa la rigidez local del patrón. Como consecuencia, se restringe la flexión de los segmentos internos; en términos de lattice structures (estructuras reticulares), esta configuración más cerrada reduce la longitud libre de los elementos estructurales y favorece una respuesta menos deformable, lo que puede explicar la menor energía absorbida que se observa en 75 B frente a 50 B. La Figura 12 analiza en detalle esta hipótesis. De manera análoga, se ha reportado que, en materiales derivados del bambú, la presencia de nodos puede elevar la capacidad de carga de 1.75 kN a 2.18 kN y la resistencia a compresión de 14.82 MPa a 18.78 MPa, evidenciando el papel de estas regiones como zonas localmente reforzadas [29].

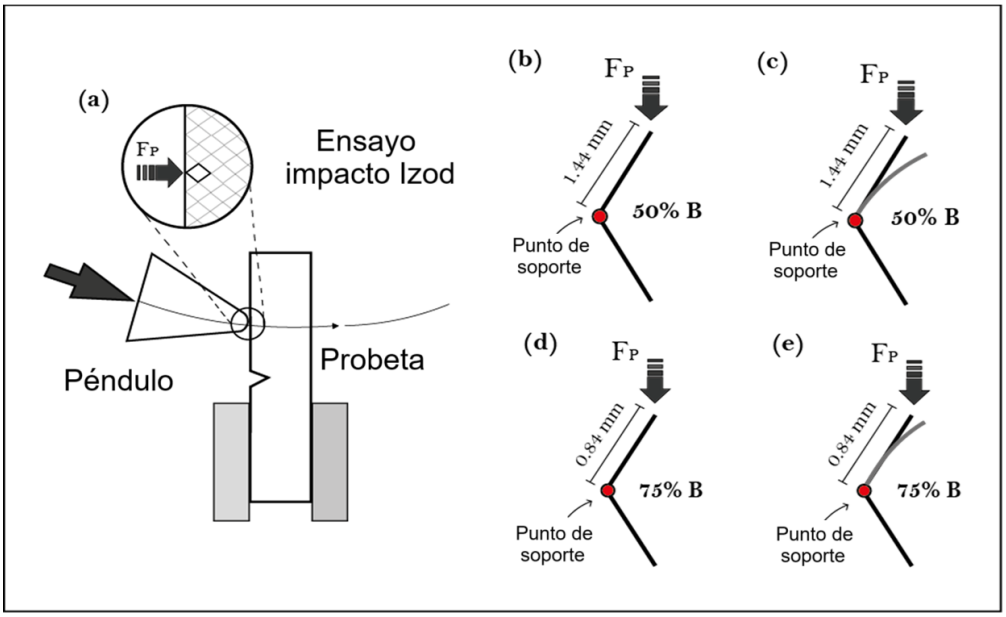


Figura 12. Deformación del biopatrón tipo bambú en el ensayo de impacto Izod: (a) fuerza aplicada, (b–c) patrón y deflexión de 50B, (d–e) patrón y deflexión de 75B. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 12a y 12b esquematizan la aplicación de la fuerza de impacto sobre el patrón correspondiente a las muestras con relleno bioinspirado en bambú. En la muestra 50 B, el punto de apoyo se encuentra a 1.44 mm respecto al punto de aplicación de la fuerza generada por el péndulo (Fp). Esta separación favorece la flexión de las paredes internas (Figura 12c), lo que se traduce en una mayor deformación plástica y, en consecuencia, en una mayor capacidad de absorción de energía. La observación es corroborada en la Figura 11a, donde se evidencia una deformación plástica significativa en la región de impacto (señalada con un óvalo).

En contraste, la muestra 75 B presenta un patrón más cerrado, con una distancia de 0.84 mm entre el punto de apoyo y la línea de acción de la fuerza. Esta menor separación restringe el movimiento de las paredes internas del patrón, incrementa la rigidez estructural y reduce la capacidad de absorción de energía durante el impacto. Tal relación se observa en la Figura 11c, donde los elementos estructurales del patrón con 75 % de relleno presentan menor deformación plástica que los de la configuración 50 B.

Este estudio presenta algunas limitaciones que se describen a continuación. (I) La evaluación experimental se realizó únicamente con filamento PLA estándar, dos patrones bioinspirados y tres niveles de relleno, por lo que los resultados no pueden generalizarse de manera directa a otros materiales, geometrías o condiciones de impresión. (II) Algunos criterios usados en la selección bioinspirada, como la complejidad de adaptación y la similitud geométrica, fueron definidos a partir de valoraciones cualitativas sustentadas en juicio experto; por lo que debe considerarse que el método AHP depende de la definición previa de criterios, de la asignación de sus pesos relativos y de la discretización de variables en escalas de ponderación; por tanto, los resultados de priorización pueden verse influenciados por las decisiones adoptadas en esa etapa. (II) El análisis mecánico se limitó a ensayos de compresión e impacto, sin considerar otros escenarios de carga como fatiga, flexión o solicitaciones cíclicas. (IV) Aunque las combinaciones experimentales fueron distribuidas entre dos impresoras para reducir sesgos sistemáticos, hay factores propios del proceso FDM, como la resolución geométrica limitada por el diámetro de boquilla, la altura de capa, la anisotropía mecánica (inducida por la deposición capa a capa) y la variabilidad entre equipos de impresión, que pueden afectar la repetibilidad y en la extrapolación de los resultados.

A pesar de las limitaciones mencionadas, este trabajo de investigación aporta un enfoque novedoso para el diseño de estructuras impresas por FDM al integrar componentes que habitualmente se abordan de manera independiente: la selección sistemática de referentes naturales mediante un método de selección multicriterio, el diseño de patrones bioinspirados a partir de morfologías reales conservando no solo su geometría, sino también sus relaciones dimensionales, y la evaluación del desempeño mecánico en términos de propiedades específicas. Esta integración proporciona criterios para orientar el diseño preliminar de estructuras impresas más eficientes en términos de consumo de material y respuesta mecánica.

4. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el porcentaje y el patrón de relleno influyen en el comportamiento mecánico específico de piezas impresas mediante FDM, tanto en compresión como en impacto. La eficiencia estructural no estuvo determinada únicamente por la cantidad de material, sino también por la interacción entre la geometría interna del patrón y la cantidad de relleno de cada configuración.

En compresión, la configuración 50 M presentó la mayor resistencia específica. Sin embargo, 25 M mostró un desempeño comparable al de configuraciones con mayor contenido de material, lo que la posiciona como una alternativa favorable cuando se busca resistencia a compresión con bajo consumo de material. En cuanto al módulo elástico específico, 50 B presentó la mejor relación módulo/densidad aparente, aunque sin diferencias significativas frente a 25 B.

En impacto, las muestras con patrón de bambú con 50 % de relleno (50 B) tuvieron una mayor absorción total de energía, mientras muestras con 25 M presentaron el mejor desempeño en términos de absorción de energía específica. Estos resultados confirman que aumentar el porcentaje de relleno no garantiza un mejor desempeño mecánico y que configuraciones bioinspiradas de menor densidad aparente pueden ofrecer respuestas mecánicas favorables en piezas livianas.

Un aporte de este trabajo fue integrar la selección multicriterio de referentes naturales, el diseño de patrones de relleno bioinspirados y la evaluación mecánica mediante propiedades específicas. En este sentido, la metodología permitió orientar el diseño preliminar de estructuras impresas más eficientes en términos de resistencia/peso y consumo de material.

Como limitaciones, el estudio se realizó con filamento PLA estándar, dos patrones bioinspirados y tres niveles de relleno. Además, algunos criterios de selección se definieron

mediante valoraciones cualitativas sustentadas en juicio de expertos. Por tanto, los resultados deben interpretarse dentro de las condiciones experimentales evaluadas.

Como trabajo futuro, se recomienda ampliar la metodología a otros materiales, tecnologías de manufactura aditiva y condiciones de carga, así como complementar el análisis experimental con simulación numérica y métricas geométricas más objetivas para la selección de patrones.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores expresan su agradecimiento al Laboratorio de Materiales y al Centro de Automatización de Procesos (CAP) de la Pontificia Universidad Javeriana Cali por el apoyo brindado en la fabricación de las muestras mediante impresión 3D. Asimismo, agradecen al Laboratorio de Materiales Cerámicos y Compuestos y al Laboratorio de Materiales Poliméricos (LAMPO) de la Universidad del Valle por el apoyo técnico y la realización de los ensayos mecánicos empleados en esta investigación.

Los autores declaran que la presente investigación no contó con financiación externa ni institucional para su desarrollo.

6. REFERENCIAS

[1] J. Muth, A. Klunker, and C. Völlmecke, “Putting 3D printing to good use—Additive Manufacturing and the Sustainable Development Goals,” *Front. Sustain.*, vol. 4, p. 1196228, Jul. 2023. https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1196228

[2] M. Jayakrishna, M. Vijay, and B. Khan, “An Overview of Extensive Analysis of 3D Printing Applications in the Manufacturing Sector,” *J. Engin.*, vol. 2023, p. 7465737, Dec. 2023. https://doi.org/10.1155/2023/7465737

[3] T. Awoke Yeshiwas, A. Bayable Tiruneh, and M. Asnake Sisay, “A review article on the assessment of additive manufacturing,” *J. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 20, no. 1, p. 85, Jul. 2025. https://doi.org/10.1186/s40712-025-00306-8

[4] C. Camposeco-Negrete, J. Varela-Soriano, and J. J. Rojas-Carreón, “The effects of printing parameters on quality, strength, mass, and processing time of polylactic acid specimens produced by additive manufacturing,” *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 6, no. 4, pp. 821-840, Dec. 2021. https://doi.org/10.1007/s40964-021-00198-y

[5] M. A. Morales, A. Maranon, C. Hernandez, V. Michaud, and A. Porras, “Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments,” *Polymers*, vol. 15, no. 3, p. 528, Jan. 2023. https://doi.org/10.3390/polym15030528

[6] T. D. Do, M. C. Le, T. A. Nguyen, and H. L. Le, “Effect of Infill Density and Printing Patterns on Compressive Strength of ABS, PLA, PLA-CF Materials for FDM 3D Printing,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 1068, pp. 19-27, Aug. 2022. https://doi.org/10.4028/p-zhm1ra

[7] P. Sethu Ramalingam, K. Mayandi, V. Balasubramanian, K. Chandrasekar, V. M. Stalany, and A. A. Munaf, “Effect of 3D printing process parameters on the impact strength of Onyx–glass fiber reinforced composites,” *Mater. Today: Proc.*, vol. 45, no. 7, pp. 6154-6159, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.467

[8] M. G. Aboelella, S. J. Ebeid, and M. M. Sayed, “Layer combination of similar infill patterns on the tensile and compression behavior of 3D printed PLA,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 11759, Apr. 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-94446-8

[9] J. L. Liu, E. W. L. Lim, Z. P. Sun, J. Wang, T. E. Tay, and V. B. C. Tan, “Improving strength and impact resistance of 3D printed components with helicoidal printing direction,” *Int. J. Impact Eng.*, vol. 169, p. 104320, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104320

[10] M. Naik, and D. G. Thakur, "Experimental investigation of effect of printing parameters on impact strength of the bio-inspired 3D printed specimen," *Sādhanā*, vol. 46, no. 3, p. 151, Jul. 2021. https://doi.org/10.1007/s12046-021-01671-8

[11] L. P. Buelvas Álvarez, and J. A. Ramírez Osorio, "Biomimética de estructuras vegetales: Mejorando la seguridad en el ciclismo a partir de la olla de mono," Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2014. http://hdl.handle.net/20.500.11912/3315

[12] A. Harish *et al.*, "Designing lightweight 3D-printable bioinspired structures for enhanced compression and energy absorption properties," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 6, p. 729, Mar. 2024. https://doi.org/10.3390/polym16060729

[13] J. Li, M. Li, J. J. Koh, J. Wang, and Z. Lyu, "3D-printed biomimetic structures for energy and environmental applications," *DeCarbon*, vol. 3, p. 100026, Mar. 2024. https://doi.org/10.1016/j.decarb.2023.100026

[14] M. K. Islam, P. J. Hazell, H. Wang, J. P. Escobedo, and H. Chowdhury, "Quasi-Static and Low-Velocity Impact Response of 3D Printed Plates Using Bio-Inspired Tool Paths," *Biomimetics*, vol. 10, no. 3, p. 135, Feb. 2025. https://doi.org/10.3390/biomimetics10030135

[15] E. İ. Albak, "Crashworthiness Performance of Bamboo-Inspired 3D-Printed Tubes: Effects of Infill Pattern, Infill Ratio, Wall Thickness, and Inner Diameter," *Biomimetics*, vol. 10, p. 702, Oct. 2025. https://doi.org/10.3390/biomimetics10100702

[16] M. Zhang *et al.*, "3D printed single-material bio-inspired layered structures with mechanical heterogeneity for enhanced energy absorption," *Compos. B: Engin.*, vol. 307, p. 112936, Nov. 2025. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112936

[17] C. Peñafiel-Viáfara, and L. D. Hernández-Quiroz, "Optimización de los parámetros de impresión 3D relacionados con el consumo de material en función de las propiedades mecánicas de productos impresos por modelado de deposición fundida (FDM)," Trabajo de grado, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali, Colombia, 2023. https://doi.org/10.71618/ma49-2d20

[18] H. Chen, Z. Jia, and L. Li, "Lightweight lattice-based skeleton of the sponge *Euplectella aspergillum*: On the multifunctional design," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 135, p. 105448, Nov. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105448

[19] M. Sonego, M. Madia, M. Eder, C. Fleck, and L. A. Pessan, "Microstructural features influencing the mechanical performance of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) mesocarp," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 116, p. 104306, Apr. 2021. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104306

[20] X. Chen, X. Yu, Z. Zhang, Y. Xu, and Y. Fu, "The effect of trabecular chamfers on the compressive ductility of beetle elytron plates," *Mech. Mater.*, vol. 163, p. 104093, Dec. 2021. https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2021.104093

[21] J. Sun, R. Zhao, Y. Zhong, and Y. Chen, "Compressive Mechanical Properties of Larch Wood in Different Grain Orientations," *Polymers*, vol. 14, no. 18, p. 3771, Sep. 2022. https://doi.org/10.3390/polym14183771

[22] R. A. Barbosa França, G. R. Souza, V. A. da Silva, and E. Peterson Gonçalves, "Extração de fibras de coco para aplicação em materiais de engenharia," *Rev. Univap*, vol. 22, no. 40, p. 610, Mar. 2017. https://doi.org/10.18066/revistaunivap.v22i40.1270

[23] W. Huang, A. Zaheri, J.-Y. Jung, H. D. Espinosa, and J. McKittrick, "Hierarchical structure and compressive deformation mechanisms of bighorn sheep (*Ovis canadensis*) horn," *Acta Biomater.*, vol. 64, pp. 1-14, Dec. 2017. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.09.043

[24] L. Osorio, E. Trujillo, F. Lens, J. Ivens, I. Verpoest, and A. W. Van Vuure, "In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 37, no. 17, pp. 1099-1113, Jun. 2018. https://doi.org/10.1177/0731684418783055

[25] M. E. Launey, P.-Y. Chen, J. McKittrick, and R. O. Ritchie, "Mechanistic aspects of the fracture toughness of elk antler bone," *Acta Biomater.*, vol. 6, no. 4, pp. 1505-1514, Apr. 2010. https://doi.org/10.1016/j.actbio.2009.11.026

[26] Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM D695-15, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015. [Online]. Available: https://borgoltz.aoe.vt.edu/aoe3054/manual/expt5/D695.6642.pdf

[27] Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, ASTM D256-10, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2010. [Online]. Available: https://www.universalgripco.com/_files/ugd/8e363a_c025800c15324c06a053f3610426ec77.pdf?index=true

[28] A. K. Matsushita, D. Gonzalez, M. Wang, J. Doan, Y. Qiao, and J. McKittrick, "Beyond density: Mesostructural features of impact resistant wood," *Mater. Today Commun.*, vol. 22, p. 100697, Mar. 2020. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100697

[29] H. Zhang *et al.*, "Effect of nodes on mechanical properties and microstructure of laminated bamboo lumber units," *Constr. Build. Mater.*, vol. 304, p. 124427, Oct. 2021. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124427

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses económicos, profesionales o personales que puedan influir de forma inapropiada en los resultados obtenidos en este artículo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Camila Peñafiel-Viáfara: Desarrollo de la investigación.

Laura Daniela Hernández-Quiroz: Desarrollo de la investigación.

Mario Fernando Muñoz-Vélez: Conceptualización, supervisión, diseño de la investigación, redacción y revisión final del manuscrito.