

**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)**

CAMILA PEÑAFIEL VIÁFARA

LAURA DANIELA HERNÁNDEZ QUIROZ

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2023

**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)**

**CAMILA PEÑAFIEL VIÁFARA
LAURA DANIELA HERNÁNDEZ QUIROZ**

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

**Director
MARIO FERNANDO MUÑOZ VÉLEZ Ph.D.**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS
INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2023

Camila Peñafiel Viáfara

A mi querida madre Alexandra, por su amor genuino, acompañamiento, confianza, apoyo emocional y su admirable esfuerzo en brindarnos a mí y mis hermanas educación moral y profesional durante varios años con mucho sacrificio. Gracias a ti, he logrado alcanzar mis aspiraciones sin dejar de creer en grande y nunca rendirme. Te adoro infinitamente madre, eres mi gran inspiración y mi mayor motivación. En especial, te agradezco por brindarme tu apoyo incondicional en la realización de este proyecto de grado, que presentó muchas dificultades y en varias ocasiones no sabía cómo continuar adelante por la ansiedad, la frustración y la sobrecarga de trabajo que debí llevar por mí misma, sin embargo, tus palabras de aliento me ayudaron a nunca rendirme y lograr mis objetivos. Mil gracias, madre.

A mis maravillosas hermanas Daniela y Laura Isabella, por siempre hacer de los días más oscuros en los momentos más divertidos y extraordinarios que he vivido junto a ellas. Por confiar en mí, acompañarme incondicionalmente y recordarme lo valiosa que soy.

A mis grandes amigos Cami y David, por su apoyo y acompañamiento durante mi etapa universitaria. Por su linda amistad y generosidad en los momentos más difíciles. Gracias a ustedes, tuve la fuerza y la motivación para continuar diferentes proyectos de vida.

Por último, a todas las personas que me brindaron su apoyo, colaboración y enseñanza en la realización de este trabajo de grado. Por su amabilidad, gentileza y acompañamiento, en especial aquellos que me acogieron con mucho respeto y cordialidad para compartir ideas, recomendaciones y conocimientos.

Laura Daniela Hernández Quiroz

Hoy quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre por el apoyo incondicional durante el proceso de elaboración y entrega de la tesis. El aliento, consejos y palabras motivadoras han sido fundamentales para alcanzar este logro.

A mis profesores, gracias por su guía experta, paciencia y dedicación en cada etapa de la investigación. Su conocimiento y retroalimentación han sido invaluable para el desarrollo del trabajo.

A mi familia, gracias por su amor incondicional, comprensión y apoyo constante. Han sido mi roca en los momentos difíciles y mi mayor motivación para seguir adelante. Su confianza en mí ha sido el motor que me impulsa a alcanzar mis metas.

A mis amigos, gracias por estar siempre ahí, animándome y brindándome ese respiro necesario en medio del estrés académico. Sus palabras de aliento y momentos divertidos me han dado fuerzas para continuar.

Este logro no habría sido posible sin cada uno de ustedes. Estoy eternamente agradecida por formar parte de mi vida y por ser testigos de este hito importante en mi carrera académica.

Agradecimientos

A la directora de carrera la doctora Adriana Gómez Gómez, por su inmensa colaboración, apoyo y acompañamiento durante toda la formación profesional. Por su valiosa enseñanza, dedicación, paciencia y entrega en cada una de sus intervenciones en trabajos académicos y por ser una fuente de inspiración para todos los estudiantes que desean ser excelentes profesionales, con calidad humana y sensibilidad social.

Al director de tesis el doctor Mario Fernando Muñoz Vélez, por siempre estar pendiente y atento en cada una de las etapas del proceso de realización del proyecto de grado. Por su bondad, generosidad, paciencia y su valioso acompañamiento y retroalimentación durante el análisis de los resultados obtenidos. Por siempre brindar su apoyo y motivación incondicional para seguir adelante a pesar de los obstáculos presentados.

A Erick Hernández Renjifo del Instituto de Investigación ÓMICAS por su apreciada cooperación en la ejecución de la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM) de las muestras naturales.

A Victoria Eugenia Cerón Galvis y Mayra Alejandra Galvis Medina, por su colaboración y acompañamiento en la toma de imágenes de las muestras naturales haciendo uso del estereomicroscopio, en el ensayo de compresión y en la obtención de la masa de las probetas impresas. Por su valiosa cordialidad y generosidad en todo momento.

A Nicolás Martínez Mejía y July Andrea Manquillo Castaño de la Universidad del Valle, por su amabilidad y apoyo en los ensayos de impacto y compresión. Por sus enseñanzas, recomendaciones y sugerencias para el trabajo de grado.

A Bleider Johan Arizala, por su acompañamiento, asesoría y ayuda en el diseño e impresión de las probetas de ensayo. Por su generosidad, apoyo incondicional, sugerencias, retroalimentación y enseñanza durante toda la carrera.

A todos los compañeros, amigos y próximos profesionales, por su amistad, buena energía y lindos recuerdos a lo largo de la etapa universitaria.

A los profesores, por su enseñanza, dedicación, buena disposición, compresión y apoyo durante la formación profesional.

A todos aquellos que de una u otra manera contribuyeron significativamente en la realización de este trabajo.

Contenido

1.	Introducción	13
2.	Planteamiento del problema	16
3.	Justificación	21
4.	Estado del arte	23
4.1.	Efecto de la parametrización en el proceso de impresión 3D por FDM en las propiedades mecánicas	23
4.2.	Influencia del porcentaje y patrón de relleno en el desempeño estructural de la pieza a imprimir en función de las propiedades mecánicas	30
4.3.	Impacto de la biomimética en el diseño mecánico.....	32
4.4.	Beneficios del uso de la biomimética en la impresión 3D.....	36
5.	Objetivos	40
5.1.	Objetivo general.....	40
5.2.	Objetivos específicos	40
6.	Materiales y Métodos.....	41
6.1.	Selección de una estructura bio-inspirada en función de su modo de trabajo y densidad	41
6.2.	Caracterización morfológica de los biomateriales seleccionados.....	43
6.3.	Evaluación de la influencia de porcentaje y el patrón de relleno en las propiedades mecánicas de los materiales impresos.	44
6.3.1.	Diseño de Patrones de impresión 3D	44
6.3.2.	Diseño factorial a emplearse	45
6.3.3.	Método de fabricación de probetas de ensayo.....	47
6.3.4.	Proceso para ensayos mecánicos.....	48
6.3.4.1.	<i>Ensayo de compresión</i>	48
6.3.4.2.	<i>Ensayo de impacto Izod</i>	49
6.3.5.	Caracterización física de las probetas de ensayo	50
6.3.6.	Proceso de análisis de resultados.....	50
6.4.	Selección de la mejor combinación de porcentaje y patrón de relleno en función del modo de trabajo	51
7.	Resultados y Discusión.....	51
7.1.	Aplicación del proceso de análisis jerárquico (AHP) en la selección del biomaterial más favorable por modo de trabajo	51
7.1.1.	Propiedades a compresión	52
7.1.2.	Propiedades a Impacto	55

7.2.	Análisis de la caracterización morfológica de las alternativas seleccionadas.....	58
7.2.1.	Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FE-SEM).....	58
7.2.2.	Microscopia Óptica	59
7.3.	Proceso de diseño de especímenes	61
7.3.1.	Aplicación de patrón natural de la madera.....	61
7.3.2.	Aplicación de patrón natural del Bambú.....	65
7.4.	Proceso de Impresión 3D.....	68
7.5.	Análisis de caracterización física de las probetas impresas.....	69
7.5.1.	Probetas de compresión	69
7.5.2.	Probetas de Impacto	70
7.6.	Caracterización mecánica de las probetas impresas.....	71
7.6.1.	Propiedades a compresión	71
7.6.2.	Propiedades a Impacto	77
8.	Conclusiones.....	85
	Apéndice A.....	87
	Apéndice B.....	93
	Apéndice C.....	97
	Apéndice D.....	99
9.	Bibliografía.....	103

Lista de Figuras

Figura 1. Tamaño del mercado de impresión en 3D, según tecnología, en EE. UU. 2014-2025 (en millones de dólares) [3].	14
Figura 2. Gráficos del efecto principal de SNR para [28]: (a) Resistencia a la tracción; (b) Dureza Shore D; (c) Rugosidad superficial	26
Figura 3. Fruto del árbol olla de mono [43]	32
Figura 4. Caracterización morfológica de la parte interna, externa y la sección transversal del fruto de árbol ‘Olla de mono’ (<i>Lecythis minor</i>) [43]: (a) Imágenes obtenidas a través del estereoscopio; (b) Fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido (SEM); (c) Vectores de la curva en el interior del fruto y descripción gráfica de la curva catenaria.	33
Figura 5. Diseño estructural del panel jerárquico inspirado en la cáscara del pomelo [44]: (a) Imagen SEM de la microestructura detallada junto con configuraciones y parámetros geométricos; (b) Modelos 3D de los paneles tradicionales y paneles inspirados en cáscaras de pomelo; (c) Prueba de compresión y modo de deformación representativo de ambas estructuras evaluadas.	34
Figura 6. Características estructurales de SLKF y R-SLKF [45]: (a) Pangolín y sus escamas; (b) Imagen óptica del tejido SLKF y; (c) Vista ampliada; (d) Imagen óptica del tejido R-SLKF (Surlyn) y; (e) Vista ampliada; (f) Imagen óptica de sección transversal entre cuatro escalas y; (g) entre dos escalas del R-SLKF (Surlyn).	35
Figura 7. Diseño morfológico del escarabajo [46]: (a) Estructura trabecular; (b) Microestructura del núcleo fabricado mediante impresión 3D.	36
Figura 8. Caracterización morfológica de la superficie del escorpión (<i>Androctonus australis</i>) [47]: Imagen realizada con estereoscopio (a) Superficie del lomo del escorpión; (b) y (c) Vista ampliada de la forma de protuberancia y ranura; Muestras impresas bioinspiradas (d) con ranura, protuberancia y curvatura (CGB); (e) con ranura y curvatura pero sin protuberancia (CG); (f) con protuberancia y curvatura pero sin ranura (CB); (g) con ranura y protuberancia pero sin curvatura (FGB); (h) con ranura pero sin protuberancia ni curvatura (FG); (i) con protuberancia pero sin ranura ni curvatura (FB).	37
Figura 9. Diseño morfológico e impresión 3D de las estructuras evaluadas [48]: (a) Centríolo; (b) Concha de Nautilo; (c) Estructura reticular ‘Cartwheel’ (Centríolo+Nautilo)	38
Figura 10. Patrones de relleno disponibles en el software UltiMaker Cura 5.4.0.: (a) Rejilla; (b) Líneas; (c) Triángulos; (d) Trihexagonal; (e) Cúbico; (f) Subdivisión cúbica; (g) Octeto; (h) Cúbico bitruncado; (i) Concéntrico; (j) Zigzag; (k) Cruz; (l) Cruz 3D y (m) Giroides.	42
Figura 11. Dimensiones del espécimen estándar para ensayo de compresión: (a) Vista frontal; (b) Sección transversal del espécimen; (b) Vista isométrica.	45
Figura 12. Dimensiones de la probeta para ensayo de impacto: (a) Espesor del espécimen; (b) Vista frontal; (b) Vista isométrica.	45
Figura 13. Esquema del diseño de experimentos 2x3.	47
Figura 14. Método de impresión de las probetas de ensayo: (a) Impacto; (b) Compresión.	48
Figura 15. Prueba de compresión axial: (a) Máquina de ensayo Instron 3366; (b) Máquina de ensayo Tinius Olsen H50KS; (c,d) Muestras ensayadas con 25%, 50% y 75% de relleno y bioinspiradas en la estructura 1 y 2 seleccionadas previamente por el método AHP respectivamente.	49

Figura 16. Ensayo de impacto Izod: (a) Máquina de prueba de péndulo Tinius Olsen - Model Impact 304; (b,c) Muestras ensayadas después de la prueba de impacto con las diferentes combinaciones de porcentaje y patrón de relleno.	50
Figura 17. Imágenes SEM/MicroCT-rayos X de las cuatro alternativas naturales (Compresión): (a) Placa tamiz de la Esponja de <i>E. aspergillum</i> cubierta con tejido [55]; (b) Estructura esquelética de la esponja <i>E. aspergillum</i> obtenida a partir de una microtomografía computarizada de rayos X (MicroCT- rayos X) [55]; (c) Micrografía SEM de las células esclereidas elíptica del mesocarpio de la nuez de Brasil [60]; (d) Imagen SEM de las células esclereidas de la nuez de Brasil después de ensayo de compresión [56]; (e) Imagen SEM de las alas anteriores del escarabajo (<i>Beetle Elytra</i>) [61]; (f) Trabécula de la arquitectura interna de las alas anteriores del escarabajo (honeycomb) [61]; (g) Imagen SEM Madera de alerce (<i>Larch Wood</i>) [62]; (h) Micrografía SEM de la sección transversal de muestra de madera balsa (<i>Ochroma pyramidale</i>) de densidad media [63].....	53
Figura 18. Estimación de área equivalente de vacíos para la esponja <i>E. aspergillum</i> (Alternativa 1) [55]	54
Figura 19. Imágenes SEM/NIC de las cuatro alternativas naturales (Impacto): (a) Imagen SEM de la fibra de coco a 3200x [71]; (b) Microscopía NIC de la sección transversal del cuerno del borrego cimarrón (<i>Ovis canadensis</i>) [72]; (c) Imagen SEM de la morfología de los haces vasculares de la sección media del bambú [73]; (d) Microscopía NIC de sección transversal de hueso compacto (cortical) de la asta de alce [70].....	56
Figura 20. Imágenes FE-SEM de los biomateriales seleccionados. Muestra de madera de pino silvestre (<i>Pinus Sylvestris Wood</i>): (a) Resolución de 100 μm - Aumento de 732x; (c) Resolución de 2 μm - Aumento de 18.8kx. Muestra de bambú: (b) Resolución de 1000 μm - Aumento de 60x; (d) Resolución de 500 μm - Aumento de 151x.	59
Figura 21. Imágenes de microscopía óptica de la muestra de bambú: (a) Distribución de los haces vasculares en la corteza interior del culmo del bambú – Aumento de 2x; (b) Caracterización geométrica de la morfología natural de los haces vasculares – Aumento de 4x.....	60
Figura 22. Caracterización microestructural de la muestra de madera de pino silvestre (<i>Pinus Sylvestris</i>): (a) Microscopía óptica de la sección transversal – Aumento de 4x; (b) Diseño geométrico superficial del patrón natural – Aumento de 3x; (c) Dimensiones principales del hexágono que compone la microestructura de la muestra biológica.....	61
Figura 23. Obtención de las medidas principales del hexágono presente en el patrón natural de la muestra de madera: (a) Análisis dimensional de la microscopía óptica con el Software ImageJ; (b) Definición de la longitud promedio del segmento vertical (Lado z) y el segmento diagonal (Lado x); (c) Dimensiones del hexágono analizado.	62
Figura 24. Caracterización y dimensión geométrica del hexágono: (a) Diseño estructural con medidas principales y ángulos internos; (b) Definición dimensional del espesor superficial de la figura teniendo en cuenta el diámetro de la boquilla de la impresora 3D.	63
Figura 25. Análisis dimensional de la figura geométrica (hexágono) para cada porcentaje de relleno: (a) Medidas de las aristas con un espesor fijo de 0.2 mm; (b) Vista isométrica del modelo hexagonal con 25%, 50% y 75% de relleno respectivamente; (c) Relación entre área superficial total y área superficial con agujero central en la definición y validación del porcentaje de relleno.	63
Figura 26. Vista de la sección transversal de la probeta para ensayo de compresión con patrón bioinspirado en la madera y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.	64

Figura 27. Vista de corte de la probeta para ensayo de impacto Izod por plano longitudinal con patrón bioinspirado en la madera y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.	65
Figura 28. Caracterización y dimensión geométrica del rombo: (a) Diseño estructural con medidas principales y ángulos internos; (b) Definición dimensional del espesor de la figura.....	66
Figura 29. Análisis dimensional de la figura geométrica (rombo) para cada porcentaje de relleno: (a) Medidas de las aristas con un espesor superficial fijo de 0.2 mm; (b) Vista isométrica del rombo con 25%, 50% y 75% de relleno respectivamente; (c) Relación entre área superficial total y área superficial con agujero central en la definición y validación del porcentaje de relleno.....	67
Figura 30. Vista de la sección transversal de la probeta para ensayo de compresión con patrón bioinspirado en el bambú y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.....	67
Figura 31. Vista de corte de la probeta para ensayo de impacto Izod por plano longitudinal con patrón bioinspirado en el bambú y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.	68
Figura 32. Probetas impresas con filamento PLA para ensayos mecánicos: (a) Impacto; (b) Compresión.....	68
Figura 33. Densidad aparente promedio de las seis muestras de compresión por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno.	70
Figura 34. Densidad aparente promedio de las seis muestras de impacto por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno.	70
Figura 35. Curvas representativas de esfuerzo – deformación: (a) Muestras 25B, 50B y 75B; (b) Muestras 25M, 50M y 75M.....	71
Figura 36. Propiedades a compresión: (a) Resistencia a la compresión; (b) Módulo de elasticidad.	73
Figura 37. Propiedades específicas a compresión: (a) Resistencia a la compresión/densidad aparente; (b) Módulo de elasticidad/densidad aparente.....	75
Figura 38. Propiedades a Impacto en función del porcentaje y patrón de relleno: (a) Energía absorbida por cargas de impacto; (b) Energía absorbida/densidad volumétrica.....	78
Figura 39. Análisis estructural de las probetas 50B y 75B respectivamente: (a,c) Zona de fractura observada con microscopía óptica; (b,d) Corte transversal de la zona de fractura de las muestras.	80
Figura 40. Análisis de deformación del biopatrón referente al bambú en la prueba de Impacto Izod: (a) Fuerza aplicada (F_p) por el péndulo en la (b) muestra de 50% de relleno (50B) y su (c) reacción frente a la fuerza y la (d) muestra de 75% de relleno (75B) y su (e) respuesta ante la fuerza aplicada (F_p).....	81
Figura 41. Análisis de deformación del biopatrón referente a la madera en la prueba de Impacto Izod: (a) Carga aplicada F_p por el péndulo en la (a) probeta de 50% de relleno (50M) y su (c) reacción frente a la fuerza (F_p).....	82

Lista de Tablas

Tabla 1. Procesos de manufactura tradicionales [6].....	16
Tabla 2. Causas de la acumulación de desechos plásticos en la manufactura aditiva [8]	18
Tabla 3. Parámetros de impresión 3D descritos en la sección 4.1.....	23
Tabla 4. Criterios de selección y escala de ponderación del método AHP	41
Tabla 5. Escala fundamental de Saaty para comparación por pares [50, 51].....	43
Tabla 6. Parámetros de fabricación para la impresión 3D.....	45
Tabla 7. Alternativas para aplicación del modelo AHP (Compresión).....	52
Tabla 8. Matriz de decisión (Compresión).....	54
Tabla 9. Alternativas para aplicación del modelo AHP (Impacto).....	55
Tabla 10. Matriz de decisión (Impacto).....	57
Tabla 11. Agrupación de la resistencia a la compresión promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza.....	73
Tabla 12. Agrupación del módulo elástico promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza.....	74
Tabla 13. Agrupación de la resistencia a la compresión/densidad aparente promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza.....	76
Tabla 14. Agrupación del módulo elástico/densidad aparente promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza.....	76
Tabla 15. Agrupación de la energía absorbida promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza.....	78
Tabla 16. Agrupación de la relación promedio entre energía absorbida y la densidad aparente utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza	79
Tabla A1. Comparaciones pareadas de los criterios de selección.....	87
Tabla A2. Matriz de comparación por pares de los criterios de selección.....	87
Tabla A3. Evaluación de criterios por cada alternativa (Compresión).....	88
Tabla A4. Comparaciones pareadas entre criterios de selección y alternativas (Compresión)..	88
Tabla A5. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 1 (Compresión).....	89
Tabla A6. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 2 (Compresión).....	89
Tabla A7. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 3 (Compresión).....	89
Tabla A8. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 4 (Compresión).....	90
Tabla A9. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 5 (Compresión).....	90
Tabla A10. Evaluación de criterios por cada alternativa (Impacto).....	91
Tabla A11. Comparaciones pareadas entre criterios de selección y alternativas (Impacto).....	91
Tabla A12. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 1 (Impacto).....	92
Tabla A13. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 2 (Impacto).....	92

Tabla A14. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 3 (Impacto)	92
Tabla A15. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 4 (Impacto)	93
Tabla A16. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 5 (Impacto)	93
Tabla B1. Masa de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.	93
Tabla B2. Masa de las muestras del ensayo de impacto en función del porcentaje y patrón de relleno.	94
Tabla B3. Densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.	94
Tabla B4. Densidad aparente de las muestras del ensayo de impacto en función del porcentaje y patrón de relleno.	95
Tabla B5. Densidad aparente promedio de las muestras del ensayo de compresión en función de porcentaje y patrón de relleno.	96
Tabla B6. Densidad aparente promedio de las muestras del ensayo de impacto en función de porcentaje y patrón de relleno.	96
Tabla C1. Resistencia a la compresión y módulo elástico de las muestras 25M, 50M, 75M – 25B, 50B, 75B.	97
Tabla C2. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad promedio de cada muestra en función del porcentaje y patrón de relleno.	97
Tabla C3. Energía absorbida bajo cargas de impacto de las muestras 25M, 50M, 75M – 25B, 50B, 75B	98
Tabla C4. Energía absorbida promedio de cada muestra ensayada en función de porcentaje y porcentaje de relleno.	98
Tabla D1. Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.	99
Tabla D2. Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad aparente promedio de cada muestra ensayada en función de porcentaje y porcentaje de relleno	100
Tabla D3. Relación entre el módulo de elasticidad y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.	101
Tabla D4. Relación promedio entre el módulo de elasticidad y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.	101
Tabla D5. Relación entre la cantidad de energía absorbida bajo condiciones de impacto y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno	102
Tabla D6. Relación promedio entre la cantidad de energía absorbida bajo condiciones de impacto y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno.	102

Resumen

La impresión 3D es una tecnología emergente de la Industria 4.0, capaz de producir una amplia variedad de productos con geometría compleja de forma eficiente e innovadora a diferencia de otros métodos de fabricación convencionales. A medida que, el crecimiento poblacional sigue aumentando, la necesidad de fabricar productos de bajo peso, buen rendimiento mecánico y excelente calidad superficial, cobra más importancia en el sector industrial, de tal forma que, se logre elaborar piezas con un bajo consumo de material reduciendo el costo de producción y el tiempo de procesamiento, con el propósito de disminuir significativamente el nivel de desechos plásticos derivados de errores de impresión, errores de diseño, material de soporte, fallas de la impresora, entre otros, en diferentes organizaciones educativas y empresariales.

Por lo anterior, este trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de dos parámetros de impresión, el porcentaje y patrón de relleno previamente seleccionados a partir de una revisión bibliográfica y un análisis biomimético, en la resistencia a la compresión e impacto con relación a la densidad de la pieza a imprimir, a partir de un análisis de varianza factorial (ANOVA); con el ánimo de optimizar el consumo de material en el proceso de impresión 3D sin afectar el desempeño de estructural del producto.

Palabras claves: Consumo de material, Porcentaje de relleno, Compresión, Impacto, Patrón de relleno, Parámetros de impresión, Estructuras bioinspiradas.

Abstract

3D printing is an emerging Industry 4.0 technology, capable of producing a wide variety of products with complex geometry in an efficient and innovative way unlike other conventional manufacturing methods. As population growth continues to increase, the need to manufacture products with low weight, good mechanical performance and excellent surface quality, becomes more important in the industrial sector, so that, it is possible to produce parts with low material consumption reducing production cost and processing time, with the purpose of significantly decreasing the level of plastic waste derived from printing errors, design errors, support material, printer failures, among others, in different educational and business organizations.

Therefore, this work aims to evaluate the influence of two printing parameters, the percentage and pattern of filler previously selected from a literature review and a biomimetic analysis, on the compressive strength and impact in relation to the density of the part to be printed, from a factorial analysis of variance (ANOVA); with the aim of optimizing the material consumption in the 3D printing process without affecting the structural performance of the product.

Keywords: Material consumption, Infill percentage, Tension, Compression, Impact, Infill pattern, Printing parameters, Bio-inspired structures.

1. Introducción

Según el informe *World Population Prospects 2022* publicado por el Departamento de Asuntos Económicos y Sociales de las Naciones Unidas, se reportó un ascenso poblacional a nivel mundial de 8.000 millones de personas en el cuarto trimestre del año 2022 [1]. Este panorama incrementa la necesidad de impulsar el crecimiento económico y la innovación tecnológica para confrontar los diversos retos para la sociedad del siglo XXI, tanto a nivel de la relación con la protección ambiental, como la sostenibilidad de la cadena de suministro en torno a las demandas de los consumidores [2].

De acuerdo con lo anterior, el sector industrial empezó a adoptar nuevas tecnologías que permiten establecer un plan estratégico de mejoramiento social, económico, financiero y ambiental, en pro del desarrollo sustentable de la humanidad, con el ánimo de fortalecer las condiciones de vida de la población mundial, en función del crecimiento de la producción en masa, como respuesta a la necesidad continua de nuevos productos y servicios rentables de alta calidad. En este sentido, la impresión 3D se presenta como una solución sostenible para el futuro de las cadenas de producción, además, esta tecnología se caracteriza por su versatilidad en el uso de distintos materiales en múltiples aplicaciones y la personalización de los productos [2].

La aplicación de la impresión 3D ha presentado un crecimiento significativo, lo que trae con ello grandes ventajas en su adaptación, aplicación y desarrollo en diversos sectores con respecto a otras técnicas de manufactura, pues los productos que son usados por la sociedad ocasionan nuevas necesidades que implican el rediseño y evaluación de estos, para que cumplan con funciones específicas [3]. Por esta razón, esta tecnología es una herramienta fundamental en la generación de nuevos procesos industriales, con el fin de comprender la conceptualización y la creación de objetos con una geometría compleja, minimizando considerablemente el tiempo de fabricación y los costos de cada proceso y postproceso que se requieren para obtener la pieza final [3].

Actualmente, la impresión 3D ha causado gran impacto en la industria por su utilidad en todas las áreas de conocimiento, para el desarrollo de partes, piezas y prototipos, teniendo en este último un mayor efecto por la reducción de materia prima desechada por errores y/o ajustes de diseño, impactado también el tiempo total del proceso de diseño. Por lo anterior, esta técnica de prototipado ha ganado espacio en el ámbito del entretenimiento, estudio, trabajo e investigación. El informe *Global Trends 2030* elaborado por el National Intelligence Council de Estados Unidos (NIC), tomó las tecnologías de impresión 3D entre las más grandes tecnologías innovadoras que ha generado cambios en el mundo [3] como se muestra en la **Figura 1**, donde se puede observar las ganancias predictivas de las técnicas de impresión 3D más usadas en el mercado (Estereolitografía, Modelado por deposición fundida (FDM) Sinterización por láser selectiva).

La manufactura aditiva (AM) agrupa varias tecnologías y procesos industriales vinculados al diseño y modelado computacional para la creación de una pieza digital que posteriormente se transformará en un objeto 3D mediante la adición sucesiva de capas de material hasta completar el modelo tridimensional [4].

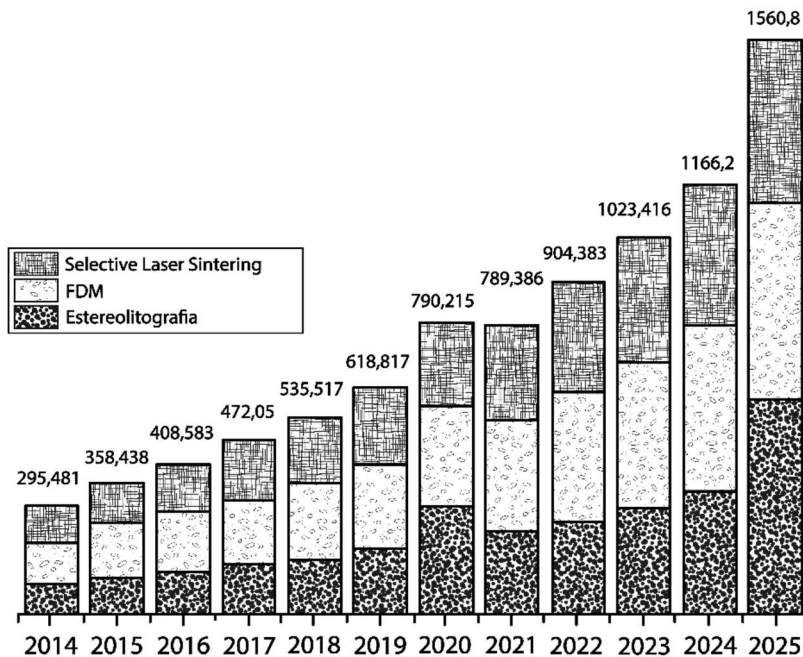


Figura 1. Tamaño del mercado de impresión en 3D, según tecnología, en EE. UU. 2014–2025 (en millones de dólares) [3].

La impresión 3D se utiliza constantemente en la producción de piezas con geometrías complejas que no es posible alcanzar con métodos de fabricación tradicionales siendo así, una excelente alternativa para fabricar una amplia variedad de productos rentables. Una de las tecnologías de la AM, es el modelado por deposición fundida (FDM) la cual consiste en calentar un filamento que posteriormente es presionado hacia abajo por una boquilla sobre una base plana, capa a capa, para fabricar la pieza deseada. Esta técnica de impresión es ampliamente adoptada debido a su bajo costo en cuanto a materiales, mantenimiento, fácil operación y facilidad de uso [5].

No obstante, uno de los desafíos de la AM es reducir el alto nivel de desperdicio de material plástico en entornos educativos y profesionales y obtener productos que funcionen correctamente con deformación reducida y sin fallar, bajo condiciones de esfuerzos mecánicos. Por este motivo, es de vital importancia evaluar y optimizar los efectos de los parámetros de impresión y la selección adecuada de estos, de tal forma que influya positivamente en el tiempo de procesamiento, la calidad y el rendimiento mecánico de la pieza impresa otorgándole propiedades mecánicas mejoradas y/o una reducción de masa [5].

En este orden de ideas, en este trabajo se estudió la influencia de los parámetros de la impresión 3D por FDM, específicamente el porcentaje y patrón de relleno, esta última basada en referentes naturales (biomimética), en las propiedades mecánicas y la densidad; con el propósito de optimizar el consumo de material de impresión, sin sacrificar su desempeño estructural. También se buscó identificar la idoneidad del uso de las diferentes estructuras evaluadas, en función del modo de trabajo (compresión e impacto) a los que fue sometido la pieza a imprimir.

Desde este punto de vista se realizó un estudio detallado de materiales bioinspirados (referentes naturales), para que por medio de la manufactura aditiva por FDM sea posible encontrar, replicar y producir una estructura ideal que en torno a su naturaleza sea efectiva para poder resistir los 2 modos de trabajo anteriormente mencionados. El análisis de estas propiedades es esencial para poder fabricar un producto que cumpla con los requerimientos de trabajo, como el buen desempeño a compresión e impacto.

2. Planteamiento del problema

En la esfera de la competitividad y progreso empresarial hacia una nueva construcción de procesos industriales eficientes y de bajo costo de producción, la impresión 3D es una metodología de trabajo innovadora que permite crear múltiples objetos tridimensionales de alta complejidad geométrica a partir de la superposición sucesiva de capas de diversos materiales (polímeros, metales, biomateriales, entre otros).

Para el ciclo de transformación convencional de los materiales, se implementa diferentes procesos de manufactura tradicionales como se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Procesos de manufactura tradicionales [6]

Procesos de Manufactura tradicionales	Descripción general	Técnicas
Procesos de fundición de metales	Operación en la que se vierte un metal derretido hacia un molde cuya cavidad tiene la forma de la pieza deseada.	<ul style="list-style-type: none"> - Fundición en moldes desechables - Fundición en moldes no desechables
Procesos de conformado para plástico	Permiten la fabricación de piezas de plásticos a partir de la compresión o expansión del material fundido con ayuda de maquinaria industrial (extrusoras, máquinas rotomoldadoras, termoformadoras, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> - Extrusión - Moldeo por inyección - Moldeo por compresión y transferencia - Moldeo por soplado y moldeo rotacional - Termoformado
Procesos de deformación volumétrica de metales	Se encargan de la producción de componentes metálicos por medio de la aplicación de esfuerzos suficientes para que el material adopte la forma deseada a partir del uso de prensas, troqueles, molinos de laminado, etc.	<ul style="list-style-type: none"> - Laminado - Forjado - Formado por estirado - Embutido
Procesos de operaciones de corte y doblado	Consiste en comprimir una lámina con ayuda de un punzón para cortar, perforar o doblar el material.	<ul style="list-style-type: none"> - Cizallado, punzado y perforado - Doblado en V y doblado de bordes
Operaciones de maquinado	Se basa en remover material mediante herramientas de corte hasta obtener la pieza deseada.	<ul style="list-style-type: none"> - Torneado - Taladrado - Fresado
Procesos de soldadura	Operación que consiste en la unión de dos o más piezas de un material mediante el uso de calor y/o compresión para la elaboración de un producto final.	<ul style="list-style-type: none"> - Soldadura con arco - Soldadura por resistencia - Soldadura con oxígeno y gas combustible

Estos procesos presentan limitaciones predominantes como:

- Productos escasamente personalizables
- Necesidades emergentes en la operación de ensamble y mecanizado
- Incremento de esfuerzos en logística y transporte
- Riesgo en la seguridad e integridad física de los operarios
- Aumento del tiempo de entrega del producto final
- Acumulación de desechos postindustriales

Por esta razón, la impresión 3D es una oportunidad tecnológica de transformación estratégica, en los métodos de fabricación a escala industrial de manera sostenible, de tal forma que, ofrece soluciones creativas que satisfagan la demanda de los clientes proporcionando una ventaja competitiva [7]. Ahora, si bien la manufactura aditiva trae numerosos beneficios, persisten ciertas restricciones asociadas al consumo elevado de material en función de la complejidad del objeto deseado, tiempo excesivo de producción e incremento en los costos de fabricación del producto impreso.

En condiciones ideales, el modelado por deposición fundida (FDM) es una tecnología destacable y eficiente para la manufactura aditiva a diferencia de otros tipos de fabricación, sin embargo, en la práctica académica y/o profesional, la impresión 3D genera grandes cantidades de residuos sólidos derivados de impresiones fallidas, material de soporte, filamentos sobrantes y otros desechos plásticos. El volumen de desperdicio de material en FDM está relacionado al déficit en el ajustamiento óptimo de los parámetros de impresión como el diámetro de la boquilla, altura de capa, temperatura de extrusión, orientación, porcentaje de relleno, entre otros, sin desestimar que los defectos de impresión también se deben a diversas variables de operación relacionadas al tiempo de precalentamiento insuficiente, geometría inadecuada de la pieza, falta de experiencia en el funcionamiento de la impresora 3D, errores de manejo por parte del operario o fallas técnicas de la impresora [8].

Estos residuos plásticos producidos en la fabricación aditiva se han convertido en una gran preocupación en la integridad sostenible del medio ambiente. Entre el 5 y el 10 por ciento de todos los productos de impresión son desechos que acaban en los contenedores de basura según el experto alemán en ciencias ambientales, Christian Lölkes [9]. En la Universidad de California, Berkeley, EE.UU, han adoptado la tecnología de fabricación aditiva con más de 100 impresoras 3D en el campus; las cuales generan alrededor de 600 libras de basura al año y gran parte de ese desperdicio resulta de prototipos descartados o impresiones fallidas generadas por fabricantes novatos. Aunque, los estudiantes de la universidad de California han realizado piezas y/o objetos personalizados con geometrías complejas bajo especificaciones y requerimientos de operación establecidos, los residuos plásticos se acumulan rápidamente en los depósitos de basura, representando un riesgo ambiental significativo [10].

En un estudio de investigación realizado en un taller abierto de Atlanta, Georgia, EE. UU, donde se recolectó durante 12 semanas, residuos plásticos de impresiones fallidas de proyectos personales y prototipos de cursos de diseño y manufactura, derivados de 12 impresoras Afinia H480 y 20 mini impresoras PP3DP-UP, se logró identificar las principales causas de la acumulación de desechos plásticos en la fabricación aditiva [8] como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Causas de la acumulación de desechos plásticos en la manufactura aditiva [8]

Causa	Descripción
Filamento no utilizado	Si no hay suficiente material para la siguiente impresión, el filamento restante es desechado para garantizar el funcionamiento continuo de la impresión 3D.
Calentamiento de la plataforma	Si la plataforma no se precalienta o la temperatura no es lo suficientemente alta, afecta la adherencia de la primera capa del filamento a la cama ocasionando que las bordes de la impresión se doblen hacia arriba.
Forma de la pieza	Las impresiones pueden fallar si la especificación de la impresora no puede soportar la forma de la pieza.
Desplazamiento de capa	El cabezal de extrusión no se mueve suavemente en el eje x o y , o las varillas no están alineadas correctamente.
Eliminación de material de soporte	Después de que la impresora termine un trabajo, las piezas pueden dañarse durante la retirada manual del material de soporte.
Calibración ajustada	La boquilla y la plataforma de impresión están calibradas demasiado cerca la una de la otra. Por lo tanto, la boquilla no puede extruir el material correctamente.
Calibración suelta	La boquilla y la plataforma de impresión están calibradas demasiado lejos el uno del otro, esto ocasiona baja adherencia entre capas.
Salto de capas	Omisión en parte o completamente de algunas capas debido a un error de la impresora generando problemas en la bobina del filamento, la rueda de alimentación o la obstrucción en la boquilla.
Defecto no físico	Errores de diseño o de otro tipo. Se destaca la influencia de la orientación de impresión en la disminución en el costo de producción y el consumo de energía.

Teniendo en cuenta lo anterior, se reportó que alrededor del 34% del plástico utilizado en el taller abierto de Georgia, Atlanta termina en los contenedores de basura y el 19% de este material representan impresiones fallidas. Este panorama trae consecuencias perjudiciales como:

- **Alto consumo energético:** Durante el proceso de fundición de plástico con calor o láser, las impresoras 3D consumen alrededor de 50 a 100 veces más energía eléctrica que el moldeo convencional por inyección empleado para elaborar una pieza impresa del mismo peso, según un estudio de la Universidad de Loughborough. Además, para producir 1 kg de piezas finales es necesario 219 MJ/kg lo cual está directamente asociado al tiempo de impresión [8], [11].

- **Riesgo de salud:** Según un estudio del Instituto de Tecnología de Illinois, EE. UU, durante el calentamiento del plástico para impresión de pequeñas figuras, las máquinas que emplean filamentos de PLA emiten 20 mil millones de partículas por minutos mientras que los filamentos ABS emiten hasta 200 mil millones de partículas por minuto. Estos microplásticos tienden a ingresar en los pulmones o al torrente sanguíneo siendo un riesgo para la salud [11].
- **Acumulación de plástico:** Para el funcionamiento de las impresoras 3D, se usan comúnmente dos tipos de filamentos: el PLA el cual puede llegar a ser dañino para el medio ambiente sino se degrada en condiciones industriales específicas y el ABS que proviene de combustible fósiles [11]. Por lo tanto, todos los residuos plásticos producidos por la manufactura aditiva se almacenan en contenedores de basura en grandes cantidades.
- **Extensos tiempos de ejecución de impresión:** El tiempo de producción es una de las principales limitaciones de las impresiones 3D. En la actualidad, la mayoría de los productos fabricados con impresoras 3D están destinados a la creación de prototipos, más que a la producción a gran escala. Por lo tanto, el gran desperdicio de material, que se genera a baja escala, es derivado de impresiones fallidas que tardan más de una hora o hasta días dependiendo de la geometría de la pieza y la disponibilidad de acceso al área de impresión 3D. Y esto aumenta sustancialmente en la producción en masa a nivel industrial.
- **Incremento en el costo de fabricación:** La cantidad elevada de desechos plásticos durante la producción de piezas impresas conlleva costos elevados en el proceso de fabricación donde se generan grandes volúmenes de material que al finalizar la operación resulta en un nivel de desperdicio significativo almacenado en los vertederos industriales, minimizando su vida útil.

Por otra parte, cabe resaltar que, el filamento más utilizado en las prácticas académicas de impresión 3D es el PLA (ácido poliláctico) por su adaptabilidad para una amplia gama de aplicaciones, bajo costo e ideal para la creación de prototipos simples y elaborados [12]. Esto último, se debe a que este material termoplástico trabaja a una baja temperatura de impresión, presenta una gran capacidad de elástica, por ende, permite fabricar productos personalizables y a las piezas resultantes se les puede realizar operaciones de mecanizado (taladrado, corte, lijado, entre otros) [13].

Ahora bien, el PLA se produce a partir de materias primas naturales y renovables como el almidón de maíz a diferencia del ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) que se deriva de combustibles fósiles. Además, este filamento es visto a menudo como el material más sostenible, por su biodegradabilidad y seguro de operar en comparación con otros tipos de materiales usados en la impresión 3D, esto se debe a que no genera emisión de olores y gases tóxicos y la temperatura de fusión del material es relativamente baja facilitando su manipulación [13]; no obstante, el PLA realmente no es tan ecológico como se afirma sino es tratado térmicamente bajo condiciones especializadas, es decir, para que este filamento sea verdaderamente degradado, se deben cumplir ciertas condiciones necesarias de compostaje industrial en presencia de microorganismos específicos en un entorno de temperatura y humedad controladas, permitiendo así que el PLA pueda biodegradarse en pocos días o meses bajo temperaturas por encima de los 55 a 70°C. De no

ser así, este filamento tarda al menos 80 años en descomponerse al aire libre, esto influye sustancialmente a la contaminación ambiental provocada por residuos plásticos derivados del PLA, por este motivo, este material no puede ser dispuesto de forma indiscriminada en la naturaleza o depositado en compostadores domésticos o desechos orgánicos. Por otro lado, es importante enfatizar que la producción de bioplásticos se da a partir de la transformación industrial de materiales naturales como el maíz. Para hacer 1 kg de PLA, se necesitan 2.65 kg de maíz por lo que afecta la industria de los alimentos. Con 270 millones de toneladas de plástico producidas al año, sustituir el plástico convencional por el PLA representa la eliminación de 715.5 millones de toneladas del suministro global de alimentos en un contexto ambiental en el que el cambio climático y el calentamiento global están reduciendo la productividad agrícola en varios países del mundo provocando el incremento de la tasa de inflación en el sector de alimentos [14]. De seguir con esta tendencia en la generación excesiva de residuos plásticos en la impresión 3D, la sostenibilidad ambiental a nivel mundial se verá gravemente afectada incrementando potencialmente la acumulación de desechos sólidos altamente nocivos. De igual forma, el tiempo de funcionamiento de los sistemas energéticos aumentará exponencialmente lo cual implica el aumento de los costos de los servicios públicos en virtud del consumo de energía por hora obstaculizando la rehabilitación económica del mundo.

Debido a las múltiples consecuencias relacionadas al alto consumo de material en la fabricación aditiva, se hace necesario implementar una estrategia de solución en función de la evaluación de ciertos parámetros de impresión como la orientación, altura entre capas, el diámetro de la boquilla, el porcentaje de relleno, entre otros, ya que alrededor del 55% de los tipos de fallas que se generan en las impresoras 3D están asociadas a errores de diseño [8]. De esta manera será posible optimizar sustancialmente el proceso de manufactura aditiva minimizando la cantidad del material utilizado y los desechos plásticos generados, que podría impactar en el tiempo de fabricación, el costo de producción y el consumo de energía.

Ahora bien, los materiales impresos por deposición fundida (FDM) presentan un comportamiento ortotrópico, es decir que la respuesta mecánica es dependiente de la dirección de aplicación de la carga relativa a la dirección de impresión de la fibra del material termoplástico (PLA). Esto último, está directamente asociado con la orientación de impresión, no obstante, parámetros como el porcentaje y patrón de relleno también influyen significativamente en las propiedades mecánicas, esto se debe a que, al aumentar la densidad de relleno y seleccionar una estructura reticular específica en el interior de la pieza puede contribuir al mejoramiento de la resistencia mecánica del objeto impreso, sin embargo, esto puede requerir un alto consumo de material innecesario [15, 16].

Por lo anterior, este trabajo plantea la siguiente pregunta: ¿Es posible, optimizando los parámetros de impresión (porcentaje y patrón de relleno) en función del modo de trabajo de la pieza, minimizar el uso del material sin afectar el desempeño estructural o mecánico del producto con relación a su densidad?

3. Justificación

El uso e implementación de la manufactura aditiva en diversas organizaciones representa la evolución del sector industrial, en combinación con nuevas tecnologías disruptivas, autónomas, didácticas y novedosas, capaces de transformar e innovar en el campo empresarial y educativo gracias a la fabricación de productos personalizados y adaptables a las necesidades del mercado [17]. Sin embargo, la impresión 3D genera una cantidad considerable de residuos sólidos que altera el desarrollo sostenible del planeta. Según un reciente estudio de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) en el mundo se desperdicia 22% de los desechos plásticos y únicamente se recicla 9% con éxito. A nivel global, se está produciendo el doble de estos desechos que hace dos décadas [18].

De acuerdo con la investigación de la OCDE, se afirma que el consumo de materiales plásticos es cuatro veces mayor actualmente que hace 30 años, impulsado por el crecimiento en los mercados emergentes. La producción mundial alcanza los 460 millones de toneladas y representa 3,4% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero [18]. Con base a esto, se puede evidenciar que el consumo de plástico se ha cuadruplicado en comparación de años anteriores. Por esta razón, es necesario mitigar el alto consumo material en las industrias manufactureras, así como en las instituciones educativas, con el ánimo de minimizar la sobreexplotación de insumos renovables, disminuir el volumen de desechos plásticos en los contenedores de basura liberando alrededor 25% de espacio en los vertederos [19], dinamizar los costos de fabricación de las piezas impresas, reducir el tiempo de elaboración de los objetos diseñados, mejorar la eficiencia energética ahorrando de 20 a 40% de consumo de energía [19] y desacelerar la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) para así contribuir al equilibrio ecológico y maximizar la protección ambiental.

En este sentido, esta investigación permitirá definir la influencia de los parámetros de proceso, relacionados con el consumo del material y el rendimiento estructural de las piezas; lo cual podría impactar en la migración a un proceso de bajo impacto ambiental y económicamente sostenible, reduciendo el consumo de energía, la eliminación gradual de residuos plásticos y los costos de producción con el propósito de aumentar el rendimiento de operación y fabricación de la impresión de 3D en función del mejoramiento de las propiedades mecánicas de una pieza. Este trabajo propone optimizar algunos parámetros como el porcentaje y patrón de relleno en virtud de los requerimientos mecánicos y/o estructurales del objeto impreso, con una perspectiva sostenible, minimizando la cantidad de material empleado y reduciendo los desperdicios. De igual manera, este trabajo contribuye a la formación profesional en Ingeniería fortaleciendo el pensamiento crítico, analítico y creativo en diversas áreas del conocimiento como el diseño mecánico, procesos de manufactura, mecánica de sólidos, propiedades de los materiales, entre otros, con apoyo de herramientas computacionales.

Con base a lo anterior, el desarrollo de este estudio ofrece la oportunidad de evaluar el efecto de los parámetros mencionados anteriormente en la cantidad de material usado, calidad de la impresión, tiempo de impresión, densidad del material y en las propiedades mecánicas finales de las piezas a imprimir. Con el propósito de implementar un relleno que permita maximizar las propiedades mecánicas del material, se llevará a cabo el estudio de estructuras bioinspiradas de acuerdo con el modo de trabajo del objeto (compresión e impacto) a partir del diseño biomimético

el cual ofrece soluciones sostenibles en diversas áreas del conocimiento, imitando patrones y geometrías de la naturaleza.

Por otra parte, es importante estudiar las propiedades mecánicas de la pieza impresa según su modo de trabajo debido a que los materiales poliméricos están sometidos a constantes cargas de esfuerzo por lo que es sustancial evaluar los indicadores de absorción de energía (pruebas de compresión e impacto) en función de la variación de los criterios de impresión para mejorar la resistencia mecánica del producto impreso, reducir el consumo de material y seleccionar los parámetros de porcentaje y patrón de relleno adecuados relacionado al modo de operación y requerimientos mecánicos de la pieza a imprimir. Además, este trabajo ofrece una estrategia de mejoramiento de la resistencia a la compresión e impacto emulando la arquitectura estable de los materiales biológicos lo cual promueve la fabricación sostenible y la incorporación de nuevos patrones naturales.

La presente investigación se enfocó en analizar y optimizar los parámetros relacionados con el consumo de material en la manufactura aditiva por FDM (el porcentaje y patrón de relleno), con el ánimo de garantizar el desempeño mecánico de un producto impreso en 3D minimizando el consumo de filamento, esto mediante los principios del diseño biomimético en torno a estructuras bioinspiradas.

4. Estado del arte

Esta sección se hablará de los trabajos de investigación referentes a:

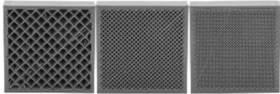
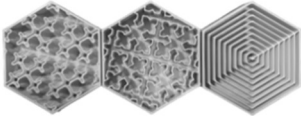
- La influencia de los parámetros de impresión 3D en las propiedades mecánicas (comprensión e impacto).
- La importancia del porcentaje y patrón de relleno en el desempeño estructural de la pieza a imprimir en función de las propiedades mecánicas.
- El papel fundamental de la biomimética en el diseño mecánico.
- Uso de la biomimética en la impresión 3D.

Esto con el ánimo de revisar, reformular ideas, reinterpretar datos, discutir, encontrar aportes significativos sobre la investigación y proporcionar suficiente sustento teórico para exponer juicios de valor sobre el estudio.

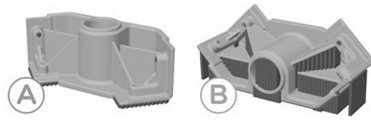
4.1. Efecto de la parametrización en el proceso de impresión 3D por FDM en las propiedades mecánicas

En los últimos años se ha presentado un aumento en el interés por estudiar, analizar y profundizar sobre el efecto del ajuste óptimo de los parámetros del proceso de impresión 3D en las propiedades mecánicas de la pieza a imprimir. Los parámetros más relevantes en la revisión bibliográfica de esta sección se encuentran descritos en la siguiente tabla.

Tabla 3. Parámetros de impresión 3D descritos en la sección 4.1.
[20-27]

Parámetros	Descripción
<p>Porcentaje de relleno</p> <p>12% 30% 50%</p> 	<p>Cantidad de material que ocupa la parte interna de la pieza.</p> <p>Porcentaje de material: 0% (pieza hueca) – 100% (pieza totalmente maciza)</p>
<p>Patrón de relleno</p> 	<p>Sucesión de formas geométricas de manera repetitiva en todo el volumen total del modelo 3D.</p>

Orientación de impresión



Posicionamiento de un objeto dentro del espacio del volumen de impresión.

Ángulo de trama



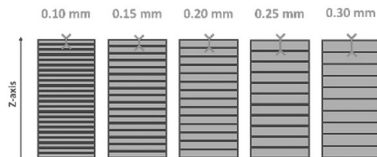
Ángulo de pared a partir del cual el software genera soportes. Para PLA el ángulo máximo recomendado es 45° y para ABS 40°, pero puede variar dependiendo de la pieza.

Altura de capa



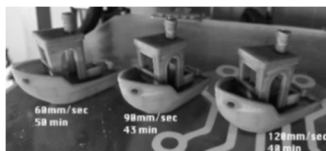
Altura exacta de cada capa de plástico extruida, curada o sinterizada por una impresora 3D. Una parametrización adecuada de esta variable modifica la resolución, el comportamiento mecánico del objeto impreso, la cantidad de material utilizado y la velocidad de impresión.

Grosor de Capa



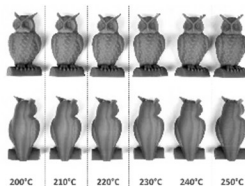
Distancia vertical entre capa consecutivas de material depositado. Está directamente relacionado con la altura de capa, lo cual influye en el acabado superficial y precisión dimensional del objeto impreso. Equilibrar estos parámetros es fundamental para lograr las características de impresión deseadas en función del propósito del producto final y el material del filamento.

Velocidad de impresión



Rapidez con la que se mueve el cabezal de la impresora. Este parámetro influye significativamente en el tiempo de producción y en la calidad de la pieza impresa.

Temperatura de impresión



Temperatura de extrusión en la que fundirá el material de impresión. El rango de temperatura recomendada para el filamento PLA está entre 190-220 °C.

En este sentido, tal es el caso de M. Mani et al. [28], quienes estudiaron la optimización de los parámetros de impresión 3D por FDM para la rugosidad de la superficie (R_a) y las propiedades mecánicas utilizando material PLA para imprimir los especímenes diseñados según la norma ASTM. Los parámetros que se analizaron fueron el espesor de la capa (0,15 mm, 0,25 mm y 0,35 mm), temperatura de la boquilla (210 °C, 215 °C, 220 °C) y densidad de relleno (55%, 60% y 65%) realizando ensayos de rugosidad de las superficies, tracción y dureza en el laboratorio de materiales Command Labs, acreditado por la NBAL.

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos, se observó que la muestra de PLA con 0.15 mm de espesor de capa, una densidad de relleno de 55% y una temperatura de boquilla de 210°C obtuvo una resistencia a la tensión mínima de 27.63 N/mm², lo cual corresponde a una disminución del 38% y en la prueba de dureza Shore D registró un valor mínimo de 54D, es decir una reducción del 17%, con respecto a una muestra con un espesor de capa y densidad de relleno máximo de 0.35 mm y 65% respectivamente y una temperatura de boquilla 5°C superior a la probeta anterior (215°C), obteniendo así, una resistencia a la tracción de 44.572 N/mm² y un valor de dureza Shore D máxima de 65D.

Ahora, usando el análisis de Taguchi, un método estadístico que ayuda a obtener una combinación óptima de diseño de parámetros para que el producto sea funcional y con un alto nivel de calidad, a partir del desarrollo de un modelo matemático de causa y efecto [29] implementando el software MiniTab 19 y la revisión de los gráficos de efectos principales de la SNR (Signal to Noise ratio) de la rugosidad de la superficie, la dureza y la resistencia a la tracción (**Figura 2**), se determinó los parámetros de impresión óptimos a partir de los resultados obtenidos.

- Para la prueba de tracción: grosor de capa de 0,35 mm, densidad de relleno del 65% y temperatura de la boquilla de 220°C.
- Para la prueba de dureza: grosor de capa de 0,25 mm, densidad de relleno del 65% y temperatura de la boquilla de 215°C.
- Para la prueba de rugosidad de superficie: grosor de capa de 0,15 mm, densidad de relleno del 55% y temperatura de la boquilla de 210°C.

Por otro lado, en la **Figura 2a** se puede evidenciar una relación relativamente lineal entre el espesor de capa y resistencia a la tracción al igual que con la densidad de relleno y temperatura de impresión que diferencia del espesor de capa, muestran un ligero aumento en esta propiedad mecánica. Ahora, en la prueba de dureza Shore D se observa el mismo comportamiento entre la densidad de relleno y el valor de dureza. En el espesor de capa y la temperatura de impresión se evidenció una disminución moderada de la resistencia a la perforación donde los valores intermedios de estos dos parámetros mostraron una mejor respuesta mecánica (**Figura 2b**).

Por lo anterior, se concluyó que, el aumento en el espesor de la capa y los valores de temperatura de la boquilla influyen sustancialmente en los valores de dureza y tracción, tanto así que, cuanto menor sea el espesor de la capa y la temperatura de la boquilla, menor será la dureza y los valores de tracción. Por otra parte, la densidad de relleno mínima proporcionó dureza y resistencia a la tracción mínimas. En cambio, la densidad de relleno máxima proporcionó los mejores valores de resistencia a la tracción y dureza (**Figura 2a**). En cambio, los valores mínimos de los parámetros de impresión evaluados (Espesor de capa: 0.15mm;

Temperatura de impresión: 210 °C; Densidad de relleno: 55%) proporcionaron un mejor acabado superficial ($R_a = 9.15 \mu m$) (Figura 2c) con una disminución del 61% en la rugosidad con respecto a una probeta con un espesor de capa y densidad de relleno máxima (0.35 mm y 65% respectivamente) y una temperatura de impresión de 215°C, la cual registró una rugosidad superficial de $23.555 \mu m$.

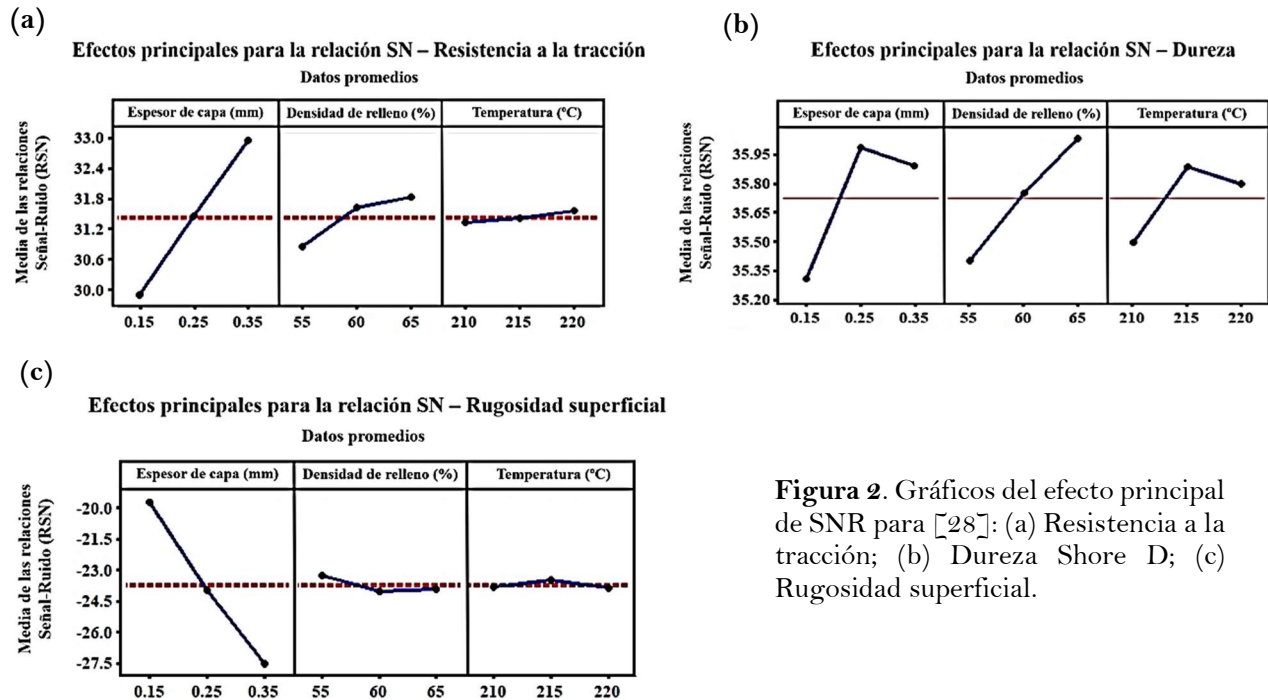


Figura 2. Gráficos del efecto principal de SNR para [28]: (a) Resistencia a la tracción; (b) Dureza Shore D; (c) Rugosidad superficial.

Por otro lado, N. Lokesh *et al.* [30] evaluaron la influencia del grosor de capa, orientación de construcción y ángulo de inclinación en el porcentaje de elongación y resistencia máxima a la tracción en especímenes de PLA procesados y probados según el estándar ASTM-D638 a través del Diseño de Experimento (DOE) utilizando el enfoque de Taguchi por arreglo ortogonal L9 con ayuda de un análisis de varianza (ANOVA) de los datos obtenidos. En el ensayo de tracción resultó que la resistencia última a la tensión (UST) máxima fue de 46,65 MPa para un espesor de capa de 0,1 mm, ángulo de trama de 30° y orientación de construcción de 0°. Además, la verificación y evaluación de las variables con mayor influencia en la salida del proceso a partir de ANOVA se observó que, el espesor de la capa tiene más influencia que la orientación de construcción y el ángulo de trama. Por consiguiente, esta investigación justifica la necesidad de variar las configuraciones mecánicas de las piezas impresas en 3D para proporcionar mejor desempeño estructural del producto y optimizar el tiempo de la fabricación.

De igual manera, Ranjith Gopi Mohan *et al.* [31], estudiaron el efecto del ángulo de trama en la resistencia a la flexión, a la compresión y al impacto de los especímenes impresas por FDM con dos ángulos de trama diferentes, +45°/-45° (entrecruzado) y 0°/90° (rejilla) adoptando un patrón de relleno particular, que son los más comúnmente utilizados como patrón de trama predeterminado. De la experimentación se obtuvo que, en los ensayos de tensión de las muestras impresas con la orientación de trama +45°/-45° presentaron un incremento del 14.31 % en la

resistencia a la flexión, con respecto a las muestras fabricadas a $0/90^\circ$. Por otra parte, para los valores de resistencia a la compresión no se observó gran diferencia entre las muestras impresas a $+45^\circ/-45^\circ$ y $0^\circ/90^\circ$, debido a las similitudes estructurales. Sin embargo, las muestras orientadas a $+45^\circ/-45^\circ$ presentaron valores ligeramente superiores (1.9%). Al analizar los valores de resistencia al impacto, las muestras con orientación $+45^\circ/-45^\circ$ fueron 41,20% superiores a las $0^\circ/90^\circ$ debido al mayor número de ángulos orientados perpendicular a la dirección de la carga de impacto aplicada.

A partir del desarrollo de la investigación, se concluye que, en una evaluación general de los valores de resistencia mecánica de ensayos de flexión, compresión e impacto, las muestras impresas en $+45^\circ/-45^\circ$ presentaron valores más altos de resistencia mecánica que la de las muestras orientadas a lo largo $0^\circ/90^\circ$, de modo que, estos valores de ángulo de trama asociado a un patrón de relleno entrecruzado tienen un efecto significativo en el comportamiento mecánico de las piezas impresas.

Ahora bien, es importante estudiar los efectos de la parametrización de la impresión 3D en otro tipo de filamento diferente al PLA como el ABS, así como lo hizo M. Samykano *et al.* [32], quienes analizaron la influencia de ángulo de trama (45° , 55° y 65°), altura de la capa (0,35 mm, 0,4 mm y 0,5 mm), y densidad de relleno (40%, 60% y 80%) para estudiar sus efectos en las propiedades mecánicas a tensión (la resistencia última, el módulo elástico, el límite elástico, la deformación por fractura y la tenacidad) para un espécimen tipo I, según la norma ASTM D638. De los resultados obtenidos, se determinó que, los parámetros óptimos para obtener las máximas propiedades mecánicas fueron espesor de capa de 0,5 mm, ángulo de trama de 55° y porcentaje de relleno del 80 %, registrando una resistencia máxima a la tracción de 31,57 MPa, módulo elástico de 774,50 MPa, límite elástico de 19,95 MPa, deformación por fractura de 0,094 mm/mm y nivel de tenacidad de $2,28 J/m^3$. Al tener en cuenta los resultados obtenidos, se concluye que, los valores óptimos de los parámetros estudiados favorecen la resistencia a la tracción y el módulo de Young con una disminución del alargamiento a la rotura, justificando la necesidad de evaluar y seleccionar correctamente los parámetros de impresión para lograr propiedades mecánicas óptimas.

Por otra parte, con ayuda de la simulación de dinámica modular (MDs) utilizada para predecir las propiedades mecánicas y físicas de los materiales, A. Farazin *et al.* [33], investigaron acerca del efecto de la densidad de relleno, la velocidad de impresión y el grosor de capa, en las propiedades de tracción de especímenes de PLA modelados según la norma ASTM D638, con 20%, 40%, 60% y 80% de densidad de relleno, dos velocidades de 20 mm/s y 40 mm/s, y dos espesores de 0,1 mm y 0,2 mm con un ángulo constante de impresión de $\pm 45^\circ$. A partir de los resultados obtenidos en la simulación atómica asistida por computadora de las muestras bajo el ensayo de tracción, se determinó que con el incremento de la densidad de relleno, las propiedades mecánicas de las piezas mejoran significativamente, no obstante, si el porcentaje de relleno es muy elevado, puede ocasionar que las piezas impresas adopten un comportamiento frágil, siendo así, el de 40% de relleno, la densidad más adecuada, en términos de costo, ahorro de material y tiempo. Aunque la resistencia a la tensión disminuyó un 50% con relación a un valor de relleno máximo del 80% (Resistencia a la tracción: 44.067 ± 2.09 MPa), exhibió una mayor deformación plástica lo cual está relacionado con el grado de ductilidad y maleabilidad del material. También, se observó que la velocidad de impresión tiene menos efecto en las propiedades mecánicas de las piezas de PLA. La diferencia porcentual de la resistencia a la tensión a una velocidad de 20 mm/s tan sólo fue del 8% con respecto a una velocidad máxima de 40 mm/s que proporcionó una

resistencia a la tracción de 20.085 ± 0.48 MPa. Además, se evidenció que al reducir el espesor de capa a 0.1 mm aumenta ligeramente un 15% la rigidez estructural de las piezas con relación al módulo de elasticidad más bajo ($E = 1.741 \pm 0.05$), esto hace que la ductilidad se vea afectada considerablemente, no obstante, también incrementa la precisión dimensional y la calidad superficial. Por lo anterior, se concluye que, al aumentar la densidad de relleno, genera que las propiedades mecánicas de las piezas mejoren significativamente. Sin embargo, a altas densidades de relleno, las muestras se comportan más frágiles, esto crea una decisión importante por parte del operario acerca del grado de importancia de la tasa de ductilidad de la pieza hacia la obtención de una pieza atractiva en su geometría y apariencia, teniendo en cuenta que, la selección óptima de los parámetros de impresión es fundamental en el desempeño mecánico del producto impreso.

Desde otro punto de vista, L. Marsavina *et al.* [34], analizaron e investigaron la importancia de la dirección de crecimiento (horizontal y vertical), la orientación de la construcción (0° , 45° y 90°), el tipo de impresora comercial (Prusa i3 MK3 y WN400 3D Platform), el grosor de la capa (0,15 y 0,40 mm), el grosor de la muestra (4 y 10 mm) y el color del filamento (púrpura, blanco, negro, gris, rojo, naranja) en pruebas de tracción para especímenes DB (Dog-Bone) y ensayos de tenacidad a la fractura en diferentes condiciones de carga (modo I y modo II) para especímenes SENB (Single Edge Notched Bend) obtenidos por tecnología FDM. Cabe resaltar que, estos últimos especímenes se caracterizan por presentar una muesca la cual fue insertada mediante manufactura aditiva y corte mecánico en un proceso de fresado, con el ánimo de analizar la trayectoria de la fisura en las piezas impresas una vez finalizado los ensayos mecánicos.

Con base a los resultados se identificó que, en dirección de crecimiento vertical para las tres orientaciones, se registraron altos valores de módulo de Young; en comparación con los valores relacionados con la dirección horizontal. Además, se encontró un aumento de alrededor del 3,6 % para una orientación de 45° y aproximadamente un 6 % más alto para la orientación de 0° . A partir del análisis del funcionamiento de las impresoras en consideración y el espesor de la muestra, se observó que, en la impresora Prusa se registraron mayores valores de tracción (+10,4 % para probetas de 4 mm de espesor y +5,2 % para probetas de 10 mm de espesor). Por otro lado, el módulo de Young máximo de 3379,8 MPa se obtuvo para los especímenes rojos, a diferencia que, el mínimo, igual a 2855,0 MPa, se obtuvo para los especímenes naranjas. Además, las muestras moradas y rojas presentaron los valores más altos de resistencia a la tracción, que resultaron superiores a 50 MPa mientras que el valor mínimo de 39,01 MPa se observó para las muestras blancas. Por último, en la prueba de tenacidad a la fractura resultó que, para ambos de fractura establecidos (modo I y modo II), los valores de resistencia a la deformación permanente hasta el punto de fractura son más altos para la orientación de 0° seguida por la de 90° . De modo que, los valores inferiores de tenacidad a la fractura corresponden a una orientación de 45° .

A partir de lo anterior, los autores concluyeron que: *I)* Los valores del módulo de Young aumentaron con el espesor de la muestra y no se encuentran significativamente influenciados por la orientación de construcción; *II)* El ángulo de trama (asociado a la orientación de la construcción) influye sustancialmente en la deformación plástica alrededor de la punta de la grieta; *III)* Para tener mayor precisión y análisis de la relación de las propiedades mecánicas con el color del filamento PLA, es necesario considerar la composición del agente del colorante; *IV)* Una capa más delgada implica una reducción de la tenacidad a la fractura; *V)* Mayor grosor de la muestra, mayor resistencia a la tensión, sin embargo, esto conduce a mayor consumo de material.

M. Doshi *et al.* [35], hacen hincapié en la revisión exhaustiva de la influencia de los parámetros de impresión más relevantes para el estudio (grosor de la capa, densidad, el patrón del relleno, ángulo de trama y la velocidad de impresión) en la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y el módulo de Young para los materiales más utilizados en la impresión 3D (ABS, PLA, Nylon, Poliéter-éter-cetona (PEEK) y Polímero Policarbonato (PC)). De esta investigación se observó que, una densidad de relleno del 100% garantiza un valor del módulo de Young alto, por lo tanto, a menor porcentaje de relleno, la resistencia mecánica de los objetos impresos disminuye. Además, los autores determinaron los parámetros óptimos del proceso de impresión; en un rango de 70-110 mm/s, la velocidad de llenado de 90 mm/s proporcionó un módulo de Young superior en términos del rendimiento del material impreso, asegurando una buena calidad superficial entre capas y la temperatura de impresión más adecuada para el filamento PLA para mejorar el rendimiento de tracción fue de 215°C frente otras temperaturas de la boquilla (200°C, 205°C, 230°C) analizadas en el estudio de Abeykoon *et al.* [36], mediante el método de Taguchi.

Ahora bien, P. Sethu Ramalingam *et al.* [37], se enfocaron en estudiar los patrones de capas (triangulares, rectangulares y hexagonales) y la densidad de relleno (30%, 40% y 50%) en especímenes impresos en 3D de fibra de vidrio ónix utilizando FDM para evaluar la resistencia al impacto de los materiales compuestos. De esta experimentación se observó un aumento en la tasa de absorción de energía (obtenida de la prueba de impacto) de las muestras impresas de fibra de vidrio ónix con una densidad de relleno de 50 % y un patrón de capa hexagonal. Los autores concluyen que el estilo de forma hexagonal mostró una mayor cantidad de energía absorbida en comparación con los otros patrones de relleno. Además, los resultados obtenidos evidencian que el aumento de la resistencia al impacto de las piezas impresas se debe al valor de máximo del grosor de relleno.

P. Patil *et al.* [38], se centralizan en optimizar los patrones de relleno (Zigzag, Triangular y Giroide), el porcentaje de relleno (70%, 80% y 90%), la velocidad de impresión (60 mm/h, 80 mm/h y 100 mm/h) y el grosor de la capa (0.2 mm, 0.25 mm y 0.3 mm) para la impresión de componentes poliméricos de ácido poliláctico (PLA), en función de rugosidad de la superficie, tiempo de impresión y longitud del filamento consumidos. Mediante la normalización de los datos brutos obtenidos del trabajo experimental empleando el método Grey relational analysis (GRA), se observó que, los mejores parámetros de impresión fueron un porcentaje del 70%, velocidad de impresión de 100 mm/h y un espesor de capa de 0,2 mm obteniéndose así una rugosidad superficial mínima de 12.560 μm , tiempo de impresión de 88 min y longitud del filamento consumida de 4.22 m. De acuerdo con lo anterior, se concluye que, para mejorar la rugosidad de la superficie, reducir el consumo de material y tiempo de impresión, se exige una adecuada selección de los parámetros de impresión mediante estrategias estadísticas, matemáticas y/o computacionales, de tal forma que, influya significativamente en el costo y rendimiento de operación del proceso FDM.

Por otro lado, P. Wang *et al.* [39], destacan los efectos de la parametrización del proceso de impresión 3D, en las propiedades mecánicas (incluida la resistencia a la tracción, resistencia a la flexión y resistencia al impacto) para filamentos compuestos de PEEK (polieteretercetona) reforzados con fibra de carbono (CF) y fibra de vidrio (GF) de 1.75 mm. En la investigación, se enfoca en estudiar los parámetros de la temperatura de la boquilla (400°C, 410°C, 420°C, 430° y 440°C), la temperatura de la plataforma (240°C, 250°C, 260°C, 270°C y 280°C), velocidad de

impresión (5 mm/s, 10 mm/s, 15 mm/s, 20 mm/s y 25 mm/s) y espesor de la capa (0.1 mm, 0.15 mm, 0.2 mm, 0.25 mm y 0.3 mm). Con base a los resultados, se concluye que: *I)* La resistencia a la tracción y a flexión de CF/PEEK y GF/PEEK crecen con el aumento de la temperatura de la boquilla y la temperatura de la plataforma, con valores óptimos de 440°C y 280°C respectivamente; *II)* La resistencia a la tracción de CF/PEEK es más mayor que el de GF/PEEK, mientras que el rendimiento de flexión de GF/PEEK es mejor, debido a la diferencia del contenido de volumen de fibra, así como la característica mecánica de la fibra entre la fibra de carbono y fibra de vidrio; *III)* La velocidad de impresión y el espesor de capa adecuada para mejorar las propiedades mecánicas son de 55 mm/s y 0.1 mm respectivamente.

De lo mencionado de anteriormente, es importante resaltar que, la temperatura de la plataforma juega un papel fundamental en el nivel de consumo energético, por este motivo, más alta es la temperatura de la plataforma se produce más energía. Por otra parte, el aumento de la velocidad de impresión y el grosor de la capa tiene un efecto negativo en las propiedades mecánicas de las fibras impresas, en cambio, a menor velocidad de impresión puede modificar la estabilidad de impresión y promover la extrusión y adhesión de compuestos PEEK de alta viscosidad. Por lo tanto, los parámetros estudiados son de vital importancia en el estabilidad y seguridad estructural de la pieza impresa en condiciones controladas y óptimas en pro de mejorar las propiedades mecánicas.

Una vez realizada la revisión de los artículos mencionados anteriormente, es posible afirmar que los altos porcentajes de relleno podrían generar un aumento en la rigidez de los materiales, no obstante, incrementa sustancialmente el consumo de material por lo que es necesario realizar un ajuste óptimo de este parámetro para minimizar la cantidad de filamento que se utiliza y ahorrar costos de producción. También, es válido decir que, un aumento de altura de capa puede conducir a propiedades mecánicas reducidas y delaminación de las capas del objeto impreso comprometiendo su durabilidad y desempeño estructural, no obstante, acelera el proceso de impresión 3D. Por el contrario, una altura de capa más pequeña puede resultar en un incremento en la resistencia mecánica, mayor calidad superficial, una buena adhesión de las capas y precisión dimensional, sin embargo, también puede provocar un aumento en el tiempo de impresión y en el consumo de material. Por esta razón, es fundamental lograr un equilibrio en la relación entre el espesor de capa y altura de capa de la tal forma que garantice un buen rendimiento mecánico e integridad estructural en función de una adhesión óptima de capas del producto impreso. Por otro lado, se puede concluir que, los patrones de relleno hexagonales ofrecen propiedades mecánicas mejoradas a la pieza impresa.

4.2. Influencia del porcentaje y patrón de relleno en el desempeño estructural de la pieza a imprimir en función de las propiedades mecánicas

En el campo de la investigación referente a la manufactura aditiva, se ha resaltado la importancia de estudiar a profundidad los efectos del porcentaje y/o patrón de relleno como parámetros de impresión, para la integridad estructural de una pieza impresa con relación a sus propiedades

mecánicas. Por esta razón, L. Feroz Ali *et al.* [40], evaluaron la resistencia máxima a la tracción, límite elástico y porcentaje de elongación de especímenes PA6 (poliamida 6) y PA66 (poliamida 66) fabricados mediante el uso del proceso de FDM con porcentajes variables de relleno de 50%, 75% y 100% en condiciones fijas (temperatura de extrusión de 180 °C, velocidad de extrusión de 30 mm/seg, temperatura de la plataforma de 50°C, espesor de capa de 0,1 mm, temperatura de la boquilla de 230 °C y velocidad de llenado 40 mm/seg). Dado los resultados obtenidos se evidenció que las muestras PA6 con un porcentaje de relleno del 100% proporcionó la mayor resistencia a la tracción equivalente a 71.92 MPa, seguida de los especímenes PA6 con 50 % y 75 % de relleno respectivamente. Además, esta misma muestra con 50% de relleno presentó un aumento del 13.5% del límite elástico inicial del espécimen PA6 que corresponde a 51.78 MPa y, por último, los valores máximos del límite elástico se observaron en las muestras PA6 con 9,78 % de límite elástico y 50% de relleno y ese mismo material con 7.3 % de límite elástico y 75% de relleno.

Por este motivo, se concluye a menor espaciado y ángulo de trama entre cada una de las capas que conforman la pieza impresa aumenta la propiedad de tracción, no obstante, se debe considerar pertinente la identificación exacta y precisa de los requisitos de densidad de relleno para el marco de las líneas de producción a escala masiva y/o de amplia demanda; para de esta forma optimizar los recursos disponibles en la planta industrial.

Ahora bien, J.L. Liu *et al.* [41], se centraron en estudiar el mejoramiento de la fuerza y la resistencia al impacto de placas circulares de 3,7 mm de espesor y 86 mm de diámetro (peso promedio de 23,26 g con 37 capas sucesivas) impresas en 3D con filamentos comerciales PLA en dirección de impresión helicoidal inspirada en la disposición de las fibras del exoesqueleto del camarón mantis. Los resultados de este estudio demostraron que las placas helicoidales impresas en 3D superan a las placas impresas convencionales en un 360% y 128% en términos de fuerza fuera del plano y disipación de energía de impacto respectivamente y pueden soportar un 20% más de carga estática. En este sentido, las orientaciones en espiral en las placas helicoidales impresas en 3D pueden desviar las grietas y prevenir la formación de grietas transversales críticas a diferencia de patrones de relleno convencionales, de tal forma que la resistencia al impacto aumenta a medida que el ángulo entre capas disminuye. Por lo anterior, se concluye que, la disposición helicoidal evita la propagación catastrófica de grietas durante el impacto gracias a los beneficios de una estructura bioinspirada.

De igual manera, M. Naik y D.G. Thakur [42], evaluaron la resistencia al impacto y la relación resistencia/peso de muestras impresas en 3D por FDM a partir de la influencia de la densidad de relleno (20%, 35%, 50%, 65%, 80% y 100%) y la orientación de la impresión (plana y en el borde) con patrón de relleno múltiple bioinspirado en la estructura de la tortuga incluyendo patrones de relleno triangulares de nido de abeja y de rejilla. Del estudio se concluyó que, la resistencia al impacto y la relación resistencia al impacto/peso de las muestras con patrón de relleno múltiple impresas en orientación plana es menor que la de las muestras impresas en orientación de borde. Además, la muestra con patrón de relleno múltiple con densidad de relleno del 20% en la orientación de borde tiene la mayor resistencia al impacto y la relación resistencia al impacto/peso en comparación con otras muestras. Por otra parte, el tiempo de impresión y el peso de las muestras con patrón de relleno múltiple de los especímenes en la orientación de borde son más altos en comparación con los especímenes con patrón de relleno múltiple impresos en la orientación plana.

De modo que, la combinación de diferentes patrones de relleno (relleno bioinspirado en la estructura de la tortuga y relleno triangular) influye significativamente en la relación resistencia/masa de tal forma que, los productos logran ser muy resistentes bajo la correcta selección de otros parámetros que afectan el comportamiento mecánico de la pieza y su peso. Adicionalmente, la orientación de impresión interviene directamente en el tiempo de fabricación de la pieza y a su vez en el costo de producción.

Después de haber revisado las fuentes bibliográficas es posible afirmar que, el porcentaje y patrón de relleno son parámetros esenciales en la gestión del consumo de material a utilizar en el proceso de impresión 3D. Por lo tanto, es fundamental imprimir piezas de bajo porcentaje de relleno que garanticen un buen desempeño mecánico y/o estructural con relación a su densidad [5].

4.3. Impacto de la biomimética en el diseño mecánico

Una de las herramientas con las que el diseño mecánico cuenta como soporte es la biomimética, que utiliza referentes naturales como un punto de inspiración para desarrollar sistemas artificiales. De acuerdo con los objetivos del estudio de investigación de este proyecto se quiere implementar la biomimética, como punto de inspiración de las estructuras que ofrece la naturaleza. Por este motivo, varios expertos han indagado la influencia de esta metodología de trabajo en el diseño mecánico implementando la impresión 3D.

En este sentido, Lucía Buelvas y Jenny Ramírez [43], evaluaron la influencia de las configuraciones morfológicas del fruto de árbol conocido como Olla de mono (*Lecythis minor*) (Figura 3) en la resistencia a compresión, tracción e impacto, con el propósito de implementar sus atributos estructurales en el diseño de productos de protección personal como el casco utilizado en el ciclismo, el cual garantiza la seguridad e integridad física del deportista.



Figura 3. Fruto del árbol olla de mono [43]

A partir de la caracterización del fruto mediante un estereomicroscopio y microscopía electrónica de barrido (SEM) (Figuras 4a,b) y los valores obtenidos en los ensayos mecánicos se evidenció que la muestra natural puede soportar una carga de 40 kg bajo deformación por tracción. Por otro lado, se observó que, en una posición invertida del fruto obtuvo una resistencia a compresión

superior, al soportar hasta 800 kg sin presentar una deformación significativa, esto se debe a estructura interna identificada como curva catenaria la cual describe una cadena suspendida por sus extremos, sometida a un campo gravitatorio uniforme (**Figura 4c**). Ahora, con relación a la cantidad de energía absorbida bajo cargas de impacto, se obtuvo un valor máximo de 0.72 ft/lb^2 con un espesor promedio de la muestra de 13.5 mm, esto representó una diferencia de 70% en comparación con el valor mínimo de resistencia a impacto (0.22 ft/lb^2) donde el espesor promedio del espécimen fue de 11 mm, esto quiere decir que entre más espesor tuviera la muestra, mayor sería la energía absorbida.

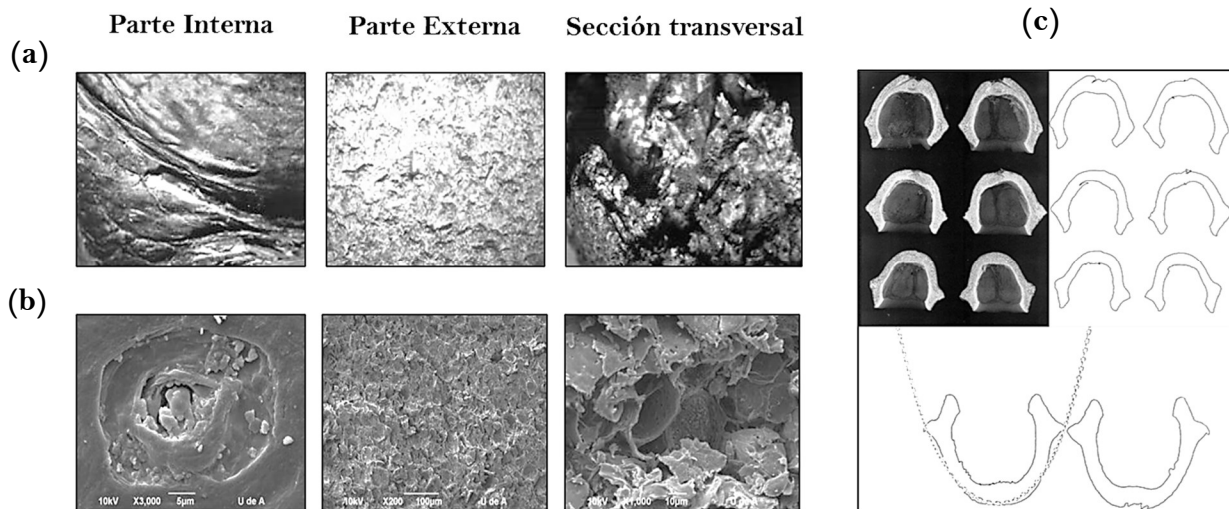


Figura 4. Caracterización morfológica de la parte interna, externa y la sección transversal del fruto de árbol ‘Olla de mono’ (*Lecythis minor*) [43]: (a) Imágenes obtenidas a través del estereoscopio; (b) Fotografías tomadas con el microscopio electrónico de barrido (SEM); (c) Vectores de la curva en el interior del fruto y descripción gráfica de la curva catenaria.

Por lo anterior, se concluye que las variables morfológicas del objeto de estudio (Fruto ‘Olla de mono’) como la simetría, la proporción dimensional, la orientación de las fibras naturales y la composición de curvas en el interior del fruto relacionadas con la curva catenaria modifican sustancialmente desempeño estructural y las propiedades mecánicas en consideración. Por lo tanto, este estudio aporta un diseño bioinspirado con valores de resistencia a tensión, compresión e impacto destacables, siendo un referente ideal para mejorar las condiciones de seguridad de elementos de protección personal mediante el uso de la biomimética.

En este orden de ideas, los materiales naturales son objeto de investigación para diseñar, sintetizar y fabricar nuevos materiales de ingeniería con un rendimiento mecánico superior, alta absorción de energía, baja densidad y alta resistencia específica. Por esta razón, Z. Wen *et al.* [44], evaluaron la resistencia al aplastamiento y la capacidad de absorción de energía de un novedoso diseño estructural de panel jerárquico inspirado en la morfología natural de la cáscara de pomelo y el patrón de panel de abeja tradicional (**Figuras 5a,b**) elaborados en muestras de aleación de aluminio AA3003-H18 (**Figura 5c**).

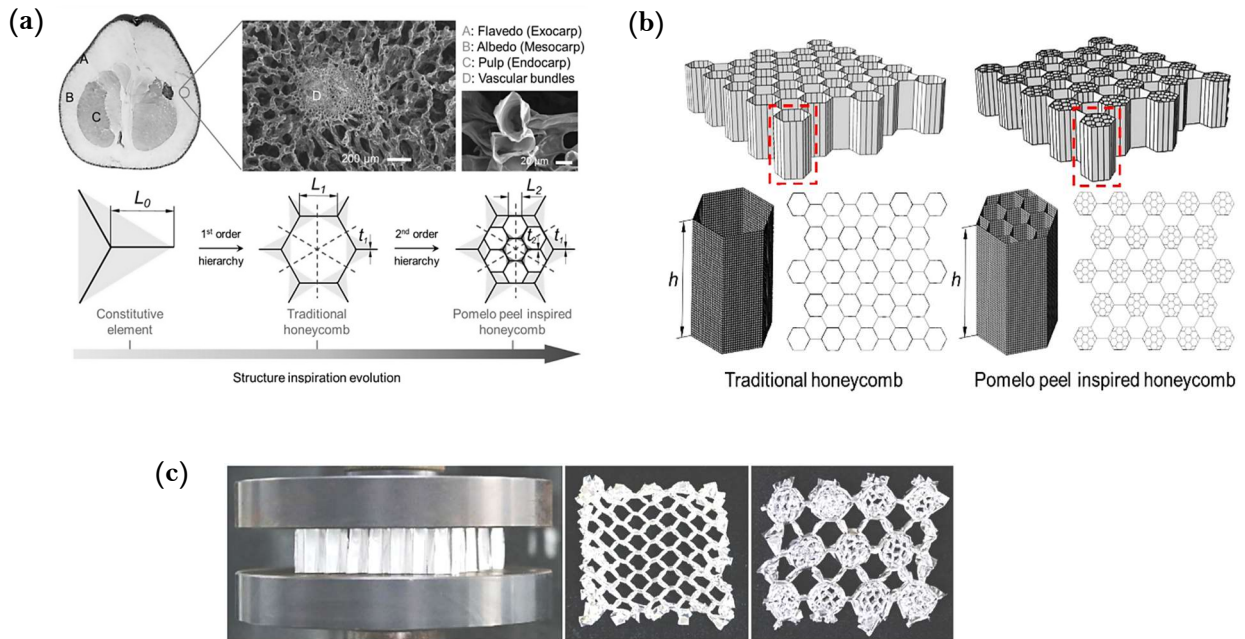


Figura 5. Diseño estructural del panel jerárquico inspirado en la cáscara del pomelo [44]: (a) Imagen SEM de la microestructura detallada junto con configuraciones y parámetros geométricos; (b) Modelos 3D de los paneles tradicionales y paneles inspirados en cáscaras de pomelo; (c) Prueba de compresión y modo de deformación representativo de ambas estructuras evaluadas.

Dado los resultados obtenidos, se demostró que la nueva estructura jerárquica inspirada en la cáscara del pomelo contribuye significativamente en la optimización de la resistencia a la compresión y a la disipación de energía por cargas de impacto debido a que se reportó que la SEA (absorción de energía específica) y el esfuerzo por deformación unitaria pueden mejorar hasta 1,5 (aplastamiento fuera del plano) y 2,5 veces (aplastamiento dentro del plano) que la estructura del panel de abejas tradicional respectivamente, a raíz del aumento de la jerarquía estructural y la variación de las dimensiones geométricas. Por lo tanto, la microestructura única de la cáscara del pomelo proporciona propiedades mecánicas superiores y una nueva perspectiva acerca de la caracterización de la morfología natural de muestras biológicas en la fabricación de nuevos materiales bioinspirados utilizados en aplicaciones de ingeniería [44].

Por otro lado, la naturaleza brinda estrategias de protección natural a partir del diseño estructural innovador de materiales u organismos biológicos con propiedades mecánicas destacables, excelente flexibilidad y peso ligero bajo condiciones de cargas dinámicas de punción. De este modo, Q. Liu *et al.* [45] desarrollaron un tejido elástico de punto en forma de escamas del pangolín (SLKF) con fibras de polietileno de muy alto peso molecular (UHMWPE) con el propósito de evaluar la resistencia al corte y la capacidad de flexión variable con respecto a un tejido de punto de trama lisa convencional (PWKF) y un tejido de punto inspirado en las escamas del pangolín reforzado con dos tipos de resina (R-SLKF) como matriz polimérica, Surllyn y polietileno (PE) (Figura 6).

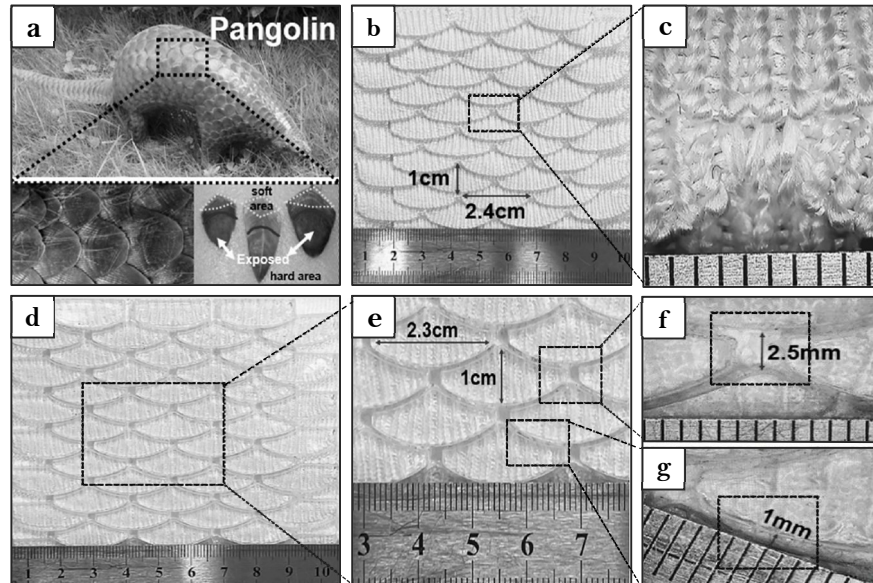


Figura 6. Características estructurales de SLKF y R-SLKF [45]: (a) Pangolín y sus escamas; (b) Imagen óptica del tejido SLKF y; (c) Vista ampliada; (d) Imagen óptica del tejido R-SLKF (Surlyn) y; (e) Vista ampliada; (f) Imagen óptica de sección transversal entre cuatro escalas y; (g) entre dos escalas del R-SLKF (Surlyn).

A partir de los resultados obtenidos, se identificó que la resistencia al corte de SLKF (45-50 N, > Grado 5) es superior a la de PWKF (~10 N, Grado 3), esto se debe a que la estructura de doble capa de SLKF cuenta con una cantidad de hilo adicional para replicar la morfología estructural de las escamas del pangolín, de modo que, la profundidad de corte aumenta en función de la densidad, el peso y el espesor del SLKF. No obstante, el R-SLKF en términos generales mostró una excelente resistencia dinámica a la punción con respecto al SLKF, esto se atribuye a la buena adhesión entre capas de este tejido y la resina la cual restringe significativamente el movimiento relativo de la fibra, previniendo que esta se rompa. Ahora bien, en cuanto a los dos tipos de resina utilizadas, el R-SLKF (Surlyn) exhibió una mayor capacidad de absorción de energía bajo cargas de corte variable (~63 N) en comparación con el R-SLKF (PE) (~53 N) mostrando una resistencia a la penetración superior, buena flexibilidad, mayor dureza superficial y fallas mínimas por fractura del hilo UHMWPE en el tejido polimérico [45].

En este sentido, esta nueva estructura compuesta bioinspirada en las escamas de pangolín abre la posibilidad de desarrollar productos industriales versátiles de protección personal, flexibles y livianos [45], a partir de la incorporación de diseños estructurales de muestras naturales con el ánimo de mejorar considerablemente el desempeño mecánico de diversos materiales de ingeniería.

4.4. Beneficios del uso de la biomimética en la impresión 3D

La impresión 3D es una tecnología que describe un proceso de fabricación previamente planificado y diseñado en un computador para crear un objeto, esto con fines educativos o

recreativos. Sin embargo, se ha evidenciado que esta técnica se ha ido implementando en muchas áreas de conocimiento, como lo son las obras de construcción, la arquitectura e incluso la medicina.

En la Universidad de Mondragón, I. Sukia *et al.* [46], diseñaron un panel tipo sándwich con pieles de ONYX (Poliamida 6 con fibra corta de carbono) y un núcleo bioinspirado en la estructura trabecular del escarabajo (alas anteriores) implementando el mismo material (**Figura 7a**), con el propósito de evaluar el comportamiento a flexo-torsión y a perforación cuasi-estático con relación a un panel tipo sándwich con pieles de ONYX reforzadas con fibra carbono y un núcleo (del mismo material) con un patrón hexagonal (honeycomb tradicional). El núcleo de ambos paneles tipo sándwich fue impreso por FFF (Fabricación con Filamento Fundido) (**Figura 7b**). El tiempo de impresión de cada núcleo fue de 1 día y 1 hora para el trabecular el cual se utilizó 66.6 ± 0.2 g de material, en cambio, para el núcleo con estructura hexagonal se fabricó en 16 horas y 15 minutos consumiendo 60.7 ± 0.1 g de material. Esto diferencia en el proceso de impresión 3D, se debe a que la geometría hexagonal es continua, por lo tanto, la impresión es más rápida en cambio, la estructura trabecular tiene círculos en los vértices lo cual requiere mayor tiempo de impresión y esto implica un consumo considerable de material.

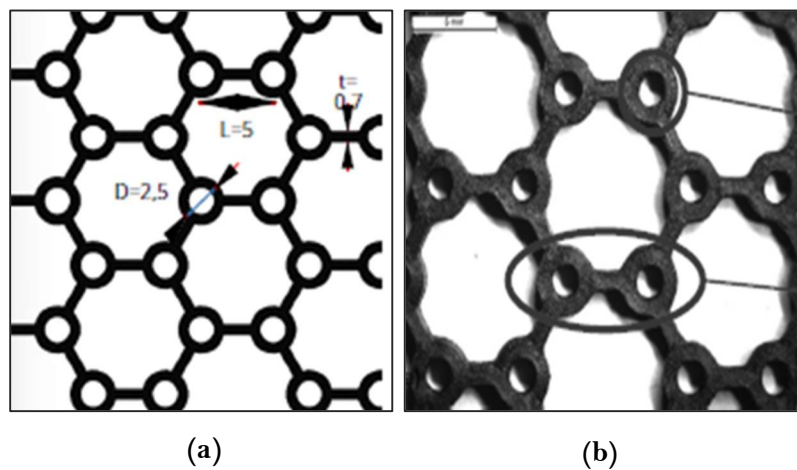


Figura 7. Diseño morfológico del escarabajo [46]: (a) Estructura trabecular; (b) Microestructura del núcleo fabricado mediante impresión 3D.

A partir de los resultados de ambos ensayos se evidenció que la estructura trabecular absorbió un 60% más de energía que el patrón hexagonal (tradicional) y en cuanto a la fuerza máxima, la de la trabecular fue de 9,1 kN, un 40 % superior y, por otro lado, la rigidez a flexo-torsión de la estructura trabecular fue 31% superior a la hexagonal. Por lo tanto, la estructura bioinspirada en el escarabajo exhibió propiedades mecánicas mejoradas. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que el diseño de nuevas estructuras bioinspiradas a partir de la combinación de patrones tradicionales y características morfológicas naturales e innovadoras pueden aportar sustancialmente en el rendimiento mecánico y la integridad estructural considerando factores relevantes como la cantidad y el tipo de material de utilizado en el proceso de impresión.

Por otra parte, la microestructura de superficies naturales se ha utilizada como estrategia para reducir la erosión de partículas sólidas mejorando el desgaste prematuro, la dureza superficial y la tenacidad de los materiales. En este aspecto, Z. Han *et al.* [47] desarrollaron una nueva superficie biónica inspirada en el escorpión (*Androctonus australis*) (Figuras 8a-c) para evaluar la resistencia a la erosión en función del grado de protuberancia superficial, la forma de ranura y nivel de curvatura de muestras fabricadas con impresora 3D; como material se utilizó acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). En las Figuras 8d-i se observan las estructuras impresas con distintas combinaciones de los tres elementos de diseño mencionados anteriormente en la superficie de los especímenes.

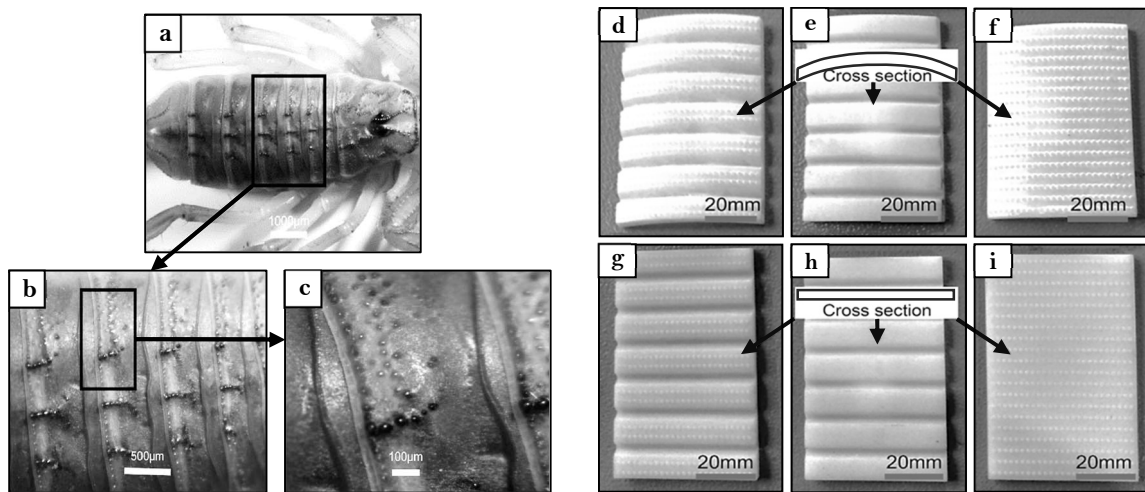


Figura 8. Caracterización morfológica de la superficie del escorpión (*Androctonus australis*) [47]: Imagen realizada con estereoscopio (a) Superficie del lomo del escorpión; (b) y (c) Vista ampliada de la forma de protuberancia y ranura; Muestras impresas bioinspiradas (d) con ranura, protuberancia y curvatura (CGB); (e) con ranura y curvatura pero sin protuberancia (CG); (f) con protuberancia y curvatura pero sin ranura (CB); (g) con ranura y protuberancia pero sin curvatura (FGB); (h) con ranura pero sin protuberancia ni curvatura (FG); (i) con protuberancia pero sin ranura ni curvatura (FB).

Para la prueba de erosión, inicialmente se diseñó una máquina de chorro de arena, de acuerdo con la norma ASTM-G76-83 para erosionar la superficie de muestras biónicas. Las partículas de sílice utilizadas como erosionante que están inicialmente en un contenedor al interior de la máquina fueron ingresadas a una velocidad controlada a la cámara de mezcla donde arrastraron el aire seco a alta velocidad que proviene del compresor. Las partículas se aceleraron aún más a medida que se movían con la corriente de aire a través de una boquilla convergente de carburo de tungsteno y finalmente golpearon la muestra que se mantenía fijada en el soporte del espécimen. Ahora, para obtener la tasa de erosión se tomó cada pérdida de peso de la muestra y se dividió entre el peso de esta antes de cada colisión teniendo que la velocidad de las partículas erosionadas fue de 30 m/s, la pérdida de masa se registró cada 10s y la presión del compresor fue de 0.5 MPa [47]. Dado los resultados obtenidos en la prueba de erosión (con una velocidad y ángulo de impacto 30 m/s y 30° respectivamente), se determinó que la presencia de protuberancias en la superficie de las muestras biónicas mejora el rendimiento antierosión hasta aproximadamente un 25% en comparación con las muestras lisas (CG, FG), esto se debe a que las protuberancias reducen el

área de contacto ante cargas de impacto continuas. Por esta razón, la muestra FB obtuvo la tasa de erosión más baja ($\sim 0.005\%$) con respecto a los otros especímenes; en este sentido, el efecto de las protuberancias tiene un nivel de importancia superior sobre la resistencia al desgaste por erosión que los otros elementos de diseño. No obstante, el nivel de curvatura y la forma de ranura podrían ser factores auxiliares que contribuyan considerablemente en el rendimiento antierosión de las diferentes combinaciones de microestructuras superficiales a partir del uso estratégico y óptimo de estas características morfológicas [47].

En este orden ideas, se concluyó que el efecto sinérgico del diseño natural de superficies bioinspiradas con características microestructurales excepcionales (protuberancias, ranuras y curvatura), aporta significativamente en la disminución de la tasa de erosión con el ánimo de incrementar la vida útil de diversos materiales.

Por último, G. Chouhan *et al.* [48] investigaron tres nuevas estructuras bioinspiradas en los centríolos, la concha de nautilo y el diseño 'Cartwheel' el cual hace alusión a la combinación de las dos estructuras mencionadas anteriormente (Centríolo+Nautilo), con el fin de evaluar y analizar la resistencia a la compresión de estas estructuras impresas en 3D con filamento PLA a partir de la técnica de estereolitografía (SLA) (Figura 9).

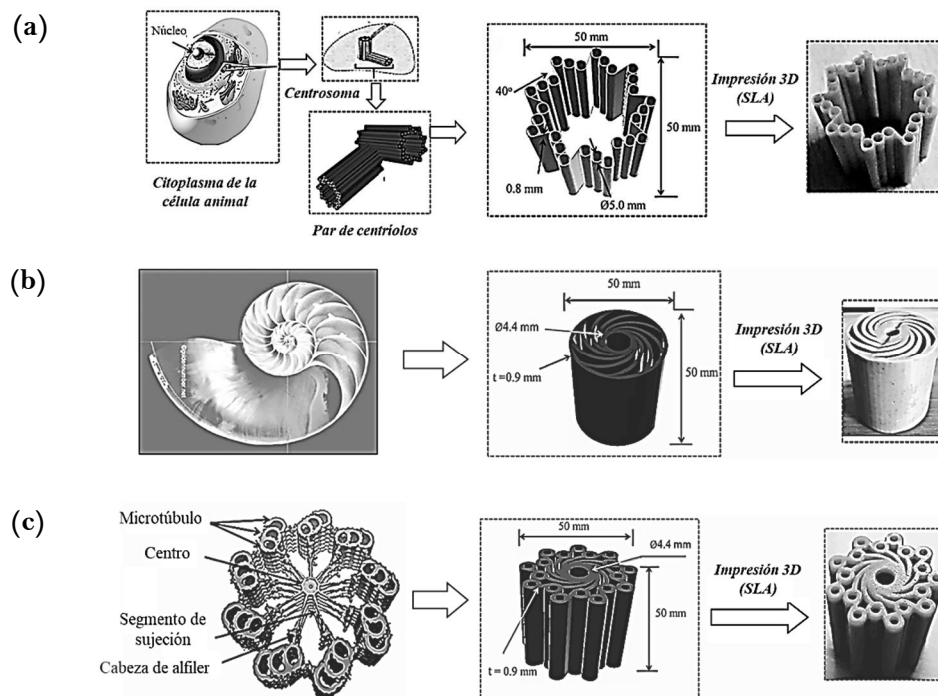


Figura 9. Diseño morfológico e impresión 3D de las estructuras evaluadas [48]: (a) Centríolo; (b) Concha de Nautilo; (c) Estructura reticular 'Cartwheel' (Centríolo+Nautilo).

Ahora bien, con base a los resultados de la prueba de compresión, la estructura 'Cartwheel' mostró una mayor resistencia a la compresión seguido por el centríolo y la concha del nautilo con valores de carga promedio de 31.97 MPa, 27.02 MPa y 25.57 MPa respectivamente. Además, la

estructura 'Cartwheel' obtuvo una mejor relación resistencia/densidad con respecto a las demás muestras [48] siendo una nueva alternativa de diseño para aplicaciones en el sector industrial donde se requiere materiales livianos y resistentes bajo cargas de aplastamiento.

En consecuencia, este estudio propone estructuras novedosas bioinspiradas no sólo en la naturaleza sino también en elementos biológicos del cuerpo humano, que ofrecen propiedades mecánicas superiores en función de las diferentes características estructurales que influyen potencialmente en el rendimiento mecánico de los materiales como el espesor de pared, el ángulo del espiral, el número de tubos, la densidad de relleno, entre otros, permitiendo así, el desarrollo de nuevas aplicaciones multifuncionales.

Teniendo en cuenta la revisión de las fuentes bibliográficas mencionadas anteriormente se puede afirmar que, el campo de las estructuras biónicas impresas en 3D ha generado oportunidades de diseño y vías de innovación hacia nuevas formas, patrones y procesos únicos de los organismos biológicos presentes en la naturaleza y en el cuerpo humano, capaces de afrontar los desafíos de diversas áreas de la ingeniería a partir de la adaptación y fabricación de nuevos modelos bioinspirados con excelente estabilidad estructural, alta resistencia y baja densidad. La tecnología de impresión 3D junto con la implementación de la biomimética en el desarrollo de productos novedosos permite explorar nuevas estrategias de optimización de material, obtener mejoras significativas en las propiedades mecánicas y fabricar estructuras complejas, funcionales y eficientes con alta precisión y exactitud [49].

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Estudiar la influencia de los parámetros de impresión 3D relacionados con el consumo de material (porcentaje y patrón de relleno), obtenidos mediante un análisis biomimético, en la resistencia a la compresión e impacto de las piezas impresas.

5.2. Objetivos específicos

- Seleccionar una estructura bioinspirada en función de cada modo de trabajo a evaluar (compresión e impacto) y su densidad, a partir de una revisión de la literatura enfocada en el desempeño mecánico de diferentes biomateriales.
- Caracterizar la morfología de los bio-materiales seleccionados, mediante microscopía óptica y electrónica (SEM).
- Modelar las estructuras bioinspiradas mediante el uso de herramientas computacionales CAD.
- Evaluar la influencia del porcentaje y patrón de relleno en las propiedades mecánicas de la pieza, por medio de ensayos de compresión e impacto.
- Seleccionar las mejores combinaciones de porcentaje y patrón de relleno en función del modo de trabajo (compresión e impacto) y su relación con la densidad.

6. Materiales y Métodos

6.1. Selección de una estructura bio-inspirada en función de su modo de trabajo y densidad

Inicialmente, se postularon cuatro alternativas por cada modo de trabajo (compresión e impacto) a partir de una revisión exhaustiva de la literatura. Posteriormente, se empleó el modelo del proceso de jerarquía analítica (AHP) para determinar la alternativa más favorable teniendo en cuenta los criterios de selección y sus respectivos pesos de importancia (**Tabla 4**), los cuales fueron definidos previamente gracias a la intervención de asesores y expertos de diversas áreas y la implementación de la matriz de comparación directa por pares de los criterios de selección para establecer sus pesos porcentuales a partir del vector propio resultante de esta matriz (**Apéndice A, Tabla A2**).

Tabla 4. Criterios de selección y escala de ponderación del método AHP

Criterio de selección	Peso	Valor	Escala
C1: Área equivalente de vacíos	32%	0	Porcentaje de área de vacíos bajo
		1	Porcentaje de área de vacíos medio
		2	Porcentaje de área de vacíos alto
C2: Resistencia mecánica del biomaterial en función del modo de trabajo	32%	0	Resistencia mecánica de 0 a 49 MPa (kJ/m ²)
		1	Resistencia mecánica de 50 a 79 MPa (kJ/m ²)
		2	Resistencia mecánica de más 90 MPa (kJ/m ²)
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 del patrón estructural del biomaterial en comparación con los patrones de relleno disponibles 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

En la presente investigación se evaluaron las alternativas identificadas basado en los criterios de selección, los cuales se les asignó una escala de ponderación de 0 a 2 para cada uno. En el criterio 1 (C1) se analizó el área porcentual de vacíos presente en imágenes SEM extraídas de investigaciones preliminares de cada alternativa evaluada. El criterio 2 (C2) se estudió el valor de resistencia mecánica de cada alternativa en función del modo de trabajo a partir de una revisión bibliográfica previa. El criterio 3 (C3) se evaluó el grado de dificultad para replicar y adaptar el patrón natural de cada una de las alternativas en el proceso de diseño e impresión de las probetas. El criterio C4 se evaluó la factibilidad de obtener una muestra de la alternativa en consideración. El criterio C5 se basó en los patrones de relleno accesibles en el software de impresión 3D, UltiMaker Cura 5.4.0. (**Figura 10**) para establecer el nivel de similitud con la composición microestructural de cada alternativa evaluada.

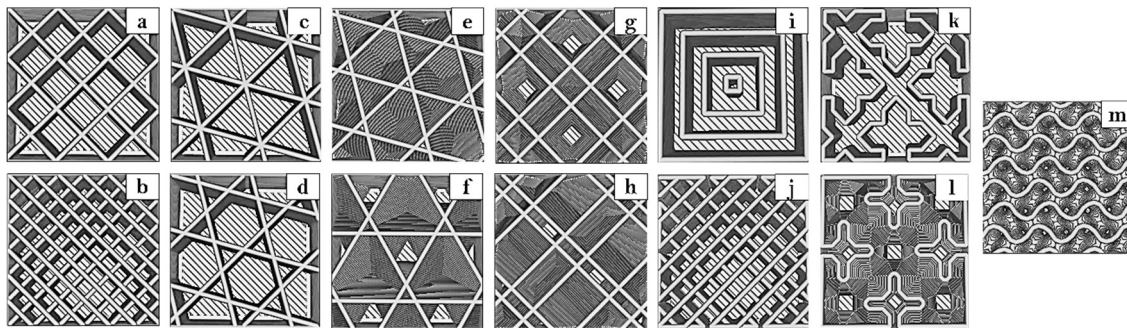


Figura 10. Patrones de relleno disponibles en el software UltiMaker Cura 5.4.0.: (a) Rejilla; (b) Líneas; (c) Triángulos; (d) Trihexagonal; (e) Cúbico; (f) Subdivisión cúbica; (g) Octeto; (h) Cúbico bitruncado; (i) Concéntrico; (j) Zigzag; (k) Cruz; (l) Cruz 3D y (m) Giroides.

Teniendo en cuenta lo anterior, inicialmente se evaluó los criterios de selección por cada alternativa en función de la propiedad mecánica en consideración (**Apéndice A, Tablas A3,A10**) mediante la asignación del valor de ponderación (**Tabla 4**). Posteriormente, se realizó las comparaciones pareadas entre los criterios y las alternativas (**Apéndice A, Tablas A4,A11**) con base al puntaje definido en las **Tablas A3,A10 (Apéndice A)** con el ánimo de establecer el nivel de importancia que tiene una alternativa con respecto a otra con relación al criterio de selección evaluado [50], mediante la escala de Saaty (**Tabla 5**). Ahora, a partir de las **Tablas A4,A11 (Apéndice A)**, se construyeron las matrices de comparación de pares entre las alternativas y cada criterio de selección por cada modo de trabajo (**Apéndice A, Compresión: Tablas A5-A9; Impacto: Tablas A12-A16**).

Por último, después de calificar los valores de importancia en cada una de las matrices de comparación pareada por criterio, se determinó el vector propio de cada alternativa en función del criterio a evaluar en la matriz de comparación y estos resultados se reunieron en una matriz de decisión 5×4 , la cual a partir de un vector final de decisión se seleccionó la alternativa con mayor puntuación total por modo de trabajo [51], con el propósito de emular sus características microestructurales como patrón de relleno de los especímenes para cada ensayo mecánico.

No obstante, con el ánimo de estudiar, analizar y evaluar la influencia de distintos patrones de relleno en el desempeño mecánico de las probetas diseñadas en función de la densidad, se decidió utilizar la morfología natural seleccionada para las muestras sometidas a compresión para inspeccionar su comportamiento bajo cargas de impacto y de igual forma, se implementó el patrón de relleno seleccionado para el ensayo de impacto Izod en el estudio de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad.

Tabla 5. Escala fundamental de Saaty para comparación por pares [50, 51]

Escala Númerica	Escala verbal	Explicación
1	Igual de importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente al criterio
3	Importancia moderada	El juicio y la experiencia previa favorece ligeramente a un elemento frente al otro
5	Importante grande	El juicio y la experiencia previa favorece fuertemente a un elemento frente al otro
7	Importancia muy grande	Un elemento domina fuertemente y su dominación está probada en la práctica.
9	Importancia extrema	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2,4,6,8	Valores intermedios o de compromiso	Es necesario un compromiso de las partes entre valores adyacentes

6.2. Caracterización morfológica de los biomateriales seleccionados

Con el fin de observar, analizar y adaptar las estructuras bioinspiradas seleccionadas para el proceso de impresión, se tomaron fotografías con aumentos necesarios para poder caracterizar la morfología del biomaterial, con ayuda de un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo (TESCAN - Modelo CLARA) y un estereomicroscopio (ZEISS - Modelo STEMI 305) para visualizar y emular las características superficiales del biomaterial en consideración, a partir del análisis y síntesis de los atributos morfológicos de la muestra de la estructura bioinspirada.

6.3. Evaluación de la influencia de porcentaje y el patrón de relleno en las propiedades mecánicas de los materiales impresos

Con el propósito de evaluar el efecto del porcentaje y el patrón de relleno en las propiedades mecánicas, se siguió la siguiente metodología.

6.3.1. Diseño de Patrones de impresión 3D

Una vez se haya identificado el patrón natural de cada biomaterial seleccionado a partir de lo observado en la microscopía electrónica y óptica, con ayuda del software de procesamiento de imágenes (ImageJ) se replicó la microestructura en consideración con las medidas obtenidas en la herramienta computacional de diseño 3D (SolidWorks) configurando la escala adecuada, teniendo en cuenta los tres porcentajes de relleno evaluados (25%, 50%, 75%) y el mínimo material a depositar, siendo esto una restricción del diseño. Tan pronto se diseñó el patrón de relleno bioinspirado se construyeron las piezas para el ensayo de compresión e impacto.

6.3.1.1. *Especímenes para ensayo de compresión*

Las dimensiones geométricas de las probetas fueron definidas a partir de la norma ASTM D695, la sección transversal de la muestra fue de 12.7 mm × 12.7 mm con una altura de 25.4 mm que corresponde al doble del ancho de la probeta [52] como se muestra en la **Figura 11**.

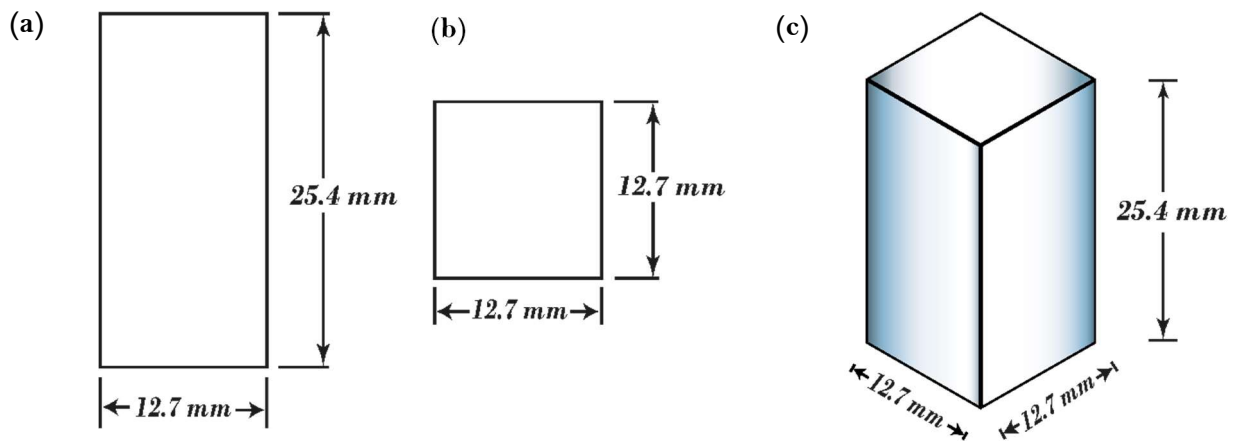


Figura 11. Dimensiones del espécimen estándar para ensayo de compresión: (a) Vista frontal; (b) Sección transversal del espécimen; (c) Vista isométrica.

6.3.1.2. Especímenes para ensayo de impacto

Con base a la norma ASTM D256 [53], las probetas de impacto fueron diseñadas con un espesor de 3 mm, ancho de 12.7 mm, largo de 63.5 mm, una distancia desde la superficie lateral hasta el centro de la muesca de 31.8 mm, ángulo de abertura de 45° y una profundidad de muesca de 2.5 mm. En la **Figura 12** se muestra las dimensiones del espécimen para ensayo de impacto.

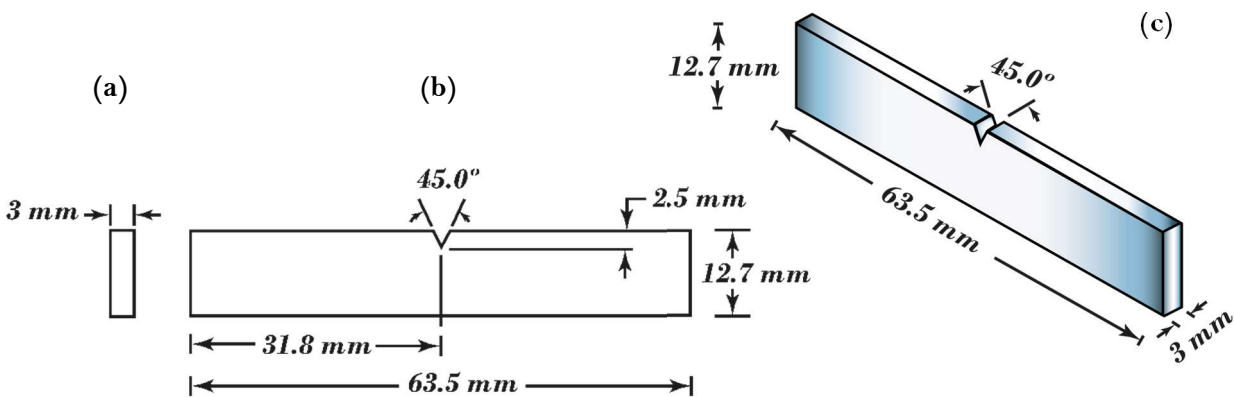


Figura 12. Dimensiones de la probeta para ensayo de impacto: (a) Espesor del espécimen; (b) Vista frontal; (c) Vista isométrica.

6.3.2. Diseño factorial a emplearse.

En este estudio se establecieron las variables fijas del proceso (velocidad de impresión, diámetro de la boquilla, altura de capa, ancho de pared, capa superior y capa inferior), a partir de una revisión de fuentes literarias, considerando los dos parámetros de impresión a evaluar (**Tabla 6**).

Tabla 6. Parámetros de fabricación para la impresión 3D

Parámetros de Impresión 3D	
Altura de capa	0.2 mm
Ancho de pared	1.2 mm
Capa superior	0.8 mm
Capa inferior	0.8 mm
Velocidad impresión	45 mm/s
Diámetro de la boquilla	0.4 mm

En este sentido, con la finalidad de evaluar el efecto del porcentaje y patrón de relleno en las propiedades mecánicas (compresión e impacto), se usó un diseño de experimentos 2×3 , donde los dos factores están representados por el porcentaje y patrón de relleno respectivamente.

El primer factor cuenta con tres niveles que hacen referencia a los tres valores de porcentaje de relleno bajo, medio y alto definidos previamente a partir del análisis de la revisión bibliográfica (25%, 50%, 75%) y el segundo factor cuenta con 2 niveles, es decir, las estructuras bioinspiradas seleccionadas para cada modo de trabajo (**Figura 13**).

Con base a lo anterior, para cada ensayo (compresión e impacto) se evaluaron seis combinaciones de porcentaje y patrón de relleno, utilizando seis probetas en cada combinación. Las variables de respuesta fueron: resistencia y módulo de elasticidad a compresión y la energía absorbida al impacto.

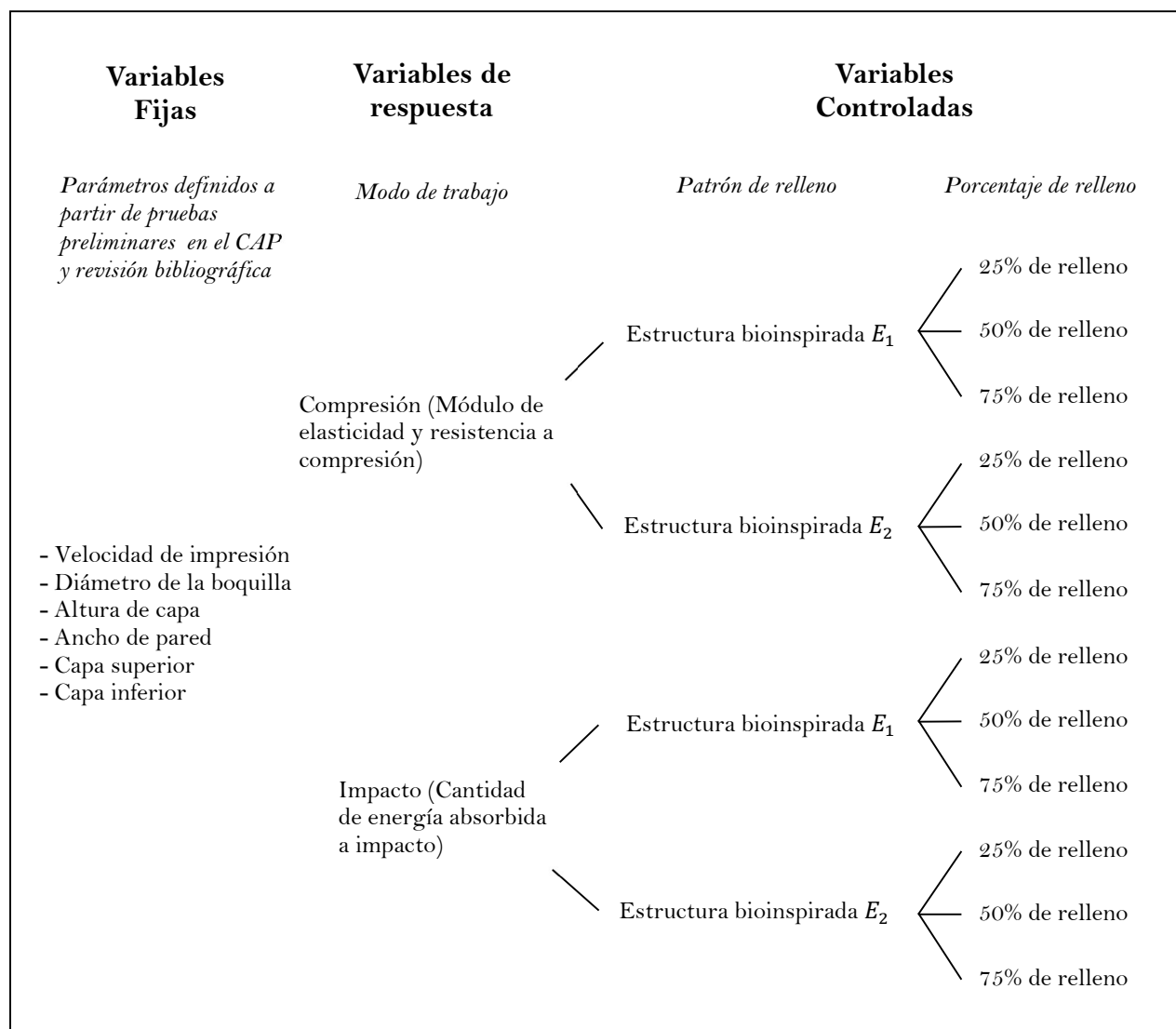


Figura 13. Esquema del diseño de experimentos 2×3

6.3.3. Método de fabricación de probetas de ensayo

Se empleó el proceso de impresión 3D por FDM utilizando impresoras DREMEL 3D40 y filamento PLA estándar. De este modo, se realizaron tres lotes de impresión, dos para las probetas para el ensayo impacto y una para las muestras de las pruebas de compresión 3D (**Figura 14**), esto con el propósito de minimizar los factores externos del entorno (calibración de la impresora, temperatura del ambiente, tiempo entre impresión y falla de probeta, ventilación y nivel de humedad del espacio, edad del filamento, etc.) que podrían afectar el proceso de impresión 3D. La distribución de las probetas de ensayo en la plataforma de la impresora para el proceso de fabricación y la designación de los parámetros de impresión mencionados anteriormente (**Tabla 6**) se realizó en el software UltiMaker 5.4.0.

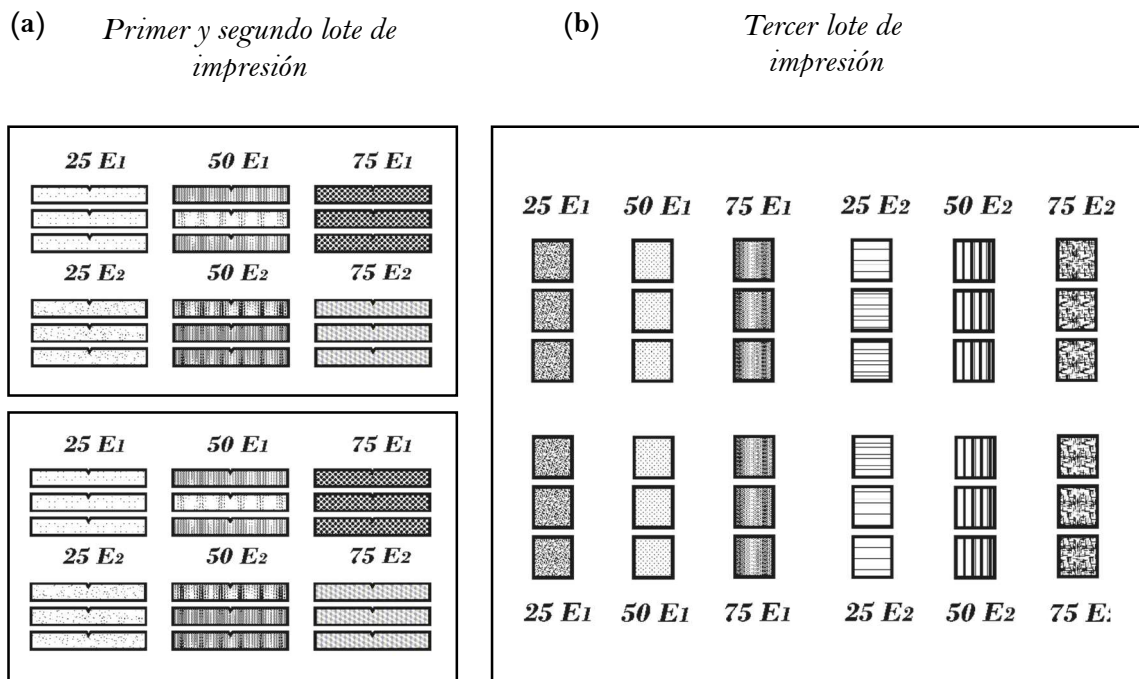


Figura 14. Método de impresión de las probetas de ensayo: (a) Impacto; (b) Compresión.

En la **Figura 14** se muestra la distribución de los especímenes utilizada para el proceso de impresión 3D. Cada lote de impresión por propiedad mecánica evaluada se fabricaron 36 probetas para una total de las 72 probetas de ensayo. Estos especímenes fueron designados con base al porcentaje de relleno y la estructura natural seleccionada para el diseño del patrón de relleno.

Por otro lado, es importante mencionar que la denotación 'E1' hace referente al biomaterial elegido para por el análisis de modo de carga a compresión; mientras que 'E2' corresponde a la estructura bioinspirada seleccionada para el modo de carga impacto. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estas se evaluaron en los dos modos de carga establecidos en este estudio (**Figura 14**).

6.3.4. Proceso para ensayos mecánicos

6.3.4.1. Ensayo de compresión

Esta prueba se realizó en dos máquinas universales de ensayos mecánicos, una con capacidad de carga máxima de 10 kN (Instron 3366) y otra con una celda de carga de 50 kN (Tinius Olsen H50KS) (Figuras 15a,b), a una velocidad estándar de ensayo de 1.3 ± 0.3 mm (0.050 ± 0.010 in.) /min [52]. Las muestras se colocaron en la máquina universal de ensayos mecánicos de tal forma que, los platos estuvieran en contacto con la muestra antes de realizar la prueba. En las Figuras 15c,d se muestran los especímenes en función de la combinación del porcentaje y patrón de relleno después del ensayo de compresión.

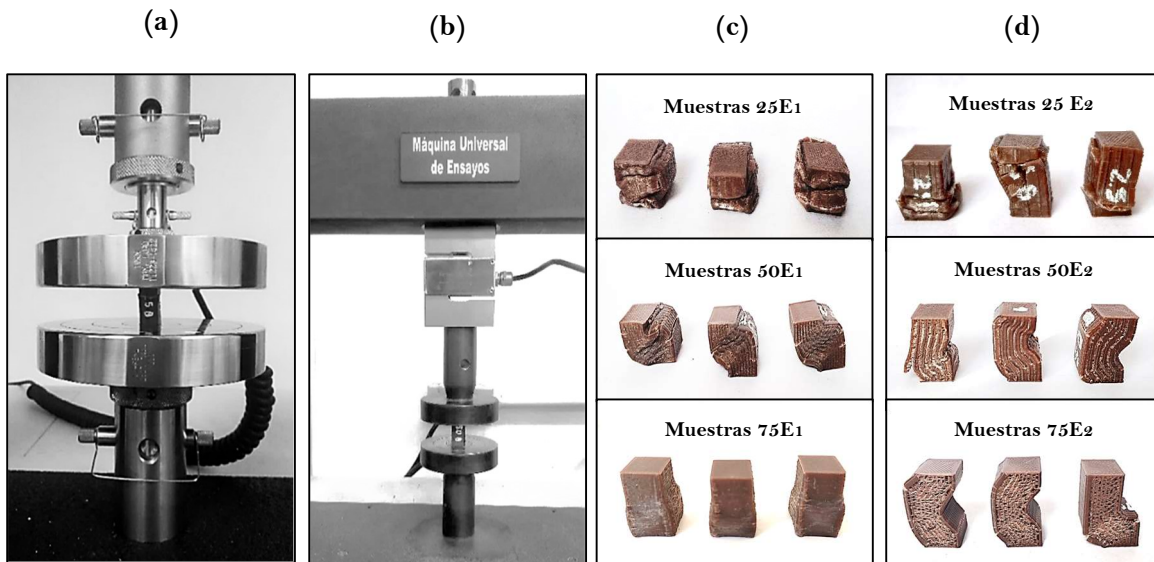


Figura 15. Prueba de compresión axial: (a) Máquina de ensayo Instron 3366; (b) Máquina de ensayo Tinius Olsen H50KS; (c,d) Muestras ensayadas con 25%, 50% y 75% de relleno y bioinspiradas en la estructura 1 y 2 seleccionadas previamente por el método AHP respectivamente.

6.3.4.2. Ensayo de impacto Izod

Se utilizó una máquina de prueba de péndulo Tinius Olsen – Model Impact 304 como se muestra en la Figura 16a. 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 (11,4 ft) /s y una altura de caída de 610 ± 2 mm ($24,0 \pm 0,1$ pulg) [53]. En las Figuras 16b,c se observan las probetas impresas luego de estar sometidas a cargas de impacto.

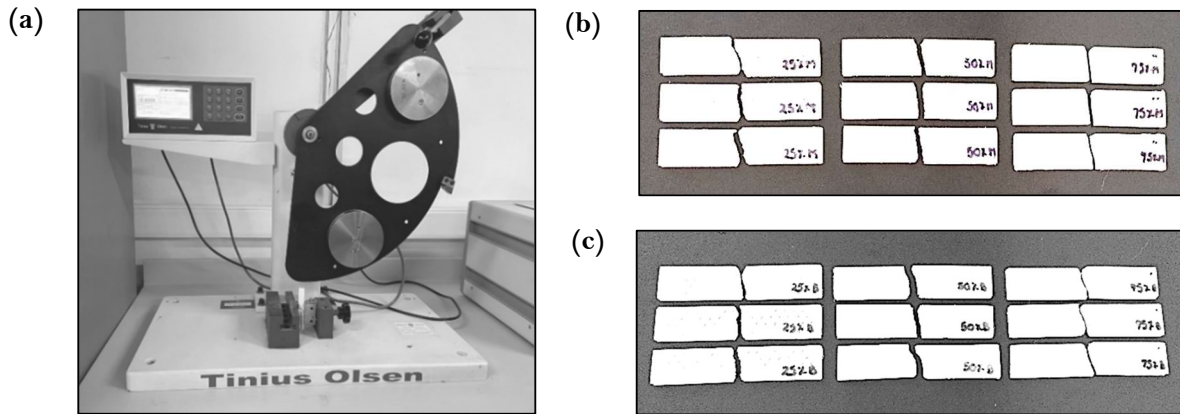


Figura 16. Ensayo de impacto Izod: (a) Máquina de prueba de péndulo Tinus Olsen – Model Impact 304; (b,c) Muestras ensayadas después de la prueba de impacto con las diferentes combinaciones de porcentaje y patrón de relleno.

6.3.5. Caracterización física de las probetas de ensayo

Con el propósito de determinar las propiedades mecánicas específicas (propiedad evaluada/densidad), se estimó la densidad de aparente (o también denominada densidad volumétrica) (ρ_a) de las muestras de compresión e impacto, para cada combinación porcentaje-patrón de relleno mediante de la ecuación (1).

$$\rho_a = m / v_a \quad (1)$$

Donde m es la masa de la muestra y v_a es el volumen aparente de la misma. Es importante mencionar que, para determinar el valor de la masa de cada una de las muestras, los especímenes fueron pesados en una balanza de alta precisión (AXIS – Modelo ACN 220). Con respecto al volumen aparente, para las probetas de compresión se calculó a partir de la ecuación (2).

$$v_a = l \times b \times h \quad (2)$$

Donde l , b y h son el largo, el ancho y la altura de las muestras impresas. Ahora bien, para los especímenes evaluados en la prueba de impacto Izod, el volumen aparente se halló mediante la ecuación (3).

$$v_a = A_s \times t \quad (3)$$

Donde A_s es el área superficial de la muestra y t es el espesor de esta.

6.3.6. Proceso de análisis de resultados

Una vez finalizados los ensayos de compresión e impacto, se tomó cada uno de los resultados y se estudiaron las variables de respuestas en relación con la densidad aparente de la pieza impresa por medio del método Tukey (asociado al análisis de varianza ANOVA) en el software estadístico Minitab® 21.4.2, con el propósito de identificar diferencias significativas entre sí [54]. A partir de esta técnica se evaluó la influencia del porcentaje y patrón de relleno en función de la densidad aparente de las muestras impresas bajo cargas de compresión e impacto.

6.4. Selección de la mejor combinación de porcentaje y patrón de relleno en función del modo de trabajo

Para seleccionar la mejor combinación se evaluó cada variación de los parámetros de impresión (porcentaje y patrón de relleno) en función de las propiedades mecánicas (compresión e impacto) de forma simultánea implementando ANOVA.

Con base a lo anterior, mediante el análisis de los resultados obtenidos y el estudio de análisis de varianza y una revisión bibliográfica previa se eligió la mejor combinación de porcentaje y patrón de relleno teniendo en cuenta la relación resistencia/densidad para cada modo de trabajo (compresión e impacto).

7. Resultados y Discusión

7.1. Aplicación del proceso de análisis jerárquico (AHP) en la selección del biomaterial más favorable por modo de trabajo

En esta sección se presentan los resultados del análisis y selección de la alternativa más adecuada por propiedad mecánica evaluada (compresión e impacto) en relación con los criterios de selección mencionado en el apartado anterior (**Tabla 4**), implementando el método AHP.

7.1.1. Propiedades a compresión

Se postularon cuatro alternativas referentes a biomateriales que exhiben una excelente morfología natural capaz de soportar altos esfuerzos a compresión bajo diferentes condiciones de carga según revisión bibliográfica previa [55-58].

Para seleccionar la mejor alternativa, se realizó un proceso de selección multicriterio utilizando el método AHP basado en las alternativas factibles identificadas [59] (**Tabla 7**) y los criterios de selección con sus respectivas escalas de ponderación.

Tabla 7. Alternativas para aplicación del modelo AHP (Compresión)

Modo de trabajo	Alternativas			
	A1	A2	A3	A4
Compresión	Esponja marina Euplectella aspergillum	Nuez de Brasil (<i>Bertholletia excelsa</i>)	Alas anteriores del escarabajo (<i>Beetle Elytra</i>)	Madera (<i>Larix principis- rupprechtii</i>)

Ahora bien, es importante mencionar que para definir el criterio 1 (C1: Área equivalente de vacíos) se analizó imágenes SEM/MicroTC de rayos X (microtomografía computarizada) extraídas de artículos de investigación para cada una de las alternativas (**Figura 17**). Para esto, se utilizó el software ImageJ, con el cual se determinó el área porcentual equivalente de vacíos de los biomateriales evaluados a partir de la relación entre el área total de vacíos presente en las imágenes de las cuatro alternativas naturales y el área global de las mismas.

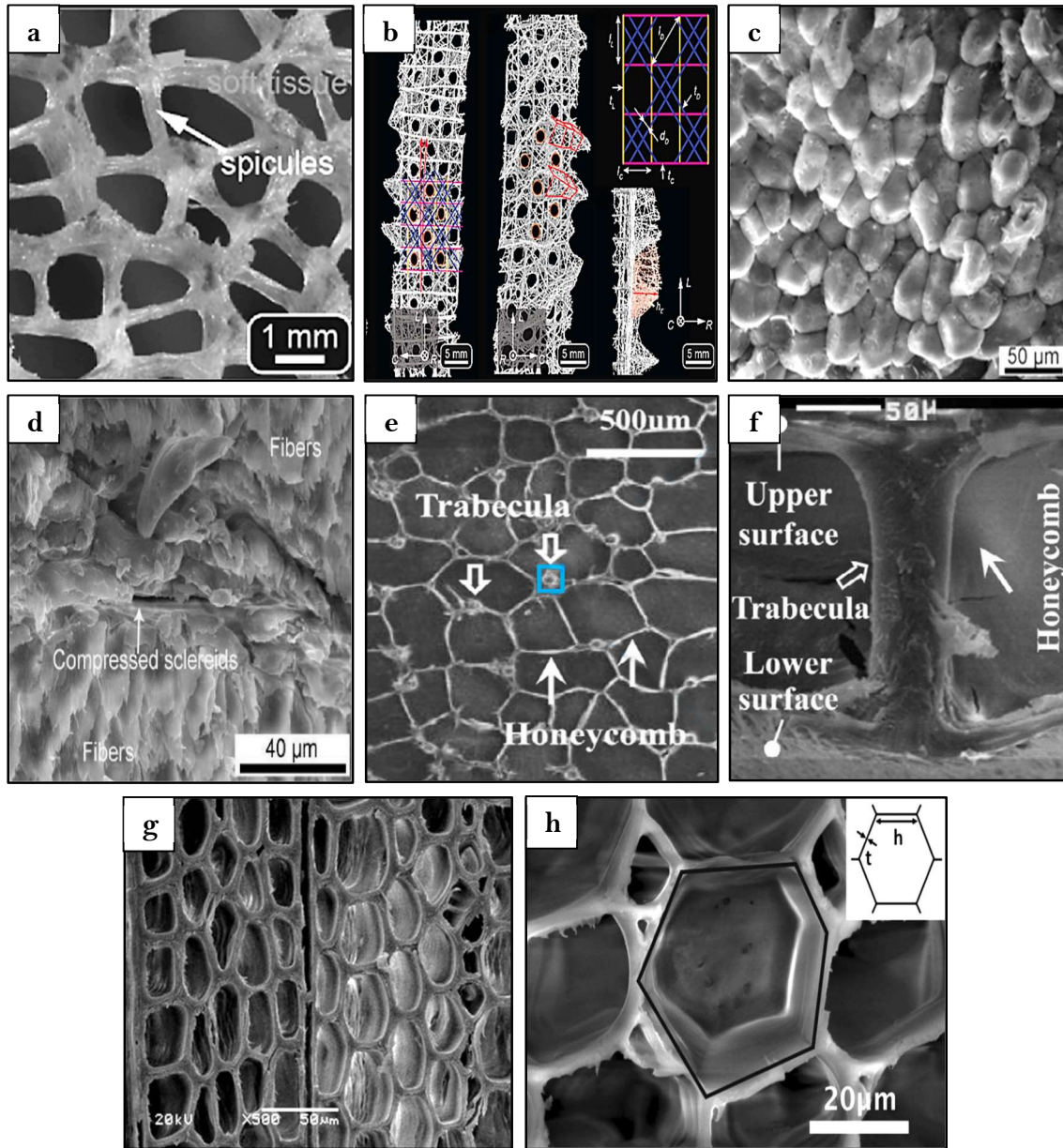
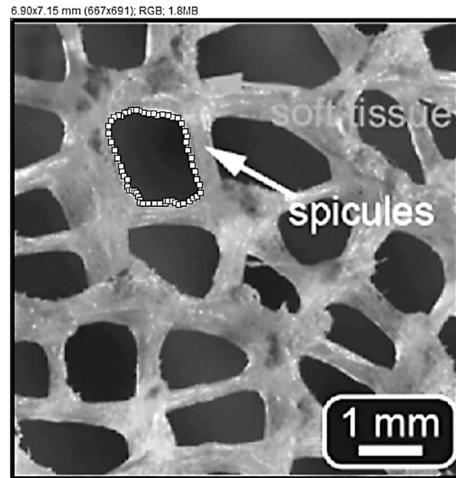


Figura 17. Imágenes SEM/MicroCT-rayos X de las cuatro alternativas naturales (Compresión): (a) Placa tamiz de la Esponja de *E. aspergillum* cubierta con tejido [55]; (b) Estructura esquelética de la esponja *E. aspergillum* obtenida a partir de una microtomografía computarizada de rayos X (MicroCT- rayos X) [55]; (c) Micrografía SEM de las células esclereidas elíptica del mesocarpio de la nuez de Brasil [60]; (d) Imagen SEM de las células esclereidas de la nuez de Brasil después de ensayo de compresión [56]; (e) Imagen SEM de las alas anteriores del escarabajo (*Beetle Elytra*) [61]; (f) Trabécula de la arquitectura interna de las alas anteriores del escarabajo (honeycomb) [61]; (g) Imagen SEM Madera de alerce (*Larch Wood*) [62]; (h) Micrografía SEM de la sección transversal de muestra de madera balsa (*Ochroma pyramidale*) de densidad media [63].

En la **Figura 18** se puede observar que para la alternativa 1 (*A1*) que hace referencia a la esponja *E. aspergillum* (**Tabla 7**) se obtuvo un 32.279% de área equivalente de vacíos, de modo que, cuenta con un 67.721% de material ocupado. Este mismo análisis se realizó para cada alternativa establecida.



Estimación de área equivalente de vacíos (%)

Área total de vacíos 16.672
 Área total aprox. 51.650

Área equivalente vacíos	32.279 %
Material ocupado	67.721 %

ESPONJA <i>E. ASPERGILLUM</i>		
No.	Área	Mean
0	51.650	86.162
1	1.624	34.081
2	1.233	45.145
3	0.505	35.621
4	1.706	58.444
5	0.971	68.362
6	1.193	37.368
7	0.941	58.743
8	0.659	34.610
9	1.033	46.618
10	1.106	46.917
11	1.335	26.158
12	1.23	35.972
13	1.982	49.405
14	0.809	32.212
15	0.345	57.667
Mean	1.111	44.488
SD	0.444	12.163
Min	0.345	26.158
Max	1.982	68.362

Figura 18. Estimación de área equivalente de vacíos para la esponja *E. aspergillum* (Alternativa 1) [55]

Cabe resaltar que estos datos fueron relevantes en la elección del biomaterial como inspiración para el diseño del patrón de relleno debido a que indica la cantidad de material que contiene la estructura natural y el nivel de porosidad que presenta siendo de vital importancia en la caracterización de la densidad de la probeta final.

Ahora bien, después de haber establecido el valor de ponderación para cada criterio de selección por alternativa (**Apéndice A, Tabla A3**), se compararon las alternativas por cada criterio de selección (**Apéndice A, Tabla A4**). Para esto, se estableció el nivel de importancia de un criterio con respecto a otro y de igual forma, se designó el grado de relevancia de una alternativa con relación a otra por criterio a partir de la escala de Saaty (**Tabla 5**) evaluando el índice de consistencia de las comparaciones realizadas. A partir de los resultados del proceso de comparación directa por pares entre criterios y alternativas (**Apéndice A, Tablas A5-A9**), se implementó una matriz 5x4 para determinar el vector final de decisión contemplando los

vectores de prioridad de los criterios, los vectores de prioridad de las alternativas para cada criterio y los valores de importancia asignados para cada uno (**Tabla 8**).

Tabla 8. Matriz de decisión (Compresión)

Alternativas	Vector Propio (C1)	Vector Propio (C2)	Vector Propio (C3)	Vector Propio (C4)	Vector Propio (C5)	Vector Final de Decisión
A1	0.083	0.100	0.394	0.063	0.625	0.17
A2	0.083	0.700	0.048	0.063	0.125	0.28
A3	0.417	0.100	0.165	0.438	0.125	0.25
A4	0.417	0.100	0.394	0.438	0.125	0.30
Vector Propio Criterios	0.321	0.321	0.188	0.116	0.053	

El análisis de la matriz de decisión indica que la alternativa más favorable para replicar su morfología natural en el diseño de las probetas de ensayo de compresión es la Alternativa 4 (Madera) con un orden de importancia del 30%.

7.1.2. Propiedades a Impacto

Al igual que en el apartado anterior, para definir el mejor biomaterial en función de su modo trabajo (impacto) y su densidad, se postularon cuatro alternativas con base a una investigación bibliográfica previa (**Tabla 9**), donde los biomateriales evaluados se destacan por su notable resistencia al impacto y absorción de energía, gracias a sus respectivas microestructuras morfológicas naturales que contribuyen al rendimiento mecánico y rigidez estructural [67-70].

Tabla 9. Alternativas para aplicación del modelo AHP (Impacto)

Modo de trabajo	Alternativas			
	A1	A2	A3	A4
Impacto	Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	Cuernos del borrego cimarrón (<i>Ovis canadensis</i>)	Bambú	Astas de alce

De igual forma que la definición del criterio 1 para las alternativas evaluadas en función de la resistencia mecánica a la compresión, se realizó nuevamente el procedimiento de obtención del área equivalente de vacío de diferentes imágenes SEM/NIC (Microscopía de Nomarski)

referentes a las alternativas con ayuda del software ImageJ (Figura 19) y para el criterio 4 se tuvo en cuenta los patrones de relleno disponibles en el software de impresión 3D, UltiMaker Cura 5.4.0 (Figura 10).

Ahora bien, teniendo en cuenta la literatura y el nivel de alcance de los criterios de selección, se estableció el valor de ponderación para cada alternativa con relación al criterio en consideración (Apéndice A, Tabla A10). A partir de lo anterior, se compararon las alternativas con cada criterio definiendo el orden de prioridad utilizando de la escala de Saaty (Apéndice A, Tabla A11). Con cada una de las comparaciones pareadas entre las alternativas y los criterios de selección se construyeron las matrices de análisis comparativo por pares (Apéndice A, Tablas A12-A16) con base al método AHP que permitieron recopilar el valor porcentual de importancia de cada alternativa por criterio a partir de vector propio de cada matriz.

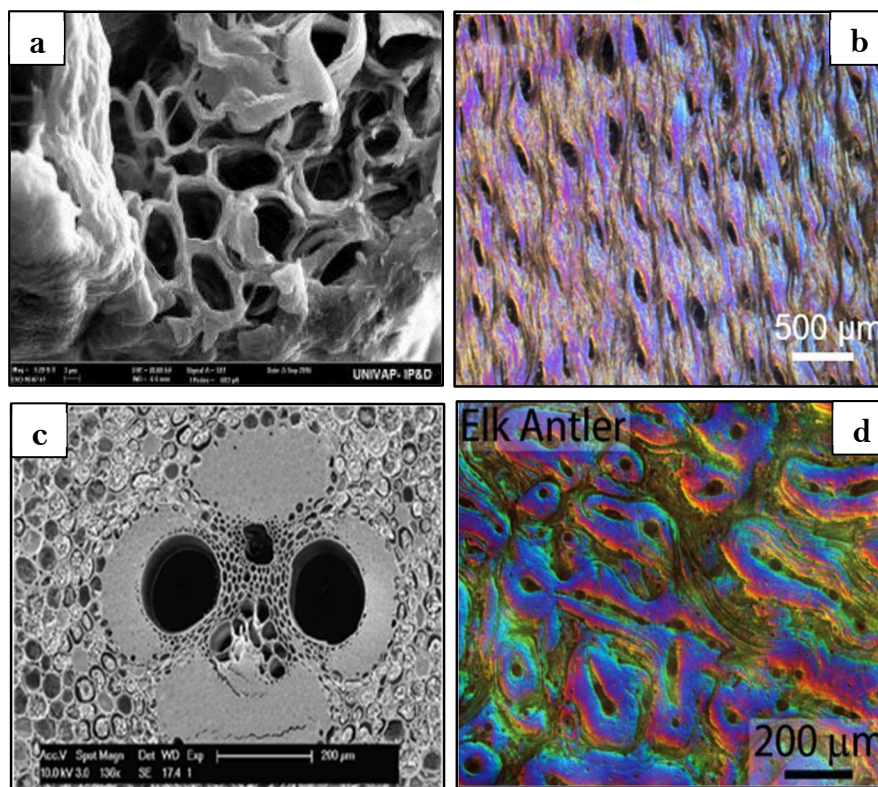


Figura 19. Imágenes SEM/NIC de las cuatro alternativas naturales (Impacto): (a) Imagen SEM de la fibra de coco a $3200\times$ [71]; (b) Microscopía NIC de la sección transversal del cuerno del borrego cimarrón (*Ovis canadensis*) [72]; (c) Imagen SEM de la morfología de los haces vasculares de la sección media del bambú [73]; (d) Microscopía NIC de sección transversal de hueso compacto (cortical) de la asta de alce [70].

Los resultados obtenidos en las Tablas A12-A16 (Apéndice A) se almacenan en la matriz de decisión 5×4 determinar la alternativa más favorable con respecto a las demás alternativas. En la Tabla 10 se evidencia que la Alternativa 3 tiene el mayor índice de importancia con un 43.2%.

Tabla 10. Matriz de decisión (Impacto)

Alternativas	Vector Propio (C1)	Vector Propio (C2)	Vector Propio (C3)	Vector Propio (C4)	Vector Propio (C5)	Vector Final de Decisión
A1	0.125	0.063	0.523	0.450	0.250	0.224
A2	0.125	0.313	0.066	0.050	0.250	0.172
A3	0.625	0.313	0.345	0.450	0.250	0.432
A4	0.125	0.313	0.066	0.050	0.250	0.172
Vector Propio Criterios	0.321	0.321	0.188	0.116	0.053	

A partir del modelo AHP, se determinaron las alternativas más favorables en función de su modo de trabajo (compresión e impacto) y su densidad, es decir que la madera y el bambú fueron los biomateriales seleccionados para adaptar su composición microestructural como patrón de relleno en el proceso de diseño e impresión de las probetas de ensayo de compresión e impacto respectivamente. No obstante, se decidió implementar la morfología natural de la madera en la construcción del patrón de relleno de las probetas de impacto y de igual forma, se utilizó el diseño microestructural del bambú para estudiar el comportamiento mecánico de las probetas sometidas a cargas de compresión. Esto con el ánimo de evaluar 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 de las piezas impresas.

Además, A.K. Matsushita *et al.* [74], evaluaron la resistencia al impacto de nueve especies de árboles en la dirección radial en función de su densidad. A partir de los resultados obtenidos (Caoba africana = 42 kJ/m², Nogal negro = 33 kJ/m², y Arce azucarero = 29 kJ/m²), se concluyó que la densidad y las características mesoestructurales específicas de la madera (vetas entrelazadas, distribución de vasos porosos difusos y rayos intermitentes) contribuyen significativamente en su rendimiento mecánico bajo cargas de impacto, capaz de absorber la mayor cantidad de energía siendo así un material biológico resistente a esfuerzos de impacto considerando la densidad y la morfología natural propia de una especie de madera específica.

De igual forma, H. Zhang *et al.* [75], hacen hincapié en el efecto de los nodos (anillos) del bambú en las propiedades mecánicas del mismo bajo diversas condiciones de carga (en dirección paralela y perpendicular a la fibra natural) donde se demostró que este biomaterial ofrece una mejora en el desempeño mecánico debido a su arquitectura microestructural, particularmente por la presencia de nodos que logra aumentar la resistencia a la compresión un 11,25% en dirección paralela a la fibra y un 27% de forma perpendicular a la misma, de esta manera, el bambú es un biomaterial pertinente para evaluar la influencia del patrón y porcentaje de relleno en la resistencia a la compresión a partir de la caracterización y adaptabilidad de su morfología natural en el proceso de impresión 3D.

Por lo tanto, el diseño microestructural de la madera y el bambú se utilizaron en la definición del patrón de relleno de las probetas evaluadas en cada ensayo mecánico.

7.2. Análisis de la caracterización morfológica de las alternativas seleccionadas

Con el ánimo de observar y adaptar los aspectos morfológicos de los biomateriales seleccionados en el proceso de diseño del patrón de relleno, se obtuvieron muestras naturales de las alternativas elegidas (Madera – Bambú) para obtener imágenes de la microestructura jerárquica de estos materiales biológicos.

7.2.1. Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo (FE-SEM)

A partir de la técnica de microscopía FE-SEM se observaron características morfológicas presentes en los biomateriales en consideración (**Figura 20**). En las **Figuras 20a,c** se evidencian una supuesta rugosidad superficial predominante en la muestra de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris Wood*) a diferencia de las **Figuras 20b,d** donde se observan aparentemente un nivel de porosidad considerable debido a la presencia de espacios vacíos en el área superficial del bambú.

No obstante, en la **Figura 20** no se evidenció con claridad las estructuras morfológicas de las muestras naturales, por lo tanto, se realizó una evaluación mediante microscopía óptica.

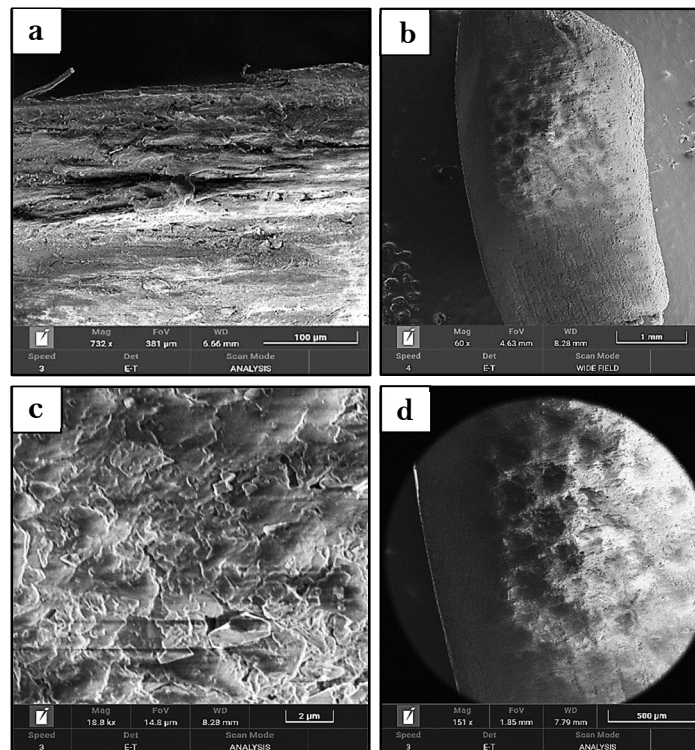


Figura 20. Imágenes FE-SEM de los biomateriales seleccionados. Muestra de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris Wood*): (a) Resolución de $100\ \mu\text{m}$ - Aumento de $732x$; (c) Resolución de $2\ \mu\text{m}$ - Aumento de $18.8kx$. Muestra de bambú: (b) Resolución de $1000\ \mu\text{m}$ - Aumento de $60x$; (d) Resolución de $500\ \mu\text{m}$ - Aumento de $151x$.

7.2.2. Microscopia Óptica

A raíz de las fotografías tomadas con el estereoscopio, se caracterizó a detalle la composición microestructural de las muestras naturales. En la **Figura 21a** se observa que el tamaño, la forma y la distribución de los haces vasculares del bambú varía en función de la zona de concentración de estos. Cerca de la periferia del culmo, los haces vasculares tienen menor tamaño y el espaciado entre ellos es bajo mientras en la sección media del culmo son más grandes y hay mayor separación entre ellos [73]. Ahora, con relación al patrón natural que posee este biomaterial, los haces vasculares que se encuentran en la periférica de la muestra natural presenta una geometría similar a un rombo como se observa en la **Figura 21b**.

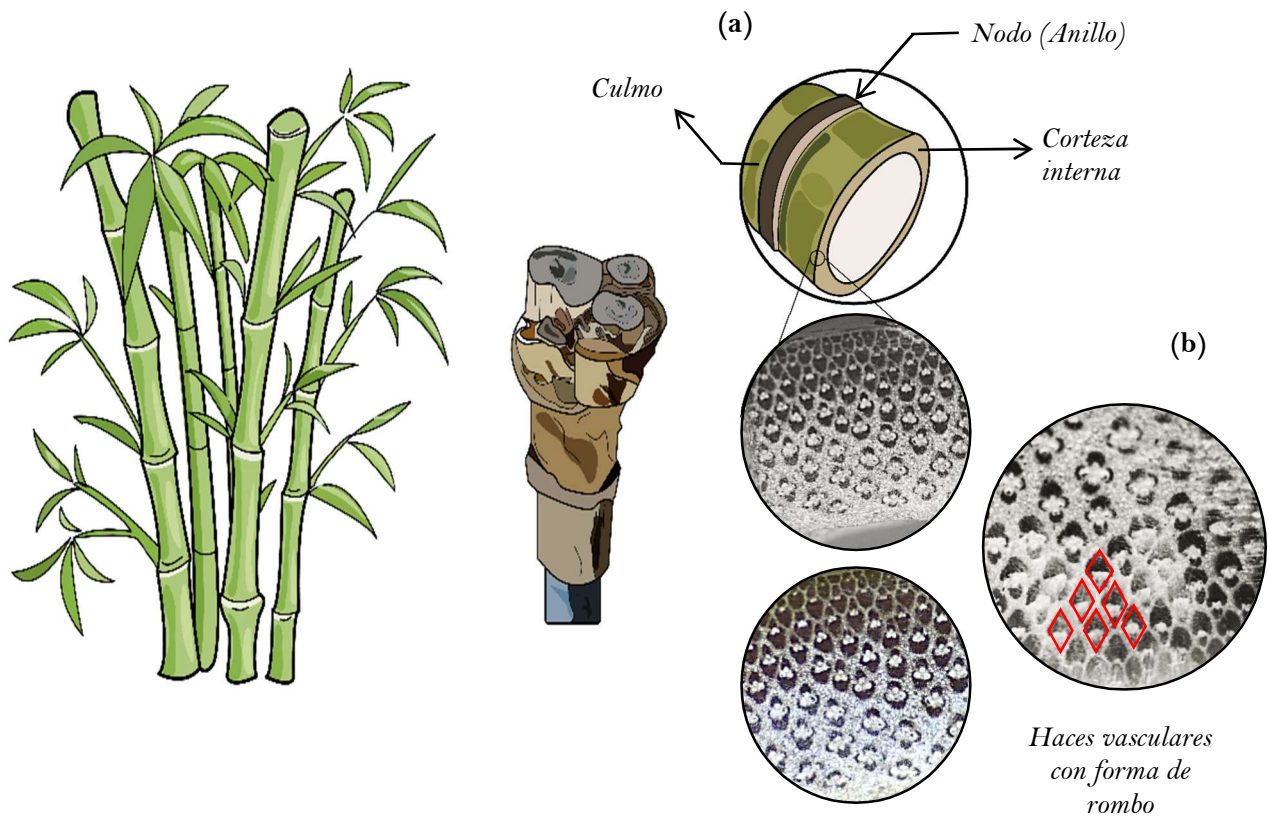


Figura 21. Imágenes de microscopía óptica de la muestra de bambú: (a) Distribución de los haces vasculares en la corteza interior del culmo del bambú – Aumento de $2x$; (b) Caracterización geométrica de la morfología natural de los haces vasculares – Aumento de $4x$.

Es importante mencionar que el bambú es un elemento natural compuesto por tejido de parénquima reforzado por haces vasculares de forma, ubicación y tamaño variable. Estas características morfológicas tienen una influencia significativa en el desempeño mecánico y la rigidez estructural de la muestra [73].

Por otro lado, en las **Figuras 22a,b** se pueden evidenciar que la madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris Wood*) cuenta con un patrón natural compuesto por hexágonos con dimensiones x , z y t . Donde x es la longitud del segmento diagonal, z la longitud del segmento vertical y t el espesor de la figura geométrica (**Figura 22c**), que hace alusión al grosor de la fibra de madera. Ahora, cabe resaltar que el diseño microestructural depende sustancialmente de la especie/clase de madera a evaluar como sus propiedades mecánicas [74].

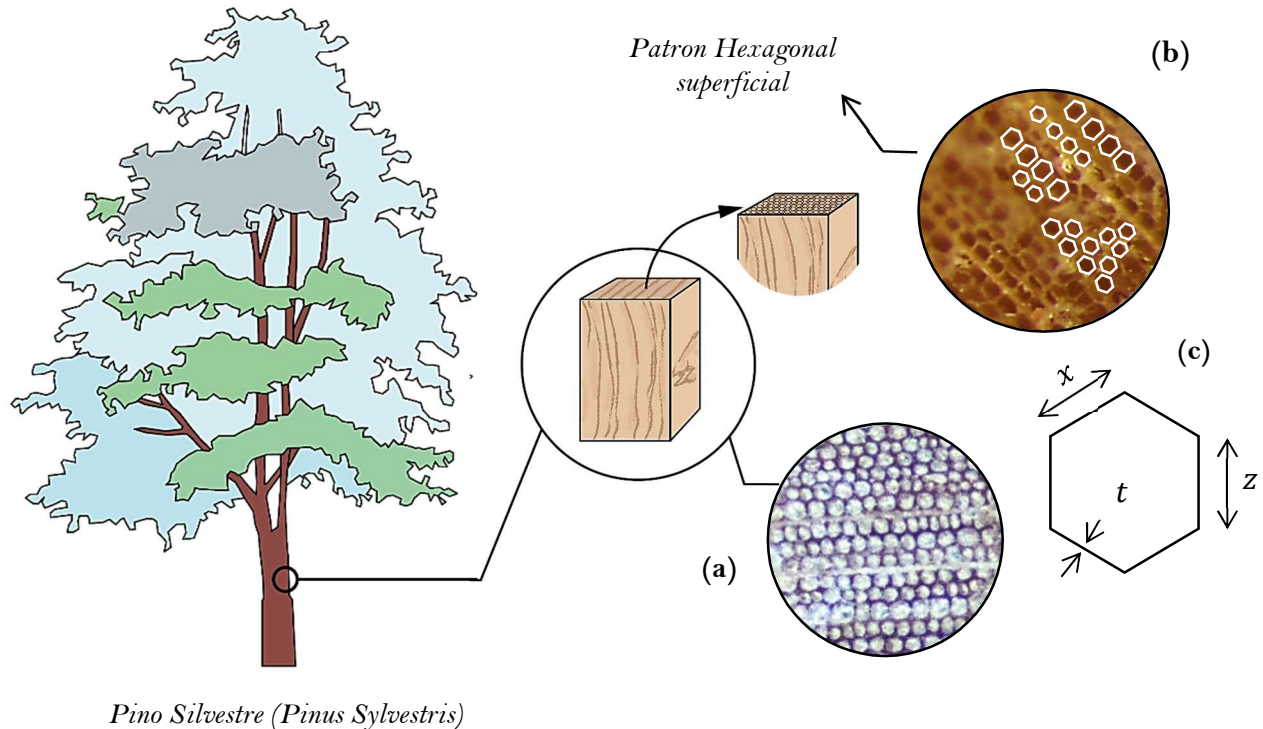


Figura 22. Caracterización microestructural de la muestra de madera de pino silvestre (*Pinus Sylvestris*): (a) Microscopía óptica de la sección transversal – Aumento de $4x$; (b) Diseño geométrico superficial del patrón natural – Aumento de $3x$; (c) Dimensiones principales del hexágono que compone la microestructura de la muestra biológica.

7.3. Proceso de diseño de especímenes

Una vez se ha identificado la morfología natural de las muestras evaluadas se procedió a replicar su patrón natural con ayuda de herramientas de procesamiento de imágenes y diseño 3D para así obtener las probetas de ensayo de compresión e impacto.

7.3.1. Aplicación de patrón natural de la madera

A partir de la caracterización microestructural de la muestra de madera (**Figuras 22a,b**), se replicó el patrón natural con ayuda de ImageJ. Inicialmente, se trazó el segmento diagonal (lado x) y el

segmento vertical (lado y) del hexágono identificado en la microscopía óptica de la muestra (Figura 23a); después de varios trazos referentes a las medidas de los segmentos evaluados (40 trazos) (Figura 23b), se definió la medida promedio de cada lado siendo estos valores de 0.020 mm (lado x) y 0.030 mm (lado z) (Figura 23c).

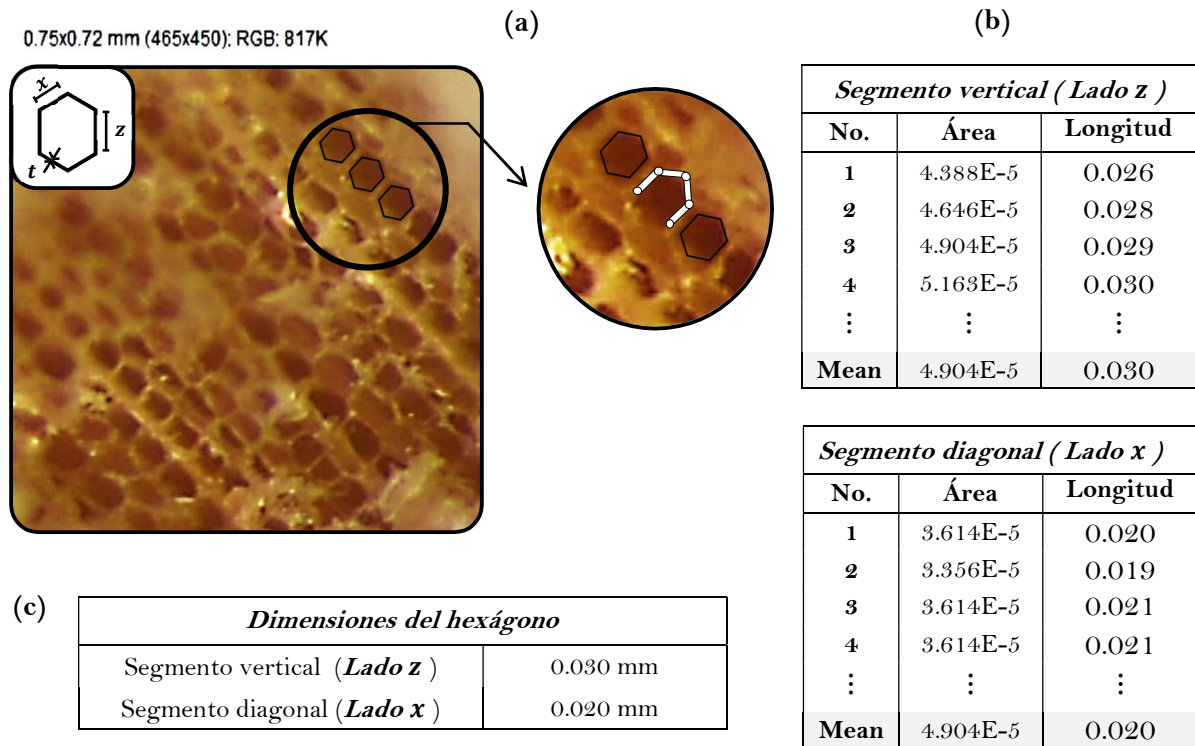


Figura 23. Obtención de las medidas principales del hexágono presente en el patrón natural de la muestra de madera: (a) Análisis dimensional de la microscopía óptica con el Software ImageJ; (b) Definición de la longitud promedio del segmento vertical (Lado z) y el segmento diagonal (Lado x); (c) Dimensiones del hexágono analizado.

Ahora, con las medidas de cada segmento, se realizó la figura geométrica en SolidWorks (Figura 24a), para reproducir el croquis inicial a mayor tamaño de tal forma que la distancia entre las aristas del modelo inicial y el nuevo croquis fuera de 0.2 mm debido que al momento de realizar la generación del patrón (matriz) hexagonal, la distancia entre cada figura fuera equivalente al diámetro de la boquilla de la impresora 3D (Figura 24b).

Después de haber establecido el espesor de la figura ($t = 0.2$ mm), se escaló el hexágono interno, de manera que, la relación entre área del hexágono con agujero central (zona sombreada) y el área superficial total de la figura sea igual a los valores del porcentaje de relleno evaluados (25%, 50% y 75%) conservando el grosor de la estructura geométrica (0.2 mm) (Figura 25).

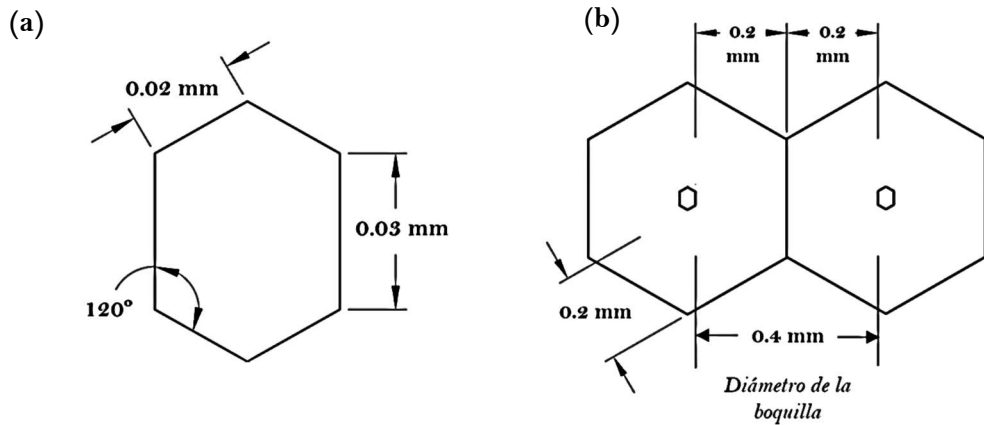
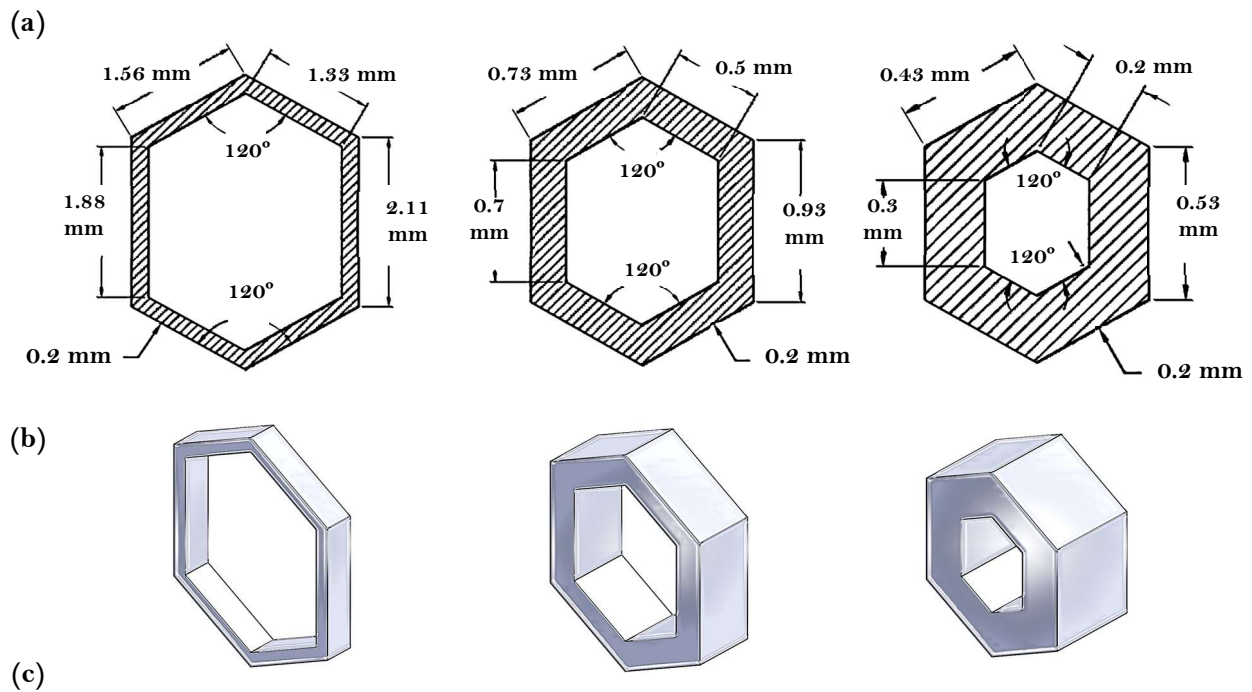


Figura 24. Caracterización y dimensión geométrica del hexágono: (a) Diseño estructural con medidas principales y ángulos internos; (b) Definición dimensional del espesor superficial de la figura teniendo en cuenta el diámetro de la boquilla de la impresora 3D.



Área superficial con agujero central	1.95202765	0.81423797	0.41937309
Área superficial total	7.79918359	1.62598857	0.55901081
Porcentaje de relleno	0.2503 (25%)	0.5008 (50%)	0.7502 (75%)

Figura 25. Análisis dimensional de la figura geométrica (hexágono) para cada porcentaje de relleno: (a) Medidas de las aristas con un espesor fijo de 0.2 mm; (b) Vista isométrica del modelo hexagonal con 25%, 50% y 75% de relleno respectivamente; (c) Relación entre área superficial total y área superficial con agujero central en la definición y validación del porcentaje de relleno.

Ahora, a partir de las dimensiones geométricas de la figura hexagonal para cada porcentaje de relleno (**Figura 25a**); se elaboró una malla lineal con el número de instancias necesarias para diseñar la probeta de compresión con sus respectivas dimensiones, según norma ASTM D695 (**Figura 11**).

En las **Figuras 26a-c** se evidencia el patrón bioinspirado de la madera en función del porcentaje de relleno (25%, 50% y 75%).

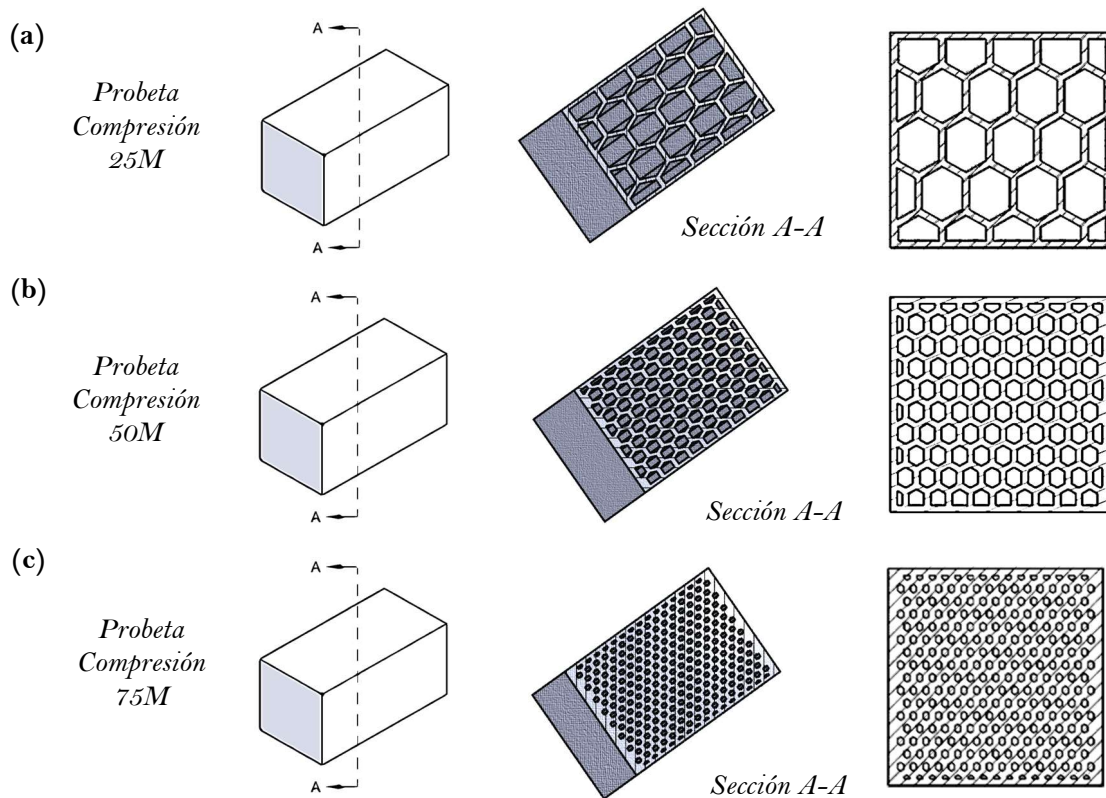


Figura 26. Vista de la sección transversal de la probeta para ensayo de compresión con patrón bioinspirado en la madera y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.

Por otra parte, según la metodología del proceso de diseño e impresión de las probetas de ensayo descrita en la sección **6.3.2** y **6.3.3**, se adaptó el patrón natural de la madera en el diseño de las probetas para el ensayo de impacto Izod teniendo en cuenta todo lo mencionado anteriormente.

En las **Figuras 27a-c** se observa el diseño estructural de la morfología natural de la madera en el patrón de relleno de los especímenes de impacto diseñadas bajo la norma ASTM D256 (**Figura 12**) con sus respectivos porcentajes de relleno.

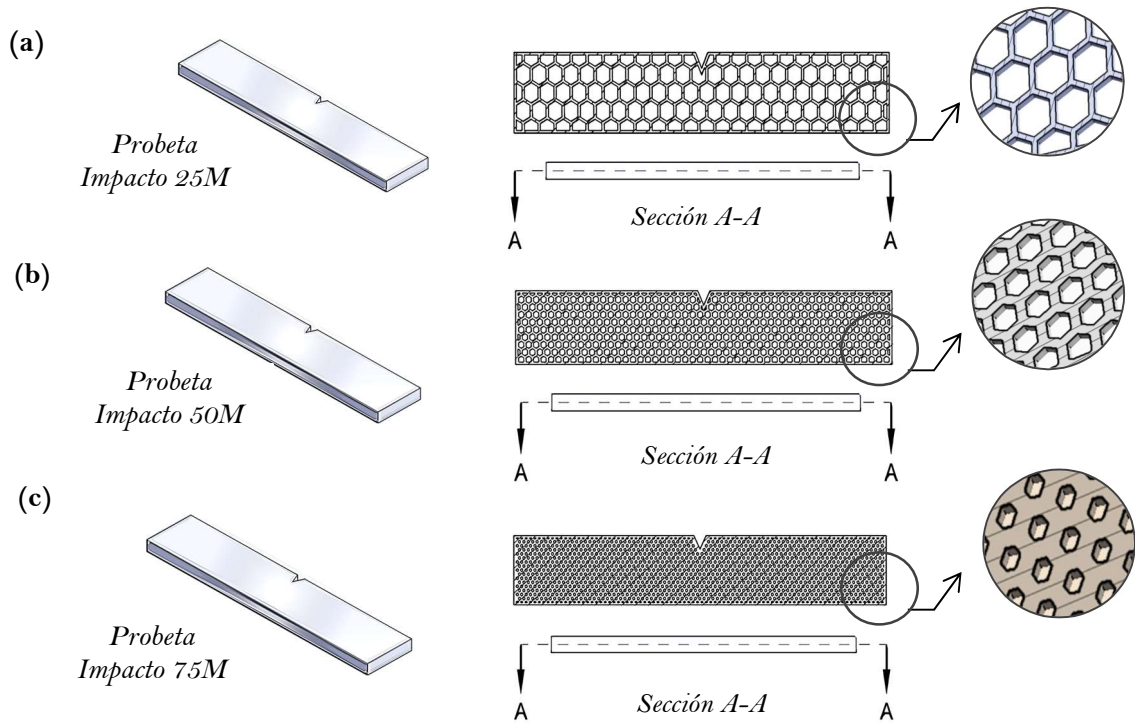


Figura 27. Vista de corte de la probeta para ensayo de impacto Izod por plano longitudinal con patrón bioinspirado en la madera y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.

7.3.2. Aplicación de patrón natural del Bambú

De igual forma que en el apartado anterior, se realizó la caracterización morfológica del patrón natural del bambú presente en la microscopía óptica de la muestra (**Figura 21b**) en ImageJ para obtener así, las dimensiones principales de la figura geométrica (**Figura 28a**). En la **Figura 28b** se evidencia la distancia de separación entre el modelo inicial (rombo interno) y el nuevo dibujo de la estructura geométrica (0.2 mm) a escala (rombo externo), como restricción de diseño (**Figura 28b**).

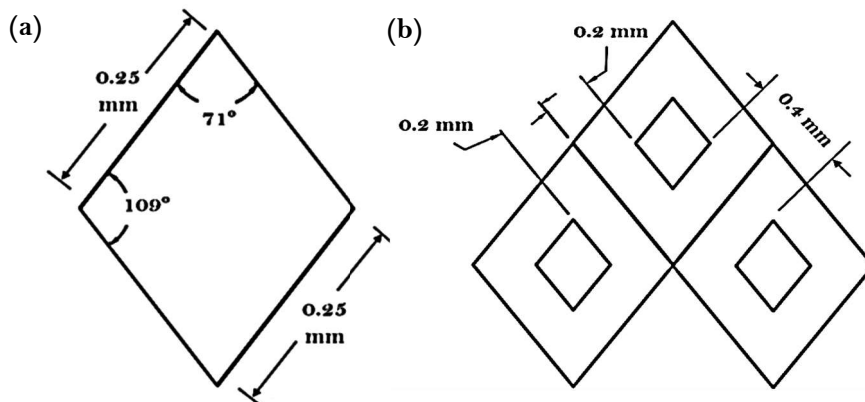
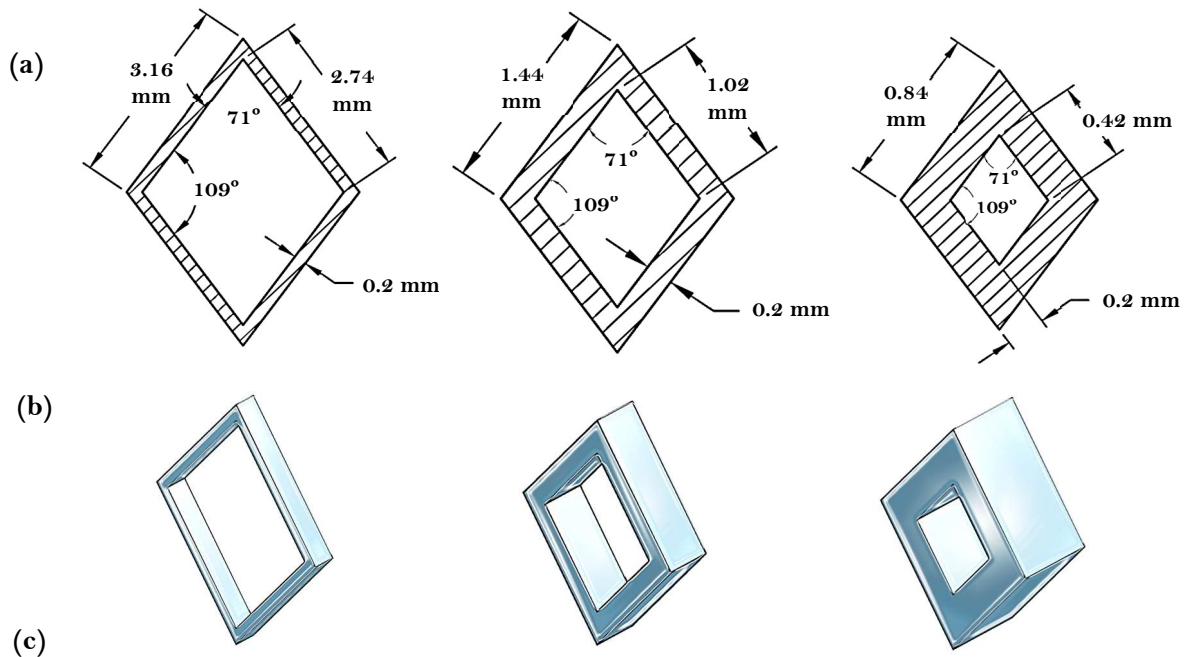


Figura 28. Caracterización y dimensión geométrica del rombo: (a) Diseño estructural con medidas principales y ángulos internos; (b) Definición dimensional del espesor de la figura.

Ya definido el modelo estructural, se procedió a ajustar la escala de las entidades de la figura geométrica con el fin de establecer adecuadamente el espesor (zona sombreada) en función del porcentaje de relleno. Este procedimiento, al igual que en el apartado anterior, se basó en la relación entre área del rombo con agujero central (zona sombreada) y el área superficial total de la figura sea igual a los valores del porcentaje de relleno evaluados (25%, 50% y 75%) conservando el espesor de la estructura geométrica durante el proceso de configuración de escala (**Figura 29**).

Ahora, con el modelo estructural del rombo en función del porcentaje de relleno, se realizó una matriz lineal para diseñar la probeta para el ensayo de impacto y compresión. De esta manera, se diseñaron 3 probetas con 25%, 50% y 75% de relleno con el patrón bioinspirado en la morfología natural del bambú para cada modo de trabajo (compresión e impacto) como se muestra en las **Figuras 30,31**.



Área superficial con agujero central	2.356219	0.984219	0.507219
Área superficial total	9.422447	1.965527	0.676000
Porcentaje de relleno	0.2500 (25%)	0.5007 (50%)	0.7503 (75%)

Figura 29. Análisis dimensional de la figura geométrica (rombo) para cada porcentaje de relleno: (a) Medidas de las aristas con un espesor superficial fijo de 0.2 mm; (b) Vista isométrica del rombo con 25%, 50% y 75% de relleno respectivamente; (c) Relación entre área superficial total y área superficial con agujero central en la definición y validación del porcentaje de relleno.

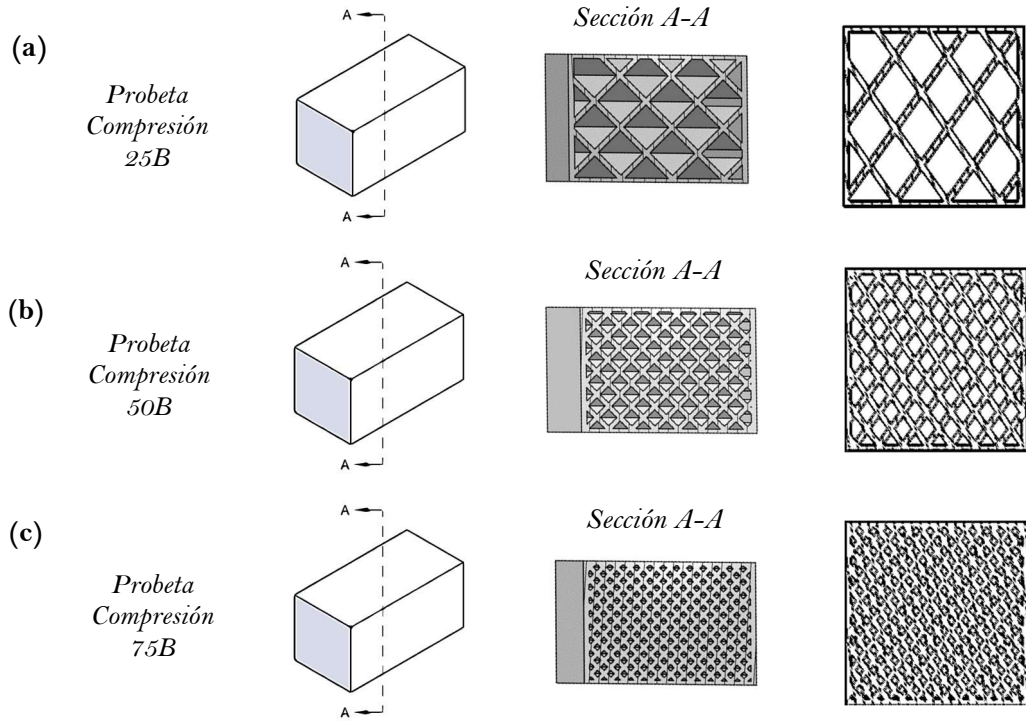


Figura 30. Vista de la sección transversal de la probeta para ensayo de compresión con patrón bioinspirado en el bambú y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.

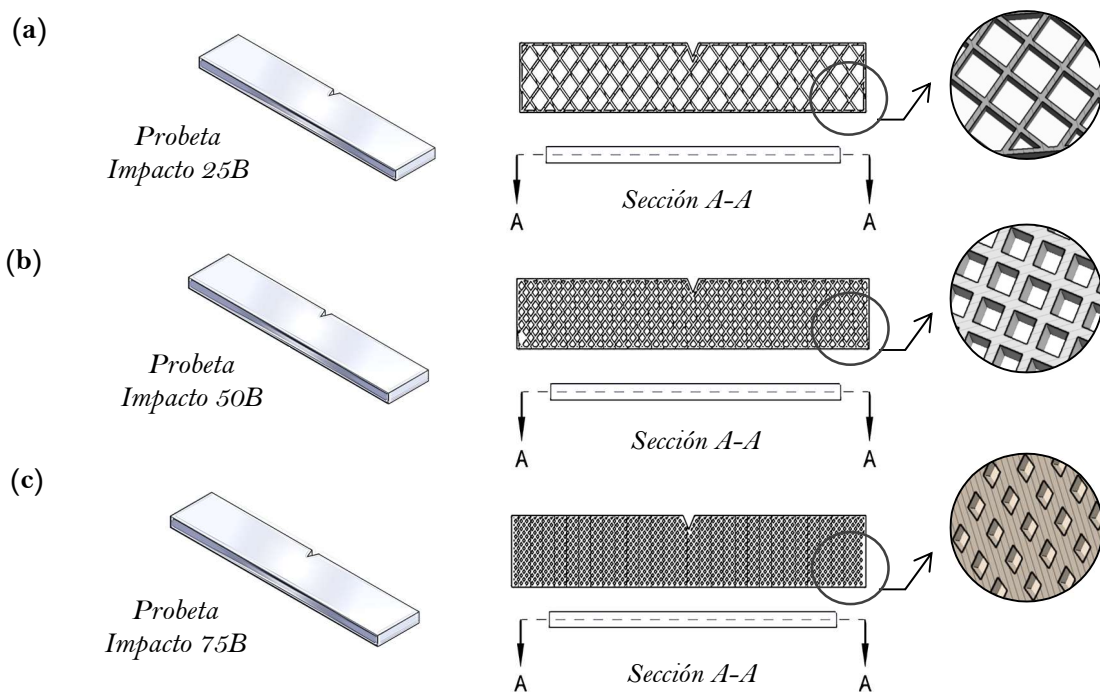


Figura 31. Vista de corte de la probeta para ensayo de impacto Izod por plano longitudinal con patrón bioinspirado en el bambú y su respectivo porcentaje de relleno: (a) 25%; (b) 50%, (c) 75%.

7.4. Proceso de Impresión 3D

Según lo mencionado en la sección **6.3.3**, la fase de impresión se dividió en tres etapas, es decir, inicialmente se imprimieron dos lotes, cada uno con 18 probetas de impacto (6 por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno) y posteriormente, se imprimieron 36 especímenes para el ensayo de compresión. En la **Figura 32** se evidencian las muestras impresas para el ensayo de compresión e impacto.

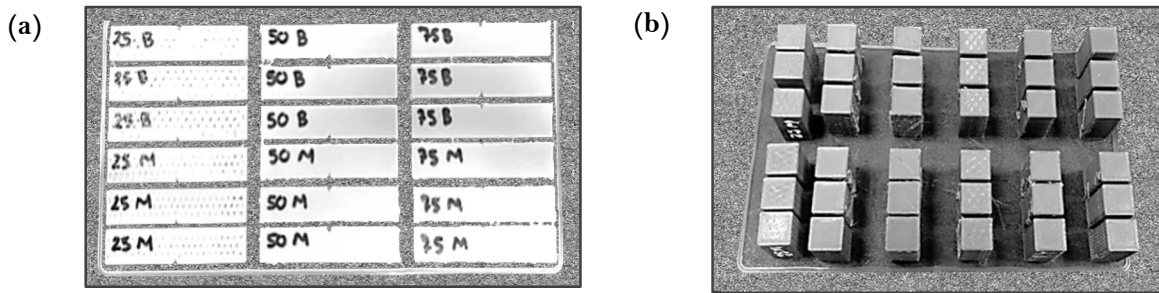


Figura 32. Probetas impresas con filamento PLA para ensayos mecánicos: (a) Impacto; (b) Compresión.

Por otra parte, cabe resaltar que en la **Figura 32a** se puede observar que las probetas están marcadas con un sufijo particular que corresponde al porcentaje de relleno (25%, 50% y 75%) y la letra inicial del biomaterial seleccionado para la adaptación de su microestructura natural en el patrón de relleno de los especímenes evaluados. Por lo tanto, las muestras fueron designadas como '25M, 50M y 75M', si contaban con un porcentaje de 25%, 50% y 75% de relleno con el patrón bioinspirado en la madera (M) y de igual forma, las probetas marcadas como '25B, 50B y 75B' hacían referencia a las muestras impresas con los diferentes porcentajes de relleno y el patrón bioinspirado en el bambú (B). Estas mismas designaciones fueron aplicadas para ambas clases de probetas de ensayo.

7.5. Análisis de caracterización física de las probetas impresas

A partir de los resultados de la densidad aparente de cada una de las probetas de compresión e impacto (**Apéndice B, Tablas B3,B4**), se estableció la densidad aparente promedio para cada combinación de porcentaje y patrón de relleno en función de la propiedad mecánica evaluada (**Apéndice B, Tablas B5,B6**).

7.5.1. Probetas de compresión

En la **Figura 33** se evidencia que las muestras de 75% de relleno con ambos patrones bioinspirados en los materiales naturales en consideración (Madera – bambú), exhibieron una mayor densidad aparente promedio en comparación con las otras muestras ensayadas. Esto se debe a que, al aumentar la densidad de relleno, se reduce el área superficial de vacíos incrementando la cantidad de material ocupado generando así, que la muestra sea más densa. Por otro lado, se puede

observar que las muestras 25M y 25B presentan una densidad volumétrica promedio muy similar con una diferencia de 17.18 kg/m^3 mientras que las muestras 75B y 75M presentan una variación significativa de 352.45 kg/m^3 , donde el espécimen de 75M obtuvo una mayor densidad aparente promedio (1315.56 kg/m^3) con relación a las otras muestras.

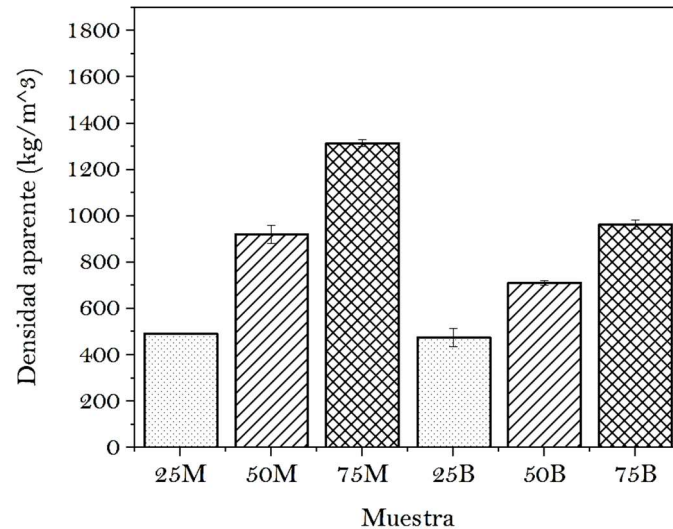


Figura 33. Densidad aparente promedio de las seis muestras de compresión por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno.

En este sentido, se podría decir que las muestras 25M y 25B no presentan diferencias significativas independientemente del patrón de relleno; no obstante, si se aumenta el porcentaje de relleno progresivamente, la densidad volumétrica de las muestras empezará a incrementar de forma proporcional a la cantidad de material agregado; de manera que, el área equivalente de vacíos, la cantidad de poros y la composición geométrica del patrón de relleno comenzarán a influir significativamente en la densidad aparente de los especímenes como se evidencia en las muestras 75M y 75B, que a pesar de que tiene el mismo porcentaje de relleno, existe una diferencia considerable en la densidad volumétrica de ambas muestras.

7.5.2. Probetas de Impacto

En la **Figura 34** se observa que la muestra de 75M obtuvo una mayor densidad aparente (1244.943 kg/m^3) con respecto a las otras muestras. Además, se evidencia que, al incrementar el porcentaje de relleno en cada una de las combinaciones de los parámetros de impresión en consideración, la densidad aparente aumenta. Sin embargo, al igual que en el análisis del apartado anterior, es importante resaltar que, las muestras de 25M y 25B presentaron una diferencia mínima de 18.67 kg/m^3 mientras que las muestras de 75M y 75B obtuvieron una variación de significativa de 215.50 kg/m^3 .

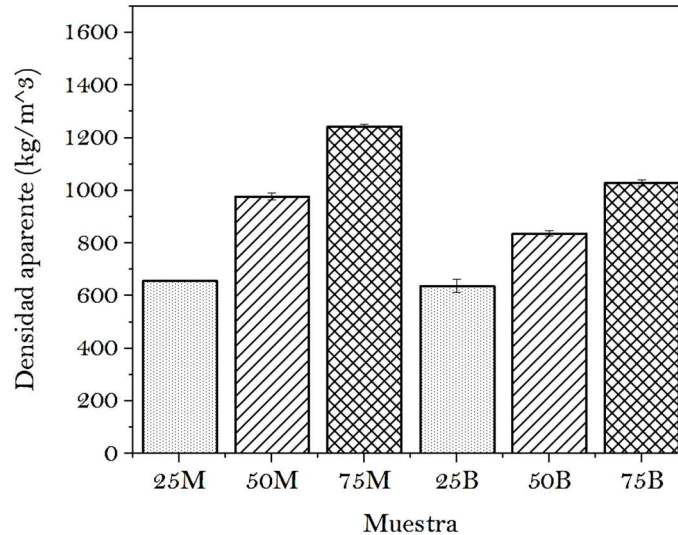


Figura 34. Densidad aparente promedio de las seis muestras de impacto por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno.

Con base en este análisis, se podría decir que, al tener un porcentaje de relleno mínimo, la densidad aparente de las muestras impresas en consideración no presentará diferencias significativas siendo muy similares, pese a la variación del patrón de relleno, en cambio, si el porcentaje de relleno aumenta, el área equivalente de vacíos empieza a disminuir y la composición geométrica del patrón de relleno comenzará a afectar sustancialmente la densidad de volumétrica. Por lo tanto, al incrementar el consumo de material, la forma geométrica del patrón de relleno varía la cantidad de espacio que ocupa, contribuyendo al cambio del área equivalente de vacío, la cual determina qué tan densa es la muestra evaluada.

7.6. Caracterización mecánica de las probetas impresas

Se analizó la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la energía absorbida por cargas de impacto con el ánimo de evaluar la influencia del porcentaje y el patrón de relleno en la relación de las propiedades mecánicas y la densidad de los especímenes impresos.

7.6.1. Propiedades a compresión

7.6.1.1. *Diagrama esfuerzo- deformación de las muestras ensayadas.*

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 35**).

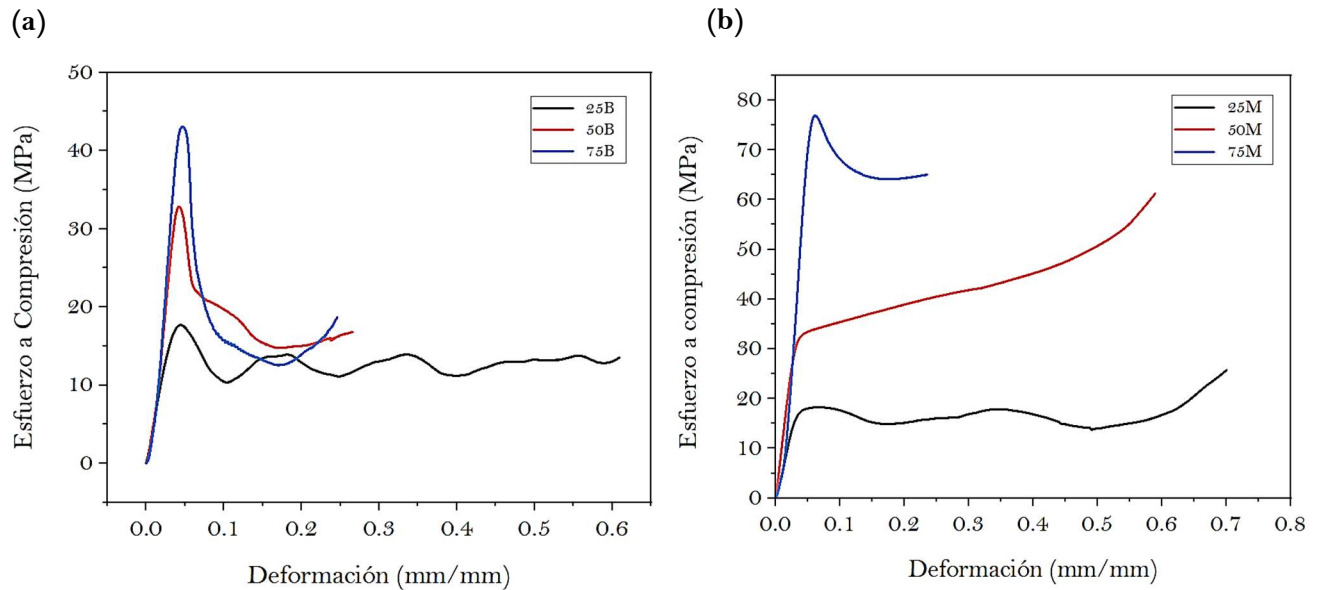


Figura 35. Curvas representativas de esfuerzo – deformación: (a) Muestras 25B, 50B y 75B; (b) Muestras 25M, 50M y 75M.

En la **Figura 35a** se puede observar que la muestra de 25% de relleno exhibe mayor deformación plástica a diferencia de las muestras de 50% y 75% de material. Esto podría ser debido a que las probetas de 25% de relleno presentan mayor área equivalente de vacío y a medida que la carga de compresión va aumentando hay mayor grado de libertad de deformación, en cambio, en las muestras de 50% y 75% de material, este efecto se ve minimizado debido a que estas muestras tienen una densidad de relleno superior generando que el área equivalente de vacío se reduzca aumentando la rigidez estructural la cual afecta la deformación de la muestra. Por otra parte, se puede evidenciar que, cuando la muestra de 75% de relleno alcanza el esfuerzo máximo a compresión, inmediatamente, este esfuerzo disminuye considerablemente a diferencia de las muestras de 25% y 50%.

En la **Figura 35b** se puede evidenciar que la muestra de 75% de relleno obtuvo un mayor esfuerzo bajo cargas de aplastamiento, a diferencia de las otras probetas. Por otra parte, se observa que, aparentemente una similitud en el esfuerzo máximo a compresión de la muestra 25M y 25B a una deformación unitaria aproximadamente del 5%.

Adicionalmente, se puede visualizar que, después de alcanzar el esfuerzo máximo a compresión, a una deformación del 10%, la resistencia a cargas de aplastamiento de la muestra 75B reduce un 37% con relación al valor máximo, en cambio en la probeta 75M, disminuyó un 9%. Con base en lo anterior, se puede inferir que la muestra 75M tiene mayor capacidad de soportar el esfuerzo a compresión.

7.6.1.2. Análisis de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

Ahora bien, a partir de la **Tabla C2 (Apéndice C)** que muestra los resultados de las propiedades intrínsecas a compresión (resistencia a compresión y módulo de elasticidad), se realizaron los gráficos de la **Figura 36**.

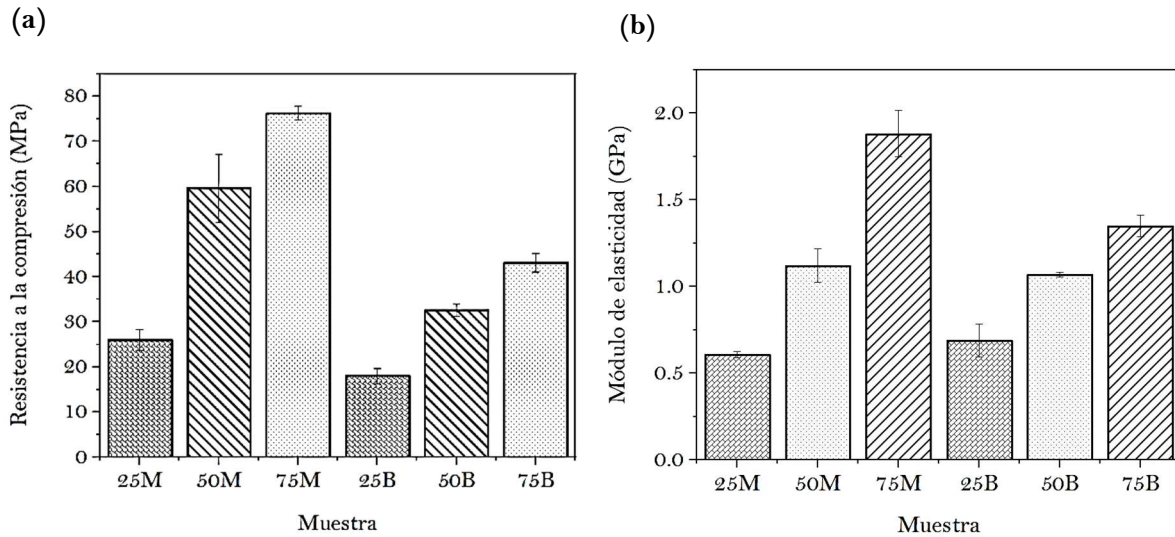


Figura 36. Propiedades a compresión: (a) Resistencia a la compresión; (b) Módulo de elasticidad.

En la **Figura 36a** se compara la resistencia a la compresión para los diferentes patrones de relleno (Madera-Bambú) con porcentaje de relleno del 25%, 50% y 75%, lo que muestra una diferencia considerable entre la resistencia a cargas de aplastamiento de las muestras ensayadas. En este sentido, se puede observar que la probeta 75M presentó una mayor de resistencia a la compresión con un valor promedio de 76.28 MPa a diferencia de la muestra 25B con un valor promedio más bajo (18.0 MPa) en relación con las otras probetas. Esto se debe a que, al aumentar el porcentaje de relleno, la resistencia a compresión mejora [76].

Ahora, a pesar de que las muestras 75M y 75B tenían el mismo porcentaje de relleno, la probeta 75B tuvo una disminución del 57% en la resistencia a la compresión con relación a la muestra 75M. Este hallazgo se debe a que el rendimiento mecánico de cada patrón de relleno depende el número de puntos de apoyo [77], es decir, la figura geométrica que compone el patrón de relleno de la muestra 75M (hexágono) cuanta con 6 puntos de apoyo mientras que el patrón de relleno de la probeta 75B compuesta por rombos presenta 4 puntos de apoyo. Por lo tanto, la muestra 75M tiene una mayor resistencia mecánica y estabilidad estructural ante cargas de compresión.

Este mismo análisis se evidencia en la **Figura 36b**, donde la muestra 75M registró un módulo de Young promedio máximo de 1.882 GPa mientras que el espécimen de 25M mostró un valor inferior de 0.607 GPa con respecto a las otras muestras. Esto quiere decir que, la muestra 75M tiene mayor rigidez estructural frente a las demás probetas debido al alto porcentaje de relleno y el tipo de patrón de relleno que posee porque al igual que la **Figura 36a**. La muestra 75B tiene el

mismo porcentaje de relleno, sin embargo, la composición estructural interna de la muestra afecta sustancialmente en el módulo elástico.

En este orden de ideas, se puede concluir que la adición de la cantidad de relleno aumenta el módulo de Young y disminuye el límite elástico y el tipo de patrón de relleno impacta en las propiedades mecánicas en función del incremento del porcentaje [76,77]. Para validar en detalle, lo mencionado anteriormente se realizó un análisis ANOVA de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad con respecto al porcentaje y patrón de relleno (**Tablas 11,12**) a partir de comparaciones por pares mediante el método de Tukey. Este método indica que si los factores no comparten la misma letra tienen diferencias significativas.

Tabla 11. Agrupación de la resistencia a la compresión promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
75M	6	76.276	A
50M	6	59.61	B
75B	6	43.113	C
50B	6	32.568	D
25M	6	25.969	E
25B	6	17.997	F

Tabla 12. Agrupación del módulo elástico promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
75M	6	1.8824	A
75B	6	1.3504	B
50M	6	1.1210	C
50B	6	1.06885	C
25B	6	0.6884	D
25M	6	0.60722	D

En este sentido, en la **Tabla 11** se puede observar que las todas muestras difieren sustancialmente en la resistencia a la compresión, en cambio en la **Tabla 12**, las probetas 25M y 25B no presentan diferencias significativas; esto se puede evidenciar en las **Figuras 35a,b** y en la **Figura 36b**. Lo mismo se observa en las muestras 50M y 50B. Con base a lo anterior, se puede inferir que una probeta con 25% y 50% de relleno y con un patrón bioinspirado en la madera tendrá una rigidez estructural muy similar a una probeta con el mismo porcentaje de relleno con un patrón bioinspirado en el bambú. A diferencia de los especímenes de 75M y 75B que tienen diferencias considerables, por lo tanto, el tipo de patrón de relleno influye notablemente en el módulo elástico de la muestra.

7.6.1.3. Análisis de la resistencia a la compresión y módulo elástico con respecto a la densidad aparente

En la **Figura 37** se observa las propiedades específicas promedio a compresión con base a las **Tablas D2,D3 (Apéndice D)**.

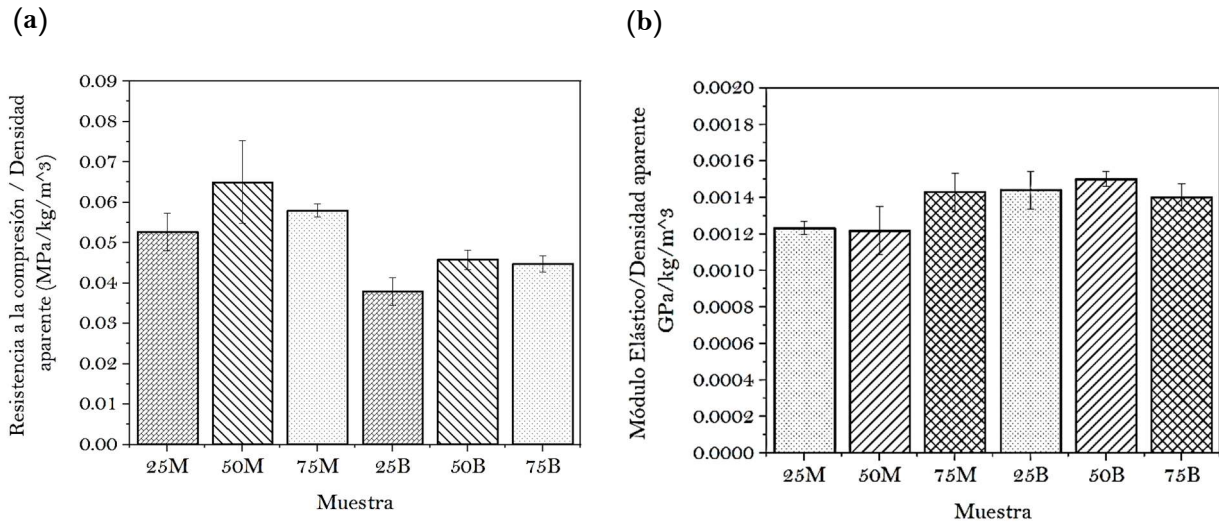


Figura 37. Propiedades específicas a compresión: (a) Resistencia a la compresión/densidad aparente; (b) Módulo de elasticidad/densidad aparente.

En la **Figura 37a** se evidencia que la muestra 50M tiene una relación entre la resistencia a cargas de compresión ligeramente superior con 0.065 MPa/kg/m^3 , sin embargo, con respecto a la muestra de 75M, la diferencia porcentual de esta propiedad específica a compresión entre estas dos muestras es mínima (9%). Además, se puede observar que las muestras 50B y 75B presentan una relación propiedad/densidad aparente semejante.

Por otro lado, en la **Figura 37b** la muestra 50B obtuvo una relación máxima entre el módulo elástico y la densidad volumétrica ($0.0015 \text{ GPa/kg/m}^3$), no obstante, se puede observar que existe similitud en esta propiedad específica a compresión en un número considerable de probetas. Por este motivo, es necesario realizar el análisis ANOVA por medio del método de comparación Tukey para cada de las propiedades específicas a compresión (**Tablas 13,14**).

Tabla 13. Agrupación de la resistencia a la compresión/densidad aparente promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
50M	6	0.06502	A
75M	6	0.057993	A B
25M	6	0.05268	B C
50B	6	0.045805	C D
75B	6	0.044772	C D
25B	6	0.03792	D

Tabla 14. Agrupación del módulo elástico/densidad aparente promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
50B	6	0.001503	A
25B	6	0.001443	A
75M	6	0.001431	A
75B	6	0.001403	A
25M	6	0.001232	B
50M	6	0.001219	B

En la **Tabla 13** se puede evidenciar que las muestras 50B y 75B no tienen diferencias significativas en la relación de la resistencia a la compresión/densidad aparente. Esto quiere decir que al evaluar la resistencia a compresión de una muestra de 50B va a tener el un comportamiento similar a una probeta de 75B, pero con 25% menos de material. Al igual que la muestra 25M y el par de muestras de 50B y 75B, donde no existen diferencias relevantes en la propiedad específica en consideración. De tal forma que una muestra con 25% de relleno y un patrón bioinspirado en la madera ofrece una resistencia a compresión similar a una muestra de 50% y 75% de relleno con un patrón diferente, a un bajo peso.

Por otro lado, en la **Tabla 14** se puede deducir que la muestra de 25B tiene una rigidez estructural equivalente a una muestra de 50B, 75B y 75M con un porcentaje de relleno mínimo. De igual forma con la muestra 25M que no presenta diferencias significativas con una probeta 50M.

Por lo tanto, la selección de la mejor combinación de porcentaje y patrón de relleno para obtener una buena resistencia a la compresión depende de la aplicación que se requiera una parametrización específica de estas dos variables de interés. Si se requiere una buena resistencia, pero sin consumir mucho material se puede implementar un 50% de relleno con un patrón bioinspirado en la madera, pero si se desea una excelente rigidez estructural sin importar su densidad de relleno se puede seleccionar un porcentaje 75% conservando el mismo patrón de relleno. Al igual que si se requiere una cantidad de material mínima con una resistencia a cargas de aplastamiento aceptable se puede utilizar un porcentaje de 25% de relleno con patrón bioinspirado en la madera. De igual forma sucede con el análisis del módulo elástico y la densidad

aparente, según la necesidad que se desea solventar, se puede implementar un patrón de relleno mínimo (25%) para garantizar la estabilidad estructural sin tener que aumentar la cantidad de material, reduciendo el tiempo de fabricación y el consumo energético por las horas de impresión.

7.6.2. Propiedades a Impacto

7.6.2.1. *Análisis de la energía absorbida por cargas de Impacto y su relación con la densidad aparente*

A partir de los datos obtenidos en la prueba de impacto Izod (**Apéndice C, Tabla C3**), se determinaron los valores de la energía absorbida durante el ensayo (**Apéndice C, Tabla C4**) y posteriormente se definió la relación promedio entre la energía absorbida y la densidad aparente de las muestras ensayadas (**Apéndice D, Tabla D6**). En la **Figura 38** se muestra gráficamente la propiedad intrínseca y específica a impacto en función del porcentaje y patrón de relleno de las probetas impresas.

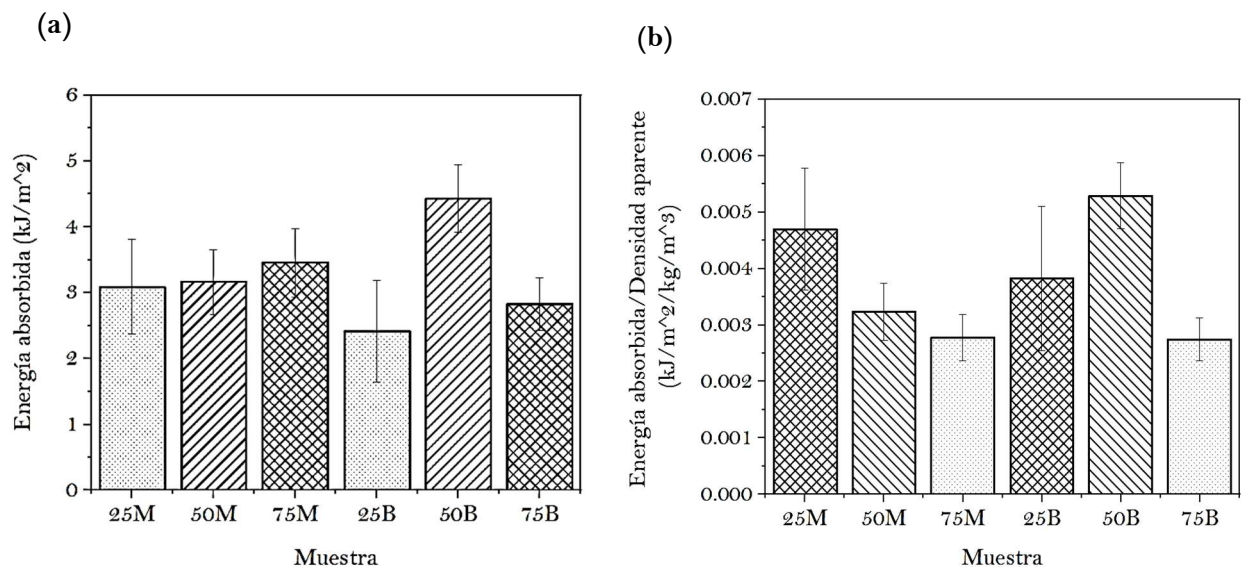


Figura 38. Propiedades a Impacto en función del porcentaje y patrón de relleno: (a) Energía absorbida por cargas de impacto; (b) Energía absorbida/densidad volumétrica.

En la **Figura 38a** se observa que las probetas con el patrón de relleno bioinspirado en la madera (25 M, 50M y 75M) tienen valores similares en cuanto a la energía absorbida. En cambio, se pueden evidenciar diferencias considerables entre las probetas con el patrón de relleno basado en la morfología del bambú (25B, 50B y 75B), donde la muestra 50B mostró una mayor cantidad de absorción de energía (4.43 kJ/m^2) a diferencia de la probeta 25B que obtuvo el valor mínimo (2.42 kJ/m^2).

En cambio, en la **Figura 38b** se puede observar que la relación entre la energía absorbida y la densidad volumétrica muestran resultados con diferencias notables. Adicionalmente, las combinaciones de porcentaje y patrón de relleno más favorables de tal forma que brinden una propiedad a impacto mejorada en relación con la densidad de relleno son las probetas 50B y 25M.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario implementar el análisis ANOVA (por medio del método de Tukey) para evaluar las distintas comparaciones entre las combinaciones de patrón y porcentaje de relleno e identificar diferencias significativas con base a las **Tablas 15,16**.

Tabla 15. Agrupación de la energía absorbida promedio utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
50B	5	4.433	A
75M	6	3.456	A B
50M	6	3.164	B C
25M	6	3.085	B C
75B	6	2.829	B C
25B	6	2.415	C

Tabla 16. Agrupación de la relación promedio entre energía absorbida y la densidad aparente utilizando el método de Tukey con un 95% de confianza

Factor	N	Promedio	Grupos
50B	5	0.005291	A
25M	6	0.004699	A B
25B	6	0.003824	B C
50M	6	0.003238	C
75M	6	0.002775	C
75B	6	0.002747	C

En la **Tabla 15** se observa que las probetas 25M, 50M y 75M no tienen diferencias significativas, al contrario, estas tienen un comportamiento similar con respecto a la energía que absorben, y con estos datos se podrá realizar un estudio y aparentemente se hallará la combinación más eficaz. Sin embargo, para las muestras de bambú, se puede notar que el resultado de esta energía absorbida varía, teniendo teóricamente la combinación deseada para los procesos que se llevarían a cabo que es 50% B, seguido de 75% B y por último una diferencia notable entre las demás probetas, el 25% B obtiene la menor cantidad de energía absorbida haciéndola posiblemente la combinación menos aceptable y recomendable.

Así mismo, en la **Tabla 16** se evidencia que en la muestra de 75% , el tipo de patrón de relleno no influye significativamente en la variación de la propiedad específica a impacto. Adicionalmente, la muestra 25M y 75M presenta diferencias significativas, de este modo, implementar un patrón de 25% de relleno con un patrón bioinspirado en la madera incrementa la energía absorbida pese a que tenga un porcentaje de relleno 15% menos que la probeta 75M conservando el mismo patrón de relleno. Por otra parte, se puede apreciar que probetas 50B y 25M tienen un comportamiento similar con relación a la propiedad específica a impacto.

En este orden de ideas, se podría inferir que el aumento del porcentaje de relleno no contribuye a la mejora de las propiedades de impacto, al contrario, disminuye el grado de deformación del material reduciendo la cantidad de energía absorbida. Por esta razón, es importante analizar la de la zona de fractura de las probetas 50B y 75B por medio de cortes en la sección transversal extraídas de SolidWorks e imágenes obtenidas por el estereoscopio (**Figura 39**).

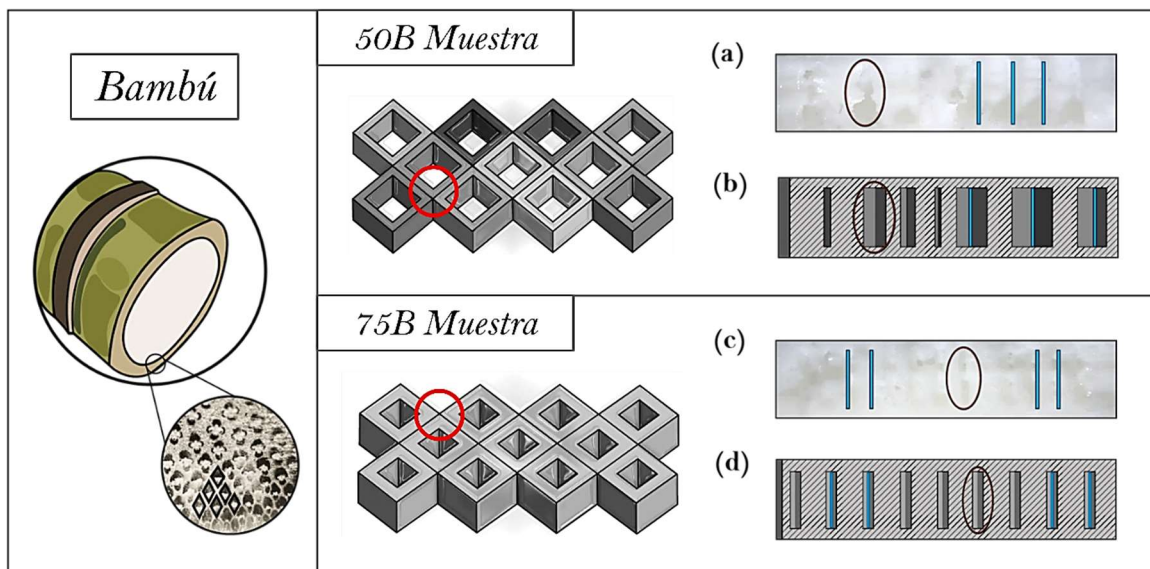


Figura 39. Análisis estructural de las probetas 50B y 75B respectivamente: (a,c) Zona de fractura observada con microscopía óptica; (b,d) Corte transversal de la zona de fractura de las muestras.

En la **Figura 39b** se observa la sección trasversal del modelo 3D de la muestra 50B, mediante un corte en la zona de fractura de la probeta ensayada. Aquí es posible observar la forma del patrón en dicha zona, que coincide con la zona de fractura de la probeta (**Figura 39a**). También, se evidencia una columna en la parte de atrás del patrón (línea azul); dicha columna también se observa en las muestras 75B (**Figuras 39c y 39d**) y se denominó en este trabajo “punto de apoyo” (círculos rojos).

La disposición de los puntos de apoyo, que se encuentran más alejados de la zona de fractura en 50B, que en las muestras 75B, parecen generar un efecto de rigidización en las muestras que incrementa con la cercanía de los puntos de apoyo a la zona de fractura; lo que implica una menor

cantidad absorbida en muestras 75B, que en las 50B. En la **Figura 40**, se analiza en detalle la hipótesis propuesta.

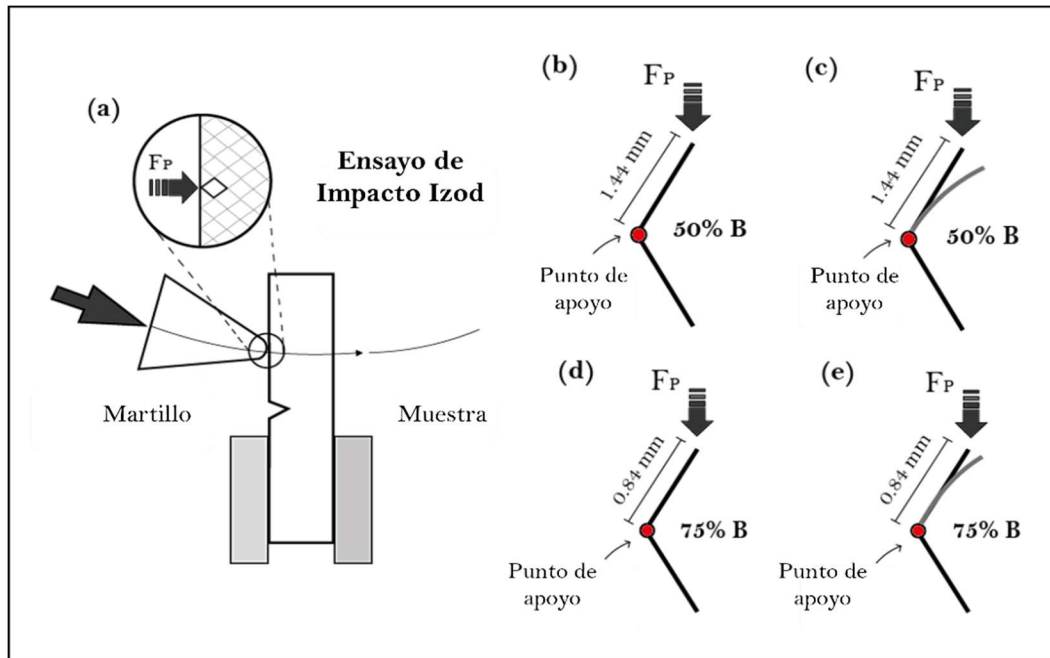


Figura 40. Análisis de deformación del biopatrón referente al bambú en la prueba de Impacto Izod: (a) Fuerza aplicada (F_P) por el péndulo, (b) muestra de 50% de relleno (50B), (c) deflexión generada por la fuerza en 50B, (d) muestra de 75% de relleno (75B) y (e) deflexión generada por la fuerza en 75B.

En las **Figuras 40a** y **40b** se presenta una representación esquemática de la acción de la fuerza de impacto sobre el patrón de impresión de las muestras bioinspiradas en el bambú. Se observa que el punto de apoyo se encuentra a 1.44 mm de distancia del origen de la fuerza del péndulo (F_P), lo cual provoca que las paredes de la muestra se flecten más debido al momento aplicado y al espacio disponible (**Figura 40c**). Esto resulta en una mayor deformación plástica y, en consecuencia, en una mayor absorción de energía. Este efecto se replica en todos los elementos del patrón en la zona de fractura. Esta observación es corroborada en la **Figura 40a**, donde se evidencia una significativa deformación plástica en la zona de fractura (señalada en un óvalo).

Por otro lado, la estructura de 75B es más cerrada y presenta una distancia de 0.84 mm entre el punto de apoyo y la fuerza ejercida, lo cual podría restringir el movimiento y/o deflexión de las paredes del patrón de impresión. Esto se refleja en un incremento de la rigidez de las probetas y una disminución de la energía absorbida por impacto. Esta relación se puede observar en la **Figura 40c**, donde la evidencia de deformación plástica de los elementos estructurales del patrón con 75% de relleno es menor en comparación con las muestras con 50% de relleno.

Ahora bien, con respecto a lo anterior es importante realizar este mismo análisis para el patrón bioinspirado en la madera (**Figura 41**).

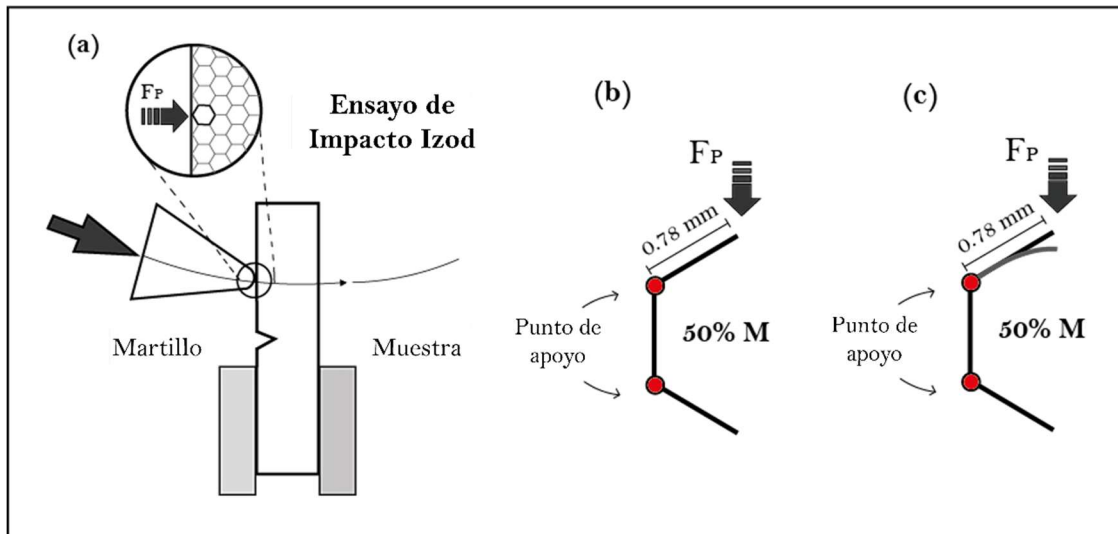


Figura 41. Análisis de deformación del biopatrón referente a la madera en la prueba de Impacto Izod: (a) Carga aplicada F_P por el péndulo en la (a) probeta de 50% de relleno (50M) y su (c) reacción frente a la fuerza (F_P)

En la **Figura 41a** se observa el patrón de madera que se usó como base para la realización de la probeta en donde se analizará a continuación el comportamiento de la fuerza del péndulo que se acciona en la parte superior atravesando la mitad de la zona de fractura.

En la **Figura 41b** se puede apreciar nuevamente el patrón principal con el que se realizaron las pruebas. En este caso se puede observar que contiene dos puntos de apoyo y la distancia entre los puntos de apoyo y la fuerza ejercida por el péndulo es de 0.78 mm . Con esta longitud reducida se intuye que la probeta de 50% de relleno y patrón de relleno bioinspirado en la madera podría alcanzar una mayor rigidez estructural presentando menor grado de deformación plástica, por lo tanto, su capacidad de absorción de energía será mínima.

Por otro lado, en la **Figura 41c** se puede evidenciar cómo el material experimenta una pequeña deformación antes de fracturarse por completo. A partir de este punto, los patrones posteriores indicarán la forma en que se produce la fractura y cómo se distribuyen las fuerzas en la probeta.

Es importante destacar que los resultados de las propiedades específicas a impacto de las probetas de 50M y 75M tienen una similitud aparente, es decir no tienen diferencias significativas entre sí como se evidencia en la **Tabla 16**, teniendo en cuenta lo explicado anteriormente.

8. Conclusiones

La proliferación de las tecnologías de impresión 3D en diferentes sectores industriales (automotriz, electrónico, aeroespacial, biomédico, entre otros) ha remodelado los paradigmas de la fabricación tradicional permitiendo acelerar los ciclos de producción, disminuir el tiempo de elaboración y la personalización de productos con geometría compleja. Además, es una herramienta ideal en la creación de prototipos simples y elaborados a partir de la innovación tecnológica y la adaptabilidad estructural. Sin embargo, la fabricación de múltiples piezas en organizaciones empresariales y educativas genera la acumulación de grandes cantidades de desechos plásticos, derivados de errores de impresión, errores de diseño, material de soporte, entre otros, que están directamente asociados a los efectos adversos de los parámetros de impresión 3D.

Ahora, frente a este escenario, la biomimética ha sido propuesta por expertos en el campo de la ingeniería y el diseño, como una solución sostenible y eficiente para incorporar estructuras de materiales biológicos en la composición interna de la pieza impresa, con el propósito de fabricar nuevos modelos bioinspirados con excelente estabilidad estructural, alta resistencia y baja densidad, mediante la optimización de los parámetros de impresión 3D relacionados con el consumo de material, sin sacrificar el desempeño mecánico y/o estructural de productos impresos. Por esta razón, en esta investigación se estudió la influencia del patrón y porcentaje de relleno en las propiedades mecánicas de piezas modeladas por deposición fundida (FDM) en función de la densidad.

Considerando lo expuesto, se pueden destacar las siguientes conclusiones a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo:

- La caracterización morfológica de biomateriales porosos con atributos estructurales excepcionales (Madera de pino silvestre y el bambú) mejoran la absorción de energía y la resistencia a la compresión con el beneficio adicional de reducir el peso de la pieza impresa debido a la baja densificación por la presencia de espacios vacíos con bajo porcentaje de material biológico, lo cual es determinante en la tenacidad del producto 3D.
- La muestra de 75M exhibió una mayor resistencia a la compresión (76.28 MPa) en comparación con la muestra de 25B con una diferencia del 76%. De igual modo, la muestra de 75M registró un módulo elástico superior de 1.882 GPa mientras que el espécimen de 25M mostró un valor inferior de 0.607 GPa con una diferencia de 68%. Por lo tanto, al aumentar el porcentaje de relleno, la resistencia a cargas de aplastamiento, la rigidez estructural y la estabilidad dimensional de muestras de PLA mejoran considerablemente.
- La muestra de 75B presentó una disminución del 57% en la resistencia a la compresión con relación a la muestra de 75M. Esto se debe a que el patrón de relleno bioinspirado en la madera (Hexágono) cuenta con 6 puntos de apoyo que contribuyen a la estabilidad estructural ante cargas de compresión, de modo que, el rendimiento mecánico de cada patrón de relleno está asociado al número de apoyos que posee la composición geométrica bioinspirada.

- En las propiedades específicas a compresión, la muestra 50M presentó una mayor relación entre la resistencia a compresión y la densidad aparente del espécimen. Sin embargo, la muestra 25M no mostró diferencias significativas frente a muestras con mayor porcentaje de relleno (50B, 75B), por lo tanto, minimiza la cantidad de material utilizado garantizando buena resistencia a carga por aplastamiento. Mientras que, relación módulo elástico y densidad volumétrica, la muestra de 50B exhibió un mejor comportamiento mecánico en función de la densidad aparente, no obstante, no presentó diferencias notables con muestras de bajo porcentaje de relleno como la probeta 25B conservando el mismo patrón de relleno.
- La muestra con 50% de relleno y patrón bioinspirado en el bambú obtuvo propiedades a impacto superiores en comparación con las demás muestras, debido a que exhibió mayor deformación plástica por sus características estructurales y dimensionales en función de la densidad de relleno. Por lo tanto, si se requiere un material que tenga un alto nivel de absorción de energía, esta muestra es la indicada, no obstante, si necesita que el material sea más rígido (deformación mínima) se puede optar por un porcentaje de 75% de relleno, con un patrón bioinspirado en la madera.

Estos hallazgos afirman que el porcentaje y patrón de relleno, este último basado en referentes naturales, son factores cruciales para lograr una eficiencia óptima del material y el rendimiento mecánico deseado en los productos impresos modificando considerablemente la relación resistencia/peso. En resumen, es posible reducir el consumo de material adaptando nuevas morfologías naturales en el patrón de relleno de los materiales impresos. Ahora bien, es importante mencionar que la selección de la mejor combinación de porcentaje y patrón de relleno está directamente asociado a la aplicación en la que será utilizado el material que contará con esa combinación, debido a que la variación estos parámetros de impresión modifican sustancialmente el grado de deformación, la resistencia a la compresión, la cantidad de energía absorbida, la rigidez estructural y la estabilidad superficial en función de la densidad volumétrica del material impreso.

Apéndice A

Los pesos de importancia de los criterios de selección fueron establecidos a partir de una comparación por pares entre cada uno de ellos para definir un orden de prioridad dentro del método AHP (Tablas A1,A2) teniendo en cuenta los objetivos específicos de la presente investigación y la participación de expertos de diversos campos.

Tabla A1. Comparaciones pareadas de los criterios de selección

Más importante					Menos importante			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
C1-C2	C3	C4		C5				

Tabla A2. Matriz de comparación por pares de los criterios de selección

Comparaciones Pareadas	C1	C2	C3	C4	C5	Vector Propio	Proporción de Consistencia (PC)
C1	1	1	2	3	5	0.321	1 %
C2	1	1	2	3	5	0.321	
C3	1/2	1/2	1	2	4	0.188	
C4	1/3	1/3	1/2	1	3	0.116	
C5	1/5	1/5	1/4	1/3	1	0.053	
SUMA	3.033	3.033	5.750	9.333	18.000		

Por otro lado, los puntajes asignados a las cinco alternativas evaluadas en el AHP (Tabla 7) para replicar su composición microestructural en probetas para ensayo de compresión se evidencian en la Tabla A3. Es importante resaltar que la alternativa 1 tuvo el puntaje más alto con relación a la similitud entre la morfología natural del mismo (Figura 14b) con el patrón ‘Octeto’ presente en el software UltiMaker Cura 5.4.0 (Figura 10g), por esta razón, el nivel de dificultad para adaptar el patrón de natural del biomaterial en el proceso de diseño e impresión 3D es bajo.

En términos de resistencia bajo esfuerzos mecánicos, la alternativa 2 se clasificó con el mayor puntaje debido a que reporta una tenacidad a la compresión de 140.4 ± 32.2 MPa según con la literatura [56], mientras que la alternativa 1,3,4 y 5 presentan una resistencia a la compresión de 39.7 ± 4.5 MPa, 38.82 MPa y 44.90 MPa respectivamente [57,58,64].

Por otra parte, las alternativas 1 y 2 se les asignó el punto más bajo con relación al criterio 4 referente al nivel de accesibilidad al entorno natural para la obtención de muestras naturales de los biomateriales evaluados; la alternativa 1 está localizada en el océano pacífico occidental y el

océano indico, especialmente cerca de las islas Filipinas [65] y la alternativa 2 se origina en grandes árboles de especie *Bertholletia excelsa* localizados en los bosques de las cuencas de los ríos Amazonas, Negro y Orinoco [66]. Ahora, con relación al criterio 1 referente al porcentaje de vacíos evaluado con base al análisis de imágenes SEM/MicroCT-rayos X de cada alternativa (Figura 17), se evaluó la alternativa 3 y 4 con un puntaje más alto con respecto a la alternativa 1 y 2 ya que estas últimas registran un porcentaje de vacíos de 32.28% y 1.23% respectivamente en cambio la alternativa 3 y 4 cuentan con 52.66% y 54.95% de vacíos respectivamente.

Tabla A3. Evaluación de criterios por cada alternativa (Compresión)

Criterios	Alternativas			
	A1	A2	A3	A4
C1	0	0	1	1
C2	0	2	0	0
C3	0	2	1	0
C4	0	0	2	2
C5	2	0	0	0

En la **Tabla A4** se muestra las comparaciones pareadas entre los criterios de selección y las alternativas con base al puntaje definido en la **Tabla A3** estableciendo un nivel de importancia que tiene una alternativa con respecto a otra en función del criterio de selección evaluado. En decir, en la **Tabla A4** se observa que en el proceso de comparación entre las alternativas y el criterio 1, la alternativa 3 y 4 (A3, A4) tiene la misma connotación de importancia (están ubicados en la misma casilla) al igual que la alternativa 1 y 2 (A1, A2). Ahora, A3 y A4 son fuertemente más importante que A1 y A2 por estar ubicados siete posiciones detrás de A3 y A4 a diferencia de las comparaciones por par entre el criterio 3 y las alternativas donde A1-A4 son ligeramente más importantes que A3 al estar posicionados tres casillas delante de A3 según la escala de Saaty (**Tabla 5**). Este análisis se realiza de la misma manera con cada combinación de criterios y alternativas y con base a esto se construye las matrices de comparación por pares de las alternativas por cada criterio (**Tablas A5-A9**).

Tabla A4. Comparaciones pareadas entre criterios de selección y alternativas (Compresión)

Criterios	Más importante				Menos importante				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
C1	A3-A4				A1-A2				
C2	A2						A1-A3-A4		
C3	A1-A4		A3				A2		
C4	A3-A4						A1-A2		
C5	A1				A2-A3-A4				

En las **Tablas A5-A9** se evidencian los diferentes arreglos matriciales referente a las comparaciones por pares que se establecieron entre alternativas y criterios donde los valores de las comparaciones que están por debajo de la diagonal siempre serán el inverso de las comparaciones de la parte superior de la diagonal de la matriz (reciprocidad) [51]. Esto significa que, el nivel de importancia de un elemento es menor con respecto al otro. En la **Tabla A5**, las alternativas 1 y 2 son cinco veces menos relevantes (1/5) que las alternativas 3 y 4 ya que A1 y A2 están posicionados en cinco posiciones por detrás de A3 y A4, es decir que, A1 y A2 tienen un nivel de importancia superior que A3 y A4. Este mismo análisis aplica para las matrices de comparación por par entre las alternativas y los criterios 2,3,4 y 5, teniendo en cuenta la **Tabla A4**.

Tabla A5. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 1 (Compresión)

Criterio 1	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C1)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1	1/5	1/5	0.083	0 %
A2	1	1	1/5	1/5	0.083	
A3	5	5	1	1	0.417	
A4	5	5	1	1	0.417	
SUMA	12.000	12.000	2.400	2.400		

Tabla A6. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 2 (Compresión)

Criterio 2	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C2)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1/7	1	1	0.100	0 %
A2	7	1	7	7	0.700	
A3	1	1/7	1	1	0.100	
A4	1	1/7	1	1	0.100	
SUMA	10.000	1.429	10.000	10.000		

Tabla A7. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 3 (Compresión)

Criterio 3	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C3)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	7	3	1	0.394	3 %
A2	1/7	1	1/5	1/7	0.048	
A3	1/3	5	1	1/3	0.165	
A4	1	7	3	1	0.394	
SUMA	2.476	20.000	7.200	2.476		

Tabla A8. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 4 (Compresión)

Criterio 4	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C4)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1	1/7	1/7	0.063	0 %
A2	1	1	1/7	1/7	0.063	
A3	7	7	1	1	0.438	
A4	7	7	1	1	0.438	
SUMA	16.000	16.000	2.286	2.286		

Tabla A9. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 5 (Compresión)

Criterio 5	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C5)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	5	5	5	0.625	0 %
A2	1/5	1	1	1	0.125	
A3	1/5	1	1	1	0.125	
A4	1/5	1	1	1	0.125	
SUMA	1.600	8.000	8.000	8.000		

Es importante mencionar que para cada matriz de comparación se debe validar que la proporción de consistencia (PC) sea menor del 10% para que la matriz sea completamente consistente ($PC = 0$) o inconsistente admisible ($PC \leq 0.10$). De no ser así ($PC \geq 0.10$), se tiene que revisar las comparaciones pareadas y designar nuevamente del nivel de importancia entre criterios y/o alternativas con respecto a cada criterio según la escala de Saaty (Tabla 5).

Ahora, con base lo anterior se aplicó el método AHP en la selección de la alternativa más favorable de cinco alternativas evaluadas (Tabla 9) para emular su diseño microestructural en probetas impresas para el ensayo de impacto como patrón de relleno.

En la Tabla A10 muestra los valores de ponderación establecidos para cada alternativa con relación al criterio de selección. Cabe mencionar que las alternativas 1,2 y 4 se clasificaron con el puntaje más bajo debido a que presentar porcentajes de área equivalente de vacíos inferiores (14.56%, 7.52%, 5.41%); con relación a la alternativa 3 la cual registró un 46.44% de vacíos según el análisis de la imagen SEM del biomaterial (Figura 17c). En términos de la cantidad de energía absorbida bajo cargas de impacto se evaluó la alternativa 1 con el puntaje más bajo ya que exhibe una resistencia al impacto de 28 kJ/m² mientras que las otras alternativas es superior 50 kJ/m² (A2 = 75 kJ/m², A3 = 63.54 kJ/m² y A4 = 60 kJ/m²) [67-70].

Tabla A12. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 1 (Impacto)

Criterio 1	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C1)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1	1/5	1	0.125	0 %
A2	1	1	1/5	1	0.125	
A3	5	5	1	5	0.625	
A4	1	1	1/5	1	0.125	
SUMA	8.000	8.000	1.600	8.000		

Tabla A13. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 2 (Impacto)

Criterio 2	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C2)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1/5	1/5	1/5	0.063	0 %
A2	5	1	1	1	0.313	
A3	5	1	1	1	0.313	
A4	5	1	1	1	0.313	
SUMA	16.000	3.200	3.200	3.200		

Tabla A14. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 3 (Impacto)

Criterio 3	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C3)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	7	2	7	0.523	1 %
A2	1/7	1	1/6	1	0.066	
A3	1/2	6	1	6	0.345	
A4	1/7	1	1/6	1	0.066	
SUMA	1.786	15.000	3.333	15.000		

Tabla A15. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 4 (Impacto)

Criterio 4	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C4)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	9	1	9	0.450	0 %
A2	1/9	1	1/9	1	0.050	
A3	1	9	1	9	0.450	
A4	1/9	1	1/9	1	0.050	
SUMA	2.222	20.000	2.222	20.000		

Tabla A16. Matriz de Comparación directa por pares de las alternativas Vs Criterio 5 (Impacto)

Criterio 5	A1	A2	A3	A4	Vector Propio (C5)	Proporción de Consistencia (PC)
A1	1	1	1	1	0.250	0 %
A2	1	1	1	1	0.250	
A3	1	1	1	1	0.250	
A4	1	1	1	1	0.250	
SUMA	4.000	4.000	4.000	4.000		

Apéndice B

En las **Tablas B1,B2** se muestran los datos de masa de las muestras de compresión e impacto, que, junto con el volumen aparente previamente calculado (**en compresión:** 0.00000410 m^3 , **en impacto:** 0.00000241 m^3) se halló la densidad aparente de todas las probetas ensayadas (**Tablas B3,B4**).

Tabla B1. Masa de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.

No. Muestra	25M	50M	75M
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1	0.002014	0.003696	0.005369
2	0.002028	0.004104	0.005468
3	0.002018	0.003725	0.005341
4	0.002032	0.003740	0.005306
5	0.002010	0.003674	0.005453
6	0.002014	0.003723	0.005401
No. Muestra	25B	50B	75B
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1	0.001858	0.002947	0.004031
2	0.001860	0.002907	0.003799
3	0.001886	0.002862	0.003943
4	0.001951	0.002948	0.004003
5	0.002264	0.002861	0.003956
6	0.001876	0.002960	0.003941

Tabla B2. Masa de las muestras del ensayo de impacto en función del porcentaje y patrón de relleno.

No. Muestra	25M	50M	75M
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1	0.001568	0.002398	0.003022
2	0.001585	0.002336	0.003002
3	0.001586	0.002335	0.002999
4	0.001585	0.002396	0.003015
5	0.001577	0.002338	0.002981
6	0.001592	0.002335	0.002995
No. Muestra	25B	50B	75B
	Masa (kg)	Masa (kg)	Masa (kg)
1	0.001512	0.002034	0.002446
2	0.001658	***	0.002501
3	0.001515	0.002031	0.002491
4	0.001511	0.002018	0.002505
5	0.001504	0.001980	0.002449
6	0.001522	0.002037	0.002503

Tabla B3. Densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.

No. Muestra	25M	50M	75M
	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)
1	491.656	902.151	1310.424
2	495.073	1001.790	1334.711
3	492.535	909.278	1303.711
4	496.050	912.793	1295.070
5	490.729	896.805	1331.099
6	491.705	908.814	1318.357
No. Muestra	25B	50B	75B
	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)
1	453.504	719.299	983.947
2	454.090	709.633	927.366
3	460.265	698.624	962.564
4	476.156	719.690	977.039
5	552.680	698.453	965.737
6	457.971	722.521	962.003

Tabla B4. Densidad aparente de las muestras del ensayo de impacto en función del porcentaje y patrón de relleno.

No. Muestra	25M	50M	75M
	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)
1	650.112	994.284	1252.994
2	657.369	968.575	1244.950
3	657.825	968.036	1243.664
4	657.037	993.662	1250.091
5	654.052	969.529	1236.200
6	660.064	968.326	1241.757
No. Muestra	25B	50B	75B
	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Densidad aparente (kg/m ³)
1	626.808	8.434E+02	1014.313
2	687.598	***	1037.244
3	628.342	8.420E+02	1032.848
4	626.725	8.368E+02	1038.571
5	623.822	8.212E+02	1015.681
6	631.121	8.445E+02	1037.990

Es importante resaltar que la muestra No. 2 para el ensayo de impacto, se omitió en el análisis de resultados. Ahora bien, con base a los datos descritos en las **Tablas B3,B4** se determinó el valor promedio de la densidad aparente de las muestras de compresión e impacto en función del porcentaje y patrón de relleno junto con la desviación de estándar correspondiente (**Tablas B5,B6**).

Tabla B5. Densidad aparente promedio de las muestras del ensayo de compresión en función de porcentaje y patrón de relleno

Muestra	Densidad aparente (kg/m ³)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	492.958	2.1189
50M	921.939	39.5366
75M	1315.562	15.5090
25B	475.778	38.5701
50B	711.370	10.8512
75B	963.109	19.5667

Tabla B6. Densidad aparente promedio de las muestras del ensayo de impacto en función de porcentaje y patrón de relleno

Muestra	Densidad aparente (kg/m ³)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	656.077	3.499
50M	977.069	13.105
75M	1244.943	5.993
25B	637.403	24.705
50B	837.574	9.616
75B	1029.441	11.377

Apéndice C

En la **Tabla C1** se observa los datos de la resistencia a la compresión y módulo elástico para las 6 muestras de cada combinación de porcentaje y patrón de relleno, mientras que en la **Tabla C2** se evidencia los valores promedio de estas propiedades a compresión.

Tabla C1. Resistencia a la compresión y módulo elástico de las muestras 25M, 50M, 75M – 25B, 50B, 75B

No. Muestra	25M		50M		75M	
	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)
1	25.522	0.621	65.100	1.044	74.710	1.980
2	25.729	0.609	44.559	1.017	74.788	1.957
3	22.050	0.583	63.611	1.145	77.748	1.926
4	27.304	0.620	61.684	1.130	78.120	1.934
5	26.298	0.623	61.201	1.098	76.880	1.880
6	28.910	0.586	61.534	1.293	75.408	1.619
No. Muestra	25B		50B		75B	
	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)	Resistencia (MPa)	Módulo elástico (GPa)
1	19.087	0.665	32.829	1.068	43.710	1.398
2	17.700	0.573	31.806	1.053	43.059	1.398
3	18.375	0.656	33.945	1.087	39.339	1.248
4	15.261	0.733	33.480	1.058	45.384	1.378
5	20.178	0.854	33.155	1.087	43.757	1.385
6	17.382	0.650	30.194	1.060	43.431	1.296

Tabla C2. Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad promedio de cada muestra en función del porcentaje y patrón de relleno.

Muestra	Resistencia (MPa)		Módulo de Elasticidad (GPa)	
	Promedio	Desviación Estándar	Promedio	Desviación Estándar
25M	25.968	2.287	0.607	0.017
50M	59.614	7.526	1.121	0.097
75M	76.275	1.506	1.882	0.133
25B	17.997	1.675	0.688	0.095
50B	32.568	1.367	1.068	0.014
75B	43.113	2.013	1.350	0.063

Por otra parte, en la **Tabla C3** se puede apreciar los datos de la energía absorbida durante el ensayo de impacto Izod para las 6 muestras de cada combinación de porcentaje y patrón de relleno. Teniendo en cuenta estos datos, se halló el valor promedio de la energía absorbida en función de los parámetros de impresión en consideración (**Tabla C4**).

Tabla C3. Energía absorbida bajo cargas de impacto de las muestras 25M, 50M, 75M – 25B, 50B, 75B

No. Muestra	25M	50M	75M
	Energía absorbida (kJ/m ²)	Energía absorbida (kJ/m ²)	Energía absorbida (kJ/m ²)
1	2.469	3.243	3.710
2	3.770	3.053	3.350
3	4.138	3.226	4.361
4	2.560	3.237	3.194
5	2.492	2.348	3.222
6	3.078	3.876	2.896
No. Muestra	25B	50B	75B
	Energía absorbida (kJ/m ²)	Energía absorbida (kJ/m ²)	Energía absorbida (kJ/m ²)
1	2.574	4.164	2.97975
2	1.077	***	2.59609
3	2.699	4.260	3.29145
4	1.987	4.120	3.22181
5	3.125	4.277	2.26749
6	3.026	5.342	2.61729

Tabla C4. Energía absorbida promedio de cada muestra ensayada en función de porcentaje y porcentaje de relleno.

Muestra	Energía absorbida (kJ/m ²)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	3.085	0.719
50M	3.164	0.490
75M	3.456	0.516
25B	2.415	0.769
50B	4.433	1.867
75B	2.829	0.401

Apéndice D

En la **Tabla D1** se logra visualizar los datos obtenidos de la relación entre la resistencia a la compresión y la densidad de aparente para las 6 probetas por cada combinación.

Tabla D1. Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno.

No. Muestra	25M	50M	75M
	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)
1	0.0519	0.0722	0.0570
2	0.0520	0.0445	0.0560
3	0.0448	0.0700	0.0596
4	0.0550	0.0676	0.0603
5	0.0536	0.0682	0.0578
6	0.0588	0.0677	0.0572
No. Muestra	25B	50B	75B
	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)
1	0.0421	0.0456	0.0444
2	0.0390	0.0448	0.0464
3	0.0399	0.0486	0.0409
4	0.0320	0.0465	0.0465
5	0.0365	0.0475	0.0453
6	0.0380	0.0418	0.0451

En la **Tabla D2** se evidencia los valores de relación promedio de la resistencia a la compresión en función de la densidad aparente por cada combinación de los parámetros de impresión en consideración.

Tabla D2. Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad aparente promedio de cada muestra ensayada en función de porcentaje y porcentaje de relleno

Muestra	Resistencia/densidad aparente (MPa/kg/m ³)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	0.05268	0.00464
50M	0.06502	0.01021
75M	0.05799	0.00165
25B	0.03792	0.00343
50B	0.04580	0.00237
75B	0.04477	0.00207

Por otro parte, en la **Tabla D3** se observa los resultados de la relación entre el módulo elástico y la densidad aparente de las muestras ensayadas. Ahora bien, en la **Tabla D4** se visualiza el valor promedio de dicha relación en función del porcentaje y patrón de relleno.

Tabla D3. Relación entre el módulo de elasticidad y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno

No. Muestra	25M	50M	75M
	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)
1	0.00126	0.00116	0.00151
2	0.00123	0.00101	0.00147
3	0.00118	0.00126	0.00148
4	0.00125	0.00124	0.00149
5	0.00127	0.00122	0.00141
6	0.00119	0.00142	0.00123
No. Muestra	25B	50B	75B
	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)
1	0.00147	0.00148	0.00142
2	0.00126	0.00148	0.00151
3	0.00142	0.00156	0.00130
4	0.00154	0.00147	0.00141
5	0.00154	0.00156	0.00143
6	0.00142	0.00147	0.00135

Tabla D4. Relación promedio entre el módulo de elasticidad y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno

Muestra	Módulo elástico/densidad aparente (GPa/kg/m ³)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	0.00123	3.61545E-05
50M	0.00122	0.00013359
75M	0.00143	0.000105138
25B	0.00144	0.000103495
50B	0.00150	4.18767E-05
75B	0.00140	7.32109E-05

Por otro lado, en la **Tabla D5** se muestra la cantidad de energía absorbida bajo condiciones de impacto con respecto a la densidad aparente de las probetas de ensayo. A partir de estos resultados, se determinó el valor promedio de la propiedad específica a impacto (**Tabla D6**).

Tabla D5. Relación entre la cantidad de energía absorbida bajo condiciones de impacto y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión en función del porcentaje y patrón de relleno

No. Muestra	25M	50M	75M
	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)
1	0.00380	0.00326	0.00296
2	0.00573	0.00315	0.00269
3	0.00629	0.00333	0.00351
4	0.00390	0.00326	0.00256
5	0.00381	0.00242	0.00261
6	0.00466	0.00400	0.00233
No. Muestra	25B	50B	75B
	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)	Energía absorbida/densidad aparente (kJ/m ² /kg/m ³)
1	0.00411	0.00494	0.00294
2	0.00157	***	0.00250
3	0.00430	0.00506	0.00319
4	0.00317	0.00492	0.00310
5	0.00501	0.00521	0.00223
6	0.00479	0.00633	0.00252

Tabla D6. Relación promedio entre la cantidad de energía absorbida bajo condiciones de impacto y la densidad aparente de las muestras del ensayo de compresión por cada combinación de porcentaje y patrón de relleno

Muestra	Energía absorbida/densidad aparente ($\text{kJ/m}^2/\text{kg/m}^3$)	
	Promedio	Desviación Estándar
25M	0.05268	0.00464
50M	0.06502	0.01021
75M	0.05799	0.00165
25B	0.03792	0.00343
50B	0.04580	0.00237
75B	0.04477	0.00207

9. Bibliografía

- [1] UNFPA, "Fondo de Población de las Naciones Unidas," 7 July 2022. [Online]. Available: <https://www.unfpa.org/es/press/el-mundo-alcanzara-los-8000-millones-de-personas-el-15-de-noviembre-de-2022>. [Accessed 4 October 2022].
- [2] S. R. Ustáriz, "BBVA.CH," 14 June 2021. [Online]. Available: <https://www.bbva.ch/noticia/ventajas-y-desventajas-de-la-impresion-3d/>. [Accessed 4 October 2022].
- [3] E. Castillo, "Fabricación aditiva, un futuro de impresión 3D," ELEXPORTADOR, pp. 1-4, 8 November 2018.
- [4] J. Faludi, N. Cline-Thomas and S. Agrawala, "3D printing and its environmental implications," in *The Next Production Revolution*, Paris, OECD Publishing, 2017, pp. 172-204.
- [5] C. Camposeco, J. Varela and J. J. Rojas, "The effects of printing parameters on quality, strength, mass and processing time of polylactic acid specimens produced by additive manufacturing," *Progress in Additive Manufacturing*, pp. 821-840, 2021.
- [6] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3er ed., McGraw-Hill, Ed., 2007, pp. 210-776.
- [7] L. Cubillos, "Zonológica," 16 Febrero 2021. [Online]. Available: <https://zonologica.com/la-impresion-3d-y-su-impacto-en-la-cadena-de-suministro/#:~:text=La%20impresi%C3%B3n%203D%20permitir%C3%A1%20diferenciar,se%20convertir%C3%A1%20en%20el%20inventario.ment2print> [Accessed 17 September 2022].
- [8] R. Song and C. Telenko, "Material and energy loss due to human and machine error in commercial FDM printers," *Journal of Cleaner Production*, pp. 896-903, 2017.
- [9] NATIONAL GEOGRAPHIC, "NATIONAL GEOGRAPHIC EN ESPAÑOL," 9 Agosto 2018. [Online]. Available: <https://www.ngenespanol.com/ciencia/impacto-ambiental-impresora-3d-tercera-dimension/>. [Accessed 2022 September 17].
- [10] B. Albright, "Digital Engineering," 10 Marzo 2017. [Online]. Available: <https://www.digitalengineering247.com/article/berkeley-students-to-recycle-filament/>. [Accessed 18 September 2022].
- [11] BBC New Mundo, "BBC New Mundo," 27 Marzo 2014. [Online]. Available: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/03/140327_tecnologia_impresoras_3d_lado_oscuro_rg. [Accessed 19 September 2022].
- [12] "BCN3D," 28 Junio 2022. [Online]. Available: <https://www.bcn3d.com/es/filamento-pla-los-pros-y-los-contras-de-este-material-basico/>. [Accessed 18 September 2022].
- [13] Dynapro 3D, "Impresión 3D PLA - Las ventajas del PLA para su utilización en impresión 3D," Dynapro 3D, [Online]. Available: <https://dynapro3d.com/impresion-3d/impresion-3d-pla/>. [Accessed 18 September 2022].
- [14] L. C., "3Dnatives," 23 Julio 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!> [Accessed 18 September 2022].
- [15] D. Agudelo, D. Díaz, A. Ibarra, C. Cruel, M. Montoya and C. Hernández, "Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida," *Desarrollo e innovación en ingeniería*, pp. 1-14, 2019.
- [16] Xometry Europe, "Relleno en la impresión 3D: definición, partes principales y diferentes tipos," [Online]. Available: <https://xometry.eu/es/relleno-en-impresion-3d/>. [Accessed 18 September 2022].

- [17] S. Ramírez, "3Dnatives," 9 Febrero 2021. [Online]. Available: 3dnatives.com/es/impresion-3d-industria-4-0-090220212/#!. [Accessed 25 September 2022].
- [18] "Editorial La Republica S.A.S.," 24 febrero 2022. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/hoy-en-dia-se-produce-el-doble-de-desechos-plasticos-en-el-mundo-que-hace-20-anos-3310507>. [Accessed 25 09 2022].
- [19] "CJS canecas," 4 Agosto 2020. [Online]. Available: <https://www.canecas.com.co/identificar-plasticos-reciclaje>. [Accessed 25 September 2022].
- [20] "filament2print," 04 November 2019. [Online]. Available: https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html. [Accessed 27 November 2022].
- [21] "formlabs," [Online]. Available: <https://support.formlabs.com/s/article/Model-Orientation?language=es#:~:text=En%20impresi%C3%B3n%203D%2C%20la%20orientaci%C3%B3n,la%20superficie%20y%20la%20imprimibilidad.> [Accessed 27 November 2022].
- [22] "ARQDIS | Taller de cómputo de Arquitectura y Diseño," [Online]. Available: <http://www.arqdis.iberomexico.com.mx/blog/principales-parametros-fdm/>. [Accessed 27 November 2022].
- [23] E. Mejia, "IDEA 161," 13 August 2021. [Online]. Available: <https://idea161.org/2021/08/13/altura-de-la-capa-de-impresion-3d-que-importancia-tiene/>. [Accessed 27 November 2022].
- [24] Formlabs, "Grosor de capa adaptativo: un equilibrio entre velocidad y resolución," 3 December 2020. [Online]. Available: <https://formlabs.com/latam/blog/grosor-de-capa-adaptativo-un-equilibrio-entre-velocidad-y-resolucion/>. [Accessed 27 November 2022].
- [25] L. Llamas, "Diseño para impresión 3D, altura de capa," 31 October 2022. [Online]. Available: <https://www.luisllamas.es/altura-de-capa/>. [Accessed 27 November 2022].
- [26] E. Mejia, "IDEA 161," 2 November 2021. [Online]. Available: <https://idea161.org/2021/11/02/velocidad-de-impresion-3d-los-ajustes-perfectos-para-el-play-mas/>. [Accessed 27 November 2022].
- [27] IMPRESORAS3D.COM, "Impresoras3D.com," 3 January 2018. [Online]. Available: [https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-muchomas/#:~:text=El%20rango%20de%20temperatura%20de,\(198%2D210\)%C2%BAC.](https://www.impresoras3d.com/filamento-pla-consejos-caracteristicas-y-muchomas/#:~:text=El%20rango%20de%20temperatura%20de,(198%2D210)%C2%BAC.) [Accessed 27 November 2022].
- [28] M. Mani, A. G. Karthikeyan, K. Kalaiselvan, P. Muthusamy and P. Muruganandhan, "Optimization of FDM 3-D printer process parameters for surface roughness and mechanical properties using PLA material," *Materials Today: Proceedings*, pp. 1926-1931, 2022.
- [29] A. Zapata and W. A. Sarache, "Mejoramiento de la calidad del café soluble utilizando el método Taguchi," *Ingeniare*, vol. 22, pp. 116-124, January 2014.
- [30] N. Lokesh, B. A. Praveena, R. J. Sudheer, K. V. Vikram and S. Vijaykumar, "Evaluation on effect of printing process parameter through Taguchi approach on mechanical properties of 3D printed PLA specimens using FDM at constant printing temperature," *Material Today: Proceedings*, pp. 1288-1293, 2022.
- [31] R. G. Mohan, . K. Santhosh, R. V. Iyer, L. K. John and M. Ramu, "Comparitive analysis of mechanical properties of FDM printed parts based on raster angles," *Materials Today: Proceedings*, pp. 4730-4734, 2021.
- [32] M. Samykano, S. K. Selvamani, K. Kadirgama, W. K. Ngui, G. Kanagaraj and K. Sudhakar, "Mechanical property of FDM printed ABS: influence of printing parameters," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 2779-2796, 6 February 2019.
- [33] A. Farazin and M. Mohammadimehr, "Effect of different parameters on the tensile properties of printed Polylactic acid samples by FDM: experimental design tested with MDs

simulation," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 103–118, 31 May 2021.

[34] L. Marşavina, C. Valean, M. Marghitaş, E. Linul, S. M. Javad, F. Berto and R. Brighenti, "Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens," *Engineering Fracture Mechanics*, 7 September 2022.

[35] M. Doshi, A. Mahale, S. K. Singh, and S. Deshmukh, "Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects," *Materials Today: Proceedings*, pp. 2269-2275, 21 October 2021.

[36] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn and A. Fernando, "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, pp. 284-297, 30 March 2020.

[37] P. Sethu Ramalingam, K. Mayandi, V. Balasubramanian, K. Chandrasekar, V. Mago Stalany and A. A. Munaf, "Effect of 3D printing process parameters on the impact strength of onyx – Glass fiber reinforced composites," *Materials Today: Proceedings*, pp. 6154-6159, 29 November 2020.

[38] P. Patil, D. Singh, . S. J. Raykar and J. Bhamu, "Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components," *Materials Today: Proceedings*, pp. 4880-4885, 20 February 2021.

[39] P. Wang, B. Zou, S. Ding, L. Li and C. Huang, "Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK," *Chinese Journal of Aeronautics*, 11 June 2021.

[40] L. Feroz Ali, R. Raghul, M. Yogesh Muthu Ram, V. Harshavardhan Reddy and N. Shakil Kanna, "Evaluation of the polyamide's mechanical properties for varying infill percentage in FDM process," *Materials Today: Proceedings*.

[41] J. L. Liu, E. W. Lim, Z. P. Sun, J. Wang, T. E. Tay and V. B. Tan, "Improving strength and impact resistance of 3D printed components with helicoidal printing direction," *International Journal of Impact Engineering*, 3 July 2022.

[42] M. Naik and D. G. Thakur, "Experimental investigation of effect of printing parameters on impact strength of the bio-inspired 3D printed specimen," *Sādhanā*, 24 June 2021.

[43] L. P. Buevas and J. A. Ramírez, "Biomimética de estructuras vegetales mejorando la seguridad en el ciclismo a partir de la olla de mono," *Escuela de Arquitectura y Diseño. Facultad de Diseño Industrial, Pontificia Universidad Bolivariana*, pp. 1-30, Medellín, 2014.

[44] Z. Wen, Y. Sha, Y. T.X. y X. Jun, «Crushing resistance and energy absorption of pomelo peel inspired hierarchical honeycomb,» *International Journal of Impact Engineering*, pp. 163-172, 26 November 2018.

[45] Q. Liu, H. Mao, L. Niu, F. Chen y P. Ma, «Excellent flexibility and stab-resistance on pangolin-inspired scale-like structure composite for versatile protection,» *Composites Communications*, pp. 1-8, 10 August 2022.

[46] I. Sukia, A. Esnaola, U. Morales, L. Aretxabaleta and J. Aurrekoetxea , "3D printing of bio-inspired cores for out-of-autoclave sandwich structures," *Materiales Compuestos*, vol. 07, 18 July 2022.

[47] Z. Han, B. Zhu, M. Yang, S. Niu, H. Song y J. Zhang, «The effect of the micro-structures on the scorpion surface for improving the anti-erosion performance,» *Surface & Coatings Technology*, pp. 143-150, 21 January 2017.

[48] G. Chouhan, B. M. Gunji, P. Bidare, D. Ramakrishna y R. Kumar, «Experimental and numerical investigation of 3D printed bio-inspired lattice structures for mechanical behaviour under Quasi static loading conditions,» *Materials Today Communications*, pp. 1-12, 17 February 2023.

- [49] J. Li, M. Li, J. J. Koh, J. Wang y Z. Lyu, «3D-printed biomimetic structures for energy and environmental applications,» DeCarbon, 2023.
- [50] C. J. Leyva, A. A. Gatell y I. Alvarez, «Proceso Analítico Jerárquico. Herramienta para la gestión del ordenamiento urbano-ambiental en el eje Luaces de Camagüey,» *Arquitectura y Urbanismo*, vol. XL, n° 2, pp. 43-57, 24 June 2019.
- [51] Arias, C.L. (2023). "Análisis de Decisiones. Proceso de jerarquía analítica (AHP)". [Diapositivas de PowerPoint en formato PDF]. Departamento de Ingeniería Civil e Industrial. Pontificia Universidad Javeriana – Sede Cali [Accessed 31 October 2023].
- [52] Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, ASTM D695-15
- [53] Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, ASTM D256-10
- [54] "Anova: Qué es y cómo hacer un análisis de varianza," [Online]. Available: <https://www.questionpro.com/blog/es/anova/>. [Accessed 28 November 2022].
- [55] H. Chen, Z. Jia and L. Li, "Lightweight lattice-based skeleton of the sponge *Euplectella aspergillum*: On the multifunctional design," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, pp. 1-12, 7 September 2022.
- [56] M. Sonogo, M. Madia, M. Eder, C. Fleck y L. A. Pessan, «Microstructural features influencing the mechanical performance of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) mesocarp,» *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, pp. 1-13, 7 January 2021.
- [57] J. Chen, X. Yu, Z. Xiaoming, Y. Xu y Y. Fu, «The effect of trabecular chamfers on the compressive ductility of beetle elytron plates,» *Mechanics of Materials*, pp. 1-7, 4 October 2021.
- [58] J. Sun, Z. Rongjun, Y. Zhong y Y. Chen, «Compressive Mechanical Properties of Larch Wood in Different Grain Orientations,» *Polymers*, pp. 1-12, 9 September 2022.
- [59] Saaty, T.L. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why Pairwise Comparisons Are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors the Analytic Hierarchy/Network Process. *Rev. Real Acad. Ciencias Exactas Fis. Nat. Ser. A Mat.* 2008, 102, 251–318
- [60] M. Sonogo, C. Fleck and L. A. Pessan, "Hierarchical levels of organization of the Brazil nut mesocarp," *Scientific Reports*, pp. 1-13, 22 April 2020.
- [61] X. M. Zhang, Y. C. Wang y M. N. Su, «Experimental, numerical and analytical study to develop a design method for bending and shear resistances of 3D printed beetle elytron inspired sandwich plate (beetle elytron plate),» *Thin-Walled Structures*, pp. 1-16, 6 December 2022.
- [62] J. Jae-Hyuk, K. Jong-Ho, K.-W. Chun, K. Gu-Joong, H. Won-Joong y K. Nam-Hun, «Durability Characterization of Larch Wood (*Larix kaempferi*) used for Woody Erosion Control Dam,» *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, pp. 310-317, July 2013.
- [63] M. Borrega, P. Ahvenainen, R. Serimaa y L. Gibson, «Composition and structure of balsa (*Ochroma pyramidale*) wood,» *Wood Science Technology*, pp. 404-420, 23 January 2015.
- [64] K. Robson Brown, D. Bacheva y R. S. Trask, «The structural efficiency of the sea sponge *Euplectella aspergillum* skeleton: bio-inspiration for 3D printed architectures,» *The Royal Society*, pp. 1-12, 16 April 2019.
- [65] Ecuador iNaturalist, «Canasta de Flores de Venus *Euplectella aspergillum*,» [En línea]. Available: <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/908110-Euplectella-aspergillum>. [Último acceso: 9 November 2023].
- [66] Ecuador iNaturalist, «Nuez de Brasil (*Bertholletia excelsa*),» [En línea]. Available: <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/145603-Bertholletia-excelsa>. [Último acceso: 9 November 2023].
- [67] N. Graupner, D. Labonte, H. Humburg, T. Buzkan, A. Dörgens, W. Kelterer y J. Müssig, «Functional gradients in the pericarp of the green coconut inspire asymmetric fibre-composites

with improved impact strength, and preserved flexural and tensile properties, » *Bioinspiration & Biomimetics*, pp. 1-10, 28 February 2017.

[68] Y. Zhang, W. Huang, C. Hayashi, J. Gatesy y J. McKittrick, «Microstructure and mechanical properties of different keratinous horns» *Journal of The Royal Society Interface*, vol. 15, n° 143, pp. 1-14, 16 May 2018.

[69] B. P. Novanda, H. Ardianto y H. Setiawan, «Impact strength of horizontal bamboo fiber and Iron sand with epoxy matrix » *Teknika STTKD: Journal Teknik, Elektronik, Engine*, vol. 8, pp. 124-131, 30 July 2022.

[70] M. E. Launey, P. Y. Chen, J. McKittrick y R. O. Ritchie, «Mechanistic aspects of the fracture toughness of elk antler bone» *Acta Biomaterialia*, pp. 1505-1514, 24 November 2009.

[71] R. A. Barbosa, G. R. Souza, V. Da Silva, y E.P. Gonçalves, «Extracción de fibras de coco para aplicación en materiales de ingeniería» São Paulo, Brasil, 2016.

[72] W. Huang, A. Zaheri, J. Jae-Young, H. D. Espinosa y J. McKittrick, «Hierarchical structure and compressive deformation mechanisms of bighorn sheep (*Ovis canadensis*) horn» *Acta Biomaterialia*, pp. 1-14, 30 September 2017.

[73] L. Osorio, E. Trujillo, F. Lens, J. Ivens, I. Verpoest y A. W. Van Vuure, «In-depth study of the microstructure of bamboo fibres and their relation to the mechanical properties,» *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, pp. 1-15, 2018.

[74] A. K. Matsushita, D. Gonzalez, M. Wang, J. Doan, Y. Qiao y J. McKittrick, «Beyond density: Mesostructural features of impact resistant wood,» *Materials Today Communications*, pp. 1-12, 19 October 2019.

[75] H. Zhang, H. Li, Y. Li, Z. Xiong, N. Zhang, R. Lorenzo y M. Ashraf, «Effect of nodes on mechanical properties and microstructure of laminated bamboo lumber units,» *Construction and Building Materials*, pp. 1-14, 4 September 2021.

[76] M. Q. Tanveer, G. Mishra, S. Mishra y R. Sharma, «Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review,» *Materials Today: Proceedings*, pp. 100-108, 8 March 2022.

[77] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran y A. Mustafa, «Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid,» *Polymer Testing*, pp. 1-9, 15 April 2020.