



Revista UIS ingenierías

ISSN: 1657-4583

ISSN: 2145-8456

Universidad Industrial de Santander

Serrano-Cinchilla, Luis; Bustamante-Gómez, Liliana; Villarraga-Ossa, Junes
Influencia de la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades
mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA
Revista UIS ingenierías, vol. 21, núm. 2, 2022, Abril-Junio, pp. 107-114
Universidad Industrial de Santander

DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n2-2022009>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=553772634009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

Influencia de la densidad y de los parámetros de relleno en las propiedades mecánicas compresivas de probetas fabricadas en manufactura aditiva de PLA

Influence of the infill density and infill patterns on the compressive mechanical properties of 3D printed PLA specimens

Luis Serrano-Cinchilla ^{1a}, Liliana Bustamante-Góez ^{1b}, Junes Villarraga-Ossa ^{1c}

¹ Grupo de Diseño Mecánico, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Colombia.

Correo electrónico: ^a henrique.serrano@udea.edu.co, ^b liliana.bustamante@udea.edu.co,

^c junes.villarraga@udea.edu.co. Orcid: ^a 0000-0001-5235-0959, ^b 0000-0002-1150-1252, ^c 0000-0002-7893-5362

Recibido: 11 noviembre, 2021. Aceptado: 15 febrero, 2022. Versión final: 3 marzo, 2022.

Resumen

La impresión por hilo fundido (FDM, por sus siglas en inglés) tiene una gran cantidad de parámetros que influyen directamente sobre la calidad y las propiedades mecánicas de la pieza final. Actualmente, la manufactura aditiva por FDM ha presentado un gran auge para desarrollos de prótesis por su bajo costo respecto a otros procesos de manufactura; además, esta tecnología es de gran interés para el área de la medicina, dada su capacidad de crear soluciones personalizadas para cada paciente, debido a la variedad de materiales que se pueden emplear, ya que hay una amplia oferta de empresas que fabrican y suministran impresoras y materiales para la impresión. En este trabajo se investigó la influencia de la densidad y de la geometría de los patrones de relleno sobre el esfuerzo máximo, el esfuerzo de fluencia y el módulo de elasticidad a la compresión, en probetas de PLA elaboradas mediante manufactura aditiva con la técnica modelado por FDM. Se emplearon densidades de 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, y los parámetros de relleno utilizados fueron *trihexagonal*, subdivisión cúbica y giroide. Todas las probetas se sometieron a ensayos de compresión para calcular sus propiedades mecánicas, y en términos generales se observó que, al aumentar la densidad de relleno, se presenta un aumento en las propiedades a la compresión del material, y la geometría del patrón de relleno puede alterar estas propiedades.

Palabras clave: PLA; ácido poliláctico; manufactura aditiva; FDM; ensayo compresión; propiedades mecánicas; impresión 3D; densidad de relleno.

Abstract

Fused deposition modeling (FDM) has a large number of parameters that directly influence the quality and mechanical properties of the final part. Currently, FDM additive manufacturing has shown a rise for prosthesis developments due to its low cost for their development with respect to other manufacturing processes. Additionally, this technology presents great interest to the area of medicine due to its ability to create customized solutions for each patient, the variety of materials that can be used, and the wide range of manufacturing and supply printers brands and materials for printing. This work investigated the influence of infill density and infill patterns on the compression values for maximum stress, yield stress and elastic modulus, in PLA specimens made by additive manufacturing by FDM technique. Densities of

10%, 25%, 50%, 75% and 100% and infill parameters Trihexagonal, Cubic Subdivision and Gyroid were used. All specimens were subjected to compression tests to calculate their mechanical properties and in general terms it was observed that increasing the infill density presents an increase in the compression properties of the material and that the geometry of the filling pattern can alter these properties.

Keywords: PLA; polylactic acid; additive manufacturing; FDM; compression test; mechanical properties; 3D printing; infill density.

1. Introducción

La implementación de manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés) o impresión 3D ha venido en aumento en la industria del diseño y desarrollo de productos (DDP), ya que se pueden fabricar prototipos o piezas complejas funcionales a un bajo costo y con mayor facilidad de desarrollo, por lo cual muchas empresas del sector industrial han comenzado a implementar la tecnología de manufactura aditiva para la creación de modelos y algunos productos terminados [1], [2], [3].

En la tecnología de fabricación digital aditiva (TFDA) o manufactura aditiva, se busca fabricar objetos tridimensionales depositando capas de material para obtener un modelo físico a partir de un archivo digital (CAD), donde se emplean materiales plásticos, cerámicos, metálicos, biológicos o compuestos [4], [5]. Además, se pueden fabricar prótesis funcionales con buenas propiedades mecánicas que perduran en el tiempo. Actualmente, los datos suministrados por los fabricantes de los materiales y de la tecnología resultan insuficientes para la fabricación de piezas funcionales, al existir una gran cantidad de variables que afectan las propiedades de la pieza [6], [7], [8].

Los materiales comúnmente empleados en FDM son el ácido poliláctico (PLA), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el acrilato estireno acrilonitrilo (ASA), el nailon y el poliuretano termoplástico (TPU), entre otros; en la [tabla 1](#) se observan los materiales, sus propiedades y sus aplicaciones [9]. Es indispensable poder predecir cómo se comportarán las piezas con determinado material cuando se sometan a cargas para estimar su idoneidad para una aplicación determinada; las propiedades de las piezas fabricadas con FDM dependen en gran medida de los parámetros del proceso, como se observa en la [figura 1](#), y pueden mejorar si se establecen los parámetros de impresión a niveles adecuados [10], [11], [12]. Además de buscar piezas funcionales con buenas propiedades mecánicas, también se desean bajos tiempos de impresión a la hora de fabricar cualquier pieza.

Existen diversas aplicaciones prácticas de la AM, y un área en la que está brindando muy buenos resultados y ha

generado grandes expectativas es en la fabricación de ortesis y prótesis, ya que brinda la posibilidad de producir elementos personalizados según la necesidad de cada paciente; adicionalmente, disminuye los costos y tiempos de fabricación, lo cual se ve reflejado en una mejora en las condiciones de vida y el confort de los pacientes. En el caso particular de prótesis para miembro inferior, las sollicitaciones de compresión son importantes, por lo cual se necesita tener información del comportamiento bajo estas sollicitaciones de las piezas fabricadas utilizando TFDA.

Factores que intervienen en el proceso de FDM	Modelo 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Pieza modelada por medio de programas CAD
	Principales parámetros de impresión	<ul style="list-style-type: none"> • Diámetro de boquilla • Altura de capa • Grosor de pared • Densidad de relleno • Patrón de relleno • Temperatura de Impresión • Posición de impresión • Orientación de impresión • Velocidad de impresión
	Factores externos	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura ambiente • Humedad ambiente
	Materia prima	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad • Temperatura de fusión • Temperatura de transición vítrea • Propiedades mecánicas

Figura 1. Factores que intervienen en el proceso de FDM. Fuente: [6].

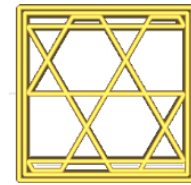
Actualmente, los estudios del comportamiento de los materiales usados en FDM se centran en las propiedades a tensión, principalmente para el ABS y el PLA, pero poco se investiga sobre las propiedades mecánicas a la compresión y cómo los parámetros de impresión afectan estas propiedades [13]. Las cargas de compresión están presentes de forma propia en la ingeniería, debido directamente a la carga de compresión y/o debido a la carga de flexión [14].

Dada la tendencia anisotrópica de la pieza construida por FDM, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de los parámetros de impresión sobre la resistencia a la compresión de muestras fabricadas en PLA variando la densidad de relleno de 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 % y la geometría del patrón de relleno, la cual es simplemente una estructura repetitiva utilizada para ocupar espacio dentro de una impresión en 3D vacía. Los patrones utilizados en este estudio son el trihexagonal, subdivisión cúbica y giroide, que permiten variar la geometría interna de las piezas, como se puede observar en la [figura 2](#). La información recolectada tiene como fin proporcionar a los usuarios de FDM mayores criterios para el desarrollo de las piezas con buenas propiedades mecánicas a la compresión, que optimicen los tiempos de impresión y el material, de modo que se reduzcan los costos de producción. Se pretende que estos resultados también puedan servir como insumo para la fabricación de diferentes elementos de prótesis, y en particular prótesis de miembro inferior, con lo cual se podría disminuir costos sin disminuir la calidad del producto, y con esto ayudar al bienestar y el confort de los pacientes.

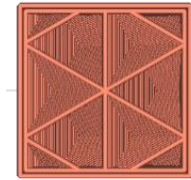
2. Materiales y métodos

Para determinar la influencia del porcentaje de densidad de relleno y el patrón del mismo sobre la resistencia a la compresión de piezas fabricadas usando impresión 3D, y con el fin de estudiar la viabilidad de implementar esta técnica de fabricación como método alternativo para la

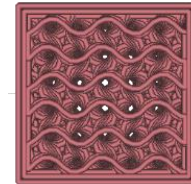
fabricación de prótesis de miembro inferior, se imprimieron piezas en ácido poliláctico.



(a) Trihexagonal



(b) Subdivisión cúbica



(c) Giroide

Figura 2. Patrones geométricos empleados en el relleno de las probetas. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Propiedades y aplicaciones de algunos materiales empleados en FDM

Material	Propiedades	Aplicaciones
PLA	Buena resistencia a la tracción.	Ideal para prototipos que no requieran mantener propiedades mecánicas en el tiempo.
ABS	Resistente y fuerte.	Automoción, aeroespacial, dispositivos médicos.
Nailon	Buena resistencia química, alta resistencia a la fatiga y alta resistencia al impacto.	Para aplicaciones que requieran materiales con propiedades al impacto y fatiga, incluidas cubiertas, antenas, herramientas de producción personalizadas, insertos de ajuste por fricción y ajustes a presión en las industrias automotriz, aeroespacial y alimentos.
TPU	Excelente resistencia al desgarrar y al desgaste, alto impacto, fuerza y dureza.	Flexibilidad excepcional y resistencia a la corrosión para muchos productos químicos y aceites industriales comunes. Material altamente versátil con propiedades de caucho y plástico para una variedad de aplicaciones industriales.
ASA	Resistencia mecánica y estabilidad UV.	Prototipos funcionales desde soportes y carcasas eléctricas hasta prototipos de automóviles y piezas de producción prácticas para uso en exteriores bajo el sol.

Fuente: Tomada de impresión 3D con materiales elastómeros [9].

En este trabajo se analizaron las combinaciones para diferentes densidades de relleno: 10 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %, y los patrones geométricos de impresión: trihexagonal, subdivisión cúbica y giroide; estos patrones son los más empleados en el proceso de FDM y se pueden observar en la [figura 2](#). Para las densidades del 10 %, 25 %, 50 % y 75 % se imprimieron 6 muestras para cada geometría, para un total de 18 muestras por cada densidad de relleno. Para las probetas del 100 % solo se realizaron 6 por material, ya que para este caso no se tiene variación del patrón geométrico del relleno al estar todas las líneas superpuestas; se realizó un total de 234 probetas. Se diseñaron las probetas conforme con la norma ASTM D695 *Compression Testing of Rigid Plastics* [15], las cuales consistían en primas cuadrangulares con las dimensiones de 1 pulgada de alto por ½ pulgada para las artistas de la base.

2.1. Diseño y fabricación

Para el diseño de las probetas se utilizó el *software* de código abierto Cura 4.6 [17], y para la posterior fabricación se empleó una impresora Anet A8. Se diseñaron las probetas en el *software* Autodesk Inventor 2020 [18], conforme con la norma ASTM D695 *Compression Testing of Rigid Plastics*; se exportaron en formato STL, y posteriormente fueron importadas en el *software* Cura 4.6 para crear el código G de cada tipo de porcentaje de relleno y patrón geométrico. La temperatura de extrusión fue de 210 °C y la cama fue precalentada a 85 °C para favorecer la adhesión del material.

2.2. Pruebas mecánicas

Los ensayos mecánicos se llevaron a cabo en el laboratorio de materiales de la Universidad de Antioquia; se empleó la máquina de ensayos Shimadzu AGX Plus con una celda de carga de 10 KN a una velocidad de 2 mm/min, que llevó las muestras hasta la falla; los ensayos se realizaron de acuerdo con la norma ASTM D695 *Compression Testing of Rigid Plastics*. Para determinar el módulo elástico del material para cada configuración de la probeta se utilizó un extensómetro axial Epsilon 3542-050M-020-ST.

3. Resultados

En esta investigación se analizó la resistencia última a un 20 % de deformación, el esfuerzo de fluencia aparente y el módulo de rigidez para la compresión respecto al porcentaje y al patrón de relleno. En la [figura 3](#) se presentan las curvas del comportamiento a compresión para cada patrón y las densidades de relleno de 50 % y 75 %; las líneas de color rojo corresponden al patrón

trihexagonal, las líneas de color amarillo son del patrón subdivisión cúbica y las líneas de color morado son del patrón Giroide. En esta figura se observa que las variables analizadas en este estudio (patrón y densidad) afectan directamente el comportamiento mecánico a compresión de las piezas a compresión. Estos resultados tienen relación con los presentados por diversos autores para el caso de propiedades a tracción de piezas elaboradas empleado la técnica de FDM [7], [8], [12], [13], [14], [16].

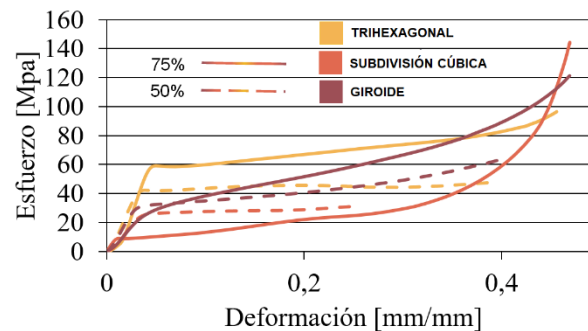


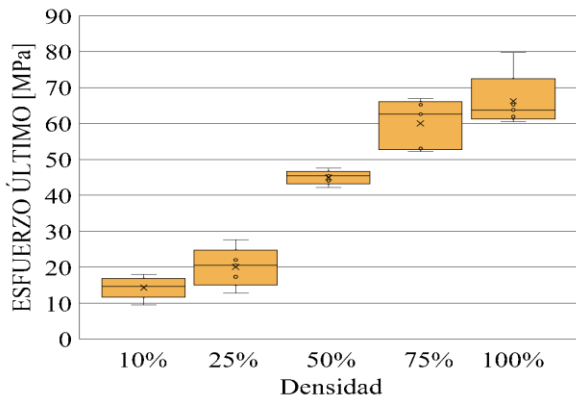
Figura 3. Curvas esfuerzo vs. deformación para el comportamiento compresivo de probetas de PLA variando el patrón y la densidad de relleno. Fuente: elaboración propia.

La amplia variedad de comportamientos obtenidos variando estos parámetros de impresión brinda al diseñador una gran flexibilidad en el momento de seleccionar los materiales, ya que con un solo material se pueden obtener diferentes respuestas dependiendo de las necesidades del diseño.

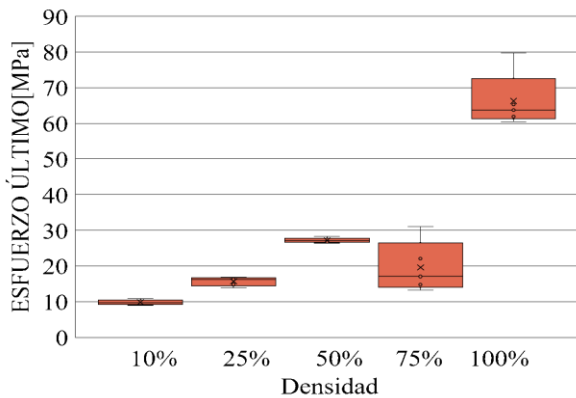
En la [figura 4](#) se observan para los diferentes patrones de relleno los valores de la resistencia a compresión para una deformación máxima del 20 %. Se aprecia que al aumentar el porcentaje de relleno, aumenta la resistencia última, excepto en subdivisión cúbica del 75 % de densidad, esto debido a que las probetas fabricadas con este patrón de relleno no son homogéneas, ya que no se puede controlar el algoritmo del programa que se emplea para la fabricación de las mismas, y esto generó geometrías de relleno muy diferentes entre sí.

La probeta del 75 % de relleno permitió unos vacíos más grandes que las probetas del 50 %, y esto pudo ocasionar que se obtuviera una menor resistencia en las pruebas. Otro aspecto para destacar es que no se encontraron relaciones lineales en la variación de estas propiedades respecto a la variación del porcentaje de relleno empleado, por lo cual se hace importante establecer este tipo de propiedades a compresión para las piezas finales

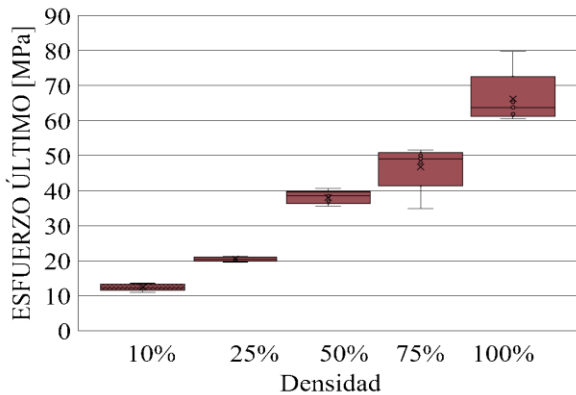
fabricadas empleando FDM, lo cual es recomendado por diversos autores en el caso de los estudios de comportamiento a tracción.



(a) Trihexagonal



(b) Subdivisión cúbica



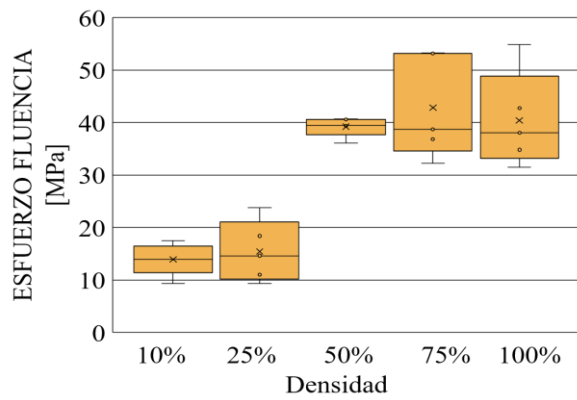
(c) Giroide

Figura 4. Esfuerzo último vs. densidad para los diferentes patrones de relleno, variando el porcentaje de relleno. Fuente: elaboración propia.

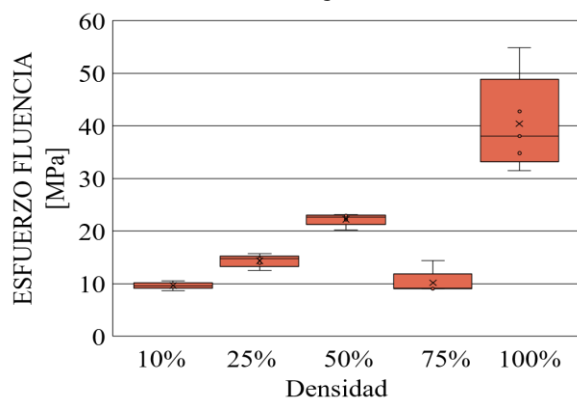
En la figura 5 se presentan los valores de esfuerzo a la fluencia para los patrones de relleno trihexagonal, subdivisión cúbica y giroide variando la densidad de relleno. Respecto al esfuerzo de fluencia, se observa la misma tendencia anterior: al aumentar el porcentaje de relleno, aumenta el valor de este esfuerzo, aunque no hay una proporcionalidad entre estos, lo cual concuerda con los resultados presentados por Abbas [16] en su estudio para caracterizar propiedades mecánicas compresivas de PLA variando la velocidad de impresión y el porcentaje de relleno. Adicionalmente, el patrón de relleno trihexagonal es el que mayor variabilidad tiene en las propiedades mecánicas a compresión. Por otra parte, se obtuvo una menor desviación de las propiedades mecánicas en porcentajes de densidad bajos para subdivisión cúbica y giroide, lo cual permitiría la fabricación de piezas con una certeza razonable para su comportamiento compresivo final empleando estos valores.

En la figura 6 se presenta la variación del módulo de rigidez para cada patrón de relleno y densidad empleado. Se encontró que para los patrones de relleno trihexagonal y subdivisión cúbica en promedio se presentó una mayor rigidez en la densidad del 75 % respecto a la densidad del 100 %, lo cual no sucede para el patrón giroide y puede ocurrir debido a la irregularidad del relleno que se presentó para este valor en particular de densidad, lo que ocasionó la presencia de intersticios de mayor tamaño que los demás patrones. Este mejor comportamiento se relacionó con la mejor adhesión que se observó en las capas de material fabricado para este porcentaje, y proporcionaría piezas con buenas propiedades compresivas, con un ahorro de material respecto al uso de un 100 % de relleno.

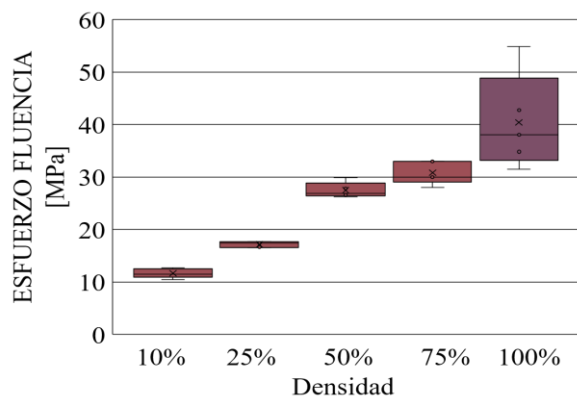
En la figura 7 se presentan los resultados para el esfuerzo último, el esfuerzo de fluencia y el módulo de rigidez, normalizados respecto a las probetas con densidad del 100 %. En estos resultados se puede observar que el patrón de relleno trihexagonal presentó las mejores propiedades mecánicas a compresión, excepto en la de 25 % para el esfuerzo de fluencia y resistencia última. Observando los resultados, se encontró que las propiedades de piezas fabricadas empleando la técnica de FDM son muy variables, aunque se puede decir que esta investigación brinda herramientas para seleccionar el patrón y la densidad de relleno más adecuados para la pieza que se necesite fabricar. Es recomendable, de ser posible, ensayar mecánicamente las piezas en su configuración final, debido a los factores que pueden incidir en su comportamiento y que se han mencionado en este trabajo.



(a) Trihexagonal

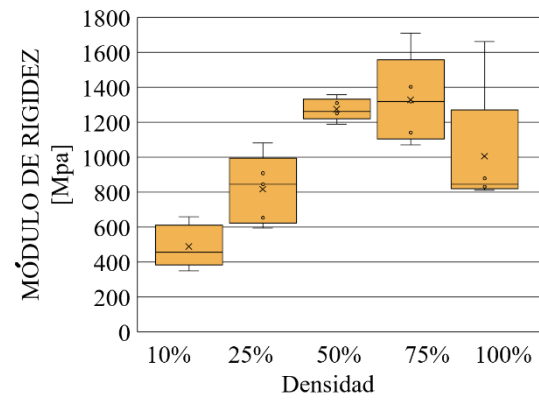


(b) Subdivisión cúbica

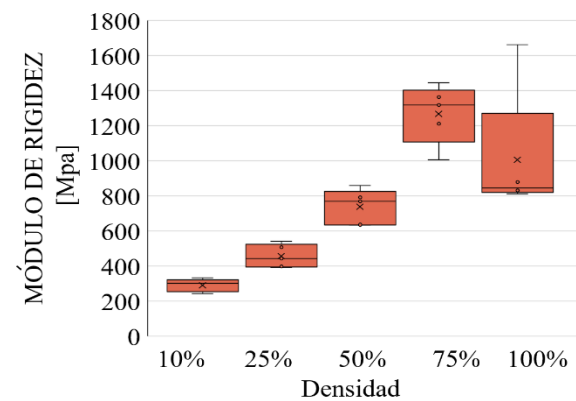


(c) Giroide

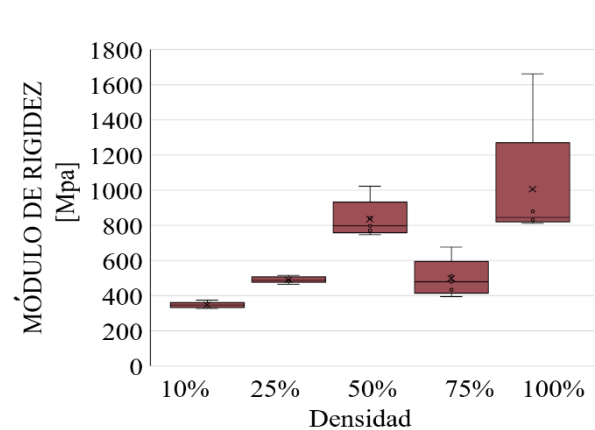
Figura 5. Esfuerzo de fluencia vs. densidad para los diferentes patrones de relleno, variando el porcentaje de relleno. Fuente: elaboración propia.



(a) Trihexagonal

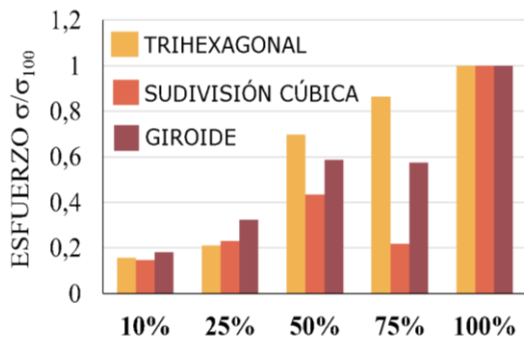


(b) Subdivisión cúbica

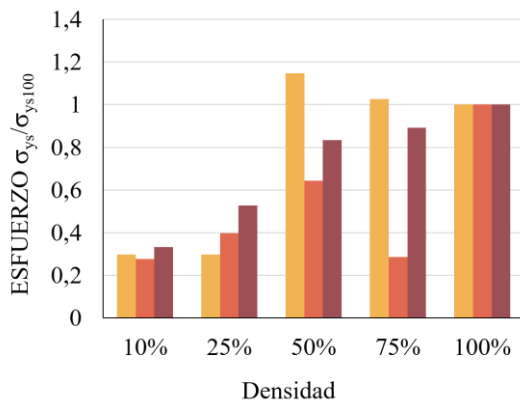


(c) Giroide

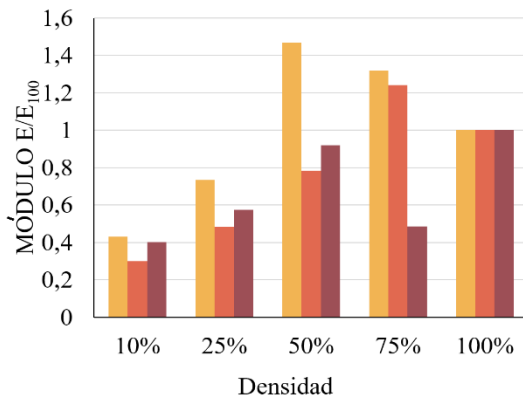
Figura 6. Módulo de rigidez vs Densidad para los diferentes patrones de relleno, variando el porcentaje de relleno. Fuente: elaboración propia.



(a) Resistencia última



(b) Esfuerzo de fluencia



(c) Módulo de rigidez

Figura 7. Comparativo de resultados normalizados variando la densidad para (a) resistencia última, (b) esfuerzo de fluencia y (c) módulo de rigidez. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

El patrón de relleno tiene una alta influencia en el comportamiento a compresión de las probetas de PLA; el que mejores propiedades mecánicas presentó fue el patrón trihexagonal.

Combinando el patrón y la densidad de relleno, se pueden obtener diferentes comportamientos a compresión del PLA, lo cual brinda versatilidad en el proceso de selección de materiales.

Para la aplicación en prótesis de miembro inferior se recomienda emplear el patrón trihexagonal a una densidad de 50 % o 75 %, ya que este presentó las mejores propiedades mecánicas a compresión, sin diferencias significativas, y adicionalmente representa ahorro de material en comparación con el uso del 100 % de relleno.

En general, al aumentar la densidad de relleno, se obtiene un aumento en las propiedades cuantificadas, salvo la de 75 % de subdivisión cúbica, debido a la falta de control sobre el algoritmo que diseña la geometría del patrón de relleno.

En el proceso de impresión usando FDM, las propiedades mecánicas pueden presentar variaciones de acuerdo con los parámetros de impresión utilizados. Aunque esta investigación brinda herramientas para seleccionar patrones y porcentajes de rellenos más adecuados para la pieza que se desea fabricar, se recomienda ensayar las piezas para verificar su comportamiento bajo ciertas condiciones de carga.

Con el objetivo de comprender mejor los mecanismos de la falla, se recomienda analizar la topología del daño en la estructura por métodos no invasivos; adicionalmente, se podría realizar una caracterización superficial con SEM o TEM, las cuales ayudarían a establecer características del daño. Por otra parte, para el diseño de prótesis de miembro inferior se recomienda implementar un patrón de relleno trihexagonal a una densidad de relleno del 75 %.

Agradecimientos

Los autores de esta investigación agradecen al ingeniero Walter Villaneda Pulgarín, técnico del Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Antioquia, por su colaboración en la realización de los ensayos, y al Departamento de Ingeniería Mecánica por facilitar el uso de este espacio.

Referencias

- [1] W. Gao *et al.*, “The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering,” *CAD Computer Aided Design*, vol. 69, pp. 65-89, 2015, doi: <https://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- [2] S. A. Vesga, “Fabricación de un prototipo de una prótesis de miembro inferior transtibial mediante tecnologías aditivas de acuerdo con las medidas antropométricas del paciente,” Ph.D. dissertation, Universidad Santo Tomás, 2018.
- [3] C. I. López-Gualdrón, L. E. Bautista-Rojas, and J. A. Machuca-Gélvez, “Reconstrucción 3D para el desarrollo de prótesis de miembro inferior,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 1, pp. 73-85, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020007>
- [4] D. Torreblanca Díaz, “Tecnologías de Fabricación Digital Aditiva, ventajas para la construcción de modelos, prototipos y series cortas en el proceso de diseño de productos,” *Iconofacto*, vol. 12, no. 18, pp. 118-143, 2016.
- [5] Y. Huang, M. C. Leu, J. Mazumder, A. Donmez, “Additive manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, vol. 137, no. 1, pp. 1–10, 2015.
- [6] O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik, “Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects,” *Advances in Manufacturing*, vol. 3, no. 1, pp. 42-53, 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- [7] M. Carvajal L, *et al.*, “Influencia de la posición de impresión y la densidad de relleno en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en ABS,” *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 19, no. 37, pp. 179-193, 2020.
- [8] M. Lalengani, M. Anuar Mohd, “The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process” *Polymers*, vol 12, no. 12, 2020. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12122792>
- [9] M. León, Á. Marcos-Fernández, A. M. León, “Impresión 3D con materiales elastoméricos,” *Revista De Plásticos Modernos*, vol. 118, no. 747, 2019.
- [10] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra, “Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,” *Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 1, pp. 81-90, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>
- [11] A. K. Sood, R. K. Ohdar, S. S. Mahapatra., “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,” *Materials and Design*, vol. 31, no. 1, pp. 287-295, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>
- [12] J. C. Camargo *et al.*, “Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, no. 5, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>
- [13] A. Chalgham, A. Ehrmann, I. Wickenkamp, “Mechanical Properties of FDM Printed PLA Parts before and after Thermal Treatment” *Polymers*, vol. 13, no. 8, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13081239>
- [14] L. Baich, G. P. Manogharan, H. Marie, “Study of infill print design on production costtime of 3D printed ABS parts Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts,” *International Journal of Rapid Manufacturing*, no. 3-4, 2015, <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.074809>
- [15] ASTM D695, “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics,” *ASTM International*, pp. 1-8, 2010.
- [16] D. Abbas, D. Mohammad Othman, H. Basil Ali, and C., “Effect of infill Parameter on compression property in FDM Process,” *Int. Journal of Engineering Research and Application www.ijera.com*, vol. 7. December, pp. 16-19, 2017, doi: <https://doi.org/10.9790/9622-0710021619>
- [17] “Ultimaker Cura: Powerful, easy-to-use 3D printing software,” Ultimaker Cura, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>
- [18] “Autodesk software de diseño 3D, ingeniería y construcción,” Autodesk Inventor, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://latinoamerica.autodesk.com/products/inventor>