

Caracterización del Ácido Poliláctico (PLA) en filamento y piezas producidas por tecnología FDM

Reyes-Florez Y. G.¹, Parra-Benavides N.², Flechas J.M.³, Toro-Toro L. F.⁴

¹ Universidad Santo Tomás, GEAMEC, Bogotá-Colombia, yamid.reyes@usta.edu.co

² Universidad Santo Tomás, GEAMEC, Bogotá-Colombia, nataliaparrab@usantotomas.edu.co

³ ARROWTI 3D, Bogotá-Colombia, jose.flechas@arrowti3d.com

⁴ SENA Servicio Nacional de Aprendizaje, GICOMET, Bogotá-Colombia, lfotoro9@sena.edu.co

Resumen— La impresión 3D ha transformado la producción de objetos complejos mediante la superposición de capas de material. El ácido poliláctico (PLA) se destaca en la tecnología FDM. Sin embargo, las propiedades del PLA se ven afectadas por varios factores, como la calidad del filamento y los parámetros de impresión. Se plantea la necesidad de una caracterización mecánica del PLA y las piezas impresas para comprender mejor su rendimiento. El objetivo principal es caracterizar propiedades mecánicas del PLA en forma de filamento y en piezas impresas mediante FDM. Se realizan pruebas mecánicas a tracción, para evaluar el rendimiento mecánico. Las curvas esfuerzo-deformación se analizan para entender el comportamiento mecánico bajo diversas condiciones de impresión. Los resultados muestran variaciones en los módulos de elasticidad y esfuerzos máximos de tensión en función de las combinaciones de orientación y sentido de impresión. Este trabajo impulsa el conocimiento sobre la caracterización mecánica del PLA en el contexto de la fabricación aditiva.

Palabras clave— Impresión 3D, ácido poliláctico PLA, FDM, caracterización mecánica, parámetros de impresión.

I. INTRODUCCIÓN

LA manufactura aditiva, también conocida como Impresión 3D, ha revolucionado la forma en que se producen objetos y componentes en diversos campos industriales. Esta tecnología permite la creación de piezas tridimensionales mediante la superposición de capas sucesivas de material, ofreciendo ventajas como la personalización, la reducción de costos, tiempos de producción y la posibilidad de fabricar geometrías complejas.

El ácido poliláctico (PLA) ha emergido como uno de los materiales más prometedores en la fabricación aditiva, específicamente en la tecnología de deposición de material fundido (FDM, por sus siglas en inglés). [1] La caracterización exhaustiva del filamento de PLA y las piezas producidas mediante FDM es esencial para comprender las propiedades y el rendimiento de estos productos. [2] En este artículo científico, se presenta una investigación detallada sobre la caracterización del PLA en términos de sus propiedades mecánicas tanto en el filamento como en las piezas impresas.

El PLA es un polímero biodegradable obtenido a partir de recursos renovables, lo que lo convierte en una opción

atractiva para aplicaciones sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, las propiedades del PLA pueden verse afectadas por varios factores, como la calidad del filamento utilizado y los parámetros de impresión en la tecnología FDM. Por lo tanto, es crucial investigar en detalle cómo estos factores influyen en las características finales del material y las piezas impresas. [3]

Además, se analizan las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, para comprender el rendimiento del PLA en diferentes condiciones de impresión.

La caracterización del filamento es esencial evaluar las propiedades del PLA en las piezas impresas mediante FDM. [4] Esto implica la realización de pruebas mecánicas para determinar la resistencia, rigidez y tenacidad de las piezas, así como el análisis estructural para examinar la distribución y orientación de las fibras de PLA.

Este artículo científico aborda la caracterización del ácido poliláctico en términos de esfuerzo de tensión máximo, deformación a esfuerzo de tensión máximo y deformación a esfuerzo de ruptura máximo en filamento y espécimen impresas mediante tecnología FDM. El conocimiento obtenido a partir de esta investigación proporcionará información de los parámetros de impresión y el desarrollo de aplicaciones futuras del PLA en la fabricación aditiva.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Material

El material de impresión es Acido Poliláctico (PLA) marca ARROW TI 3D, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la presentación es rodete de 1kg en forma de filamento con diámetro 1,75mm de color verde seda.



FIGURA 1. FILAMENTO PLA VERDE SEDA MARCA ARROWTI3



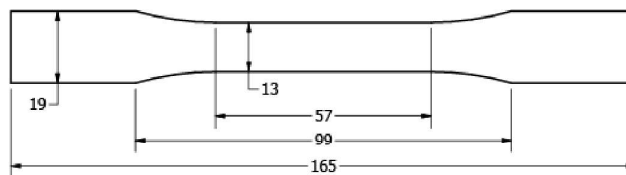
FUENTE AUTORES

B. Método y parámetros de manufactura

La manufactura aditiva se realiza con la técnica de modelado por deposición de filamento FDM en la impresora Zortrax M200. La geometría de impresión es un espécimen de acuerdo con la norma ASTM D368-14 tipo I, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, para ensayos cuasi estáticos a tracción.

La geometría se modela en Inventor2023 y se exporta en extensión STL. En el software Z-SUITE V 2.26.0.0, nativo de Zortrax, se configuran la orientación de impresión, relleno y demás parámetros de impresión.

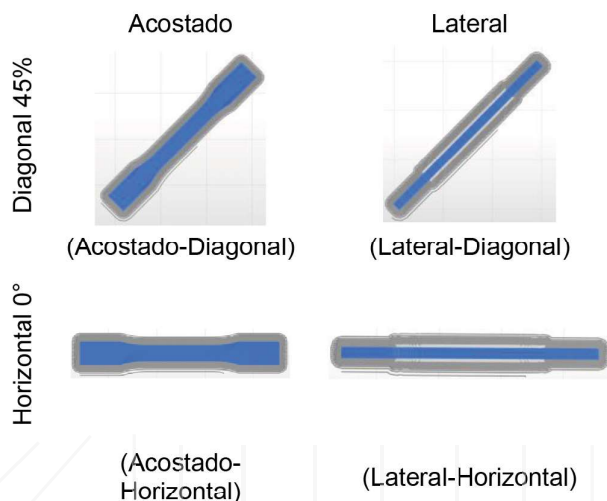
FIGURA 2. DIMENSIONES ESPÉCIMEN ASTM D638 TYPE I
ESPESOR 7MM



FUENTE AUTORES

La geometría puede ser impresa en posiciones y orientaciones múltiples. La investigación restringe la orientación a acostado y lateral, el sentido se define horizontal y diagonal 45° respecto al eje x de la máquina. En la Tabla se identifican las cuatro combinaciones posibles entre orientación y sentido.

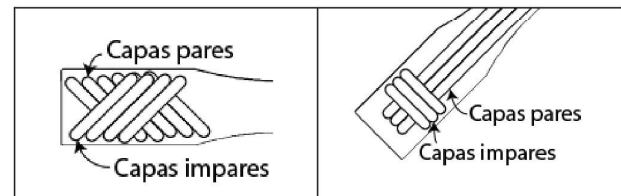
TABLA 1
DISPOSICIÓN DE IMPRESIÓN ESPÉCIMENES (VISTA DE PLANTA)



FUENTE AUTORES

Para el patrón de relleno macizo de los especímenes, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se tiene perpendicularidad entre las direcciones de las capas y diferencia entre la dirección del relleno y las capas del contorno según sentido.

FIGURA 3. DIRECCIÓN DE IMPRESIÓN DEL PATRÓN DE RELLENO



FUENTE AUTORES

Los parámetros de impresión son definidos por los autores debido a la carencia de datos por parte del fabricante, se toma como referencia valores típicos para PLA. El espécimen se fabrica con dos paredes externas con la silueta y el relleno es del 100% con un patrón de zigzag. La adherencia a la palca de impresión se realiza mediante *raft* y se usan soportes para la impresión lateral.

TABLA 2
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Parámetros	Unidad	Valor
Diámetro de filamento	mm	1,75
Diámetro de boquilla	mm	0,4
Altura de capa	mm	0,19
Paredes	-	2
Adherencia a la placa	-	Raft
Orientación	°	0, 45
Temperatura de boquilla	°C	200
Temperatura de cama	°C	45
Velocidad de impresión	mm/s	60
Velocidad de retracción	mm/s	36
Distancia de retracción	mm	1,2
Relleno	%	100
Dirección del relleno	°	0 – 90
Material de impresión	-	PLA
Programa Slicer	z-suite	2.26.0.0

FUENTE AUTOR

Una vez se configuran los parámetros en el software Z-SUITE se genera un código en extensión ZCODE que se ingresa a la impresora, por cada configuración se imprimen tres repeticiones.

C. Caracterización mecánica

Las pruebas de estrés se realizaron en una máquina universal de ensayos Shimadzu (Shimadzu, Japón) según la norma ISO 527-2. Las deformaciones se midieron luego de la fractura

utilizando un calibrador y una velocidad de prueba de 5 mm/min. El módulo de elasticidad se determinó promediando la regresión lineal de las gráficas de tensión de deformación presente en el rango de deformación entre 0,05% y 0,1%.

FIGURA 4. MONTAJE DEL ENSAYO A TENSIÓN (SHIMADZU)

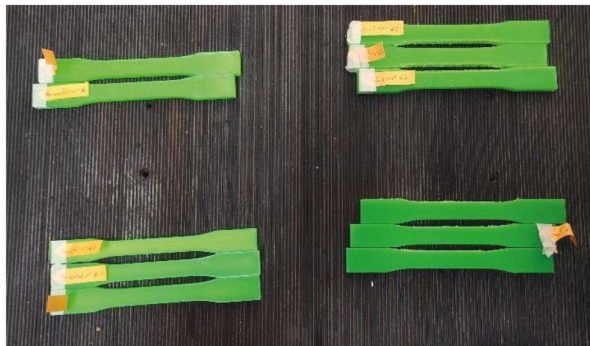


FUENTE AUTOR

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los tres especímenes macizos, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, por cada combinación se llevaron hasta la fractura, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

FIGURA 5. ESPECÍMENES IMPRESOS



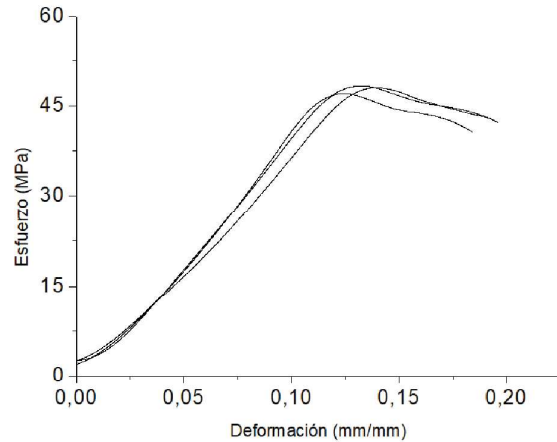
FUENTE AUTOR

Las curvas esfuerzo deformación del filamento tienen como diferencia principal la extensión de la deformación, esto se debe al cambio de la velocidad entre los ensayos, se decidió realizar el ensayo con mayor velocidad debido a que estaba tomando demasiado tiempo y la norma limita el tiempo del ensayo.

En la combinación Acostado-Diagonal, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 422,4 MPa, mientras que, en la combinación Acostado-Horizontal, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se registró un módulo de elasticidad promedio de 414,2 MPa. Estos valores se

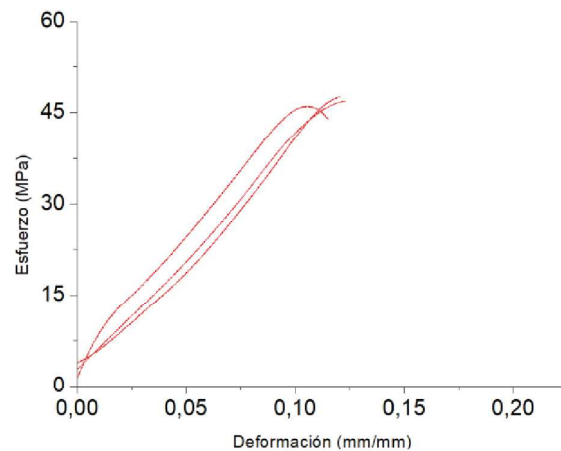
encuentran cercanos entre sí, y se observa en las curvas una tendencia similar en las pendientes. No obstante, la diferencia más significativa se presenta en el Esfuerzo de Tensión Máximo, siendo de 46,7 MPa para la combinación Acostado-Diagonal y de 48,8 MPa para la combinación Acostado-Horizontal.

FIGURA 6. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CASO ACOSTADO-DIAGONAL



FUENTE AUTOR

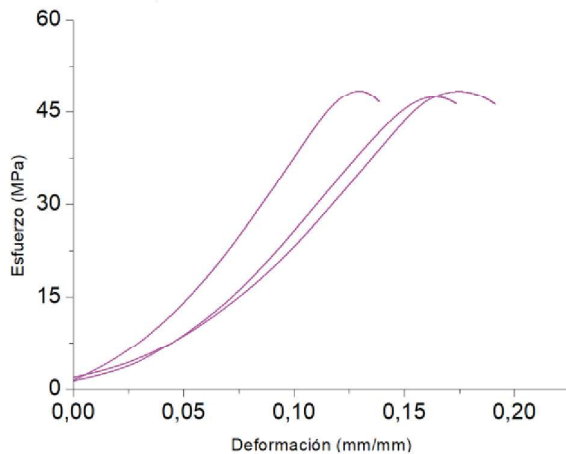
FIGURA 7. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CASO ACOSTADO-HORIZONTAL



FUENTE AUTOR

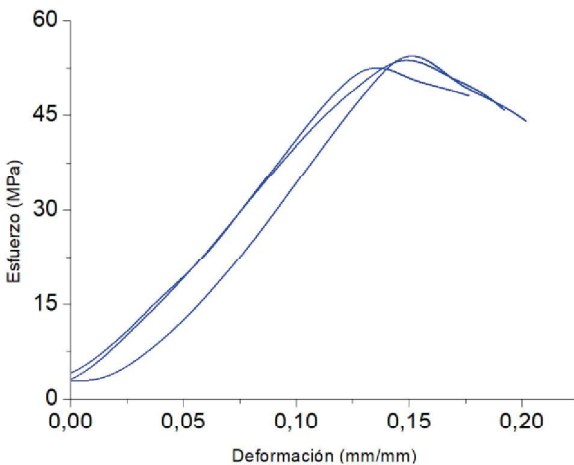
En cuanto a la combinación Lateral-Diagonal, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 283,3 MPa, mientras que, en la combinación Lateral-Horizontal, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se registró un módulo de elasticidad promedio de 349,9 MPa. además, el Esfuerzo de Tensión Máximo es de 48,2 MPa para la combinación Lateral-Diagonal y de 54,3 MPa para la combinación Lateral-Horizontal.

FIGURA 8. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CASO LATERAL-DIAGONAL



FUENTE AUTOR

FIGURA 9. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN CASO LATERAL-HORIZONTAL



FUENTE AUTOR

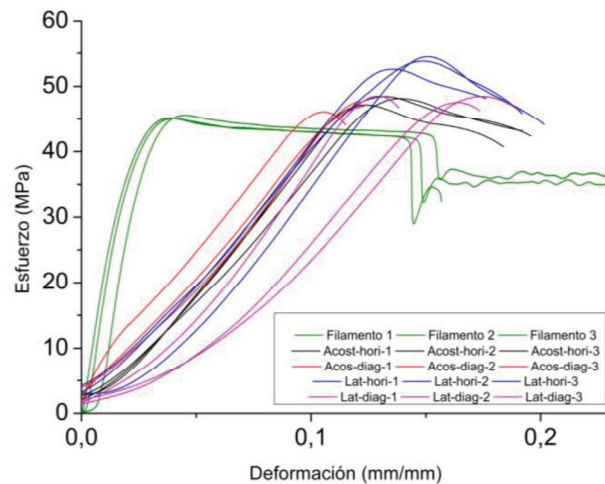
FIGURA 10. EJEMPLO ESPECÍMENES FACTURADOS



FUENTE AUTOR

Para el caso del filamento fue necesario usar una máquina con una celda de carga más pequeña (5kN) y con mayor sensibilidad.

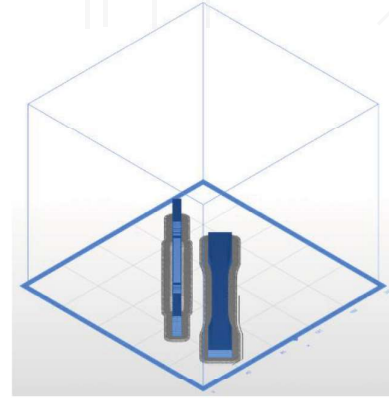
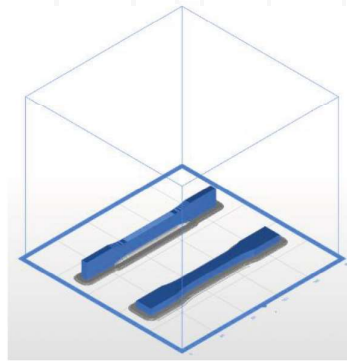
FIGURA 11. CURVA ESFUERZO DEFORMACIÓN ESPECÍMENES Y FILAMENTO



FUENTE AUTOR

En comparación con investigaciones similares, Letcher [5] para especímenes acostados horizontales, con espesor 6mm, obtuvo Esfuerzo de tensión máximo promedio de 58 MPa y módulo de elasticidad de 3,5 GPa. El valor de esfuerzo de tensión es cercano a los obtenidos en esta investigación, pero el módulo de elasticidad es la décima parte del referenciado. Por último, la elongación a ruptura de Letcher está entorno al 3%, en este caso está en promedio en el 15%. Por otra parte, Raja [6] con probetas de espesor 3mm determinó un módulo de elasticidad de 3 GPa. Ciftci [7] estimó módulos de elasticidad cercanos a 105 MPa.

TABLA 3
Comparación de propiedades mecánicas entre filamento y espécimen impreso



Propiedades mecánicas	filamento Ø1,75mm	Acostado-Horizontal	Lateral-Horizontal	Acostado-Diagonal	Lateral Diagonal
Módulo de elasticidad (MPa)	2181,6	414,24	349,86	422,4	283,3
Esfuerzo de tensión máximo (MPa)	45,3	48,85	54,3	46,7	48,2
Deformación a esfuerzo de tensión máximo	4,2%	13,2%	15,6%	11,7%	16,2%
Deformación a esfuerzo de ruptura máximo	31,7%	19,1%	20,4%	12%	16,8%

IV. CONCLUSIONES

Comparando con investigaciones similares, se encontraron módulos de elasticidad en un amplio rango, evidenciando la influencia de parámetros como la calidad dimensional, la porosidad, la unión intercapas e intracapas y, esencialmente, la composición química de cada tipo de PLA en particular. Este último aspecto es poco mencionado en las investigaciones.

Se determinó que existen diferencias entre las configuraciones de impresión, sin embargo, hay que profundizar para identificar si son estadísticamente significativas las diferencias tanto entre las impresiones acostadas y laterales, como entre las diagonales y horizontales.

Los fenómenos de recristalización durante el proceso de deposición del material incrementan la elasticidad, lo cual se manifiesta en un aumento significativo de la deformación a esfuerzo de tensión máximo, que puede llegar a ser tres o incluso cuatro veces mayor.

Para lograr una comprensión más profunda de este fenómeno, es necesario emplear métodos de caracterización mecánica avanzados, así como caracterización térmica y de

resistencia térmica. También es fundamental identificar los mecanismos de fractura en polímeros impresos mediante manufactura aditiva, capa por capa, utilizando filamento.

Asimismo, se deben realizar simulaciones que consideren la adherencia entre capas y tener en cuenta posibles porosidades causadas por errores de proceso.

Para investigaciones futuras se considera explorar la velocidad, temperatura, patrón y porcentaje de relleno y la variabilidad de la calidad del filamento, en las propiedades mecánicas del PLA, con el fin de profundizar en la caracterización del filamento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones de ARROWTI3D quienes dispusieron la materia prima. Agradecen el financiamiento por parte de la Universidad Santo Tomás USTA a través del Código interno del proyecto 157 y el proyecto código BOG-2023-IDT013.



REFERENCIAS

- [1] M. d. R. Salazar-Sánchez, J. A. Cañas-Montoya y H. S. Villada-Castillo, «Biogenerated polymers: an environmental alternative,» *DYNA*, vol. 87, nº 214, 2020.
- [2] V. Andronov, L. Beránek, V. Krůta, L. Hlavůňková y Z. Jeníková, «Overview and Comparison of PLA Filaments Commercially Available in Europe for FFF Technology,» *Polymers*, vol. 15, nº 14, p. 3065, 2023.
- [3] J. E. B. Calderon y M. A. V. Peña, «Effect of the different printing variables on the modulus of elasticity for the PLA-CF in 3D printing,» *Braz. J. Develop.*, vol. 9, nº 05, pp. 17345-17359, 2023.
- [4] W. B y P. JM, «The Effects of PLA Color on Material Properties of 3-D,» *Additive Manufacturing*, vol. 8, pp. 110-116, 2015.
- [5] M. W. Todd Letcher, «MATERIAL PROPERTY TESTING OF 3D-PRINTED SPECIMEN IN PLA ON AN ENTRY-LEVEL 3D PRINTER,» de *Proceedings of the ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Montreal, 2014.
- [6] S. Raja, E.Muthukumaran y Jayakrishna.K, «A Case Study of 3D Printed PLA and Its Mechanical Properties,» *Materials Today: Proceedings*, nº 5, pp. 11219-11226, 2018.
- [7] F. CIFTCI, M. GEZEK y C. B. USTUNDAG, «MECHANICAL CHARACTERIZATION OF 3D PRINTED PLA,» de *4th INTERNATIONAL CONGRESS ON 3D PRINTING (ADDITIVE MANUFACTURING) TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY*, Antalya, 2019.

