

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL PLA EN FILAMENTO Y PIEZAS IMPRESAS EN 3D

P.N.B. Reis ^{1*}, L. Távora ^{2,3}, M. Muñoz-Reja ^{3,4}, M.T. Aranda ^{3,4}, L.M. Ferreira ^{2,3}

¹ Depart. Ingeniería Mecánica, Universidad de Coimbra, CEMMPRE, ARISE, 3030-788 Coimbra, Portugal.

² Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, Sevilla, 41092, Spain.

³ Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África 7, Sevilla, 41011, Spain.

⁴ Ingeniería de Estructuras y Materiales, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla, C/ Virgen de África 7, Sevilla, 41011, Spain.

* Persona de contacto: paulo.reis@dem.uc.pt

RESUMEN

La Fabricación por Filamento Fundido (FFF) se ha consolidado como una de las tecnologías más utilizadas en la producción de piezas poliméricas, destacándose el ácido poliláctico (PLA) por su biodegradabilidad y su facilidad de procesamiento. En este contexto, el presente estudio realiza un análisis comparativo del comportamiento mecánico del PLA en forma de filamento y en piezas fabricadas mediante FFF, con el objetivo de evaluar la influencia del proceso de impresión en sus propiedades estructurales. Los resultados evidencian una reducción del 10,8% en la resistencia a la tracción y del 31,6% en el módulo de elasticidad en las piezas impresas en comparación con el filamento. Estas disminuciones se atribuyen principalmente a la formación de vacíos interlaminares, a la adhesión imperfecta entre capas y a la degradación térmica inducida por los ciclos térmicos propios del proceso de impresión. En conjunto, estos factores comprometen la continuidad de la matriz polimérica, reducen la eficiencia en la transferencia de carga y acentúan la anisotropía del material, afectando de manera significativa su desempeño mecánico global.

PALABRAS CLAVE: Fabricación por Filamento Fundido (FFF), Ácido poliláctico (PLA), Comportamiento mecánico.

ABSTRACT

Fused Filament Fabrication (FFF) has become one of the most widely used technologies to produce polymeric components, with polylactic acid (PLA) standing out due to its biodegradability and ease of processing. In this context, the present study performs a comparative analysis of the mechanical behaviour of PLA in filament form and in parts manufactured by FFF, aiming to evaluate the influence of the printing process on its structural properties. The results reveal a reduction of 10.8% in tensile strength and 31.6% in elastic modulus in the printed parts compared to the filament form. These decreases are mainly attributed to the formation of interlayer voids, imperfect interlayer adhesion, and thermal degradation induced by the thermal cycles inherent to the printing process. Collectively, these factors compromise the continuity of the polymer matrix, reduce load transfer efficiency, and increase material anisotropy, significantly affecting the overall mechanical performance.

KEYWORDS: Fused Filament Fabrication (FFF), Polylactic acid (PLA), Mechanical behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D, en particular la Fabricación por Filamento Fundido (FFF), permite la producción de componentes complejos y personalizados, al mismo tiempo que minimiza el desperdicio de material. Entre los diversos termoplásticos utilizados en FFF, el ácido poliláctico (PLA) ha recibido una atención creciente debido a su biodegradabilidad, facilidad de procesamiento y propiedades mecánicas adecuadas [1, 2]. El PLA es un polímero de origen biológico, derivado de recursos renovables como almidón de maíz o caña de azúcar, constituyendo una alternativa más sostenible frente a los plásticos derivados del petróleo [3].

A pesar de estas ventajas, la estabilidad térmica relativamente baja y las propiedades mecánicas moderadas del PLA todavía limitan sus aplicaciones en

ingeniería, especialmente en componentes que requieren alta resistencia o desempeño bajo condiciones extremas [4]. Además, estudios han demostrado que las piezas fabricadas mediante FFF presentan propiedades mecánicas inferiores en comparación con el filamento original. Esta disminución se atribuye frecuentemente a factores intrínsecos del proceso de impresión, como la formación de vacíos interlaminares, la adhesión imperfecta entre capas y la anisotropía inducida por los ciclos térmicos del filamento durante la deposición [5,6].

Comprender estas limitaciones es esencial para optimizar el desempeño mecánico de las piezas impresas, permitiendo ajustes en los parámetros de procesamiento, en el diseño de los componentes y en la selección de materiales. Investigaciones recientes han buscado cuantificar la diferencia entre las propiedades del filamento y las de las piezas finales, con el objetivo de

identificar estrategias que minimicen la pérdida de resistencia y rigidez durante la impresión 3D. En este contexto, el presente trabajo se centra en el análisis comparativo de las propiedades mecánicas del PLA en filamento y en piezas impresas, ofreciendo información clave para aplicaciones de ingeniería que exigen una mayor fiabilidad estructural.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado en este estudio fue el PLA Ingeo Biopolymer 3D850 suministrado por NatureWorks® [7]. Las propiedades físicas y mecánicas más relevantes del filamento se presentan en la Tabla 1. El PLA se suministró en forma de bobina, con filamentos de 2,85 mm de diámetro, y posteriormente se procesó mediante FFF para la elaboración de probetas estandarizadas para la caracterización mecánica.

Tabla 1: Propiedades físicas y mecánicas del PLA Ingeo Biopolymer 3D850 [7].

Propiedad	Valor
Densidad	1.24 g/cm ³
Resistencia a la tracción	50 MPa
Módulo de Young	2315 MPa
Alargamiento en la rotura	3.31%

La geometría y las dimensiones de estas probetas se detallan en la Figura 1. Los parámetros de impresión empleados se configuraron en el software de laminado Ultimaker Cura®, según se indica en la Tabla 2. La fabricación de las probetas se realizó en una impresora Ultimaker 2®, garantizando la consistencia del proceso y la reproducibilidad de los resultados experimentales.

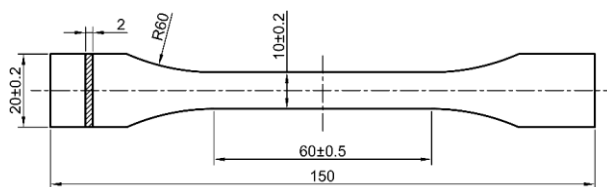


Figura 1. Geometría y dimensiones de las muestras según la norma ISO 527-4.

Tabla 2: Parámetros de impresión.

Parámetro	Valor
Densidad de relleno	100%
Patrón de relleno	Concéntrico
Temperatura de impresión	210 °C
Temperatura de cama	30 °C
Velocidad de impresión	70 mm/s

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 presenta las curvas tensión–deformaciones representativas de ensayos de tracción realizados en el filamento de PLA y en piezas impresas con el mismo

material. En el caso del filamento de PLA, la curva se inicia con un comportamiento aproximadamente lineal, característico del régimen elástico, en el que la tensión aumenta proporcionalmente a la deformación. A medida que avanza el ensayo, se observa una transición hacia un régimen dúctil, en el que el material continúa deformándose hasta alcanzar la resistencia máxima antes de la rotura. En cuanto a las piezas impresas, la curva también muestra un régimen elástico inicial similar. No obstante, su pendiente y su extensión son menores que las del filamento. Además, la tensión máxima alcanzada es inferior y la rotura se produce a niveles de deformación más reducidos, lo que refleja un comportamiento globalmente más frágil en comparación con el filamento.

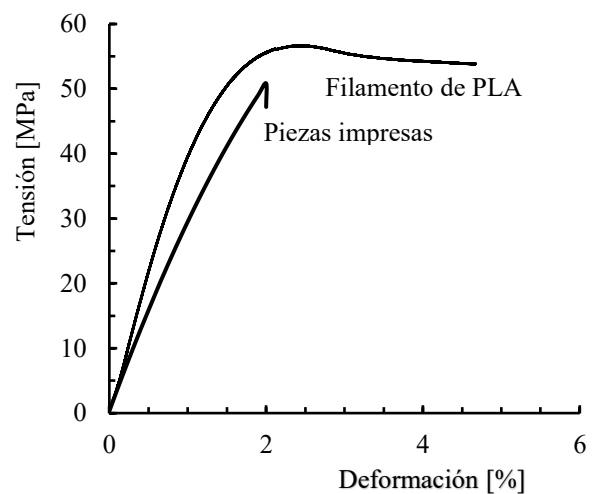


Figura 2. Curvas representativas de tracción del filamento de PLA y del PLA impreso en 3D.

La fractura frágil antes reportada se ve igualmente corroborada por el análisis de la superficie de fractura del PLA mostrada en la Figura 3. Su aspecto típicamente liso y plano pone de manifiesto la presencia de una deformación plástica despreciable antes de la falla, característica de un comportamiento de fractura frágil [8, 9]. Adicionalmente, la comparación entre los vacíos columnares formados durante el proceso de impresión y los ilustrados en la Figura 4 permite observar que estos sufrieron una distorsión geométrica bajo la acción de la carga de tracción. Esta modificación de la forma genera variaciones en las concentraciones locales de tensión, favoreciendo la iniciación y propagación de mecanismos de falla tanto interlaminar como intralaminar [10, 11].

Con base en las curvas tensión–deformaciones presentadas anteriormente, se observa que la resistencia a la tracción del filamento de PLA en su forma bruta es del orden de 56,6 MPa, mientras que las piezas producidas mediante impresión 3D presentan un valor aproximado de 50,5 MPa, lo que corresponde a una reducción de alrededor del 10,8%. De este modo, se verifica una retención de aproximadamente el 90% de la resistencia mecánica original del filamento, siendo esta pérdida atribuida, principalmente, a las características intrínsecas del proceso de fabricación. Tal como se

evidencia en las Figuras 3 y 4, el método de deposición capa por capa favorece la formación de imperfecciones microestructurales, tales como vacíos interlaminares, porosidad residual y fusión incompleta entre filamentos adyacentes. Estas discontinuidades comprometen la integridad de la matriz polimérica, interrumpen la continuidad estructural y reducen la eficiencia de la transferencia de carga a lo largo del material, afectando el desempeño mecánico global de las piezas impresas.

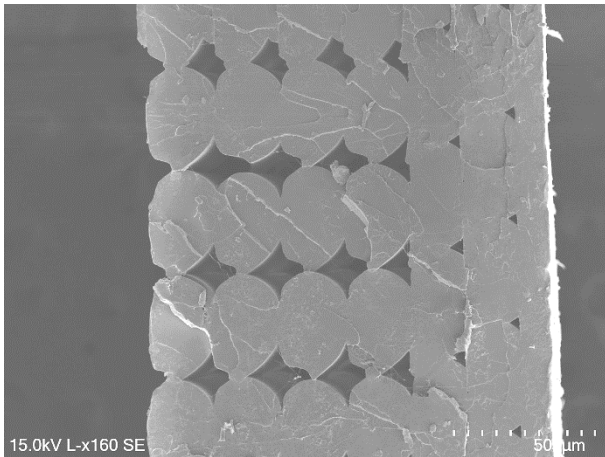


Figura 3. Mecanismos de daño obtenidos para PLA impreso en 3D.

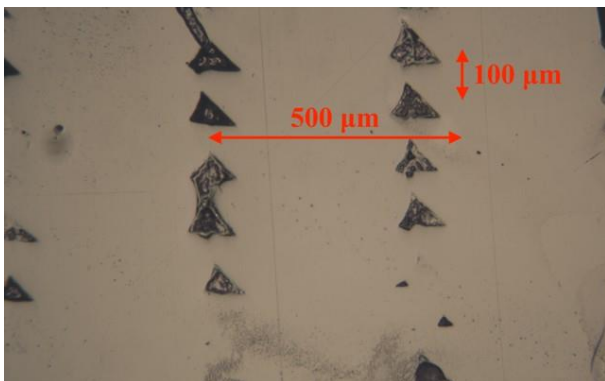


Figura 4. Micrografías de PLA impreso en 3D (aumento de 10x).

Adicionalmente, el ciclo térmico característico del proceso FFF implica sucesivos calentamientos y enfriamientos rápidos del filamento extruido durante la deposición, favoreciendo la anisotropía en las propiedades mecánicas. La reducción de la temperatura de transición vítrea (T_g), ilustrada en la Figura 5, corrobora la ocurrencia de degradación térmica previamente reportada. En estas condiciones, pueden producirse escisiones de las cadenas poliméricas, con las consiguientes alteraciones en el grado de cristalinidad, lo que conduce a una disminución de la T_g . Este fenómeno contribuye a la obtención de un material con comportamiento más dúctil, menos rígido y con menor estabilidad térmica, tal como se evidencia en la Figura 6.

En lo que respecta al módulo de elasticidad, se observa una disminución significativa de aproximadamente el 31,6% (de 4,53 GPa a 3,1 GPa). Esta reducción está directamente asociada a la presencia de microvacíos y a la adhesión interlaminar débil o imperfecta, que actúan como concentradores de tensión y zonas preferenciales para la iniciación de microfisuras, comprometiendo de manera más pronunciada la rigidez del material. En contraste, la resistencia a la tracción depende principalmente de la capacidad del material para soportar la carga máxima antes de la fractura y tiende a ser menos sensible a la presencia de pequeños defectos dispersos, salvo cuando estos presentan dimensiones críticas o una localización estratégica que favorezca su propagación inestable.

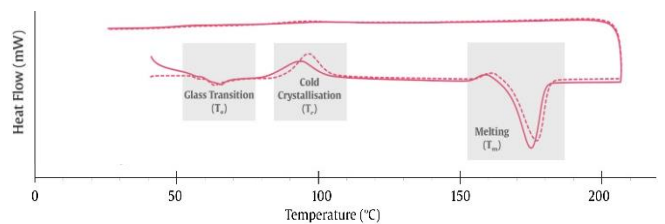


Figura 5. Calorimetría diferencial de barrido de las muestras de PLA en bobina y de las muestras impresas.

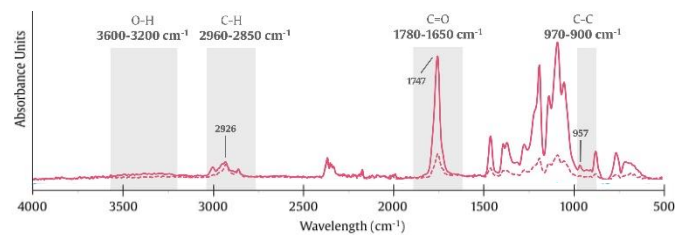


Figura 6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de las muestras de PLA en bobina y de las muestras impresas.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que la transición de filamentos a piezas impresas en 3D provocó una reducción de aproximadamente el 10,8% en la resistencia a la tracción y del 31,6% en el módulo de elasticidad. Estas disminuciones se atribuyen principalmente a la formación de vacíos, a la adhesión interlaminar imperfecta y a la degradación del polímero inducida por los ciclos térmicos propios del proceso de impresión. En conjunto, estos factores interrumpen la continuidad de la matriz polimérica, comprometen la eficiencia en la transferencia de carga y acentúan la anisotropía del material, afectando de manera significativa su desempeño mecánico global.

AGRADECIMIENTOS

El autor, Paulo N.B. Reis, desea expresar su agradecimiento por el apoyo financiero concedido mediante fondos nacionales a través de la FCT –

Fundação para a Ciência e a Tecnologia, en el marco de los proyectos UID/00285/2025 – Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes (CEMMPRE) y LA/P/0112/2020.

Asimismo, Paulo N.B. Reis manifiesta su sincero reconocimiento por la beca otorgada en el ámbito del Programa Fundación Carolina–Grupo Tordesillas, cuyo apoyo ha sido fundamental para el desarrollo y la consolidación del presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] J.M. Reverte, M. Caminero, J.M. Chacón, E. García-Plaza, P.J. Nunez, J.P. Becar, Mechanical and geometric performance of PLA-based polymer composites processed by the fused filament fabrication additive manufacturing technique. *Materials* 13 (2020): 1924.
- [2] A.J. Arockiam, K. Subramanian, R.G. Padmanabhan, R. Selvaraj, D.K. Bagal, S. Rajesh, A review on PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today: Proceedings* 50 (2022): 2057–2064.
- [3] M.S. Singhvi, S.S. Zinjarde, D.V. Gokhale, Polylactic acid: synthesis and biomedical applications. *Journal of Applied Microbiology* 127 (2019): 1612–1626.
- [4] Z. Refaa, F. Rousset, S. Xin, Crystallization kinetics of poly-(lactic acid) with and without talc: Optical microscopy and calorimetric analysis. In: *AIP Conference Proceedings*, 1593 (2014): 342–346.
- [5] L. Ferreira, J.L. Sanchez, M. Muñoz-Reja, L. Távara, Modelling the Anisotropic Elasto-Plastic Response of 3D-Printed Polymer Parts, *Journal of Applied and Computational Mechanics* (2026):1–10.
- [6] P.N.B. Reis, L. Távara, M. Muñoz-Reja, M. T. Aranda, F. Nur Ainin, M.D. Azaman, L.M. Ferreira, Multi-scale characterisation of PLA composites with natural-based reinforcements: from filament to 3D-printed parts, artículo en revisión para la revista *Polymer Composites* (2026).
- [7] Ingeo Biopolymer 3D850 Technical Data Sheet.
- [8] M.D. Hayes, D.B. Edwards, A.R. Shah, Fractography basics. In: M.D. Hayes, D.B. Edwards, A.R. Shah (eds.) *Fractography in Failure Analysis of Polymers*. *Plastics Design Library*, William Andrew Publishing, Oxford (2015): 48–92.
- [9] O. Lampron, A. Lingua, D. Therriault, M. Lévesque, Characterization of the non-isotropic tensile and fracture behavior of unidirectional polylactic acid parts manufactured by material extrusion. *Additive Manufacturing* 61 (2023): 103369.
- [10] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, H. Ouyang, Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Composites Part B: Engineering* 188 (2020): 107894.
- [11] M.-H. Hsueh, C.-J. Lai, S.-H. Wang, Y.-S. Zeng, C.-H. Hsieh, C.-Y. Pan, W.-C. Huang, Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3D-printed PLA and PETG, using fused deposition modeling. *Polymers* 13 (2021): 2387.