

**INFLUENCIA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIÁCIDO
LÁCTICO PLA VARIANDO LA ORIENTACIÓN DE LAS LÍNEAS DE
DEPOSICIÓN EN IMPRESIONES 3D**

**INFLUENCE ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LACTIC POLIACID
PLA BY VARYING THE ORIENTATION OF THE DEPOSITION LINES IN 3D
PRINTS**

MSc. Jonathan Javier Pabón Rojas *, **PhD Bladimir Ramón Valencia****
MSc. Holger Antonio Cagua Rivera**

* **Universidad de Antioquia**, Facultad de Ingenierías, Centro de Investigación, Innovación
y Desarrollo de Materiales- CIDEMAT.
CI 67 # 53-108, Medellín, Antioquia, Colombia.
jonathan.pabon@udea.edu.co.

** **Universidad de Pamplona**, Facultad de ingenierías y Arquitectura, Programa de
Ingeniería Mecánica Grupo de Investigación GIMUP.
Kilómetro 1, vía a Bucaramanga, Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
Tel.: (+57 7) 568 5303, Fax: (+57 7) 568 5303, Ext. 144
(hbladimir, holger.cagua)@unipamplona.edu.co

Resumen: El modelado por deposición fundida representa un avance significativo comparado con otros procesos de producción, debido a la reducción en el tiempo de fabricación de piezas con geometrías complejas. Sin embargo, las propiedades mecánicas del material se ven afectadas a causa de la dirección de deposición, influyendo en el funcionamiento de la pieza en servicio. Por tanto, en la siguiente investigación se analizó las propiedades mecánicas a tracción del poliláctico (PLA), en diferentes ángulos de impresión. Se evidenció un comportamiento de carácter anisotrópico, en el cual, la mejor conducta mecánica se mostraba cuando los hilos están orientados en la misma dirección de la fuerza. En consecuencia, se empleó un análisis microscopía electrónica de barrido, donde se detectó una buena adherencia entre las áreas de los filamentos fundidos y una conducta frágil propia de un material elástico lineal. Por último, se realizó un estudio comparativo entre un modelo de elementos finitos y los resultados experimentales, donde se aprecia un comportamiento mecánico similar al obtenido de manera experimental.

Palabras clave: Poliláctico, moldeado por deposición fundida, caracterización mecánica.

Abstract: Fused deposition molding represents a significant advance compared to other production processes, due to the reduction in manufacturing time for parts with complex geometries. However, the mechanical properties of the material are affected due to the direction of deposition, influencing the functioning of the part in service. Therefore, in the following investigation, the tensile mechanical properties of Lactic Poliacid (PLA) were analysed at different printing angles. An anisotropic behaviour was observed in which the best mechanical behaviour is evidenced when the threads are oriented in the same direction of force. Consequently, a scanning electron microscopy analysis was used, where a good adhesion between the areas of the melted filaments and fragile behaviour

typical of a linear elastic material were detected. Finally, a comparative study was carried out between a finite element model and the experimental results, where a mechanical behaviour similar to that obtained experimentally was observed.

Keywords: Publishing rules, procedures, publication, IFAC format.

1. INTRODUCCIÓN

Al pasar de los años han evolucionado los modelos de producción, al punto de obtener procesos que involucran menos etapas en la fabricación de un producto, como es el caso de la impresión 3D o también conocido como modelado por deposición fundida (FDM). Este proceso de fabricación rápida, se caracteriza por producir componentes con geometrías complejas, partiendo de un diseño asistido por computadora (CAD) (Wang *et al.*, 2017). La técnica FMD, utiliza polímeros termoplásticos en forma de filamento, que se hacen pasar por una boquilla en caliente, para ser fundidos en una plataforma de construcción hasta obtener la forma deseada. (Vélez *et al.*, 2020). Este método de FDM, ha revolucionado los sistemas de fabricación y representa una serie de ventajas en comparación con otros procesos de manufactura convencionales debido a los materiales empleados, velocidad de producción, y precisión dimensional en las piezas elaboradas (Lee *et al.*, 2017; Sood *et al.*, 2010).

El desconocimiento de los patrones de impresión de una pieza fabricada a partir de la manufactura aditiva, limita el campo de aplicación y la utilización de componentes esenciales bajo esta técnica. En ocasiones, elementos contruidos mediante este método, no suministran información sobre las propiedades mecánicas de las piezas en servicio, y en consecuencia la resistencia del material no cumple con las especificaciones del diseño mecánico, generando desconfianza en este proceso de producción. (Alaimo, G *et al.*, 2017) en su estudio afirman, que la dirección de extrusión del filamento influye directamente en las propiedades mecánicas del material.

Son varias las investigaciones que han sido reportadas con respecto a la orientación de las capas fundidas y las propiedades mecánicas del material. Kęsy, A y Kotliński, J (Kęsy, A., y Kotliński, J., 2010), realizaron impresiones en 3D de un fotopolímero FullCure 720 en diferentes ángulos de deposición, dando como resultado un comportamiento anisotrópico de material, con lo

cual, el material aumenta sus propiedades mecánicas cuando los filamentos se inclinan en la misma dirección de la carga. Abbott *et al.* (Abbott *et al.*, 2018), probaron a tracción un termoplástico de ABS en dos configuraciones de orientación de los filamentos, con el propósito de evaluar la relación entre la resistencia de unión entre las capas extruidas y los parámetros de impresión. De acuerdo con los resultados, los factores que más afectaron las propiedades mecánicas, fueron la velocidad de deposición y la longitud de contacto (Cacua *et al.*, 2018)

El PLA es un polímero derivado del ácido láctico, se obtiene a partir de recursos renovables de productos agrícolas como el maíz, remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Posee buenas propiedades mecánicas, con aplicaciones biomédicas debido a su compatibilidad con tejidos vivos (Bose *et al.*, 2018). Entre las características más importantes de PLA, se encuentra en la facilidad para fabricar diferentes dispositivos mediante el uso de impresoras 3D comerciales de bajo costo. De otro lado, se están desarrollando nuevos materiales personalizados a partir del PLA, empleados en diferentes sectores, especialmente en el campo de prótesis médicas (Susmel *et al.*, 2017; Mirón *et al.*, 2017).

De acuerdo con lo anterior, el PLA posee buenas propiedades mecánicas, además de una excelente facilidad para producir piezas por impresión en 3D (Rodríguez *et al.*, 2016). Sin embargo, algunos elementos fabricados por esta técnica, presentan un comportamiento anisotrópico, es decir, que los esfuerzos aplicados, dependen de la dirección de los hilos extruidos en la estructura del producto terminado. Por consiguiente, la finalidad de la siguiente investigación está enmarcada en el estudio de las propiedades mecánicas del PLA, con variación en la orientación de los filamentos fundidos para probetas obtenidas por impresión en 3D. Para tal fin, se fabricaron especímenes mediante la técnica de moldeado por deposición en fundido bajo condiciones establecidas de velocidad y temperatura en diferentes ángulos de deposición. Posteriormente, los materiales se probaron a

tensión según la norma ASTM 638-10, la estructura se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Por último, se realizó una simulación en ANSYS, en donde se llevó a cabo un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de forma experimental y los obtenidos de forma numérica.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

El material utilizado para el presente estudio es un termoplástico conocido como poliláctico (PLA), con características que lo ubican como un polímero biodegradable y biocompatible, además lo posicionan como uno de los materiales más utilizados para procesos de impresión 3D. Para esta aplicación el material es adquirido en forma de filamento de diámetro 1.75 mm, en presentación de 1 Kg, empacado al vacío y distribuido por la empresa “Maker - R”, la ficha técnica de este material se puede observar en la (Tabla 1). Cabe resaltar las diversas aplicaciones que involucran este material como: la industria alimentaria, médica, textil entre otras. Así mismo, al realizar una comparación de las propiedades mecánicas del PLA, se observa la existencia de cambios pocos significativos como los mostrados en el estudio de Arbeiter et al. (Arbeiter *et al.*, 2018) quienes fabricaron y caracterizaron probetas de PLA impresas en 3D para optimizar los parámetros por deposición en fundido.

El método de fabricación de las probetas se realizó por modelado por deposición fundida. Inicialmente se realizó un diseño asistido por computador (CAD) como el mostrado en la (Fig 1), con la geometría de la probeta según las condiciones de la norma ASTM 638 -10 para ensayos de tracción de polímeros, como en el estudio realizado por J. R. C. Dizon et al. (Dizon *et al.*, 2018)

Tabla 1. Ficha técnica del PLA

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³ , 21.5°C	1.24
MFR g/10min	10min, 2.16 Kg	6
Resistencia a la tracción	Psi (MPa) 10min	8700 (60)
Módulo de tracción	Kpsi (GPa)	500 (3.5)
Elongación	%	6
Resistencia al impacto	ft*lb/in	0.3 (16)
Resistencia a la temperatura	°C	55

Fuente: empresa Maker-R

El proceso de fabricación se realizó con la ayuda de una impresora MakerBot Replicator Z-8, apoyado con el CAD y la configuración de los parámetros de deposición para el material PLA.

Estos parámetros se muestran a continuación: ver (Tabla2).

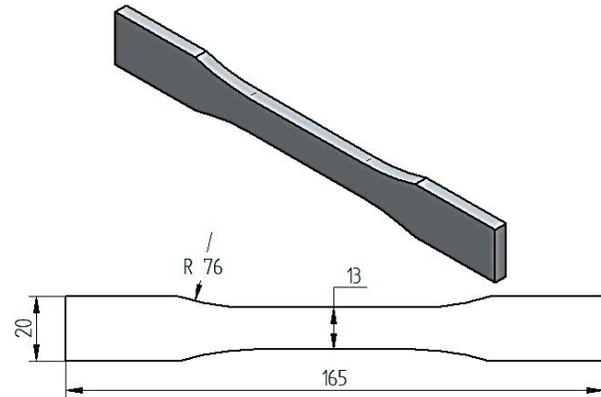


Fig. 1. Representación en CAD de la probeta de tracción.

Tabla 2. Parámetros de fabricación por FDM.

PARÁMETRO	VALOR
Velocidad de deposición	150 mm/s
Temperatura del extrusor	215°C
Temperatura de la cama	T. Ambiente
Densidad	100%
Altura de capa	0.2 mm
Numero de perímetros	2
Diámetro del hilo extruido	0.2mm
Tipo de relleno	Lineal
Raft	Si

A partir de estos parámetros se fijó la dirección de deposición (objeto de este estudio), con configuraciones en las probetas en ángulos definidos como 0°, 45° y 90° ver (Fig. 2). Para el presente estudio la orientación a 0° está definida como la dirección axial de las probetas, es decir, paralela a la fuerza de aplicación en el ensayo de tracción (dirección: X+). Por otro lado, la inclinación a 90° está determinada como la dirección transversal o perpendicular a la carga aplicada (dirección: Y+). Los filamentos con un ángulo de 45° se han tomado como la variación de las dos direcciones anteriores.

Se determinaron las propiedades mecánicas de las probetas mediante ensayos de tracción bajo norma ASTM D638-10. Para este ensayo se utilizó la máquina universal Shimadzu UH-X600 con capacidad de 600 KN y juegos de accesorios para probetas poliméricas. Las condiciones de temperatura al ambiente, humedad relativa de 60% y velocidad de deformación de 5mm/s para 5

pruebas por configuración de acuerdo con la orientación de deposición.

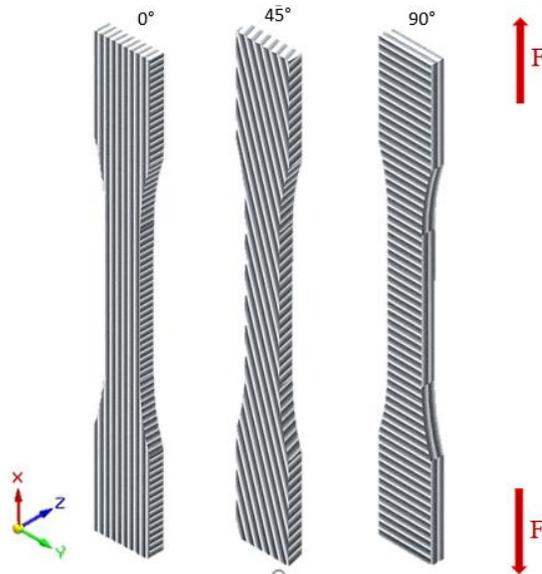


Fig. 2. Dirección de deposición en las probetas, (0°, 45° y 90°).

Se llevó a cabo un análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) con el propósito de evaluar la adherencia de los hilos de deposición, usando un equipo de marca TESCAN, modelo MIRA 3 FEG-SEM. En este procedimiento se utilizaron condiciones de aislamiento a alto vacío, voltaje de 10 KV, con un recubrimiento en un baño de oro para mejorar la conductividad de las áreas analizadas.

Por medio de análisis de elementos finitos, se realizaron 3 simulaciones con la finalidad de comparar los resultados obtenidos en la caracterización mecánica. El software de ingeniería utilizado fue ANSYS versión 16.0 con su aplicativo “static structural”. Las condiciones utilizadas para la simulación fueron las siguientes: las propiedades mecánicas del PLA se tomaron de la ficha técnica del proveedor del filamento, mientras que el CAD para la geometría, se empleó el mismo utilizado en la fabricación por impresión en 3D. Para el desarrollo de las simulaciones se utilizó una densidad de malla espaciada por 1 mm entre nodos, formando elementos cúbicos para la parte de soporte de la probeta. Por otra parte, en la sección de interés del modelo (longitud calibrada de la probeta) se aplicó un mallado espaciado cada 0.2 mm, estos valores fueron producto de un análisis de parametrización de malla como se observa en la (

Fig. 3). La densidad de malla finalmente fue establecida con un total de 11320 nodos y 10735 elementos.

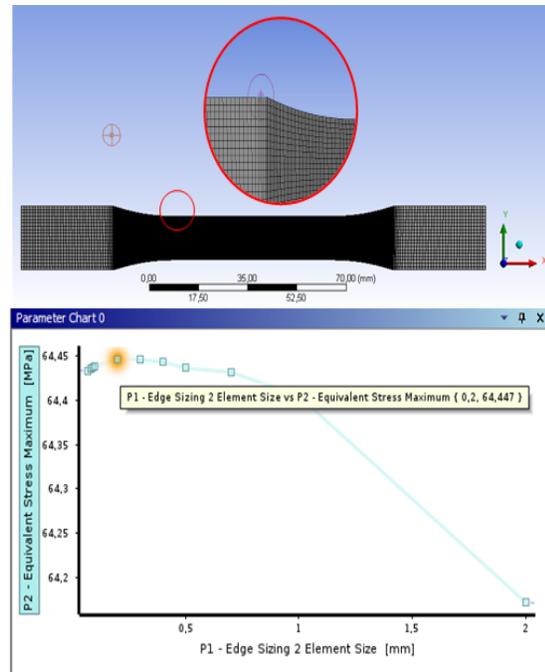


Fig. 3. Estudio de parametrización y tipo de malla.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Comportamiento a tracción

En la (Fig. 4), se observa las tendencias de esfuerzo versus la deformación para los materiales objeto de estudio, en el cual, se analizó el comportamiento mecánico a tracción para las diferentes configuraciones de las probetas, variando la orientación de deposición con respecto a la fuerza aplicada en dirección axial. En esta, se aprecia un comportamiento elástico-lineal que varía con respecto a la dirección de los hilos y una fractura propia de los materiales poliméricos de carácter frágil.

De acuerdo con los resultados de la prueba de tensión, se exhibe un mejor comportamiento a la tracción sobre el conjunto de materiales en donde, la dirección de deposición es paralela con la aplicación de la fuerza, es decir, cuando los hilos se ubican a 0°, seguido de las configuraciones a 45° y 90° respectivamente. Este comportamiento se asocia al incremento en el área de contacto entre líneas de deposición, resultado que es característico de un material anisotrópico.

Resultados similares fueron obtenidos por (Ahn, S. H et al, 2002), quienes investigaron el efecto de la dirección de deposición para en el copolímero ABS en probetas fabricadas por FDM. Los valores arrojados, demostraron las mejores propiedades del esfuerzo máximo para el material impreso con orientación de 0°, con valores cercanos a los 18 MPa, seguido de la orientación de 45° con 13 MPa y por último la dirección transversal a 90° con 3 MPa.

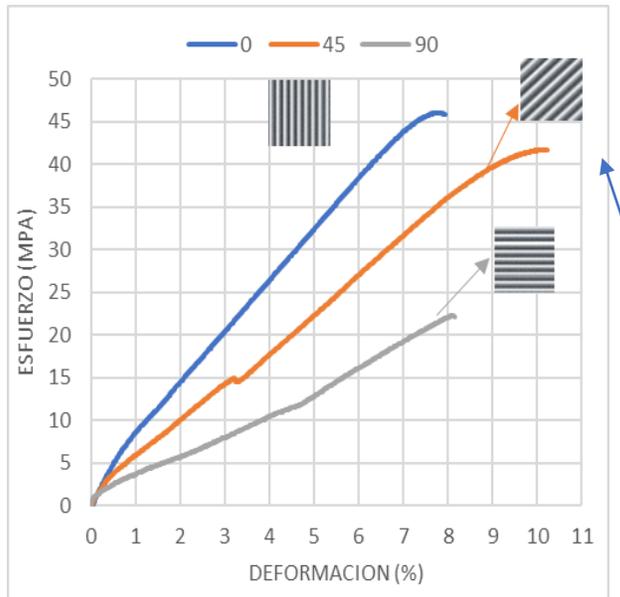


Fig. 4. Diagrama esfuerzo vs deformación, comparando los resultados de las diferentes configuraciones.

En la (Fig. 5), se muestra una comparación de la rigidez de los materiales antes mencionados. Se puede observar que para las muestras de 0° se obtuvo un mayor módulo de elasticidad con valores cercanos a los 611 MPa, seguido de este, se encuentra la configuración de 45° con valores próximos a los 404 MPa y las probetas orientadas a 90° arrojaron cifras de 228 MPa. Es evidente con estos resultados, que entre más se aleje la orientación de la dirección de los hilos con respecto a la fuerza de aplicación, se disminuye el valor del módulo de rigidez. Resultados similares fueron obtenidos por (Ding *et al.*, 2019; Song *et al.*, 2017), quienes investigaron los efectos de la deposición de filamentos de PLA en dos direcciones (0° y 90°), por medio de experimentos de tensión, compresión y fractura. Al igual que el presente estudio, la respuesta del material fue anisotrópico obteniendo mejores propiedades cuando la carga se ejerce en la misma dirección de los hilos depositados, con valores cercanos a los 55 MPa.

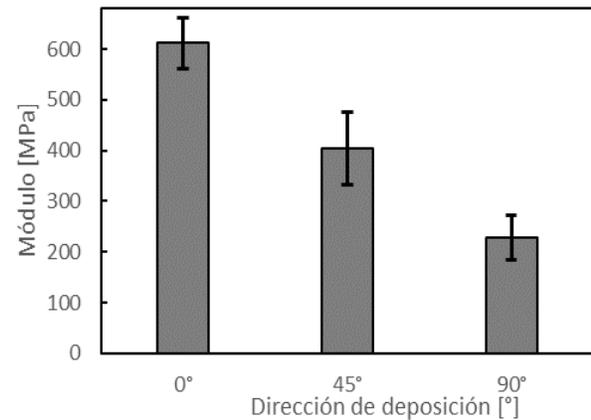


Fig. 5. Comparativa de la rigidez para las direcciones de deposición.

Para el análisis de la resistencia máxima, el esfuerzo tiene un comportamiento similar al módulo elástico como se observa en la (Fig. 6). Este comportamiento arrojó valores aproximados de 46 MPa, 42 MPa y 22 MPa para muestras de 0°, 45° y 90° respectivamente. Se puede apreciar una menor variación del esfuerzo máximo entre las probetas de 0° y 45°. De acuerdo con la investigación de (Letcher y Waytashek, 2014), en el cual, realizaron ensayos de tracción, flexión y fatiga de probetas de PLA fabricadas con impresión en 3D con variación de la dirección de deposición. Según los resultados se encontró que la dirección de impresión afecta las propiedades mecánicas del material, a diferencia del presente estudio, la muestra de 45° ofreció una mejor resistencia a la tracción con valores de 64 MPa, mientras la orientación de 0° y 90° fueron 58 MPa y 54 MPa respectivamente. Esta variación puede ser atribuida a una diferencia en los patrones de impresión utilizados con respecto al presente estudio.

A diferencia de las anteriores propiedades, los resultados de deformación como se aprecia en la (Fig. 7), muestra un mejor comportamiento de las probetas orientadas a 45° con valores en el rango del 10 %, seguido por la configuración de 90°, y 0° con porcentajes cercanos al 8 %. A pesar, que la diferencia no es muy significativa se puede asociar al comportamiento anisotrópico cuando se posiciona a 0°, aumentando el carácter frágil del material. De otro lado, en la configuración de 90° grados se produce un modo de falla por delaminación entre el área de contacto de los hilos en consecuencia, los mejores resultados se presentan a 45° por ser esta formulación, una combinación de cargas aplicadas.

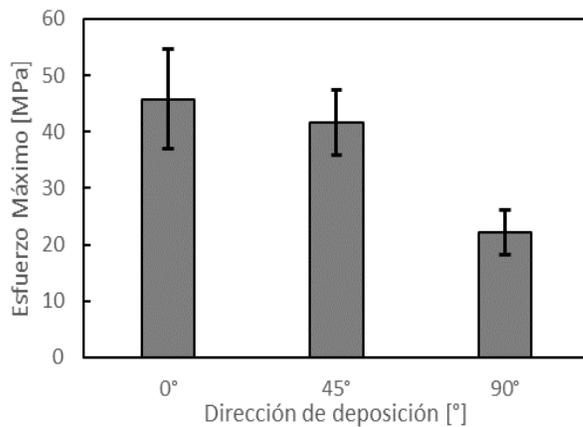


Fig. 6. Comparativa de la resistencia al esfuerzo para las direcciones de deposición.

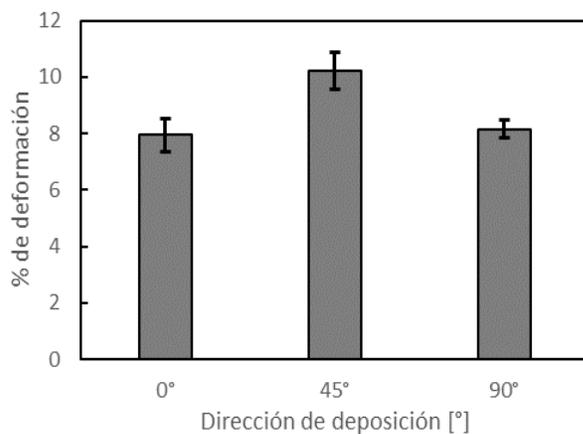


Fig. 7. Comparativa de la ductilidad para las direcciones de deposición.

3.2 Análisis de microscopía electrónica de barrido

La adherencia entre las capas de los hilos depositados con FDM, juega un papel determinante para el comportamiento mecánico del material, por lo cual, se da la necesidad de realizar un análisis SEM como medio de caracterización morfológica. En la (Fig. 8), se muestra la interface entre los hilos depositados para las probetas orientadas a 0° con respecto a la fuerza. En la micrografía se aprecia las líneas de adhesión y las dimensiones entre capas fundidas, donde prevalece una medida promedio de 190 μm . Además, se observó una zona de capas homogénea con mínimos espacios libres entre ellas, lo que conduce a determinar una buena adherencia. Estas condiciones conducen a determinar, que las condiciones de fabricación fueron adecuadas, entre estos la temperatura del

extrusor, velocidad de deposición y altura de capa. Estas imágenes corroboran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción debido a una buena unión de interface entre los hilos de impresión en 3D.

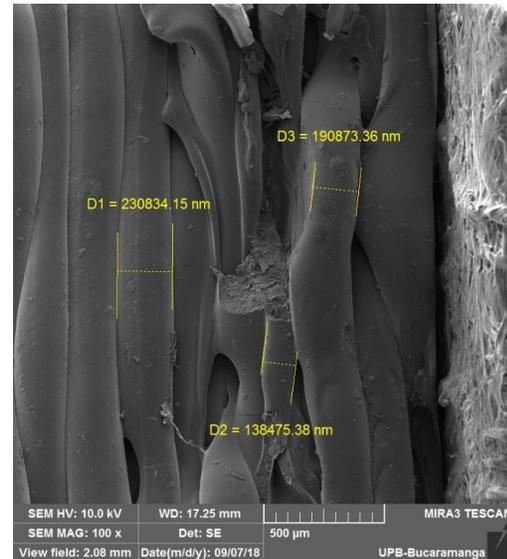


Fig. 8. Filamentos orientados a 0° respecto a la fuerza de aplicación.

En la (Fig. 9) se aprecia la superficie de fractura de una probeta con orientación de deposición a 0° respecto a la fuerza. En la imagen se muestra una fractura frágil en la sección transversal de los filamentos.

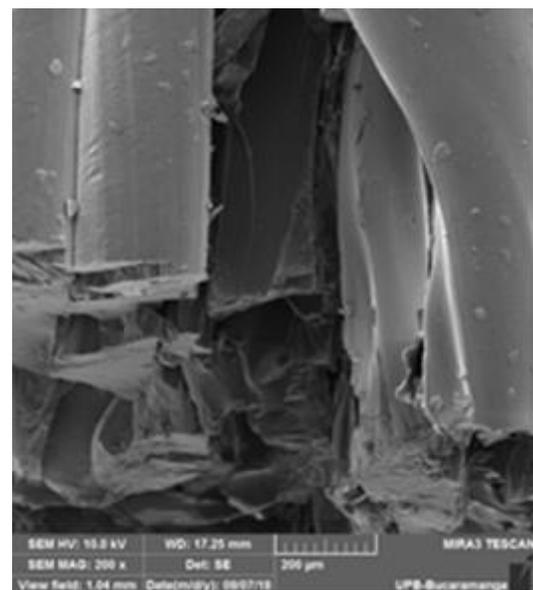


Fig. 9. Superficie de fractura para probeta orientada a 0°

3.3 Modelamiento numérico

A partir de los análisis por simulación de elementos finitos se recopiló los resultados de esfuerzo máximo, para cada configuración por deposición. Estos datos fueron útiles para establecer un medio de comparación donde se evaluó el comportamiento del espesor y tipo de sección de las probetas. En la (Fig. 10), se representa el comportamiento de las probetas orientadas: a) 0°, b) 45° y c) 90°, en donde se utilizó una escala de colores que representa los cambios de esfuerzo, (azul = mínimo, rojo = máximo).

De los modelamientos se puede observar que la concentración de mayores esfuerzos se presenta en la zona donde ocurre el cambio de sección para todas las configuraciones, es decir, cuando se inicia la longitud calibrada de la probeta. Por otra parte, los resultados de esfuerzo máximo son mayores en el análisis numérico en comparación los valores obtenidos de manera experimental. Este comportamiento es esperado ya que en la simulación no se tienen en cuenta datos como porosidad de las piezas, calibración de equipos, entre otras condiciones de un ejercicio en condiciones reales. Sin embargo, se evidencia una tendencia similar en lo que corresponde con la dirección de deposición como se representa en la (Fig. 11).

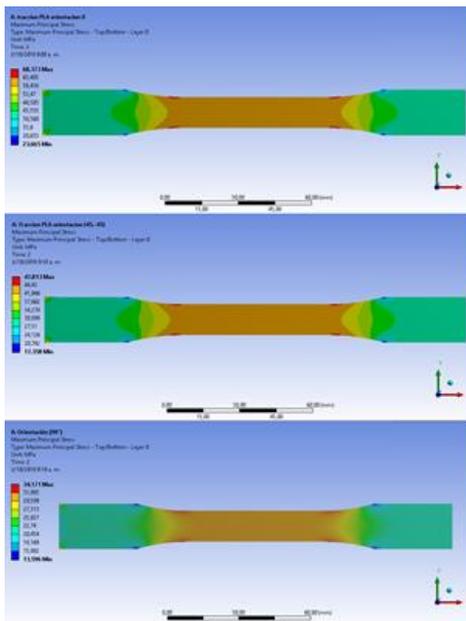


Fig. 10. Comportamiento de la simulación a tracción de las probetas: a) 0°, b) 45° y c) 90°.

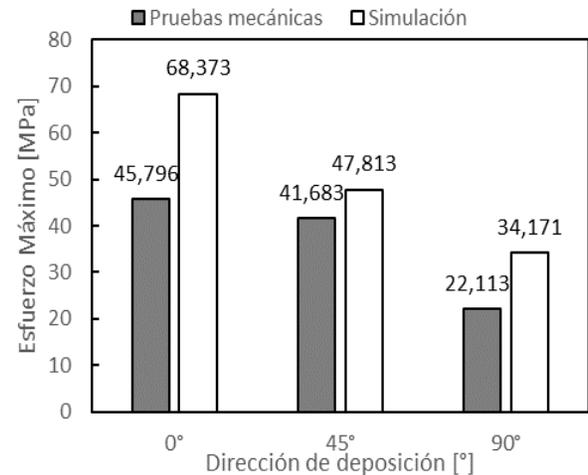


Fig. 11. Comparativa de la resistencia al esfuerzo en pruebas mecánicas y de simulación.

Al igual que en los resultados obtenidos de forma experimental, en análisis computacional se demuestra un comportamiento anisotrópico. Así mismo, se logra mejores propiedades de las probetas con filamentos orientadas en la misma dirección de la fuerza, con valores de resistencia a la tracción de 68,373 MPa, mientras que la configuración a 90° arroja una cifra de 34,171 MPa, registrando una diferencia del 50%. Este comportamiento se ve reflejado en los resultados del ensayo experimental con probetas orientadas a 0° y 90° con cantidades de 45,79 MPa y 22,11 MPa respectivamente, lo que representa una diferencia de 51.7%. Por tanto, la parte numérica como la experimental arrojan valores muy similares.

En un estudio (Song *et al.*, 2017) utilizaron un análisis de elementos finitos con software Abaqus Standard, para simular la respuesta elástica de la fractura en probetas impresas en 3D. Investigaron la sensibilidad de la rigidez en la extensión de las grietas para las probetas construidas con PLA. Encontraron que los valores calculados por la extensión de la grieta estuvieron de acuerdo con las mediciones de deformación óptica empleadas en el mismo estudio.

4. RECONOCIMIENTO

En este proyecto de investigación participaron los laboratorios MMI y el laboratorio de impresión 3D de la Universidad de Pamplona, al igual que el

laboratorio de microscopía de la Universidad Pontificia Bolivariana.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo de investigación se fabricaron probetas de PLA impresas por modelado con deposición fundida con diferentes direcciones de deposición (0°, 45° y 90°), teniendo como referencia la dirección de aplicación de la fuerza en procedimientos de tracción. Se realizaron ensayos de tracción axial mecánica y se analizó la morfología por microscopía electrónica de barrido. Se llevó a cabo, un estudio comparativo entre los resultados de un modelo por elementos finitos y los valores obtenidos de forma experimental de la prueba de tensión.

Los resultados de las pruebas de tracción arrojaron que las probetas orientadas a 0° con respecto a la fuerza aplicada, muestran mejores resultados de esfuerzo máximo y rigidez a comparación de los materiales con direcciones alejadas a la carga. Este comportamiento está asociado al carácter anisotrópico, debido a que los filamentos están organizados en la misma dirección de la carga, por tanto, pueden soportar mayores esfuerzos.

Los resultados del estudio comparativo entre el análisis numérico y el método experimental muestran una tendencia similar, en donde las configuraciones alineadas con respecto a la fuerza aplicada, arrojaron valores máximos de esfuerzo y rigidez. Mientras que los sistemas con direcciones a 45° y 90° presentaron cantidades inferiores, tanto por el modelo computacional, como en la prueba experimental del ensayo de tracción.

Con la siguiente investigación se demuestra que las piezas fabricadas mediante la manufactura aditiva tienen comportamientos diferentes dependiendo de la dirección de aplicación de las cargas y por tanto este factor se debe tener en cuenta en el diseño de elementos construidos bajo esta técnica.

5. REFERENCIAS

- Wang, X. Jiang, M. Zhou, Z. Gou, J. Hui, D. (2017). *3D Printing of Polymer Matrix Composites: A Review and Prospective*, Composites Part B: Engineering, Vol. 110, pp. 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- Vélez, M. Toala E. y Zagal. J. C. (2020). “Koala 3D: A Continuous Climbing 3D Printer.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 64: 101950. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584519301474>.
- Lee, J. Y. An, J. Chua, C. K. (2017). *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials*. Applied Materials Today, Vol. 7, pp. 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004>
- Sood, A. K. Ohdar, R. K. Mahapatra, S. S. (2010). *Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts*, Materials and Design, 31(1), 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>
- Alaimo, G. Marconi, S. Costato, L. Auricchio, F. (2017). *Influence of meso-structure and chemical composition on FDM 3D-printed parts*, Composites Part B: Engineering, 113, 371–380. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.019>
- Keisy. A. y Kotliński. J. (2010). *Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology*, Arch. (2010). Civ. Mech. Eng, 10 n° 3, 37–50.
- Abbott, A. C. Tandon, G. P. Bradford, R. L. Koerner, H. y Baur, J. W. (2018). *Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication*, ELSEVIER, 19, 29–38. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.002>
- Cacua. R, H.A. Peña.C, C.A. Ramon. V, B.A. (2018). *Efecto de la Velocidad de Deposición en Impresiones 3D Sobre las Propiedades Mecánicas del Poliacido Lactico*, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 31–35. <https://doi.org/10.24054/16927257.v0.n0.2018.3301>
- Bose, S. Ke., D. Sahasrabudhe. H. y Bandyopadhyay, A. (2018). *Additive manufacturing of biomaterials*, Progress in Materials Science, 93, 45–111. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.08.003>
- Susmel, L. y Ahmed, A. A. (2017). *Additively Manufactured PLA under static loading: strength/cracking behaviour vs. deposition angle*, Procedia Struct. Integr, 3, 498–507.
- Mirón, V. Ferrándiz, S. Juárez, D. Mengual, A. (2017). *Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials*. Procedia Manufacturing, 13, 888–894. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>

- Rodriguez, E. Cortés, E. Peña, C. (2016). *Application of the Qfd Methodology in the Development of a 3d Printer*, Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2 n°28, 47–54.
- Arbeiter, F. Spoerk, M. Wiener, J. Gosch, A. y Pinter, G. (2018). *Fracture mechanical characterization and lifetime estimation of near-homogeneous components produced by fused filament fabrication*, Polymer Testing, 66(January), 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.01.002>
- Dizon, J. R. C. Espera, A. H. Chen, Q. y Advincula, R. C. (2018). *Mechanical characterization of 3D-printed polymers*. Additive Manufacturing, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Ahn, S. H. Montero, M. Odell, D. Roundy, S. Wright, P. K. (2002). *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*, Rapid Prototyping Journal, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Ding, S. Zou, B. Wang, P. Ding, H. (2019). *Effects of nozzle temperature and building orientation on mechanical properties and microstructure of PEEK and PEI printed by 3D-FDM*, Polymer Testing, 78, 105948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.105948>
- Song, Y. Li, Y. Song, W. Yee, K., Lee, K. Y. Tagarielli, V. L. (2017). *Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-PRINTED PLA*, Materials and Design, 123, 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>
- Letcher, T. y Waytashek, M. (2014). *Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer*, Volume 2A: Advanced Manufacturing, (December 2014), V02AT02A014. <https://doi.org/10.1115/IMECE2014-39379>