

Optimization of 3D Printing Parameters by FDM in PLA to Maximize Flexural Strength

Optimización de parámetros de impresión 3D por FDM en PLA para maximizar la resistencia a la flexión

Juan Leonardo Martínez Barrera¹, Rafael Bolívar León², Jarol Derley Ramon Valencia³

¹Ingeniero Mecánico, la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación GIMUP, Pamplona, Colombia.

²Ph.D. en Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y Reciclaje, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación GIMUP, Pamplona, Colombia.

³Ph.D. en Ingeniería Ambiental, Docente e Investigador de la Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Grupo de Investigación GIAAS, Pamplona, Colombia.

e-mail: rbolivar1@unipamplona.edu.co

Cite this article as: J. Martínez Barrera, R. Bolivar León, J. Ramon Valencia “Optimización de parámetros de impresión 3D por FDM en PLA para maximizar la resistencia a la flexión”, *Prospectiva*, Vol. 24 N° 1 2026

Recibido: 07/09/2025 / Aceptado: 24/01/2026

<http://doi.org/10.15665/rp.v24i1.3836>

RESUMEN

La manufactura aditiva mediante modelado por deposición fundida (FDM) se ha posicionado como una alternativa para la fabricación de componentes de diferentes sistemas usando polímeros como material base. Se evalúa la influencia de tres parámetros de impresión —diámetro de boquilla, número de perímetros y densidad de relleno— sobre la resistencia a la flexión del ácido poliláctico (PLA). Se implementó un diseño factorial 2^3 con punto central, que evaluó 45 probetas impresas según la norma ASTM D790-10 respecto a la resistencia a la flexión. Los resultados evidencian que esta propiedad supera el valor reportado por el fabricante (55.16 MPa), alcanzando un máximo de 127.91 MPa si se utiliza la combinación con boquilla de 1.2 mm, 10 perímetros y densidad del 50%. El análisis estadístico muestra que el diámetro de boquilla y el número de perímetros ejercen efectos positivos significativos, mientras que la densidad presenta una contribución menor. Se concluye que la optimización de parámetros geométricos y de extrusión permite mejorar sustancialmente el desempeño estructural del PLA impreso en 3D, aportando definición de la venta de proceso para aplicaciones donde la resistencia a la flexión es crítica.

Palabras clave: Optimización en Manufactura aditiva, Resistencia a la flexión en PLA impreso 3D, Variables de impresión 3D.

ABSTRACT

Additive manufacturing through fused deposition modeling (FDM) has become a viable alternative for producing functional polymer components. This study evaluates the influence of three printing parameters—nozzle diameter, number of perimeters, and infill density—on the flexural strength of polylactic acid (PLA) specimens. A full 2^3 factorial design with a central point was implemented, generating 45 specimens printed under controlled conditions and tested according to ASTM D790-10. Results show that flexural strength values exceeded the manufacturer's reported value (55.16 MPa), reaching a maximum of 127.91 MPa with a 1.2 mm nozzle, 10 perimeters, and 50% infill density. Statistical analysis revealed that nozzle diameter and number of perimeters had significant positive effects, while infill density showed a minor contribution. It is concluded that optimizing extrusion and geometric parameters can substantially enhance the structural performance of PLA parts manufactured by FDM, providing guidelines for applications where mechanical strength is critical.

Keywords: *Additive Manufacturing Optimization, Flexural Strength of 3D Printed PLA, 3D Printing Process Parameters*

1. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, se ha consolidado en la última década como una de las tecnologías de mayor crecimiento en el ámbito industrial y académico, en especial el modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés), debido a la flexibilidad del proceso y a su bajo costo en comparación con métodos tradicionales de mecanizado [1,2,3]. Este avance ha impulsado su aplicación en sectores como la industria biomédica, automotriz, aeroespacial, construcción y producción de bienes de consumo, donde se emplea tanto para prototipado como para la fabricación de piezas funcionales. El presente artículo se centra en la determinación de los parámetros óptimos de impresión por FDM con ácido poliláctico (PLA), con el objetivo de maximizar la resistencia a la flexión. La elección de este material obedece a su carácter biodegradable, facilidad de uso y amplia disponibilidad, lo que lo convierte en uno de los más utilizados en procesos de impresión 3D [1][3].

1.1 Modelado por deposición fundida (FDM)

El proceso FDM consiste en la extrusión de un filamento termoplástico a través de una boquilla calentada, que deposita el material en capas sucesivas hasta construir la pieza tridimensional [4]. El material se funde parcialmente y es depositado sobre una cama caliente, lo que garantiza la adhesión entre capas y la estabilidad dimensional de la pieza [5,6]. Su capacidad para fabricar geometrías complejas con un consumo optimizado de material explica su creciente adopción en diversas industrias [7]. Los principales materiales utilizados son Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), PLA y nylon [7,8] reforzado con fibras que se caracterizan mediante ensayos a flexión [9]. En particular, el PLA es valorado por su rigidez, resistencia relativa y bajo impacto ambiental, al ser derivado de fuentes renovables como maíz, caña de azúcar o trigo [1]. Sus propiedades mecánicas incluyen una densidad de 1.3 g/cm³, temperatura de fusión entre 173–178 °C y resistencia a la flexión de 55.16 MPa [1]. Sin embargo, su carácter frágil [7], plantea desafíos cuando se busca mejorar el desempeño estructural de piezas fabricadas por FDM.

1.2 Parámetros de impresión

El comportamiento mecánico de las piezas impresas depende en gran medida de los parámetros de impresión [10,11,12] que a su vez dependen del tipo de impresora que se tenga disponible [13]. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Posición de impresión:** se refiere al ángulo de deposición de la boquilla respecto a la base. Orientaciones comunes son 0°/90° o ±45°, que afectan la distribución de esfuerzos y la adherencia entre capas [8].

- **Densidad de relleno:** expresa el porcentaje de volumen ocupado por material sólido en la pieza. Puede variar entre 0% (pieza hueca) y 100% (pieza maciza). A mayor densidad, aumenta la resistencia mecánica, pero también el tiempo de impresión y el consumo de material [3].
- **Temperatura de impresión:** corresponde al calor mantenido en la boquilla del extrusor. Debe ajustarse según el material para garantizar adecuada fluidez y adhesión interlaminar [12].
- **Tipo de relleno:** se relaciona con el patrón geométrico del material interno. Existen múltiples configuraciones, como rectilíneo, rejilla, triangular, panal de abeja o giroide, cada una con ventajas específicas en términos de rigidez, tiempo de impresión y consumo de material [14,15,16].
- **Perímetro:** define el grosor de las paredes externas de la pieza, influyendo directamente en su resistencia mecánica [1].
- **Capas sólidas superior e inferior:** determinan la resistencia en las caras horizontales de la pieza. Un mayor número de capas sólidas reduce defectos como el pandeo, aunque incrementa el tiempo de impresión [17,18,19].
- **Orientación de impresión:** la ubicación de la pieza en los ejes X, Y y Z modifica la dirección de los esfuerzos predominantes y, por ende, sus propiedades finales [12].
- **Espesor de capa:** a mayor espesor, la impresión es más rápida pero menos precisa; a menor espesor, aumenta la calidad superficial y la resistencia interlaminar [1].
- **Diámetro de boquilla:** controla el caudal de material extruido y afecta tanto la resistencia como la velocidad de impresión. Los diámetros más comunes son 0,2 mm, 0,4 mm, 0,6 mm y 0,8 mm, siendo la boquilla de 0,4 mm la estándar [16][20].

En conjunto, la interacción de estas variables define las propiedades mecánicas finales de las piezas impresas [21,22], siendo indispensable un análisis experimental para determinar combinaciones óptimas.

1.3 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión constituye una técnica fundamental para evaluar el comportamiento mecánico de materiales poliméricos fabricados por FDM. Su objetivo es determinar propiedades como el módulo de ruptura (MOR), también llamada la resistencia a la flexión, el módulo de elasticidad, a partir de una probeta rectangular sometida a carga en tres puntos y la deflexión [1,23]. La resistencia a la flexión se calcula mediante la ecuación (1):

$$MOR = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

donde F es la fuerza máxima, L la distancia entre apoyos, b el ancho y h el espesor de la probeta. Este procedimiento se encuentra estandarizado por la norma ASTM D790-10, que establece condiciones para garantizar la repetibilidad de los resultados usando la máquina universal de ensayos [9,24,25]. La importancia de este ensayo radica en que, al tratarse de piezas obtenidas por FDM, la anisotropía inducida por la deposición de capas puede afectar significativamente su resistencia. De ahí que la evaluación bajo flexión permita comparar configuraciones de impresión y establecer parámetros óptimos.

1.4 Diseño experimental

Para analizar el efecto de múltiples parámetros de impresión sobre la resistencia a la flexión, se emplean diseños factoriales, particularmente útiles en experimentos con dos o más factores independientes [26]. En este caso, se adopta un diseño factorial completo 2^3 , que evalúa tres parámetros (boquilla, perímetros y densidad) ya que son los más comúnmente utilizados por los fabricantes de productos impresos en este tipo de material [7,8,10,20,29]. Para cada parámetro se definen en dos niveles cada uno (alto y bajo). Este tipo de diseño permite observar tanto los efectos principales como las interacciones entre variables [27].

Además, se incorporan puntos centrales, que representan niveles intermedios entre los valores alto y bajo, con el fin de detectar la presencia de curvatura en la superficie de respuesta. Esta estrategia aporta mayor

robustez al análisis estadístico y permite inferir con mayor precisión las condiciones óptimas para maximizar la resistencia a la flexión.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se referencian los materiales utilizados en la impresión 3D por FDM y los métodos de ensayo de flexión y análisis empleado. El material que se usó para la investigación de este proyecto es el PLA, el cual es uno de los materiales más populares para impresión 3D con FDM. De todos los materiales existentes para el proceso de impresión 3D por FDM, el PLA es el más comercializado ya que es un material fácil de trabajar y tiene un costo relativamente bajo en el mercado [28,29], el polímero biodegradable PLA se fabrica gracias a recursos 100% renovables [16], como el maíz, trigo, patata o caña de azúcar en comparación al ABS que se fabrican a partir de petróleo.

2.1 Selección del material ácido poliláctico (PLA)

Para la selección del material es necesario conocer algunas de sus propiedades mecánicas, físicas y de impresión 3D que se presentan en la tabla 1

Tabla 1. Propiedades mecánicas, físicas y de impresión 3D del PLA. Fuente: Autor.

Table 1. Mechanical, physical and thermal properties of PLA. Source: Author.

Propiedad	ColorPlus	Smart Materials 3D	Grilon3	3DBots
Resistencia a la flexión	87 MPa	107 MPa	83 MPa	55.16 MPa
Módulo de elasticidad	3642 MPa	3189.7 MPa	3826.59 MPa	–
Densidad	1.24 g/cm ³	1.24 g/cm ³	1.24 g/cm ³	1.24 g/cm ³
Alargamiento por flexión	–	5.2 %	–	–
Temperatura de extrusor	190-210 °C	205-220 °C	195-220 °C	190-230 °C
Temperatura de plataforma	50-60 °C	40-60 °C	40-55 °C	40-60 °C
Velocidad de impresión	20-80 mm/s	30-50 mm/s	60 mm/s	60 mm/s

- ColorPlus: Empresa ubicada en México, fabricante de filamentos para impresión 3D
- Smart Materials 3D: Empresa ubicada en España, fabricante de filamentos para impresión 3D
- Grillon3: Empresa ubicada en Argentina, fabricante de filamentos para impresión 3D
- 3DBots: Empresa ubicada en Colombia, distribuidora de filamentos para impresión 3D

El material PLA elegido fue el de la empresa distribuidora 3DBots debido a su facilidad de compra y adquisición.

2.2 Parámetros y valores comúnmente utilizados en la impresión 3D para el PLA

Los parámetros y valores comúnmente utilizados en la impresión 3D para el PLA el cual se resume en la siguiente tabla, por medio de investigaciones realizadas a otros proyectos que siguen el mismo lineamiento [1,12,20,29]:

Tabla 2. Parámetros comúnmente usados para la impresión 3D del PLA. Fuente: Autor.

Table 2. Commonly used parameters for PLA 3D printing. Source: Author.

Parámetro	Valor
Temperatura del extrusor	210 °C
Altura de capa	0,3 mm
Cama caliente	60 °C
Patrón de relleno	Panal de abeja
Porcentaje de relleno o densidad	0 a 100 %
Boquilla	0.1 mm a 2 mm

Perímetros	2 a 15
------------	--------

2.3 Diseño experimental 2³

Se procedió a definir los dos valores de los 3 parámetros seleccionados [7,8,10,20, 29] con dos valores, uno mínimo y otro máximo para poder planear el diseño experimental 2³. Los parámetros seleccionados con (mínimo - máximo) son perímetros (2 -10), tamaño de la boquilla (0.4 mm – 1.2 mm) y densidad de relleno (15 % – 50 %) dando el diseño experimental de la tabla 3.

Tabla 3. Diseño experimental con punto central. Fuente: Autor.

Table 3. Center-point experimental design. Source: Author.

Orden	Orden aleatorio	Perímetros	Tamaño de la boquilla (mm)	Densidad (%)
Combinación 1	C1	2	0.4	15
Combinación 2	C8	10	0.4	15
Combinación 3	C5	2	1.2	15
Combinación 4	C3	10	1.2	15
Combinación 5	C6	2	0.4	50
Combinación 6	C2	10	0.4	50
Combinación 7	C4	2	1.2	50
Combinación 8	C7	10	1.2	50
Combinación 9	C9	6	0.8	30

Como indica el diseño experimental (Tabla 3), son ocho combinaciones para la impresión de las probetas, más un punto central que es la combinación 9. Para cada combinación se realizaron cinco repeticiones, para un total de 45 probetas. Para asegurar que no influyan más variables de las consideradas, se opta por bloquear o dejar fijas las siguientes variables:

- Tipo de relleno panal de abeja
- Capas solidas: inferior (2) y superior (3). Se opta por 3 capas superiores porque la teoría sugiere que la primera hace de puente entre el relleno y las subsecuentes.
- Altura de capa que será de un valor de 0.3 mm.
- Temperatura del extrusor 210 °C.
- Cama caliente a 60 °C

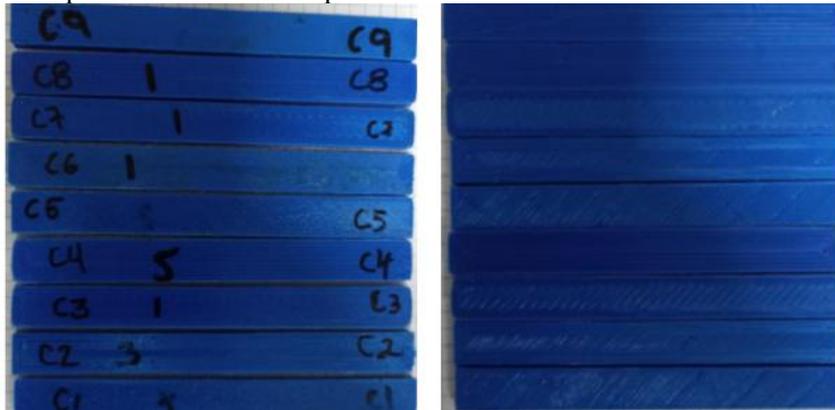
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El dimensionamiento de las probetas se realizó según la norma ASTM (D790-10). Una vez completados los diseños en CAD, estos se convirtieron en una extensión STL, que es empleada en el software laminador PrusaSlicer usado para programa la impresión y en donde se establecen los parámetros de impresión anteriormente definidos (perímetros, tamaño de la boquilla y densidad de relleno) con los otros valores constantes como se mencionó anteriormente.

Se imprimieron 45 probetas de flexión a partir del material PLA, 5 para cada combinación. Se realizó una inspección visual con el objetivo de verificar la idoneidad de las probetas y las que fueron rechazadas por defectos o grietas superficiales, se volvieron a imprimir (Figura 1). El ensayo de flexión se realizó bajo la norma ASTM D790-10, para determinar la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad de cada una de las combinaciones.

Figura 1. Probetas impresas por 3D para inspección visual. Fuente: Autor

Figure 1. Printed 3D specimen for visual inspection. Source: Author



3.1 Propiedades mecánicas obtenidas

Los resultados de la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad obtenidos en el ensayo de flexión, son presentados a continuación. Se puede apreciar, para cada combinación definida los valores medios obtenidos de las propiedades medidas, así como su desviación estándar.

3.2 Resistencia a la flexión (R_f)

La resistencia a la flexión (R_f) fue medida a cinco probetas iguales para cada combinación tabla 3, dando los valores reportados en la tabla 4, donde se puede observar los valores obtenidos de la resistencia a la flexión, la desviación estándar (σ), y una desviación estándar positiva y negativa para cada combinación. Puede observarse que el valor obtenido de esfuerzo a la flexión para las diferentes combinaciones es mayor al valor reportado por el fabricante de (55.16 MPa).

Tabla 4. Resistencia a la flexión y desviación estándar de las combinaciones. Fuente: Autor

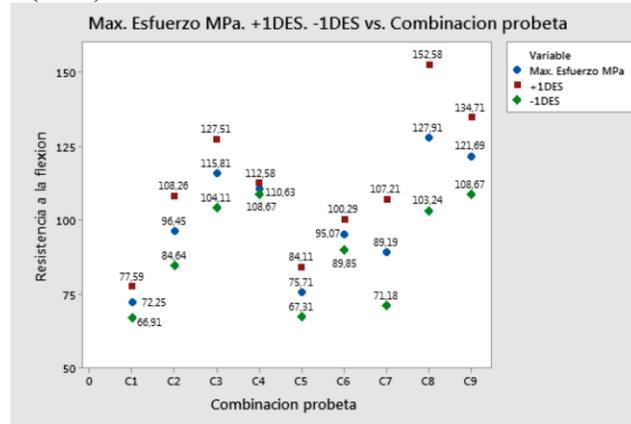
Table 4. Flexural strength and standard deviation of combinations. Source: Author

Combinación	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación	+1 DES	-1 DES
C1	72.25	5.34	77.59	66.91
C2	96.45	11.81	108.26	84.64
C3	115.81	11.70	127.51	104.11
C4	110.63	1.96	112.58	108.67
C5	75.71	8.40	84.11	67.31
C6	95.07	5.22	100.29	89.85
C7	89.19	18.01	107.21	71.18
C8	127.91	24.67	152.58	103.24
C9	121.69	13.02	134.71	108.67

La combinación que obtuvo el máximo valor de resistencia a la flexión fue la C8, con 127.91 MPa, correspondiente a las variables perímetros (10), tamaño de la boquilla (1.2 mm) y densidad (50%). En segundo lugar, se encuentra la combinación C9, con un valor de 121.69 MPa, asociada a las variables perímetros (6), boquilla (0.8 mm) y densidad (30%). Por el contrario, la combinación con el menor valor de resistencia a la flexión fue la C1, con 72.25 MPa, la cual se obtuvo utilizando las variables perímetros (2), tamaño de la boquilla (0,4 mm) y densidad (15%). En cuanto a la desviación estándar (σ) de los resultados obtenidos en la resistencia a la flexión y producto de todas las fluctuaciones del proceso, la combinación C4 presentó la menor variación, con un valor de 1.96, lo que indica que el proceso de impresión fue estable bajo esas condiciones. En contraste, la combinación C8 mostró la mayor desviación estándar, con 24.67, lo

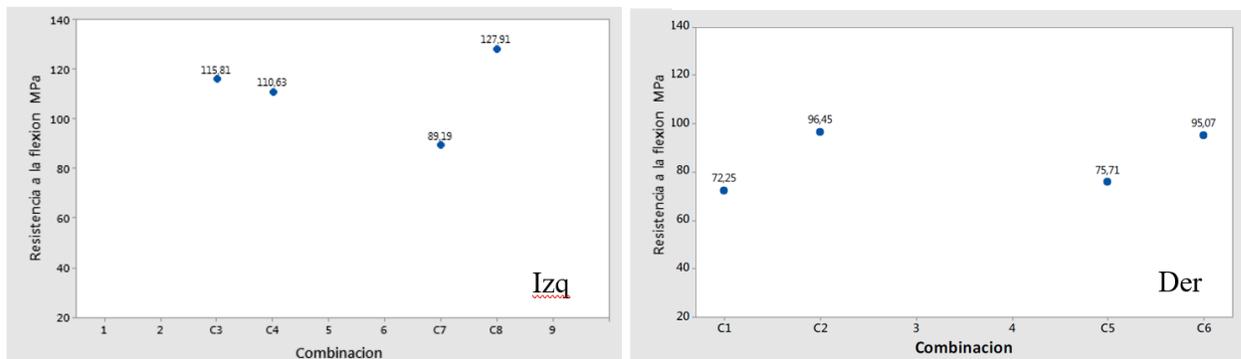
que refleja una alta variabilidad en los resultados obtenidos. Una baja desviación estándar (σ) implica que la variación durante el proceso de impresión, manteniendo las mismas variables, fue mínima y, en consecuencia, los defectos también lo fueron. Por el contrario, una desviación alta se asocia a una mayor variación en el proceso, lo que genera diferentes defectos en las probetas. En este trabajo, este dato sirve como referencia para definir si existe o no variación entre combinaciones. Si bien el valor promedio entre dos combinaciones puede ser distinto, cuando sus desviaciones estándar son amplias y se superponen con dicho promedio, se concluye que estadísticamente no existe una variación significativa.

Figura 2. Resistencia a la flexión (MPa) de diferentes combinaciones. Fuente: Autor
Figure 2. Flexural strength (MPa) of different combinations. Source: Author



En la Figura 2 se observa que el promedio de la resistencia a la flexión para cada combinación presenta diferencias; sin embargo, al considerar la dispersión de los datos representada por $+\sigma$ y $-\sigma$, se concluye que no existe una variación estadísticamente significativa en la resistencia a la flexión dentro de los siguientes grupos: combinaciones C3, C4, C8 y C9; combinaciones C1 y C5; y combinaciones C2, C6 y C7. No obstante, entre estos grupos se evidencian diferencias. Por otro lado, lo común de las combinaciones con la propiedad de resistencia a flexión con valores altos es que la variable boquilla tiene el valor más alto de 1.2 mm.

Figura 3. Resistencia a la flexión, Izq.- C3, C4, C7 y C8; Der.- C1, C2, C5 y C6. Fuente: Autor
Figure 3. Flexural strength, Left: C3, C4, C7, and C8; Right: C1, C2, C5, and C6. Source: Author



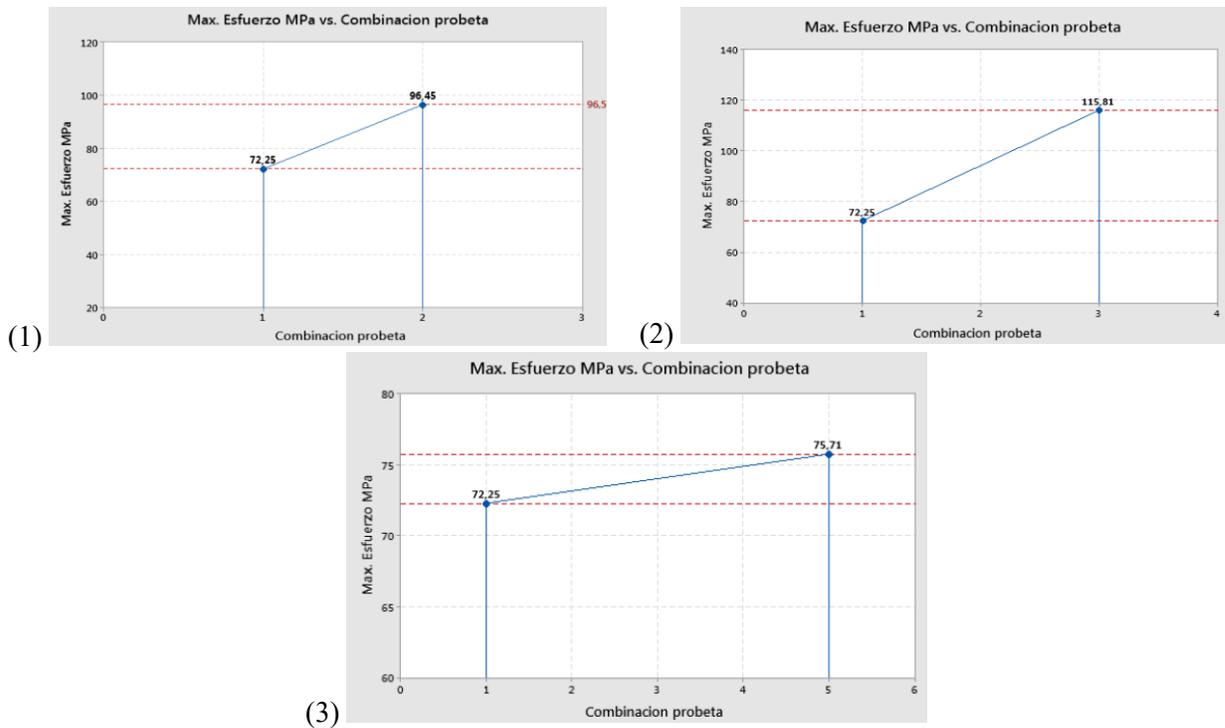
De la figura 3-izq, se puede determinar una tendencia para las combinaciones (C3, C4, C7 y C8) donde a mayor densidad de relleno y mayor tamaño de boquilla se optimiza la propiedad de resistencia a la flexión

En contraste, el conjunto de combinaciones C1, C2, C5 y C6 (figura 3-der) que comparten la variable boquilla de 0.4 mm, fueron las que obtuvieron los valores más bajos en la resistencia a la flexión. Al observar la figura 3-der, se aprecia que las combinaciones C1 y C5 tienen en común la variable perímetros (2), mientras que las combinaciones C2 y C6 presentan 10 perímetros. Esto permite inferir que, a mayor número de perímetros en la pieza, se obtiene una mayor resistencia a la flexión.

3.2.1 Variable perímetro

Teniendo en cuenta como única variable el número de perímetros, y fijando el resto de parámetros (figura 4-1), se determina que las combinaciones C1 y C2, correspondientes a 2 y 10 perímetros respectivamente, ambas con tamaño de la boquilla de 0.4 mm y densidad de 15%, que a mayor número de perímetros la resistencia a la flexión aumenta.

Figura 4. Variación de (1) Perímetro C1 y C2, (2) Boquilla C1 y C3, (3) Densidad C1 y C5. Fuente: Autor.
Figure 4. Variation of (1) Perimeter C1-C2, (2) Nozzle C1-C3, (3) Density C1-C5. Source: Author.



3.2.2 Variable diámetro de la boquilla

Cuando la única variable que se modificó fue el tamaño de la boquilla y las demás permanecieron constantes (Figura 4-2), se analizaron las combinaciones C1 y C3. En la combinación C1 se utilizó 2 perímetros, boquilla de 0.4 mm y densidad del 15%, mientras que en la combinación C3 se mantuvieron los mismos parámetros de 2 perímetros y 15% de densidad, pero con una boquilla de 1.2 mm. Los resultados mostraron que, al incrementar el diámetro de la boquilla, y por ende el volumen de salida de filamento, se obtuvo un valor mayor en la resistencia a la flexión. Además, se evidenció que el uso de la boquilla de 1.2 mm permitió reducir el tiempo de impresión en aproximadamente un 41% en comparación con las probetas impresas con boquilla de 0.4 mm, lo que representa una ventaja significativa en términos de eficiencia del proceso.

3.2.3 Variable densidad

Cuando la única variable que se modificó fue la densidad y las demás permanecieron constantes (Figura 4-3), se compararon las combinaciones C1 y C5. En la combinación C1 se emplearon 2 perímetros, boquilla

de 0.4 mm y densidad del 15%, mientras que en la combinación C5 se mantuvieron los mismos parámetros, variando únicamente la densidad al 50%. El análisis de los resultados mostró que, si bien se evidenció un incremento en la resistencia a la flexión al aumentar la densidad, dicho aumento no fue estadísticamente significativo frente a otras combinaciones, como se observa en la Figura 5. Esto sugiere que la variable densidad tiene un efecto limitado sobre la resistencia a la flexión en comparación con el número de perímetros o el diámetro de boquilla, por lo que puede considerarse una variable de menor peso en el modelo experimental.

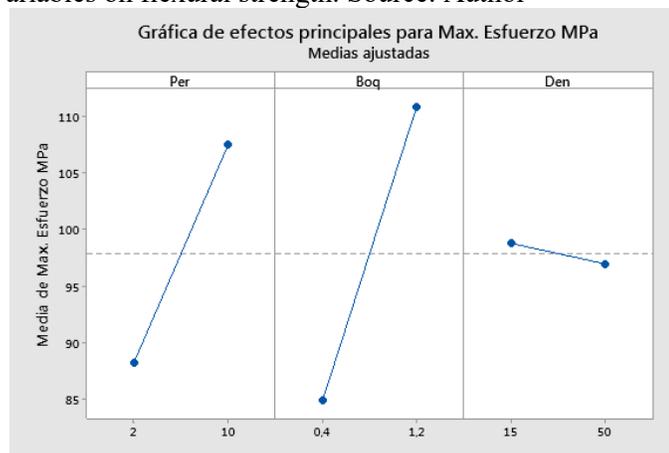
3.3 Determinación de las variables más influyentes usando el diseño de experimentos

Utilizando el software Minitab se analizó los resultados de las medias obtenidas de la resistencia a la flexión.

3.3.1 Influencia experimental de las variables y sus interacciones

Como se puede observar en la figura 5, el perímetro y la boquilla tienen gran efecto incremental en la resistencia a la flexión, incluso, para la boquilla su efecto es más pronunciado como ya se había discutido previamente. También es claro que la densidad tiene un efecto negativo sobre la resistencia a la flexión, pero es bastante bajo, incluso, puede obviarse.

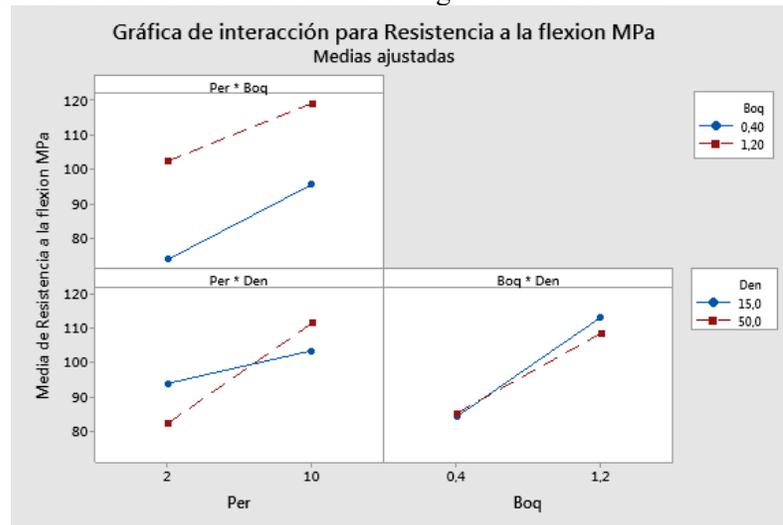
Figura 5. Influencia de las variables en relación a la resistencia a la flexión. Fuente: Autor
Figure 5. Influence of variables on flexural strength. Source: Author



Al realizar el análisis de los efectos de interacción entre las variables (figura 6), se observa lo siguiente:

- No se evidencia un efecto de interacción significativo Per*Boq entre las variables perímetro (Per) y tamaño de la boquilla (Boq), dado que las líneas de tendencia se mantienen aproximadamente paralelas, con pendientes similares.
- Se aprecia un efecto de interacción Per*Den entre las variables (Per) perímetro y (De) densidad sobre la resistencia mecánica, lo que indica que el cambio en el número de perímetros influye de manera diferente dependiendo del nivel de densidad empleado.
- No se observa un efecto de interacción Boq*Den entre las variables tamaño de la boquilla (Boq) y densidad (Den), ya que las líneas se encuentran prácticamente superpuestas, lo que estadísticamente sugiere independencia entre ambas variables.

Figura 6. Interacción de las variables entre la resistencia a la flexión. Fuente: Autor
Figure 6. Interaction of variables between flexural strength. Source: Author



3.3.2 Parámetros seleccionados

Del análisis realizado se determina que los mayores valores de resistencia a la flexión se asocian con niveles altos en el diámetro de boquilla y en el número de perímetros, por otro lado, la variable densidad presenta una contribución de muy bajo peso. Este comportamiento puede explicarse porque, desde el punto de vista del proceso de manufactura aditiva, la programación de la máquina respecto a la densidad no resulta tan determinante como el aumento de perímetros, ya que un mayor número de perímetros reduce significativamente los vacíos internos, actuando en la práctica como una medida indirecta de la densidad efectiva de la probeta. Con base en los resultados obtenidos del análisis de datos experimentales, se tiene una recomendación inicial correspondiente a la combinación C8; sin embargo, al considerar los resultados del diseño de experimentos, la combinación C3 también aparece como una opción significativa (ver Tabla 5). Es importante destacar que, aunque la combinación C8 presenta el mayor valor promedio de resistencia a la flexión (127.91 MPa), la desviación estándar asociada (24.67) es considerablemente mayor que la observada en la combinación C3, la cual, con un valor promedio de 115.81 MPa, presenta una desviación estándar de 11.70, indicando mayor estabilidad en los resultados. Finalmente, se resalta que el punto central del diseño mostró valores de resistencia elevados, lo que sugiere la posible existencia de un máximo local en la superficie de respuesta; no obstante, dado que dicho análisis excede los objetivos del presente trabajo, se plantea como una línea de investigación futura.

Tabla 5. Parámetros seleccionados para la resistencia a la flexión. Fuente: Autor

Table 5. Selected parameters for flexural strength. Source: Author

Combinación	Perímetros	Boquilla (mm)	Densidad (%)	Resistencia a la flexión (MPa)	Desviación estándar
C3	2	1.2	15	115.81	11.70
C8	10	1.2	50	127.91	24.67

4. CONCLUSIONES

El estudio demostró que la impresión 3D mediante FDM con PLA puede alcanzar resistencias a la flexión considerablemente superiores a las reportadas por el fabricante (55.16 MPa), llegando hasta 127.91 MPa. Este resultado evidencia que, al controlar adecuadamente las variables de impresión, es posible optimizar la calidad de impresión en referencia al aumento en la resistencia a la flexión para aplicaciones estructurales de exigencia media.

El análisis factorial confirmó que el diámetro de boquilla y el número de perímetros son las variables más influyentes en la resistencia a la flexión. El incremento del diámetro de la boquilla de 0.4 mm a 1.2 mm mejoró el desempeño mecánico. En contraste, la densidad de relleno mostró un efecto limitado sobre la resistencia, lo que sugiere que su influencia práctica es secundaria frente a la configuración geométrica de las paredes externas.

Aunque el análisis estadístico evidenció que la mayoría de las interacciones no fueron significativas, se identificó una relación entre perímetros y densidad. Este hallazgo indica que, en determinadas combinaciones, el efecto de aumentar los perímetros puede potenciar o atenuar la resistencia a la flexión, según del nivel de relleno, lo que constituye un aspecto relevante para la programación de impresoras en entornos industriales.

Los resultados permiten establecer lineamientos concretos para optimizar piezas de PLA fabricadas por FDM cuando se busca maximizar la resistencia a la flexión. En términos prácticos, se recomienda el uso de boquillas de mayor diámetro y configuraciones con múltiples perímetros como estrategia principal de refuerzo. Esta conclusión es particularmente relevante para aplicaciones en prototipado funcional, piezas de reemplazo en equipos mecánicos de baja carga y componentes en diseño biomédico o educativo, donde se requiere resistencia con bajo costo y rápida fabricación.

La implementación de un diseño factorial completo 2³, complementado con un punto central, permitió evaluar con rigor los efectos principales y las posibles interacciones. Este enfoque experimental no solo validó la reproducibilidad del ensayo de flexión bajo la norma ASTM D790-10, sino que también aportó un marco estadístico sólido para tomar decisiones en la selección de parámetros de impresión.

A pesar de los avances logrados, se identificaron limitaciones en el alcance del diseño experimental, en especial respecto al rango de valores de densidad y al uso exclusivo del patrón de relleno panal de abeja. Se sugiere ampliar futuras investigaciones hacia densidades superiores, explorar otros patrones internos y analizar la influencia de condiciones ambientales durante la impresión que pueden afectar el resultado, tal como la humedad y la temperatura del componente durante la impresión. Asimismo, en la evaluación del diseño, la presencia de un máximo local en el punto central sugiere que la superficie de respuesta podría ser modelada mediante diseños de segundo orden, lo que constituiría una extensión lógica de este trabajo.

Finalmente, esta investigación confirma que la manipulación de parámetros de impresión en FDM no debe considerarse un proceso empírico aislado, sino un sistema optimizable mediante técnicas de diseño experimental. La posibilidad de superar ampliamente las propiedades declaradas por el fabricante del PLA representa una oportunidad para repositionar este material dentro de aplicaciones más exigentes, consolidando a la manufactura aditiva como una tecnología competitiva frente a procesos convencionales de mecanizado.

5. REFERENCIAS

- [1] A. Fernando Delgado. María Milagros Laz Pavón. José Antonio Valido García. “Caracterización de filamento de pla reciclado para impresión 3d.” Universidad de la Laguna, 2021. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/24777>
- [2] Pérez Buenrostro, César Antonio. Impresión 3D y método de elemento finito aplicados a la optimización de plantillas y herramientas con aplicación automatizada. Diss. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2017. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/17832>
- [3] RODRÍGUEZ, Bernat Martí. Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM. 2017. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola d'Enginyeria de Barcelona Est. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/b455f165-cd6f-4a40-93b2-4172066bf46d/content>
- [4] M. J. C. Loaiza. P. G. Diaz. C. A. M. Blandon. L. M. B. Goetz. and J. A. V. Ossa. “Influencia de la posición de impresión y la densidad de relleno en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en impresión 3D. *Rev. Ing. (Medellín. Colomb.)*. vol. 19. no. 37. p. 179. 2020. [Online]. Available:

https://fama.us.es/discovery/fulldisplay?docid=cdi_gale_infotrasmisc_A644651534&context=PC&vid=34CBUA_US:VU1.

- [5] A. P. Rubin, L. C. Quintanilha, and W. L. Repette. "Influence of structuration rate . with hydration accelerating admixture . on the physical and mechanical properties of concrete for 3D printing." *Constr. Build. Mater.*, vol. 363, no. February 2022, p. 129826, 2023. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129826.
- [6] A. Tayeb, J. Le Cam, and B. Loez. "Mechanics of Materials 3D printing of soft thermoplastic elastomers : Effect of the deposit angle on mechanical and thermo-mechanical properties." *Mech. Mater.*, vol. 165, no. September 2020, p. 104155, 2022. doi: 10.1016/j.mechmat.2021.104155.
- [7] M. Benamira, N. Benhassine, A. Ayad, and A. Dekhane. "Investigation of printing parameters effects on mechanical and failure properties of 3D printed PLA." *Eng. Fail. Anal.*, vol. 148, p. 107218, 2023. doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107218.
- [8] S. L. Rodríguez-Reyna, C. Mata, J. H. Díaz-Aguilera, H. R. Acevedo-Parra, and F. Tapia. "Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing." *Mater. Today Commun.*, vol. 33, no. June, p. 104774, 2022. doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.104774.
- [9] Astm International. "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790." *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–12, 2002. doi: 10.1520/D0790-10.
- [10] K. L. C. Alvarez, R. F. C. Lagos, and M. Aizpun. "Influence of infill parameter on the mechanical resistance in 3D printing, using the fused deposition modeling method." *Ingeniare*, vol. 24, pp. 17–24, 2016. doi: 10.4067/S0718-33052016000500003.
- [11] Mariano. "Tecnología de los Plásticos." *Impresión 3D*, 2013. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>.
- [12] Cabello Correa, Eduardo. "Estudio del efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas por impresión 3D mediante FDM." Universidad de la Laguna, 2021. <http://riull.ull.es/xmlui/handle/915/24229>
- [13] "¿Qué impresora 3D comprar?." *filament2print*, 2018. https://filament2print.com/es/blog/35_que-impresora-3d-comprar.html.
- [14] "Patrones de relleno." *Prusa Knowledge Base*, 2023. https://help.prusa3d.com/es/article/patrones-de-relleno_177130.
- [15] P. M. Guañuna Simbaña. "Análisis y determinación de propiedades a tracción de productos fabricados de material fundido ABS utilizando una impresora 3d." *Tesis*, vol. 1, p. 141, 2018. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [16] E. A. E. ANDRES. "Evaluación de la resistencia a la flexión y torsión del material ácido poliláctico (PLA) manufacturado por impresión 3d con patrón de panal de abeja y porcentaje de relleno del 50%." *Tesis*, pp. 1–100, 2021. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>.
- [17] P. Crespo and G. David. "Estudio y caracterización de propiedades mecánicas de piezas compuestas de Fibras Carbono y Nylon producidas mediante impresión 3D." 2022.
- [18] P. Solomon. "7 Factores principales para obtener la impresión 3d perfecta en la primera capa." *Cults 3D*. <https://cults3d.com/es/blog/articles/6-factores-impresion-3d-perfecta-primera-capa>.
- [19] D. Venencia. "Capas superiores e inferiores en Cura." *Impresion3d*, 2023. <https://impresion3d.website/capas-superiores-e-inferiores-en-cura/>.
- [20] E. Macarena, G. Sánchez, J. Domingo, Á. Hervás, J. Luis, and T. Moreno. "Estudio de la deformación por flexión de piezas impresas en 3D." 2020. <https://repositorio.ual.es/handle/10835/10194>
- [21] J. L. Martín Morlanes. "Optimización de los procesos de impresión 3D." 2020. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/44662>.
- [22] "Cómo evitar los Hilos o Stringing en Impresión 3D." *Impresoras3D*, 2021. <https://www.impresoras3d.com/stringing-hilos-en-nuestras-piezas/>.

- [23] J. Torres and J. Redondo. “Reparación y automatización de una máquina universal de ensayos Repairing and automation of a universal testing machine.” *Rev. Cienc. e Ing.*, vol. 30, no. 2, pp. 171–179, 2009. <https://www.redalyc.org/pdf/5075/507550785010.pdf>
- [24] J. A. Velasco Parra, B. A. Ramón Valencia, and W. J. Mora Espinosa. “Composite materials reinforced with ceramic waste and matrix of unsaturated polyester for applications in the automotive industry.” *Dyna*, vol. 87, no. 212, pp. 251–258, 2020. doi: 10.15446/dyna.v87n212.81483.
- [25] “Máquinas Universales De Ensayo.” *Socief S.A.* 2021. <https://socief.com/maquinas-universales-de-ensayo/>.
- [26] S. Fernández Bao. “Diseño de Experimentos: Diseño Factorial..” *Upc*, p. 73 Pag., 2020. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/339723/TFM_Fernandez_Bao_Sheila.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [27] D. A. Interno and L. D. Factoriales. “Diseño de Experimentos – Diseño de Superficie de Respuesta.” no. 2002, pp. 1–15, 2006.
- [28] X. Rodríguez. “Proyecto de diseño de piezas modeladas con una impresora 3d para la realización.” Universitat Politècnica de Catalunya, 2018.
- [29] W. Guamantario, A. Conejero Rodilla, Santiago Ferrándiz, Bou Valencia. “Master Universitario En diseño y fabricación integrada asistida por computador influencia de los parámetros de relleno en el comportamiento mecánico a la flexión de piezas fabricadas en impresoras 3D de bajo Coste.” 2014. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/64445>.