ORIGINAL



Effect of 3D printing parameters on the mechanical characteristics of carbon fiberreinforced PLA

Efecto de los parámetros de impresión 3D en las características mecánicas del PLA reforzado con fibra de carbono

Arley Chuquin¹, Brizeida Gámez¹, Marco Naranjo¹, David Ojeda¹

¹Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Ibarra, Ecuador.

Citar como: Chuquin A, Gámez B, Naranjo M, Ojeda D. Effect of 3D printing parameters on the mechanical characteristics of carbon fiber-reinforced PLA. Data and Metadata. 2025; 4:768. https://doi.org/10.56294/dm2025768

Enviado: 11-05-2024

Revisado: 14-09-2024

Aceptado: 29-03-2025

Publicado: 30-03-2025

Editor: Dr. Adrián Alejandro Vitón Castillo 回

Autor para la correspondencia: Brizeida Gámez 🖂

ABSTRACT

The comparative results of the mechanical behavior of carbon fiber-reinforced Polylactic Acid (PLA FC) specimens of two brands of filaments for printing by the Fused Deposition Modeling (FDM) process are presented. The experiments were carried out according to ASTM D638 14, using Type I specimens with the established dimensions. For the generation of the 3D model, parameters such as printing temperature, printing speed, density, and filling pattern were set. Cubic, gyroid, and triangular filling patterns were used, with filling densities of 40 %, 60 %, and 80 %. For each configuration, a G-code was generated and used for the fabrication of each specimen. A total of 90 specimens were used, which were divided into two groups according to the brand. Subsequently, tensile tests were carried out to determine the mechanical properties by analyzing the stress-strain curves under the established conditions. Comparative analysis revealed that SUNLU's PLA FC filament achieves higher ultimate stress values, while Artillery's filament has a better ability to withstand deformation. Likewise, the filler pattern that withstood the greatest load was the cubic one.

Keywords: Carbon Fiber-Reinforced PLA; Ultimate Stress; Deformation; Filament; Filling Pattern.

RESUMEN

Se presentan los resultados comparativos del comportamiento mecánico en probetas de Ácido Poliláctico reforzado con Fibra de Carbono (PLA FC) de dos marcas, de filamentos para impresión mediante el proceso de Modelado por Deposición Fundida (FDM). Los experimentos se llevaron a cabo de acuerdo con la norma ASTM D638 14, utilizando probetas Tipo I con las dimensiones establecidas. Para la generación del modelo 3D, se establecieron parámetros como la temperatura de impresión, velocidad de impresión, densidad y patrón de relleno. Se emplearon patrones de relleno cúbico, giroide y triangular, con densidades de relleno del 40 %, 60 % y 80 %. Para cada configuración se generó un código G el cual se utilizó para la fabricación de cada probeta. Se utilizaron un total de 90 especímenes, que se dividieron en dos grupos según la marca. Posteriormente, se llevaron a cabo ensayos a tracción para determinar las propiedades mecánicas, analizando las curvas de esfuerzo-deformación bajo las condiciones establecidas. El análisis comparativo reveló que el filamento de PLA FC de SUNLU alcanza mayores valores de esfuerzo último, mientras que el filamento de Artillery posee una mejor capacidad para soportar deformación. Así mismo, el patrón de relleno que soportó mayor carga fue el cúbico.

Palabras clave: PLA Reforzado con Fibra de Carbono; Esfuerzo Último; Deformación; Filamento; Patrón de Relleno.

© 2025; Los autores. Este es un artículo en acceso abierto, distribuido bajo los términos de una licencia Creative Commons (https:// creativecommons.org/licenses/by/4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio siempre que la obra original sea correctamente citada

INTRODUCCIÓN

El proceso de impresión 3D a través del modelado por deposición fundida (FDM) es una tecnología de fabricación aditiva. Es una de las técnicas de fabricación más utilizada en la elaboración de piezas complejas en diversas aplicaciones de ingeniería.^(1,2) Se trata de un proceso avanzado y eficaz a través del cual se pueden fabricar componentes tridimensionales de geometría compleja con un ínfimo desperdicio de material.⁽³⁾ Las ventajas de la impresión 3D se distinguen de otras tecnologías en rentabilidad, bajo costo de equipos, reducción de residuos y manejo de geometrías complejas; sin embargo, estos beneficios no son plenamente reconocidos, lo que limita su penetración definitiva en el mercado.^(2,3,4) Los filamentos de materiales poliméricos compuestos han reportado un rendimiento superior en las piezas impresa.⁽⁵⁾ Durante los últimos años, los materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras han sido objeto de investigación para la elaboración de productos aditivos.⁽⁶⁾

Venkateswar y otros investigadores, evaluaron la importancia de diferentes parámetros de impresión, tales como la densidad de relleno, la velocidad de impresión y grosor de la capa, en relación con la resistencia a la tracción de los componentes impresos en 3D utilizando la técnica de modelado por deposición fundida (FDM). Se determinó que la resistencia a la tracción se ve afectada significativamente por la temperatura de la boquilla y un aumento de la velocidad de impresión, lo que conduce a una reducción de las propiedades mecánicas; sin embargo, se observó que existe una mayor adhesión entre capas y una mejor distribución del material en las piezas con capas más finas y densidades más altas.⁽⁷⁾

Por otra parte, se determinó la resistencia a la tracción deseada del Ácido Poliláctico (PLA) reforzado con fibra de carbono mediante la optimización de diversos parámetros de impresión para lo cual se utilizó el diseño experimental Taguchi L9. Se fabricaron nueve conjuntos de probetas según la norma ASTM, dando como resultado que la resistencia a la tracción óptima se obtiene como 21,961 MPa cuando los parámetros de proceso son densidad de relleno 80 %, velocidad de impresión 80 mm/s y altura de capa 100µm.⁽⁸⁾

En otra investigación, se caracterizaron compuestos de PLA reforzados con fibra de carbono haciendo uso de la técnica FDM, para lo cual se prepararon cuatro grupos de probetas: termoplástico de Ácido Poliláctico (PLA), PLA con Fibra Corta de Carbono (PLA-SCF), PLA impreso con Fibra de Carbono Continua (PLA-CCF) y PLA-SCF impreso con CCF (PLA-SCF-CCF), en las cuales se estudiaron experimentalmente los efectos sobre las propiedades de tracción y flexión de las muestras posterior a su proceso de fabricación. El compuesto de PLA reforzado con CCF mostró la mayor resistencia a la tracción y un módulo de Young de 245,40 MPa y 27,93 GPa, respectivamente. Las muestras de PLA-CCF mostraron el mayor valor medio de tensión de flexión de 168,88 MPa, además la micrografía óptica de la sección transversal de fibra de carbono impregnada confirma la existencia de resina y CCF con la presencia de algunos contenidos de vacíos de aire en ella.⁽⁹⁾

Adicionalmente, se analizaron los resultados de las propiedades mecánicas de probetas para un tipo particular de Compuestos Termoplásticos Reforzados con Fibra Continua (CFRTPC): matriz de nailon Reforzada con Fibras Continuas de Carbono (CRTP), Kevlar (KvRTP) y fibra de vidrio (FGRTP), las cuales fueron fabricadas mediante modelado por deposición fundida (FDM). Los experimentos reportados son tensión, flexión y corte, donde las fibras se orientaron a 45° desde el eje de carga. La orientación y el contenido de fibras influyen significativamente en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos fabricados aditivamente. Se descubrió que la deposición concéntrica de fibras tiene un rendimiento mecánico menor que la opción isométrica.⁽¹⁰⁾

Así mismo, se caracterizó el efecto de la orientación de la construcción, el espesor de la capa y el contenido de volumen de la fibra sobre el rendimiento mecánico de componentes compuestos reforzados con fibra continúa impresos en 3D. Se realizaron ensayos de tracción y flexión en tres puntos para determinar la respuesta mecánica de las probetas impresas. Se observó que el efecto del espesor de la capa de muestras de nailon sobre el rendimiento mecánico es marginalmente significativo. Además, las muestras reforzadas con fibra continua muestran valores de resistencia y rigidez más altos que las no reforzadas. Los resultados muestran que los compuestos reforzados con fibra de carbono exhiben el mejor rendimiento mecánico con mayor rigidez.⁽¹¹⁾

Por otro lado, se determinaron las propiedades mecánicas relacionadas con la dureza, la rugosidad superficial y la visualización de la microestructura de probetas de Acrilonitrilo (ABS), Tereftalato de Polietileno modificado con Glicol (PETG) y PLA a través de la técnica FDM de acuerdo con las especificaciones ASTM. La probeta con el patrón de diamante tenía una dureza extrema de 16,4 HB para el material ABS, una dureza ligeramente diferente de 15,8 HB para PLA y una dureza mínima de 10HB para PETG.⁽¹²⁾

Además, se investigaron las propiedades mecánicas y la tenacidad a la fractura interlaminar de la Poliamida reforzado con Fibra de Carbono (CF/PA). Para el caso de tracción longitudinal se consideraron dos tipos de geometrías de probetas de acuerdo con las normas ASTM D638 y ASTM D3039. Los resultados muestran que las probetas bajo la norma D638 fallan prematuramente debido a la concentración de esfuerzos e irregularidad al punto de inicio de la impresión 3D. Las muestras bajo la norma D3039 son la mejor opción para caracterizar las propiedades longitudinales de este material, debido a que sus resultados son más consistentes, con deformaciones al fallo de alrededor del 12,6 %. Para la caracterización de la tenacidad a la fractura interlaminar se utilizaron

muestras monolíticas de CF/PA sin ningún refuerzo adicional. Los resultados muestran que los especímenes prismáticos con lengüetas de papel son más apropiados para la caracterización de las propiedades del material. El uso de probetas gruesas para ensayos de tenacidad a la fractura complica la caracterización y puede conducir a resultados erróneos.⁽¹³⁾

También, se exploraron las diferentes proporciones de kenaf las cuales impactan las características de resistencia del filamento de PLA 2003D, empleado en impresión 3D. Se inició el análisis extruyendo el pellet de PLA 2003D de Ingeo NatureWorks a una temperatura de 190 °C y 7 rpm de velocidad del tornillo. Las impresiones 3D se realizaron con un patrón de relleno de ángulo de trama de 90° y una densidad de relleno del 100 %. Las pruebas mecánicas, según la normativa ASTM D638, se utilizaron para evaluar la calidad del filamento de PLA extruido. Se observó que una carga de fibra de kenaf del 15 % mostró las mejores propiedades de tracción entre las distintas cargas de relleno, evidenciando una mejora en las propiedades de tracción del filamento con la adición de fibra de kenaf como refuerzo.⁽¹⁴⁾

Por otra parte, se investigó el impacto de los parámetros del proceso FDM utilizando Ácido Poliláctico (PLA). Se utilizó un diseño experimental que utiliza el enfoque Box-Behnken donde se producen múltiples conjuntos de muestras de PLA utilizando varios parámetros del proceso FDM, incluido el espacio de aire, la temperatura del extrusor, el espesor de la capa, la densidad del relleno y el ángulo de la trama. La resistencia a la tracción de cada muestra fue medida utilizando una máquina de ensayos universal. Se obtuvo una resistencia máxima a la tracción de 18,48 MPa en la muestra 39, bajo una carga de 3,69 kN y una resistencia mínima a la tracción de 2,72 MPa en la muestra 37. Los resultados indican que los parámetros específicos del proceso en la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) afectan significativamente la resistencia a la tracción.⁽¹⁵⁾

Por último, se detalló la influencia de tres variables específicas del proceso de impresión: ángulo de trama (RSA), espesor de capa (LYT) y densidad de relleno (IFD), en dos aspectos fundamentales: la resistencia a la fractura y el comportamiento frente a la deformación en las muestras impresas utilizando PLA. Se llevó a cabo un extenso estudio experimental que incorporó 27 conjuntos distintos de combinaciones de procesos de impresión, totalizando 108 probetas evaluadas. Además, se desarrollaron dos modelos matemáticos cuadráticos con el propósito de predecir la resistencia a la tracción y la deformación al momento de la fractura en las probetas impresas, considerando la influencia de los parámetros de impresión. Los resultados obtenidos de la predicción se compararon favorablemente con los resultados experimentales. Finalmente, el estudio presento un conjunto optimizado de parámetros de impresión recomendados para mejorar tanto la durabilidad como la integridad de las piezas fabricadas.⁽¹⁶⁾

Los procesos de obtención de piezas impresas través de la tecnología FDM son ampliamente utilizadas en Ecuador; sin embargo, es necesario considerar los cambios de propiedades que sufren los materiales del filamento según los parámetros de impresión que establece el fabricante. Dado lo anterior, la presente investigación tiene como propósito evaluar la influencia de diferentes parámetros de impresión 3D en las propiedades mecánicas de probetas de PLA reforzado con fibra de carbono comercializados en Ecuador.

MÉTODO

A continuación, se muestran los parámetros que se consideraron para la impresión de las probetas a tracción, así como también las especificaciones para la realización de los ensayos. Posterior a ello, se dan a conocer los resultados para el análisis del comportamiento mecánico de los especímenes de filamento de PLA-FC.

Especificaciones del experimento

Tipo de ensayo: ensayo a tracción.

Norma: ASTM D638-14 con probeta tipo I.

Máquina universal de ensayos: Se hace uso del dinamómetro James Heal Titan 5kN, el cual pertenece a la carrera de Ingeniería Textil.

Marcas de filamento: PLA-FC SUNLU y PLA-FC Artillery

Parámetros de impresión:

- Densidad de relleno: se establecen densidades de relleno del 40 %, 60 % y 80 %.
- Patrón de relleno: se hace uso de los patrones cúbico, giroide y triangular.
- Velocidad de impresión: se configura la velocidad en 60 mm/s.
- Temperatura de impresión: se establece la temperatura en 210°C.
- Temperatura de la placa de impresión: se utiliza una temperatura de 60°C.

Diseño de la probeta

Las dimensiones de la probeta se basan en la norma ASTM D638-14. Se utilizó el perfil para la probeta Tipo I con sus respectivas dimensiones (figura 1).



Figura 1. Modelo 3D de la probeta Tipo I

Parámetros de impresión

Los parámetros de impresión 3D que se configuraron para la realización de este experimento se presentan en la tabla 1.

Tabla 1	. Configuración de impresión en el softw	are Ultimaker CUR ${ m A}$
Configuración	Parámetros	PLA FC (SUNLU y Artillery)
Calidad	Altura de capa	0,2 mm
Paredes	Grosor de la pared	0,84 mm
	Recuento de líneas de pared	2
	Grosor superior	0,8 mm
	Capas superiores	4
	Grosor inferior	0,8 mm
	Capas inferiores	4
Relleno	Densidad de relleno	40 %, 60 %, 80 %
	Patrón de relleno	Cúbico, Giroide, Triangular
Material	Temperatura de impresión	210 °C
	Temperatura de la placa de impresión	60 °C
	Diámetro del filamento	1,75 mm
Velocidad	Velocidad de impresión	60 mm/s
	Velocidad de capa inicial	45 mm/s
Refrigeración	Velocidad del ventilador	100 %

Impresión y clasificación de las probetas

Una vez establecido los parámetros de impresión en el software Ultimaker Cura, es necesario guardar el archivo de código G de la probeta en una unidad de memoria USB, la cual se debe ingresar en la impresora 3D para su fabricación. A continuación, se elige el archivo a imprimir, para lo cual la impresora calienta la boquilla a 140 °C y la placa de impresión a 60 °C, cuando ambos parámetros se encuentran en su valor, la temperatura de la boquilla sube a 210 °C e inicia el proceso de impresión de la probeta capa por capa.

Dada la configuración establecida se imprimen 4 capas inferiores, seguidas por otras capas de acuerdo con el patrón de relleno y 4 capas superiores. Se imprimen 5 probetas con 3 patrones de relleno y 3 porcentajes de densidad de relleno, dando un total de 90 probetas, 45 probetas de PLA-FC SUNLU y 45 probetas de PLA-FC Artillery. El tiempo de impresión varía entre 40 min y 1 h 39 min, una vez que la impresión ha terminado es necesario esperar al menos 10 min antes retirar la probeta. Luego, se clasifican de acuerdo con el patrón de relleno, densidad, marca y se señala de color blanco de longitud de la sección estrecha.

Ensayo a tracción de probetas de PLA-FC

Para la realización de los ensayos se hace uso de la máquina James Heal Titan misma que tiene una capacidad de carga máxima de 5000 N y se requiere seguir los siguientes pasos:

- Configurar los parámetros en el software TestWise el cual esta enlazado con la máquina de ensayos (tabla 2).
- Posteriormente, se debe sujetar cada probeta en la mordaza inferior y superior, verificando que esta se encuentra alineada en la dirección que se realizará el ensayo (figura 2).
- El software genera un informe con las curvas de Fuerza-Extensión de cada probeta sometida al ensayo.

5 Chuquin A, et al

Tabla 2. Configuración en el software TestWise								
Parámetros	Configuración							
Velocidad del ensayo	50 mm/min							
Cantidad de probetas por grupo	5							
Dirección	Urdimbre							



Figura 2. Colocación de la probeta en la máquina de ensayos

Cálculos

Luego de haber culminado con los ensayos a tracción se debe analizar los resultados para cada grupo de probetas. Para lo cual se hace uso de la ecuación 1.

$$\sigma = \frac{P}{A_T} \tag{1}$$

La fuerza (P) se la obtiene del informe exportado por el software para cada probeta. El área (A_r) de la sección transversal de la probeta depende de las capas superiores e inferiores, paredes, patrón y densidad de relleno, como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Sección transversal de la probeta

Debido a la configuración de las probetas, es necesario determinar el área equivalente a las capas superiores e inferiores se define como A_{si} y se calcula haciendo uso de la ecuación 2.

$$A_{SI} = L_c \times h_c \times n_c \tag{2}$$

Donde:

A_{si}: área de las capas superiores e inferiores [mm2].

- L_c: longitud de la capa [mm].
- h_c: altura de la capa [mm].

n_c: número de capas.

Para calcular el área de las paredes se utiliza la ecuación 3.

$$A_p = L_p \times h_p \times n_p \tag{3}$$

Donde:

A_p: área de las paredes [mm2]. L_p: longitud de la pared [mm]. H_p: altura de la pared [mm]. N_p: número de paredes.

Para obtener el área que se mantiene constante para cada probeta se utiliza la ecuación 4:

$$A_1 = A_{SI} + A_p \tag{4}$$

Donde: A₁: área constante [mm2]. A_{s1}: área de las capas superiores e inferiores [mm2]. A_p: área de las paredes [mm2].

A manera de ejemplo, en la figura 4 se presenta la configuración interna de la sección transversal de la probeta con patrón de relleno giroide al 80 %.

					 _

Figura 4. Sección transversal de la probeta con patrón de relleno giroide y densidad 80 %

Para calcular el área de la configuración interna es necesario reconstruir la sección transversal capa por capa haciendo uso del software Ultimaker Cura. Se considera el número de capas internas, número de cuadrados donde el grosor de la capa de relleno y la altura de capa es 0,2 mm, por lo tanto, el área de cada cuadrado es 0,04 mm². Luego se procede a calcular el área interna haciendo uso de la ecuación 5.

$$A_2 = A_{\bullet} \times N_{\bullet} \tag{5}$$

Donde:

A₂: área de la configuración interna [mm2].
A₂: área de cada cuadrado [mm2].
N₂: número de cuadrados.

Para calcular el área total de la sección transversal se hace uso de la ecuación 6:

$$A_T = A_1 + A_2 \tag{6}$$

Donde:

 A_{T} : área de la sección transversal total [mm2]. A_{1} : área constante [mm2]. A_{2} : área de la configuración interna [mm2].

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos a través de la utilización de las ecuaciones 2-6 para todos los patrones y densidad de relleno.

7 Chuquin A, *et al*

Tabla 3. Área de la sección transversal de las probetas													
	Patrón de relleno												
Área de la probeta [mm²]		Cúbico	ı		Giroide		Triangular						
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %				
A ₁ [mm ²]	26,51	26,51	26,51	26,51	26,51	26,51	26,51	26,51	26,51				
A ₂ [mm ²]	4,96	6,84	8,32	6,68	9,44	12,24	5,2	6,12	9,52				
A _T [mm ²]	31,47	33,35	34,83	33,19	35,95	38,75	31,71	32,63	36,03				

Luego, se calcula la deformación cuando se obtiene la máxima resistencia a la tracción haciendo uso de la ecuación (7).

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0}$$

Probetas SUNLU PLA-FC

Donde:

 l_r corresponde a la longitud final de la probeta.

(7)

 l_0 es la longitud origina (antes del ensayo) de la probeta.

RESULTADOS

Se muestran los resultados obtenidos con base a los ensayos a tracción de las probetas fabricadas con los filamentos de PLA-FC de las marcas SUNLU y Artillery y densidad del 40 %, 60 % y 80 %. Para cada grupo de probetas se presentan las propiedades mecánicas y curvas de esfuerzo - deformación, así como también la desviación estándar (SD) como medida de dispersión de los datos y la mediana (M) como valor representativo de cada grupo de probetas. En todos los casos se observa que las probetas se rompieron en la sección estrecha cuyos límites se marcan con líneas de color blanco.

Tabla 4. Resultados de ensayo a tracción de las probetas de PLA-FC Cúbico (SUNLU) Deformación Extensión Ρ Fuerza Máxima (N) Esfuerzo último (MPa) (mm/mm) (mm) 40 % 60 % 60 % 40 % 80 % 40 % 80 % 40 % 60 % 80 % 60 % 80 % 1279 1421 40.65 42.61 47,19 0,07115 1 1644 5.115 5.252 5,705 0.06367 0.06536 2 1283 1438 1630 5,253 40,77 0,06539 0,07012 5,251 5,623 43,13 46,81 0,06535 3 1311 1450 1722 5,336 5,256 5,796 41,67 43,48 49,45 0,06642 0,06541 0,07229 1293 1481 5,211 41,1 44,4 50,49 0,06487 4 1759 5,415 6,002 0,06739 0,07486 5 1255 1435 1733 4,954 5,294 5,965 39,88 43,02 49,76 0,06168 0,06589 0,0744 Μ 1283 1438 1722 5,211 5,256 5,796 40,77 43,13 49,45 0,06487 0,06541 0,07229 SD 20,55 22.5 57,09 0,1462 0,0703 0,1635 0,6529 0,6747 1.639 0,00182 0,00087 0,00204



Probetas SUNLU- Densidad de relleno 40 % - patrón cúbico

https://doi.org/10.56294/dm2025768







Probetas SUNLU- Densidad de relleno 80 % - patrón cúbico

Figura 5. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Cúbico (SUNLU)

En las tablas 4, 5, 6 y figuras 5,6 y 7 se muestran los resultados del ensayo a tracción de las probetas SUNLU, con patrón de relleno cúbico, giroide y triangular, respectivamente.

		Tabla	a 5. Resu	ltados de	ensayo a	tracción	de las pr	obetas de	PLA-FC	Giroide (SU	NLU)	
Ρ	Fuer	za Máxim	ia (N)	Ext	ensión (n	nm)	Esfuer	zo último	o (MPa)	Deformación (mm/mm)		
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %
1	1212	1474	1693	5,293	5,726	5,920	36,53	40,99	43,69	0,06593	0,07121	0,07395
2	1205	1478	1730	5,248	5,761	6,004	36,3	41,1	44,66	0,06537	0,07166	0,075
3	1216	1456	1716	5,333	5,628	6,094	36,64	40,51	44,29	0,06643	0,06999	0,07612
4	1241	1474	1735	5,349	5,636	6,137	37,4	41,01	44,77	0,06663	0,0701	0,07666
5	1222	1484	1729	5,295	5,762	6,076	36,81	41,27	44,62	0,06596	0,07167	0,0759
Μ	1216	1474	1729	5,295	5,726	6,076	36,64	41,01	44,62	0,06596	0,07121	0,0759
SD	13,71	10,2	17,01	0,0394	0,0663	0,0853	0,4132	0,2836	0,4389	0,000491	0,000825	0,001065



Densidad de relleno 40 % - patrón giroide



Densidad de relleno 60 % - patrón giroide



Densidad de relleno 80 %~ - patrón giroide

Figura 6. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Giroide (SUNLU)

	Tabla 6. Resultados de ensayo a tracción de las probetas de PLA-FC Triangular (SUNLU)														
Р	Fuer	za Máxim	ia (N)	Ext	ensión (n	nm)	Esfuer	Esfuerzo último (MPa)			Deformación (mm/mm)				
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %			
1	1200	1262	1321	4,876	4,904	5,335	37,85	38,68	36,66	0,06083	0,0613	0,07089			
2	1189	1253	1353	4,794	4,843	5,346	37,51	38,41	37,55	0,05981	0,06054	0,07103			
3	1193	1275	1310	4,884	4,952	5,139	37,62	39,06	36,36	0,06093	0,0619	0,06829			
4	1183	1257	1342	4,756	4,917	5,206	37,3	38,54	37,25	0,05933	0,06146	0,06917			
5	1178	1257	1302	4,788	4,779	5,212	37,16	38,52	36,14	0,05972	0,05973	0,06925			
Μ	1189	1257	1321	4,794	4,904	5,212	37,51	38,54	36,66	0,05981	0,0613	0,06925			
SD	8,523	8,299	21,36	0,0574	0,0684	0,0894	0,2688	0,2543	0,5927	0,00072	0,00086	0,00119			



Densidad de relleno 40 % - patrón triangular



Densidad de relleno 60 % - patrón triangular



Densidad de relleno 80 % - patrón triangular

Figura 7. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Triangular (SUNLU)

Probetas Artillery PLA-FC

En las tablas 7, 8, 9 y figuras 8, 9 y 10 se muestran los resultados del ensayo a tracción de las probetas Artillery, con patrón de relleno cúbico, giroide y triangular, respectivamente.

	Tabla 7. Resultados de ensayo a tracción de las probetas de PLA-FC Cúbico (Artillery)														
Р	Fuer	za Máxim	a (N)	Ext	Extensión (mm)			Esfuerzo último (MPa)			Deformación (mm/mm)				
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %			
1	1201	1459	1670	5,537	5,837	6,247	38,17	43,76	47,93	0,07361	0,07748	0,08298			
2	1229	1472	1652	5,765	5,878	6,215	39,04	44,13	47,43	0,07664	0,07802	0,08256			
3	1171	1415	1642	5,503	5,794	6,378	37,20	42,42	47,15	0,07316	0,07692	0,08472			
4	1213	1450	1654	5,580	5,916	6,373	38,56	43,49	47,48	0,07418	0,07853	0,08465			
5	1182	1425	1696	5,467	5,747	6,464	37,55	42,73	48,70	0,07268	0,07629	0,08587			
М	1201	1450	1654	5,537	5,837	6,373	38,17	43,49	47,48	0,07361	0,07748	0,08465			
SD	23,40	23,78	21,16	0,1165	0,0666	0,1026	0,7436	0,7129	0,6077	0,00155	0,00088	0,00136			



Densidad de relleno 40 % - patrón cúbico







Densidad de relleno 80 % - patrón cúbico

Figura 8. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Cúbico (Artillery)

		Tabla 8	. Resulta	dos de ensa	iyo a trac	ción de las	probetas	de PLA-F	C Giroide	(Artillery)			
Р	Fuer	za Máxim	a (N)	Ext	Extensión (mm)			Esfuerzo último (MPa)			Deformación (mm/mm)		
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	
1	1202	1425	1682	5,705	6,087	6,587	36,23	39,65	43,41	0,07573	0,08096	0,08721	
2	1260	1448	1671	5,888	6,134	6,416	37,97	40,28	43,13	0,07816	0,08158	0,08493	
3	1077	1472	1621	5,831	6,294	6,299	32,46	40,95	41,84	0,07741	0,08371	0,08339	
4	1170	1426	1631	5,704	6,132	6,415	35,25	39,66	42,08	0,07573	0,08156	0,08492	
5	1172	1473	1668	5,717	6,386	6,591	35,32	40,97	43,05	0,07590	0,08493	0,08726	
Μ	1172	1448	1668	5,717	6,134	6,416	35,32	40,28	43,05	0,07590	0,08158	0,08493	
SD	66,33	23,53	27,01	0,08513	0,1271	0,1258	1,999	0,6546	0,6971	0,00113	0,00169	0,00167	



Densidad de relleno 40 % - patrón giroide



Densidad de relleno 80 % - patrón giroide

Figura 9. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Giroide (Artillery)

Los resultados de este grupo de probetas se ven reflejados en la tabla donde se muestran las propiedades mecánicas como el esfuerzo último a tracción, deformación ultima y módulo de elasticidad de cada una de las probetas.

	Tabla 9. Resultados de ensayo a tracción de las probetas de PLA-FC Triangular Artillery													
Р	Fuer	Fuerza Máxima (N)			Extensión (mm)			rzo último	o (MPa)	Deformación (mm/mm)				
	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %	40 %	60 %	80 %		
1	1139	1200	1430	5,289	5,164	5,546	35,91	36,78	39,70	0,06996	0,06817	0,07353		
2	1091	1180	1397	5,218	5,202	5,299	34,39	36,16	38,77	0,06901	0,06867	0,07026		
3	1115	1227	1437	5,289	5,382	5,473	35,16	37,62	39,88	0,06995	0,07105	0,07256		
4	1096	1200	1456	5,164	5,163	5,579	34,57	36,76	40,41	0,06830	0,06816	0,07397		
5	1115	1164	1413	5,299	5,032	5,494	35,18	35,66	39,21	0,07008	0,06644	0,07284		
Μ	1115	1200	1430	5,289	5,164	5,494	35,16	36,76	39,70	0,06995	0,06817	0,07284		
SD	18,99	24,03	22,65	0,059	0,126	0,109	0,599	0,736	0,629	0,00078	0,00166	0,00144		



Densidad de relleno 40 % - patrón triángular



Densidad de relleno 60 % - patrón triangular



Densidad de relleno 80 % - patrón triangular

Figura 10. Gráfica de Esfuerzo [MPa] - Deformación [mm/mm] de las probetas de PLA-FC Triangular (Artillery)

Valores representativos de las propiedades mecánicas de PLA-FC

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos para las propiedades mecánicas esfuerzo último a tracción (S_u), deformación (ϵ_u) y módulo de Young (E) de las muestras ensayadas.

Tabla 10. Resumen de las propiedades mecánicas de PLA FC SUNLU y Artillery													
Datrán da	Donsidad		SUNLU			Artillery		Dif	Diferencia relativa				
relleno	de relleno	S (MPa)	ε _u (mm/mm)	E (MPa)	S _u (MPa)	ε _u (mm/mm)	E (MPa)	S _u (MPa)	ε _u (mm/mm)	E (MPa)			
Cúbico	40 %	40,77	0,06487	803,5	38,17	0,07361	694,1	6,8 %	-11, 9 %	15,8 %			
	60 %	43,13	0,06541	827,8	43,49	0,07748	698,6	-0,8 %	-15,6 %	18,5 %			
	80 %	49,45	0,07229	809,2	47,48	0,08465	679,3	4,1 %	-14,6 %	19,1 %			
Giroide	40 %	36,64	0,06596	732,9	35,32	0,07590	663,6	3,7 %	-13,1 %	10,4 %			
	60 %	41,01	0,07121	750,6	40,28	0,08158	639,8	1,8 %	-12,7 %	17,3 %			
	80 %	44,62	0,0759	735,0	43,05	0,08493	624,2	3,6 %	-10,6 %	17,8 %			
Triangular	40 %	37,51	0,05981	783,8	35,16	0,06995	665,9	6,7 %	-14,5 %	17,7 %			
	60 %	38,54	0,06130	785,7	36,76	0,06817	678,6	4,8 %	-10,1 %	15,8 %			
	80 %	36,66	0,06925	651,2	39,70	0,07284	673,8	-7,7 %	-4,9 %	-3,4 %			

DISCUSIÓN

Esfuerzo último a tracción

Para una mejor visualización en la figura 11 se presentan los valores representativos del esfuerzo último a tracción de cada patrón y densidad de relleno de los filamentos SUNLU y Artillery.

Al comparar los patrones de relleno cúbico, giroide y triangular con una densidad del 40 % de las marcas SUNLU y Artillery, se aprecia que el patrón cúbico de SUNLU ofrece la máxima resistencia a la tracción con un valor de 40,77 MPa, seguido por el mismo patrón de la marca Artillery con un valor de 38,17 MPa.

Al examinar los resultados correspondientes a los tres patrones de relleno con una densidad del 60 % de los dos filamentos, se puede apreciar que el mayor esfuerzo último a tracción se obtiene con el patrón cúbico de Artillery cuyo valor es 43,49 MPa, seguido por el mismo patrón de relleno del filamento de SUNLU con un valor de 43,13 MPa, la diferencia relativa es mínima.

Respecto a los resultados del máximo esfuerzo último a tracción con una densidad del 80 % considerando los tres patrones de relleno, se observa que el patrón cúbico de SUNLU permite una mayor resistencia con un valor de 49,45 MPa, seguido por el mismo patrón de Artillery cuyo valor es 47,48 MPa.



Figura 11. Comparación del esfuerzo último [MPa] para cada patrón y densidad de relleno

Al comparar los resultados se puede ver que, el patrón cúbico permite la mayor resistencia a la tracción para cada densidad de relleno. En la mayoría de los casos el filamento de PLA-FC de SUNLU proporciona un esfuerzo último superior, excepto con los patrones de relleno cúbico al 60 % y triangular al 80 %.

Para diseños donde únicamente importa la resistencia, la diferencia relativa es suficientemente baja menor al 8 % como para que el costo sea más importante, razón por la cual se sugiere utilizar la más económica que es Artillery.

Módulo de Young

En la figura se muestran los valores representativos del módulo de Young correspondientes a cada patrón y densidad de relleno de las dos marcas.

Al comparar los tres patrones de relleno con una densidad del 40 % de ambas marcas, se distingue que el patrón cúbico de SUNLU ofrece un mayor módulo elástico con un valor de 803,5 MPa, seguido por el patrón triangular de la misma marca cuyo valor es 783,8 MPa.

Al analizar los resultados correspondientes a la densidad del 60 % de los tres patrones de relleno, se puede apreciar que el mayor módulo elástico se presenta con el patrón cúbico de SUNLU con un valor de 827,8 MPa, seguido por el patrón triangular de la misma marca cuyo valor es 785,7 MPa.

Respecto al mayor módulo elástico con una densidad del 80 % considerando los tres patrones de relleno, se observa que el patrón cúbico de SUNLU posee el mayor módulo con un valor de 809,2 MPa, seguido por el patrón giroide de la misma marca cuyo valor es 735 MPa.

Al analizar los resultados se puede apreciar que el patrón de relleno cúbico posee un mayor módulo elástico para cada porcentaje de relleno. El máximo módulo elástico se presenta en el patrón de relleno cúbico al 60 % de SUNLU seguido por los patrones de relleno cúbico al 80 % y cúbico al 40 % de la misma marca. Además, se puede ver que en la mayoría de los casos el filamento de SUNLU ofrece un mayor módulo de Young a excepción con el patrón de relleno triangular al 80 %.



Figura 12. Comparación del módulo elástico [MP] para cada patrón y densidad de relleno

Deformación

En la figura 13 se presentan los valores representativos de la deformación última correspondientes a cada patrón y porcentaje de relleno de los filamentos de SUNLU y Artillery.



Figura 13. Comparación de la deformación [mm/mm] para cada patrón y densidad de relleno

Al comparar los resultados considerando los 3 patrones con una densidad del 40 % de los dos filamentos, se puede observar que el patrón giroide de Artillery admite la mayor deformación con un valor de 0,0759, seguido por el patrón cúbico de la misma marca cuyo valor es 0,07361.

Al realizar una comparación entre los patrones de relleno con una densidad del 60 %, se observa que el patrón de relleno giroide de Artillery ofrece la mayor deformación cuyo valor es 0,08158, seguido por el patrón cúbico de la misma marca.

Al analizar los resultados correspondientes a la densidad del 80 % de cada patrón de relleno, se distingue que el patrón giroide de Artillery admite una deformación de 0,08493, seguido por el patrón de relleno cúbico de la misma marca.

Como se puede apreciar, la mayor deformación última se presenta en el patrón de relleno giroide al 80 % de Artillery, seguido por los patrones de relleno cúbico al 80 % y giroide al 60 % de la misma marca de filamento. Como se observa en cada uno de los casos el filamento de Artillery ofrece una mayor deformación en comparación con el filamento de SUNLU.

CONCLUSIONES

A través de la investigación, se identificaron los parámetros necesarios para llevar a cabo los ensayos de tracción en las probetas impresas a través de la técnica FDM. Se determinaron la temperatura de impresión, velocidad de impresión, densidad y patrón de relleno adecuados para realizar la caracterización en probetas de PLA reforzadas con fibra de carbono. Ajustar cuidadosamente estos parámetros es fundamental para obtener resultados consistentes y confiables.

Los ensayos a tracción, basados en la norma ASTM D638 14, realizados en probetas de PLA FC de las marcas SUNLU y Artillery revelaron el patrón y densidad de relleno que ofrece mejores propiedades mecánicas para las diferentes condiciones.

El máximo esfuerzo último se presenta con el patrón de relleno cúbico y densidad de relleno del 80 % del filamento de PLA FC de SUNLU, seguido por la misma configuración del filamento de PLA FC de Artillery.

El filamento de PLA FC de Artillery admite una mayor deformación en cada una de las configuraciones, lo cual es más notorio con los patrones de relleno cúbico y giroide con sus respectivos porcentajes de relleno.

El mayor módulo de Young se presenta con el patrón cúbico al 80 % seguido por el mismo patrón de relleno con una densidad del 60 % del filamento de SUNLU. En la mayoría de los casos el filamento de SUNLU presenta una modulo elástico mayor al 15 % respecto al filamento de Artillery.

Dado lo anterior, se concluye que ambos materiales aportan ventajas en alguna propiedad mecánica y dependerá de lo requerido por el fabricante la respectiva selección.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Muhamedagic K, Berus L, Potočnik D, Cekic A, Begic-Hajdarevic D, Cohodar Husic M, et al. Effect of Process Parameters on Tensile Strength of FDM Printed Carbon Fiber Reinforced Polyamide Parts. Applied Sciences. 2022 Jun 14;12(12):6028.

2. Pagés-Llobet A, Espinach FX, Julián F, Oliver-Ortega H, Méndez JA. Effect of Extruder Type in the Interface of PLA Layers in FDM Printers: Filament Extruder Versus Direct Pellet Extruder. Polymers (Basel). 2023 Apr 24;15(9):2019.

3. Singh J, Goyal KK, Sharma R. Impact of FDM variables on the tensile property of 3D printed CF-PLA parts. Mater Today Proc. 2024;113:60-7.

4. Zonoobi MA, Haghshenas Gorgani H, Javaherneshan D. Experimental investigation and multi-objective optimization of FDM process parameters for mechanical strength, dimensional accuracy, and cost using a hybrid algorithm. Scientia Iranica. 2023 Jun 20;0(0):0-0.

5. Ambade V, Rajurkar S, Awari G, Yelamasetti B, Shelare S. Influence of FDM process parameters on tensile strength of parts printed by PLA material. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2025 Jan 7;19(1):573-84.

6. Calles AF, Carou D, Ferreira RTL. Experimental Investigation on the Effect of Carbon Fiber Reinforcements in the Mechanical Resistance of 3D Printed Specimens. Applied Composite Materials. 2022 Jun 1;29(3):937-52.

7. Venkateswar Reddy M, Hemasunder B, Mahadevapa Chavan P, Dish N, Paul Savio A. Study on the significance of process parameters in improvising the tensile strength of FDM printed carbon fibre reinforced PLA. Mater Today Proc. 2023 Jul;

8. Ajay Kumar M, Khan MS, Mishra SB. Effect of fused deposition machine parameters on tensile strength of printed carbon fiber reinforced PLA thermoplastics. Mater Today Proc. 2020;27:1505-10.

9. Maqsood N, Rimašauskas M. Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling. Composites Part C: Open Access. 2021 Mar;4.

10. Díaz-Rodríguez JG, Pertúz-Comas AD, González-Estrada OA. Mechanical properties for long fibre reinforced fused deposition manufactured composites. Compos B Eng. 2021 Apr 15;211.

11. Chacón JM, Caminero MA, Núñez PJ, García-Plaza E, García-Moreno I, Reverte JM. Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties. Compos Sci Technol. 2019 Sep 8;181:107688.

12. Durga Rajesh KV, Ganesh N, Yaswanth Kalyan Reddy S, Mishra H, Teja Naidu TMVPS. Experimental research on the mechanical characteristics of fused deposition modelled ABS, PLA and PETG specimens printed in 3D. Mater Today Proc. 2023 Jul;

13. Santos JD, Fernández A, Ripoll L, Blanco N. Experimental Characterization and Analysis of the In-Plane Elastic Properties and Interlaminar Fracture Toughness of a 3D-Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite. Polymers (Basel). 2022 Jan 27;14.

14. Lau HY, Hussin MS, Hamat S, Abdul.Manan MS, Ibrahim M, Zakaria H. Effect of kenaf fiber loading on the tensile properties of 3D printing PLA filament. Mater Today Proc. 2023 Mar;

15. Ambade V, Rajurkar S, Awari G, Yelamasetti B, Shelare S. Influence of FDM process parameters on tensile strength of parts printed by PLA material. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). 2023 Aug 7;

16. Algarni M. Tensile strength and strain behavior study and modeling of PLA printed parts with optimized AM parameters. Procedia Structural Integrity. 2023;51.

FINANCIACIÓN

Los autores no recibieron financiamiento para el desarrollo de la investigación.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

17 Chuquin A, *et al*

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Arley Chuquín, Brizeida Gámez, Marco Naranjo, David Ojeda. Curación de datos: Arley Chuquín. Análisis formal: Arley Chuquín, Brizeida Gámez. Investigación: Arley Chuquín, Brizeida Gámez. Metodología: Marco Naranjo, David Ojeda. Administración del proyecto: Brizeida Gámez. Recursos: Arley Chuquín, Brizeida Gámez, Marco Naranjo, David Ojeda. Supervisión: Marco Naranjo, David Ojeda. Validación: Arley Chuquín, Brizeida Gámez. Visualización: Arley Chuquín, Brizeida Gámez. Redacción - borrador original: Arley Chuquín, Brizeida Gámez. Redacción - revisión y edición: Brizeida Gámez.