

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS IMPRESAS EN
TECNOLOGÍA 3D DE ACUERDO CON LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA**

**JUAN DAVID CAUSIL PERTUZ
RAFAEL JOSE PUERTAS VILLEROS**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERIA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERIA
2023**

**CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES MECÁNICAS EN PIEZAS IMPRESAS EN
TECNOLOGÍA 3D DE ACUERDO CON LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA**

**JUAN DAVID CAUSIL PERTUZ
RAFAEL JOSE PUERTAS VILLEROS**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero mecánico

**Asesor
KATERIN OSORIO BARRERA
Ingeniero mecánico, MBA**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL MONTERIA
ESCUELA DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA
MONTERIA
2023**

DEDICATORIA

Principalmente a Dios, porque fue quien estuvo con nosotros cuando las cosas se pusieron difíciles para ayudarnos a conseguir solución a todos esos problemas que presentamos.

A mis padres Martha y Martín, que siempre estuvieron acompañándome y apoyándome durante toda mi etapa Universitaria.

A mi hermana Lina, por brindarme su apoyo incondicional y constante motivación para poder lograr cada una de mis metas.

A mi novia Fliana Sepúlveda, por todo su amor, cariño y paciencia durante la realización de esta investigación.

Juan David Causil Pertuz

DEDICATORIA

Principalmente a Dios, porque fue quien estuvo con nosotros cuando las cosas se pusieron difíciles y nos ayudó a conseguir solución a todos esos problemas que se nos presentaron.

A mi papá Luis Rafael Puertas Contreras, por estar siempre apoyándome en todo, por todos los sacrificios que tuvo que hacer para mantenerme en mi camino y sobre todo por acompañarme en toda mi carrera.

A mi mamá Beatriz Elena Villero Campo, por estar siempre orando, rezando, preocupándose y sobre todo por su amor incondicional para que yo saliera adelante.

A mi novia Rosa Milagros Díaz, por ese amor, motivación y apoyo moral cuando más lo necesitaba durante toda mi carrera universitaria.

Rafael Jose Puertas Villero.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Ingeniera Katerin Osorio por brindar todo su conocimiento a nuestra disposición, guiarnos, acompañarnos y motivarnos a culminar esta investigación.

Agradecemos a el Ingeniero Luis Rivero por sacar un poco de su tiempo para ayudarnos a realizar los ensayos.

Agradecemos a el auxiliar de laboratorio Martin por colaborarnos con todos los instrumentos de laboratorio que necesitábamos.

CONTENIDO

RESUMEN:	8
ABSTRAC:	8
1 INTRODUCCIÓN:	9
1.1 Objetivos	10
2 ESTADO DEL ARTE:	11
3 METODOLOGÍA	16
3.1 Etapa 1: Construcción de probetas	16
3.1.1 CAD	17
3.1.1.1 Probeta de flexión	17
3.1.1.2 Probeta de compresión	18
3.1.1.3 Probeta de tensión	19
3.1.2 Simulación de impresión	19
3.1.3 Impresoras	20
3.2 Etapa 2: Evaluación de resistencias	20
3.2.1 Ensayo de flexión	20
3.2.2 Ensayo de tensión	21
3.2.3 Ensayo de compresión	21
3.3 Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones de los parámetros de impresión	21
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1 Etapa 1: Construcción de probetas	22
4.1.1 Probetas para ensayos a flexión	22
4.1.2 Probetas para ensayos a tensión	23
4.1.3 Probetas para ensayos a compresión	24
4.2 Etapa 2: Evaluación de resistencias	26
4.2.1 Ensayo de flexión	26
4.2.2 Ensayo de tensión	27
4.2.3 Ensayo de compresión	29
4.3 Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones de los parámetros de impresión	31
5 CONCLUSIONES	33
6 RECOMENDACIONES	34
7 BIBLIOGRAFÍA	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Forma de impresión rejilla.....	16
Figura 2. Forma de impresión zigzag.....	16
Figura 3. CAD de probeta para flexión.....	18
Figura 4. CAD de probeta para compresión.....	18
Figura 5. CAD de probeta para tensión.....	19
Figura 6. Simulación Ultimaker Cura con probetas de flexión horizontal.....	19
Figura 7. Impresora 3D ANYCUBIC 4max pro.....	20
Figura 8. Impresora Creatbot Max.....	20
Figura 9. Máquina universal Exceed E45 – MTS.....	21
Figura 2. Simulación de probeta de flexión con árbol.....	23
Figura 3. Impresión de probeta de flexión con árbol.....	23
Figura 4. Probeta de flexión terminada.....	23
Figura 13. Simulación de probeta de tensión con árbol.....	24
Figura 14. Probeta de tensión impresa con el árbol.....	24
Figura 15. Simulación de la probeta de compresión con árbol.....	25
Figura 16. Impresión de probeta de compresión con árbol.....	25
Figura 17. Impresión de probeta de compresión.....	25
Figura 18. Resistencias de probetas a flexión.....	26
Figura 19. Ensayo de flexión.....	26
Figura 20. Probetas de flexión falladas.....	26
Figura 21. Gráfica de flexión de probeta con mayor resistencia.....	27
Figura 22. Resistencias de probetas a tensión.....	28
Figura 23. Ensayo de tensión.....	28
Figura 24. Gráfica de tensión de probeta con mayor resistencia.....	29
Figura 25. Resistencias de probetas a compresión.....	29
Figura 5. Probeta de compresión fallada.....	30
Figura 27. Gráfica de compresión de probeta con mayor resistencia.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diseño experimental para flexión.....	17
Tabla 2. Diseño experimental para compresión.....	17
Tabla 3. Diseño experimental para tensión.....	17
Tabla 4. Condiciones de impresión.....	22
Tabla 5. Construcción de probetas de tensión.....	22
Tabla 6. Construcción de probetas de tensión.....	24
Tabla 7. Construcción de probetas de compresión.....	25
Tabla 8. Resultados de resistencia máxima.....	31

RESUMEN:

Este trabajo tiene como propósito estimar que tanto influyen las direcciones de las fibras (horizontal, vertical y diagonal a 45°) y la forma de impresión (zigzag y rejilla) sobre la resistencia de probetas impresas en poliláctico (PLA). Se imprimieron 36 probetas mediante la impresión por extrusión; de las cuales 12 probetas fueron de acuerdo con la norma de flexión ASTM-D760, 12 probetas fueron de acuerdo con la norma de compresión ASTM-D695 y 12 probetas fueron de acuerdo con la norma de tensión ASTM-D638. La densidad utilizada fue del 50%, la temperatura de boquilla de 200°C, la velocidad de impresión de 40 mm/s y con las variaciones de tipo de dirección de fibra y forma de impresión se le realizaron los ensayos respectivos para comparar las resistencias de cada probeta según el esfuerzo sometido. Finalmente, con los resultados obtenidos se definen algunas sugerencias y/o recomendaciones de parámetros de manufactura de acuerdo con los esfuerzos a las que estarán sometidas piezas impresas en PLA. Esta información es beneficiosa para personas y empresas que trabajan con este filamento que es el más utilizado como material de impresión 3D y que sus piezas estén expuestas alguno de los esfuerzos evaluados en esta investigación para crear piezas con mayor resistencia ante estos esfuerzos.

Palabras claves: impresiones 3D, PLA, esfuerzos destructivos, propiedades mecánicas.

ABSTRAC:

The aim of this study is to determine the impact of fiber directions (horizontal, vertical, and diagonal at 45°) and print shape (zigzag and grid) on the strength of polylactic acid (PLA) specimens. A total of 36 specimens were printed using extrusion printing. Out of these, 12 specimens were manufactured according to the ASTM-D760 flexion standard, 12 specimens were made following the ASTM-D695 compression standard, and 12 specimens adhered to the ASTM-D638 tensile standard. The density utilized was 50%, with a nozzle temperature of 200°C and a printing speed of 40 mm/s. The respective tests were conducted to compare the strength of each specimen, based on the variation in fiber direction and print shape. The results obtained from these tests provide valuable insights and recommendations for manufacturing parameters, specifically for PLA parts subjected to similar forces. This information is highly beneficial for individuals and companies engaged in working with PLA filament, which is widely used as a material for 3D printing. It enables them to create parts with enhanced strength against the forces examined in this research.

Keywords: 3D printing, PLA, destructive efforts, mechanical properties.

1 INTRODUCCIÓN:

La manufactura se ha visto beneficiada por las nuevas tecnologías que han surgido y revolucionado este sector, en la impresión 3D se diseña por medio de modelos tridimensionales asistidos computacionalmente y se crea añadiendo capas de material hasta construir la pieza. Es de gran importancia que los materiales o piezas presenten propiedades especiales para atender a la demanda de nuevas condiciones, cubriendo prácticamente todas las áreas de mercado y con características tales como baja densidad, buenas propiedades mecánicas y decorrosión (DIAS FWR, 2011).

Cuando se diseña o se fabrica una pieza se tienen en cuenta sus propiedades mecánicas debido a que en ellas se basa el diseño para el trabajo en el cual las piezas estarán sometidas. El creciente uso de materiales poliméricos en aplicaciones de ingeniería ha motivado a varios investigadores a buscar modelos que puedan describir adecuadamente su comportamiento.

Existe una relación significativa entre las propiedades mecánicas y la orientación de las fibras en las impresiones 3D. Dado el impacto crucial de este factor, resulta imprescindible comprender los efectos que las diferentes direcciones pueden generar. Además, hasta ahora se desconoce por completo la influencia de la forma de impresión de las fibras en las piezas impresas en 3D. Por ende, el propósito de esta investigación es determinar de qué manera el tipo de impresión influye en la resistencia de las piezas frente a los esfuerzos a los que puedan estar expuestas, así como identificar las formas de impresión junto con las direcciones de fibra recomendadas para lograr una mayor resistencia.

En este proyecto se analizarán la influencia de las variables de fabricación como la dirección de fibra y la forma de impresión en probetas construidas en ácido poliláctico (PLA) que se encontrarán sometidas a esfuerzo de tensión, compresión y flexión para así proporcionar recomendaciones para parámetros de este tipo de manufactura.

1.1 Objetivos

GENERAL:

Caracterizar las propiedades mecánicas en piezas impresas en tecnología 3D de acuerdo con la dirección de la fibra.

ESPECÍFICOS:

- Crear en ácido poliláctico (PLA) diferentes probetas impresas en 3D variando la dirección de la fibra, el tipo de impresión y las dimensiones establecidas en las normas de ensayos de plásticos ASTM D638 para tensión, ASTM D760 para flexión y ASTM D695 para compresión.
- Evaluar la resistencia a la tensión, compresión y la flexión, de acuerdo con los parámetros de operación establecidos en las normas para plásticos ASTM D638, ASTM D760 y ASTM D695, de las probetas de PLA impresas en 3D.
- Determinar las mejores combinaciones de los parámetros de impresión establecidos de acuerdo con los resultados de resistencia obtenidos para identificar posibles aplicaciones potenciales de las impresiones 3D.

2 ESTADO DEL ARTE:

Las impresiones 3D permiten crear configuraciones más ligeras y complicadas en menos tiempo. En 2014, Local Motor, por ejemplo, creó el primer vehículo eléctrico impreso en 3D del mundo. Local Motors no solo fabrica vehículos, sino también un autobús impreso en 3D conocido como OLLI, (Vikram Kedambi, Shiv Pratap, Kumas Shankar, N. Vinayaka, L. Avisah, K. Dilip, Abdulrajak Buradi, 2021).

En ese sentido, Praveena BA a, y, Lokesh norte, Abdulrajak Buradi, Santhosh norte, Praveena BL, Vignesh R, en su artículo “Una revisión exhaustiva de la fabricación aditiva emergente (3D tecnología de impresión): Métodos, materiales, aplicaciones, retos, tendencias y potencial futuro” ofrece una visión general completa de la tecnología de impresión 3D y su estado actual de desarrollo. En este artículo, los autores revisan los diferentes métodos de impresión 3D, incluyendo la deposición de material fundido (FDM), la estereolitografía (SLA), la sinterización selectiva por láser (SLS) y la fabricación aditiva de metal (AM).

El procedimiento consistió en imprimir depósitos consecutivos de materiales unos encima de otros. Los principales beneficios de la impresión 3D son la libertad de diseño, el volumen personalización, minimización de los residuos generados y la capacidad de construir ensamblajes complicados, así como creación rápida de prototipos. Como resultado, el artículo ofreció una indicación de los muchos tipos de tecnologías de impresión 3D, los componentes utilizados en el campo de la fabricación y las aplicaciones. La investigación innovadora en materiales de fabricación, métodos y diseño de productos es necesaria para los avances en el negocio de fabricación en las diversas industrias como la aeroespacial, la automotriz, la médica y la de bienes de consumo. El artículo también destaca los desafíos que enfrenta la tecnología de impresión 3D, como la precisión y la calidad del producto, la limitación del tamaño de la impresión y la falta de estandarización en la industria.

Los autores también discuten las tendencias y el potencial futuro de la tecnología de impresión 3D, como la impresión en 3D de células y tejidos para la medicina regenerativa, la impresión de alimentos y la fabricación en 3D a gran escala para la construcción de edificios y estructuras. (Praveena BA a, y, Lokesh norte, Abdulrajak Buradi, Santhosh norte, Praveena BL, Vignesh R, 2021).

Por otro lado, Anoop K. Sood, Raj K. Ohdar, Siba S. Mahapatra en su artículo “Investigación experimental y modelado empírico del proceso FDM para la mejora de la resistencia a la compresión” tenía como objetivo llevar a cabo una serie de experimentos para determinar la influencia de varios parámetros de impresión, como la velocidad de impresión, la orientación de la capa y la densidad de infill, en la resistencia a la compresión de las piezas impresas en material ABS P400 en el proceso FDM. Luego, utilizaron estos datos experimentales para desarrollar un modelo empírico (validada estadísticamente) que predice la resistencia a la compresión de una pieza impresa en función de estos parámetros de impresión.

Los resultados de la investigación muestran que la velocidad de impresión y la orientación de la capa tienen una influencia significativa en la resistencia a la compresión de las piezas impresas en 3D mediante FDM. Los experimentos realizados mostraron que una velocidad de impresión más lenta y una orientación de capa diferente pueden mejorar significativamente la resistencia a la compresión

de las piezas impresas.

Los resultados experimentales establecieron la naturaleza anisotropía y frágil del material. La máxima resistencia de compresión fue de 17,4751 MPa. En particular los autores encontraron que una orientación de capa de 45 grados y una velocidad de impresión de 40 mm/s proporcionaron la más alta resistencia a la compresión en sus experimentos. Además, también descubrieron que aumentar la densidad de infill (el patrón de relleno interno de la pieza impresa) puede mejorar la resistencia a la compresión, pero solo hasta cierto punto.

La relación desarrollada entre el esfuerzo de compresión (salida) y los parámetros del proceso (entrada) es capaz de explicar el 96,13% de la variabilidad en la respuesta y es adecuada para explorar el espacio de diseño para futuras aplicaciones de ingeniería. La curvatura presente en los gráficos de respuesta muestra una gran cantidad de no linealidad, lo que indica la compleja relación entre los parámetros del proceso y la respuesta de salida. Estos resultados son importantes porque la resistencia a la compresión es un parámetro crítico en muchas aplicaciones de ingeniería, incluyendo piezas de maquinaria, componentes de automóviles y aviones, así como en otros tipos de aplicaciones de manufactura. Mejorar la resistencia a la compresión de las piezas impresas en 3D mediante el proceso de FDM podría abrir nuevas posibilidades para la producción de piezas de alta calidad y resistentes en diferentes campos de aplicación. (Anoop K. Sood, Raj K. Ohdar, Siba S. Mahapatra, 2011).

Consecuente con lo anterior, MSc. Jonathan Rojas, Holger rivera, PhD Bladimir Ramón Valencia, en su investigación "la influencia en las propiedades mecánicas del PLA variando la orientación de las líneas de deposición en impresiones" analizaron cómo la orientación de las líneas de deposición afecta a las propiedades mecánicas del PLA (ácido poliláctico) impreso en 3D. Realizaron varias impresiones en 3D de probetas de PLA utilizando diferentes orientaciones de línea de deposición y evaluaron las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y la dureza. Los ángulos de impresión fueron de 0°, 45°, y 90° y se realizó la morfología mediante microscopía electrónica de barrido.

Los resultados mostraron que las probetas con orientaciones de 45° y 90° muestran resultados más bajos. En particular, las piezas impresas con una orientación de capa en la que las líneas de deposición estaban perpendiculares al eje de la carga tenían una resistencia a la tracción más baja, mientras que aquellas con una orientación en la que las líneas de deposición estaban paralelas al eje de la carga tenían una resistencia a la tracción más alta. Los resultados de un estudio comparativo de análisis numérico y métodos experimentales muestran tendencias similares para los próximos de flexión y dureza, con ajustes de configuración que dependen de la fuerza aplicada. Por tanto, determinaron que la orientación de las líneas de deposición es un factor importante para considerar en la impresión 3D de piezas de PLA y puede tener un impacto significativo en las propiedades mecánicas de las piezas impresas. (Pabón Rojas, PhD Valencia, Cacua Rivera, 2020).

También Daniel Agudelo, David Díaz, Andrés Ibarra, Carlos Cruel, Miguel Montoya, Camilo Hernández, en su artículo "Mechanical Properties of PLA and ABS 3D Prints Modeled by Fused Deposition due to Stress Stress" investigaron las propiedades mecánicas de las impresiones en 3D de dos materiales comunes utilizados en la fabricación aditiva, PLA y ABS, modeladas mediante la técnica de deposición fundida por extrusión (FDM), bajo diferentes condiciones de impresión como la orientación de la fibra y la densidad de relleno.

En este trabajo, las propiedades mecánicas ortótropas de dos materiales termoplásticos se caracterizan mediante una técnica de deposición llamada alambre fundido. La caracterización mecánica de este se realizó asumiendo el comportamiento orientacional de las estructuras impresas en 3D. Por lo tanto, se realizó un estudio experimental imprimiendo muestras con diferentes perfiles en los dos materiales expuestos a la tensión bajo la norma ASTM D3030. Para el análisis se determinó el módulo elástico, el límite elástico, la resistencia a la tracción y la deformación a la ruptura tanto del PLA como de ABS. Los resultados mostraron que la resistencia a la tracción y la flexión de las piezas impresas en 3D varió significativamente con las condiciones de impresión, como la orientación de la capa y la densidad de relleno. Además, los autores encontraron que las propiedades mecánicas de las impresiones en 3D de PLA y ABS eran diferentes entre sí, con el PLA siendo más rígido y quebradizo y el ABS siendo más elástico y tenaz. Sin embargo, el autor recomienda caracterizar las propiedades mecánicas bajo otras condiciones de carga tales como cortes, rollos entre capas y compresión. (Agudelo, Díaz, Ibarra, Cruel, Montoya, Hernández, Medellín, Colombia 2019).

Adicionalmente, MSc. Holger Cagua, PhD César Peña, PhD. Bladimir Ramón, en su artículo “Efecto de la velocidad de deposición en impresiones 3D sobre las propiedades mecánicas del poliláctico (PLA)” investigaron el efecto de la velocidad de deposición en la impresión 3D en las propiedades mecánicas del PLA realizando una serie de impresiones y evaluando las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión.

El modelado por deposición fundida está implementado en la técnica de fabricación aditiva en la que la materia prima son fibras poliméricas, se engrana a través de un elemento llamado hotend. Esta tecnología FDM permite que los materiales se fundan capa por capa hasta que se forman objetos de formas complejas a bajo costo. El filamento es de 1.75 mm de espesor que maneja una temperatura de 205 °C y una construcción robusta que reduce la vibración de la impresión. Se debe considerar una reducción del 4% en la resistencia a la tracción para un aumento del 50% en la velocidad. En particular, encontraron que las piezas impresas con una velocidad de deposición más baja tenían una resistencia a la tracción más alta y una resistencia a la flexión más baja que las piezas impresas con una velocidad de deposición más alta.

Además, también descubrieron que la velocidad de deposición afectó la microestructura de las piezas impresas, con una velocidad de deposición más baja que produce una estructura más densa y uniforme en la pieza. Esto es ventajoso ya que se puede mejorar el proceso de fabricación y se puede reducir el consumo de energía en función del uso de la cama caliente. (Cagua, Peña y Ramón, 2018).

Por otro lado, Vuelos William Reis Dias, en su trabajo de grado de maestría titulado “Comportamiento mecánico de polímero de PTFE sujeto a diferentes tasas de deformación”, tenía como objetivo principal estudiar el comportamiento mecánico del polímero conocido como politetrafluoroetileno – PTFE bajo diferentes velocidades de deformación. En este trabajo se realizaron ensayos experimentales de tracción uniaxial en un espécimen de PTFE normalizado, considerando diferentes tasas de deformación. Con base en los datos obtenidos, se propuso un modelo constitutivo para el comportamiento mecánico del PTFE. Se desarrolló un equipo para cortar probetas de PTFE normalizado. En el diseño del equipo se utilizaron materiales comunes y económicos y se usaron los recursos disponibles en el laboratorio. Los especímenes resultantes cumplieron a los requisitos de la norma aplicada. El modelo propuesto consta de dos partes: una que considera la región del gráfico tensión – deformación real antes del punto de transición citado, de 0,8 de deformación, y la otra parte, los valores por encima de esta. (REIS DIAS, 2021).

Sin embargo, David Armas-Ruiz, Steven Ruiz – Galarza, Marcelo Piován, Luis Carrión – Matamoros, Christian Narváez – Muñoz, en su artículo titulado “Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo” tenía como objetivo estudiar las propiedades mecánicas de las fibras de banano obtenidas tanto de la corteza como del cuerpo del tallo de la planta. Para ello, llevaron a cabo pruebas de tracción y flexión sobre muestras de fibras obtenidas de ambas partes del tallo.

Hoy en día, las fibras naturales todavía se usan porque se puede obtener y extraer fácilmente de la naturaleza; además que su precio se reduce en comparación con las fibras derivadas artificialmente. A partir de la prueba universal para determinar las propiedades de fibra de plátano para obtener estos resultados, fue necesario tomar muestras del tronco después de la corteza hasta la parte más interna.

Los resultados mostraron que las fibras de la corteza del tallo de banano tenían una mayor resistencia a la tracción y una mayor rigidez que las fibras obtenidas del cuerpo del tallo. Sin embargo, las fibras del cuerpo del tallo presentaron una mayor capacidad para soportar esfuerzos de flexión. Además, los autores realizaron un análisis microscópico de las fibras para evaluar su estructura y composición química, encontrando diferencias significativas entre las fibras obtenidas de la corteza y las del cuerpo del tallo. La resistencia a la compresión, tipificada por la resina y la resistencia a la tracción tipificada por el hilo han llegado a usarse por varios propósitos y demandas. En conclusión, los autores destacaron la importancia de conocer las propiedades mecánicas de las fibras de banano para su posible uso en la fabricación de materiales compuestos y en la industria de la construcción. También señalaron la necesidad de investigar más a fondo las propiedades de las fibras de diferentes variedades de banano para determinar su potencial como material de ingeniería (Armas-Ruiz, Ruiz-Galarza, Piován, Carrión-Matamoros, Narváez-Muñoz, 2016).

Por otro lado, Saquib Rouf, Aysha Farzana Kichloo, Ankush Raina, Mir Irfan Ul Haq, Nida Naveed Sudhanraj Jeganmoha, en su artículo “Piezas impresas en 3D y propiedades mecánicas: parámetros influyentes, aspectos de sustentabilidad, escenario del mercado global, desafíos y aplicaciones”, tenía como propósito reducir el tiempo del proceso y los pasos del proceso de la impresión 3D. Esto se puede hacer por tecnologías de creación rápida de prototipos como manufactura aditiva (AM) donde se usa un CAD para desarrollar sus diseños y por lo tanto disminuir el tiempo de creación del producto. Para la industria 4.0, AM se considera uno de los actores clave para la implementación de la personalización masiva. El concepto de medios digitales puede ayudar a superar los diversos problemas en la impresión que incluyen monitoreo y control, simulación de procesos que pueden afectar la calidad del producto y permitir la corrección en tiempo real. La tecnología AM tiene los mejores materiales y energéticamente eficientes, con la capacidad de ser manejadas geométricamente complejas. Basada en la reducción de desperdicios, menos costos de mano de obra y otros beneficios. La impresión 3D ha evolucionado como una alternativa sostenible a los procesos convencionales, lo que se refleja en la participación de mercado global actual y las proyecciones futuras del mercado. También en función de las propiedades favorables que ofrecen las piezas impresas en 3D, estas piezas están encontrando aplicaciones en casi todos los campos de la ingeniería. (Saquib Rouf, Aysha Farzana Kichloo, Ankush Raina, Mir Irfan Ul Haq, Nida Naveed Sudhanraj Jeganmoha, 2022).

Mientras que Gianluca Cicala, Alberta Latter, Bárbara Del Curto, Alessio Lo Ruso, Giuseppe Recca, Silvia Farè, en su artículo “Ingeniería de termoplásticos para la fabricación aditiva: una perspectiva crítica con evidencia experimental para respaldar aplicaciones funcionales” tenía como función estudiar la fabricación aditiva en los termoplásticos con una perspectiva crítica. La fabricación

aditiva(FA) está ganando cada vez más importancia en la industria como tecnología para la creación de prototipos. Entre las diferentes técnicas de AM está la tecnología basada en filamentos, es decir, el modelado por deposición fundida (FDM), es la más utilizada y también es reconocida como la mejor técnica de AM para estructuras funcionales. El desarrollo de materiales innovadores para FDM está cobrando un interés creciente en varios campos, con diferentes perspectivas que van desde el procesamiento de filamentos verdes con componentes de madera hasta el uso de compositos o polímeros de alto rendimiento. Los filamentos de PEEK se prepararon en una extrusora de un solo tornillo con un diámetro de tornillo (D) de 20 mm y una longitud de tornillo de $25 \times D$ (modelo E 20 TH;Collins). Los gránulos de PEEK se secaron antes de su uso a 140 °C durante 48 horas; después de eso, los gránulos se cargaron en la campana de la extrusora usando un alimentador volumétrico. La PC se recibió y usó en el cartucho estándar de la marca Stratasys®. Para la producción de las muestras de PC impresas en FDM, se utilizó una máquina Fortus® 400 mc; la orientación de construcción era plana en la plataforma de construcción XY. La primera parte del estudio sirvió como base sólida para una mayor investigación de un polímero novedoso para su posible uso como filamento FDM. Se evidenciaron algunos defectos en PEEK impreso con FDM, lo que demuestra que se necesita más investigación para optimizar el proceso, particularmente en la disminución de la formación de poros durante el proceso de impresión. (Gianluca Cicala, Alberta Latter, Bárbara Del Curto, Alessio Lo Ruso, Giuseppe Recca, Silvia Farè, 2017).

3 METODOLOGÍA

La metodología aplicada en este proyecto es experimental porque se usa la modelación de 3D para realizar impresiones con la ayuda de software Solidworks 2023® y Ultimaker Cura para predecir el comportamiento real de la fabricación, simular los prototipos planteados y realizar los ensayos. Adicionalmente, es metodología analítica porque se tomarán los resultados obtenidos en los ensayos de tensión, compresión y flexión para analizar la incidencia de los parámetros de impresión en la resistencia de las probetas y determinar cuáles serían las probetas idóneas para ciertas condiciones de esfuerzo.

3.1 Etapa 1: Construcción de probetas

Como primer paso para el cumplimiento de esta etapa se hace revisión de las normas norma ASTM D790 – 17 para flexión, ASTM D1621 – 00 para compresión y ASTM D638 – 22 para tensión para materiales poliméricos. Paralelamente a esto, se establece las variables bajo la cual se registrará el diseño de las probetas. Estas variables son forma, dirección de impresión y ensayos; donde para cada forma de impresión (rejilla y zigzag) como se observa en la Figura 1 y Figura 2, se variaron las direcciones (horizontal, vertical y diagonal 45°). Posteriormente, se sometieron las probetas a cada uno de los ensayos, lo que resultó en un total de 18 probetas. Sin embargo, se realizaron 2 pruebas para cada variación, lo que implicó la impresión de un total de 36 probetas. Esto se hizo con el fin de obtener resultados más confiables. Ver el diseño de experimento como se muestra en la Tabla 1, Tabla 2. y Tabla 3.

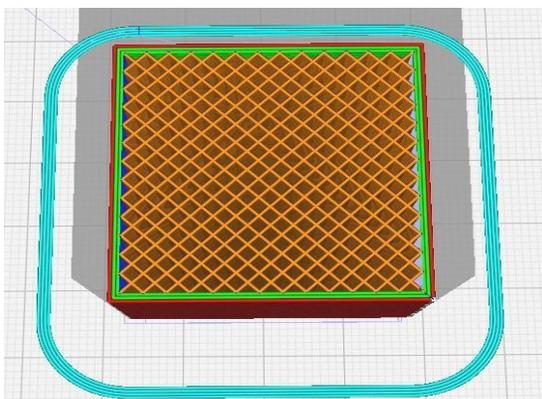


Figura 1. Forma de impresión rejilla

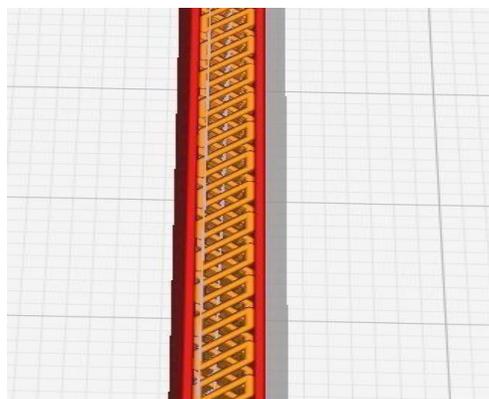


Figura 2. Forma de impresión zigzag

Ensayos a flexión		
Direcciones	Formas	
Horizontal		
		
Vertical		
		
Diagonal (45°)		
		

Tabla 1. Diseño experimental para flexión

Ensayos a compresión		
Direcciones	Formas	
Horizontal		
		
Vertical		
		
Diagonal (45°)		
		

Tabla 2. Diseño experimental para compresión

Ensayos a tensión		
Direcciones	Formas	
Horizontal		
		
Vertical		
		
Diagonal (45°)		
		

Tabla 3. Diseño experimental para tensión

3.1.1 CAD

De acuerdo con lo encontrado en las normas mencionadas anteriormente se establecen los parámetros dimensionales para cada una de las probetas, estas fueron realizadas mediante el software Solidworks 2023®.

3.1.1.1 Probeta de flexión

Para el CAD de esta probeta se basó en la norma ASTM D790 – 17 para polímeros donde se obtuvo las siguientes dimensiones en unidades de mm como se puede observar en la Figura 3.

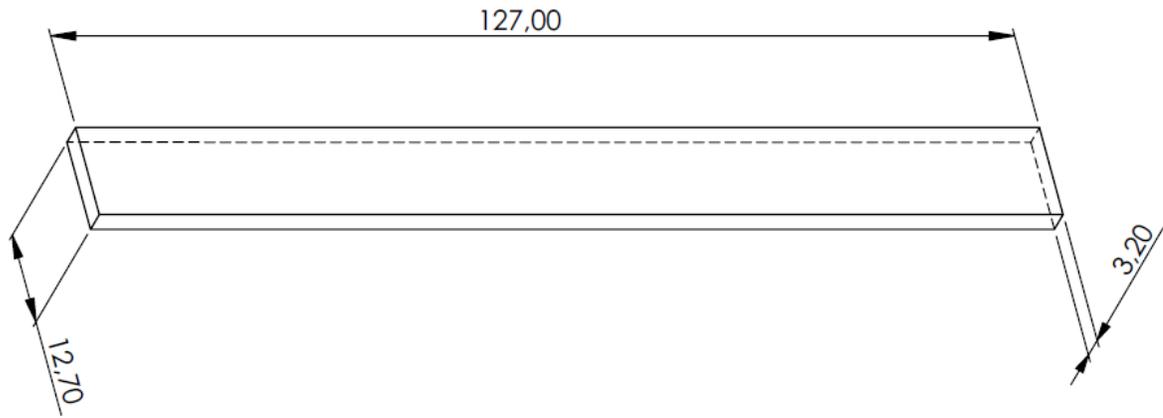


Figura 3. CAD de probeta para flexión

3.1.1.2 Probeta de compresión

Para el CAD de esta probeta se basó en la norma ASTM D1621 – 00 para polímeros donde se obtuvo las siguientes dimensiones en mm, estas se pueden ver en la Figura 4.

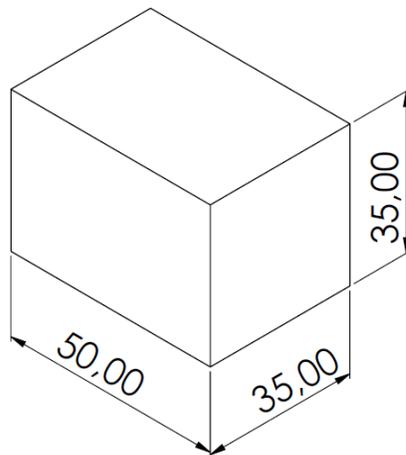


Figura 4. CAD de probeta para compresión

3.1.1.3 Probeta de tensión

Para el CAD de esta probeta se basó en la norma ASTM D638 – 22 donde se obtienen las siguientes dimensiones en mm, estas se pueden observar en la Figura 5.

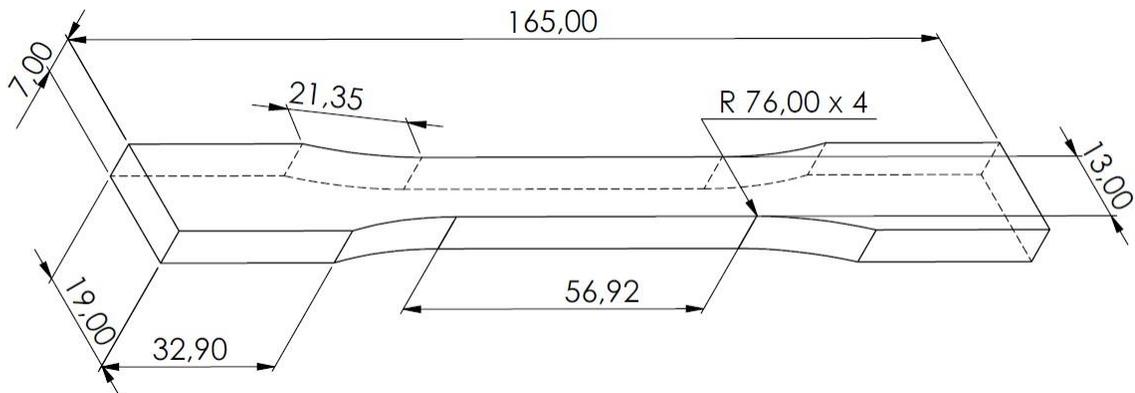


Figura 5. CAD de probeta para tensión

3.1.2 Simulación de impresión

Para la simulación de impresión se utilizó el software Ultimaker Cura donde se modeló y configuró la impresión en cada uno de los parámetros evaluados (direcciones y formas) a una velocidad de impresión de 40 mm/s, con una densidad de 50% para las probetas, temperatura de impresión de 200 °C, la temperatura de la cama de 60 °C y el diámetro del material (PLA) utilizado fue 1,75 mm. En la Figura 6 se puede observar la interfaz del Ultimaker cura con una simulación de probetas de flexión.

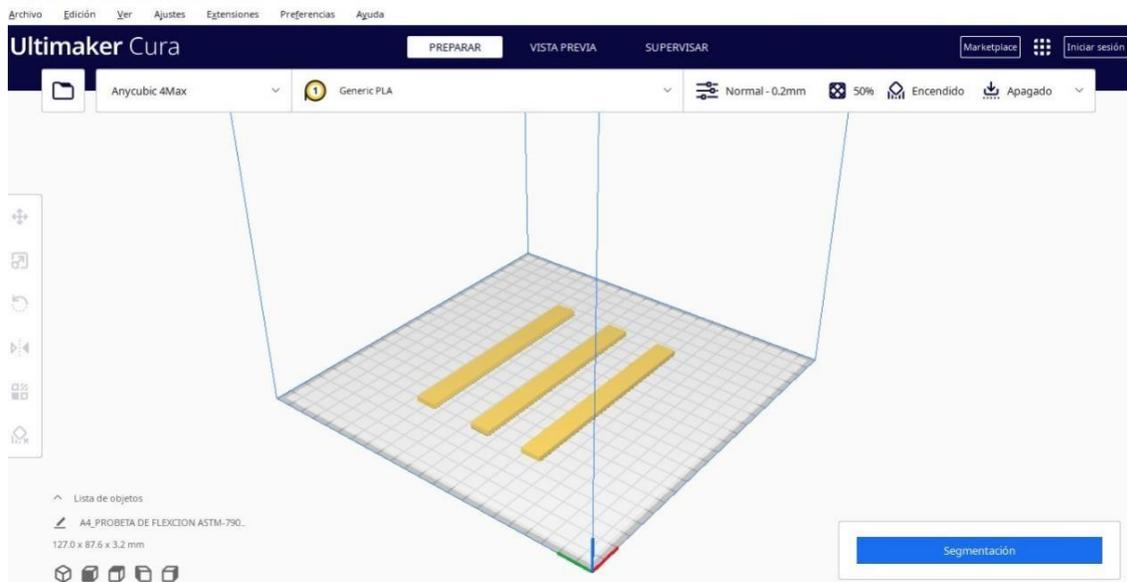


Figura 6. Simulación Ultimaker Cura con probetas de flexión horizontal

3.1.3 Impresoras

Para imprimir las probetas se utilizaron las impresoras 3D ANYCUBIC 4max pro (con una capacidad de área de trabajo de 270 mm x 210 mm x 190 mm) y Createbot max (con una capacidad de área de trabajo de 280 mm x 250 mm x 400mm y con dos extrusores dual), estas se pueden observar en la Figura 7 y Figura 8.

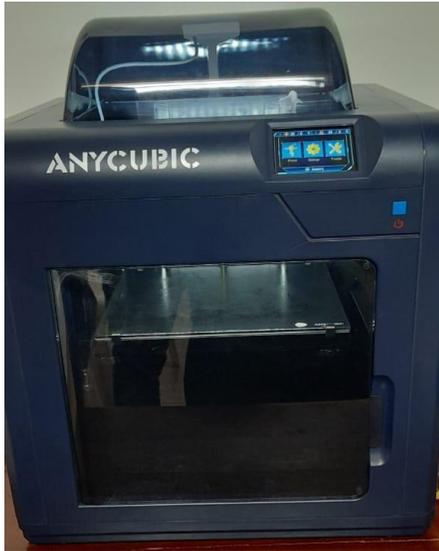


Figura 7. Impresora 3D ANYCUBIC 4max pro

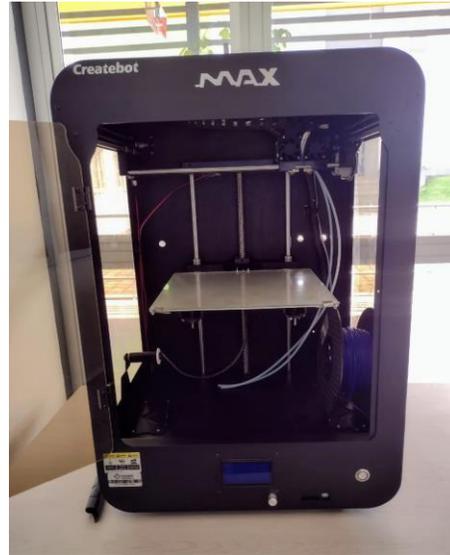


Figura 8. Impresora Creatbot Max

3.2 Etapa 2: Evaluación de resistencias

Se realizaron los tres ensayos en la máquina universal Exceed E45 – MTS. Modelo LPS. 305 serial 547272 con capacidad de 300 KN (Ver Figura 9. Máquina universal Exceed E45 – MTS).

3.2.1 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión se realizó a 3 puntos según la norma D790 – 17 a una velocidad de adquisición de datos de 0.01 mm/min y una frecuencia de 100Hz. Para la ejecución de este ensayo se utilizó una distancia entre soportes (span) de 87mm. Las variables de exportación fue desplazamiento de cruceta, tiempo, extensión, carga y resistencia.



Figura 9. Máquina universal Exceed E45 – MTS

3.2.2 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión se realizó según la norma ASTM D638 – 22 a una velocidad de adquisición de datos de 5 mm/min y una frecuencia de 100Hz. Las variables de exportación fue desplazamiento de cruceta, tiempo, extensión, carga y resistencia.

3.2.3 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión se realizó según la norma ASTM D1621 – 00 a una velocidad de adquisición de datos de 5 mm/min y una frecuencia de 100Hz. Las variables de exportación fue desplazamiento de cruceta, tiempo, extensión, carga y resistencia.

3.3 Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones de los parámetros de impresión.

Se analizarán y compararán los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos (flexión, tensión y compresión) de las probetas impresas, para establecer parámetros de impresión para piezas en poliláctico (PLA) de acuerdo con las condiciones de aplicación en la industria.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Etapa 1: Construcción de probetas

Inicialmente para realizar la construcción de las probetas se establecieron las condiciones de impresión como se observa en la Tabla 4. Debido a que con un rollo de PLA no fue posible imprimir todas las probetas, se utilizaron 2 con las mismas condiciones, pero con colores diferentes.

Material	PLA
Diámetro del material	1,75 mm
Densidad de relleno	50%
Velocidad de impresión	40 mm/s
Temperatura de boquilla	200°

Tabla 4. Condiciones de impresión

4.1.1 Probetas para ensayos a flexión

En la construcción de las probetas para flexión se desarrollaron 12 muestras como se planteó en la metodología con sus respectivos parámetros, donde el tiempo total de impresión fue de 17 h 34 min y el material total utilizado fue de 70 g que se detalla por cada probeta en la Tabla 5. En cuanto a la construcción de las probetas diagonales a 45° ocurrió un caso especial debido a que estas deben ser simuladas impresas con un árbol de soporte con una densidad de 10 % como se muestra en la Figura 10 y Figura 11. Por otro lado, se puede apreciar una probeta completamente terminada en la Figura 12.

Ensayo de flexión		
Probeta	Tiempo Impresión	Cantidad Material (g)
Vertical zigzag 1	1 h 20 min	10
Vertical zigzag 2	1 h 20 min	10
Vertical rejilla 1	1 h 8 min	9
Vertical rejilla 2	1 h 8 min	9
Horizontal zigzag 1	1 h 12 min	10
Horizontal zigzag 2	1 h 12 min	10
Horizontal rejilla 1	1 h 12 min	10
Horizontal rejilla 2	1 h 12 min	10
Diagonal (45°) rejilla 1	2 h 8 min	15
Diagonal (45°) rejilla 2	2 h 8 min	15
Diagonal (45°) zigzag 1	2 h 7 min	16
Diagonal (45°) zigzag 2	2 h 7 min	16

Tabla 5. Construcción de probetas de tensión

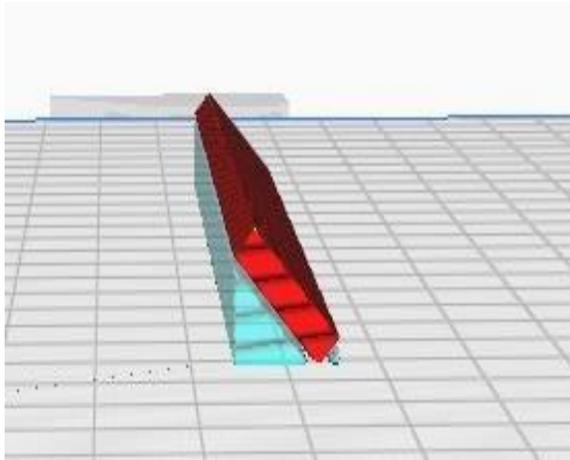


Figura 2. Simulación de probeta de flexión con árbol

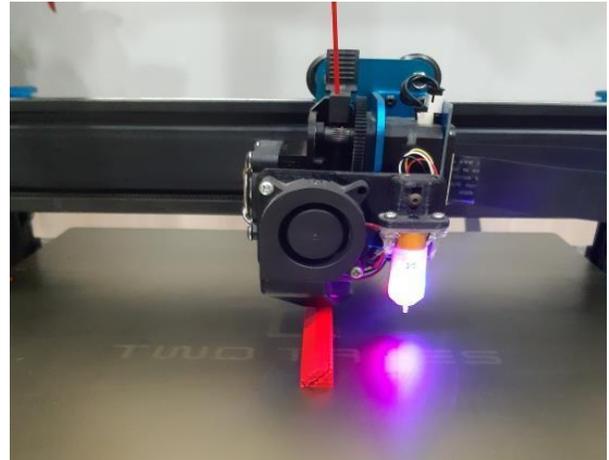


Figura 3. Impresión de probeta de flexión con árbol



Figura 4. Probeta de flexión terminada

4.1.2 Probetas para ensayos a tensión

En la construcción de las probetas para tensión se desarrollaron 12 muestras como se planteó en la metodología con sus respectivos parámetros, donde el tiempo total de impresión fue de 46 h 32 min y el material total utilizado fue de 204 g que se detalla por cada probeta en la Tabla 6. Las probetas diagonales a 45° fueron impresas con un árbol soporte con una densidad de 10 % como se muestra en la Figura 13 y Figura 14.

Ensayo de tensión		
Probeta	Tiempo Impresión	Cantidad Material (g)
Vertical zigzag 1	3 h 29 min	31
Vertical zigzag 2	3 h 29 min	31
Vertical rejilla 1	3 h 44 min	29
Vertical rejilla 2	3 h 44 min	29
Horizontal zigzag 1	3 h 4 min	30
Horizontal zigzag 2	3 h 4 min	30
Horizontal rejilla 1	3 h 5 min	29
Horizontal rejilla 2	3 h 5 min	29
Diagonal (45°) rejilla 1	5 h 18 min	42
Diagonal (45°) rejilla 2	5 h 18 min	42
Diagonal (45°) zigzag 1	5 h 16 min	43
Diagonal (45°) zigzag 2	5 h 16 min	43

Tabla 6. Construcción de probetas de tensión

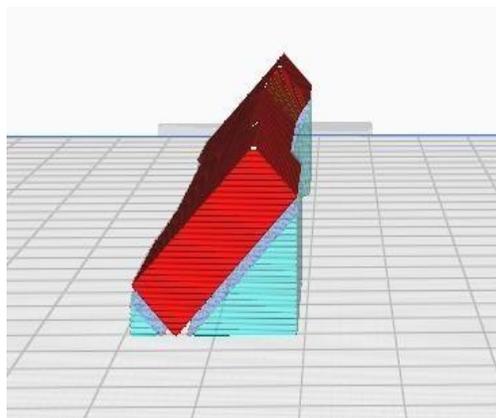


Figura 13. Simulación de probeta de tensión con árbol



Figura 14. Probeta de tensión impresa con el árbol

4.1.3 Probetas para ensayos a compresión

En la construcción de las probetas para compresión se desarrollaron 12 muestras como se planteó en la metodología con sus respectivos parámetros, donde el tiempo total de impresión fue de 95 h 10 min y el material total utilizado fue de 534 g que se detalla por cada probeta en la Tabla 7. Para las probetas con fibras en diagonal a 45° fueron impresas con un árbol soporte de densidad 10 % como se muestra en la Figura 15, Figura 16 y Figura 17.

Ensayo de compresión		
Probeta	Tiempo Impresión	Cantidad Material (g)
Vertical zigzag 1	7 h 7 min	84
Vertical zigzag 2	7 h 7 min	84
Vertical rejilla 1	7 h 24 min	82
Vertical rejilla 2	7 h 24 min	82
Horizontal zigzag 1	7 h 3 min	84
Horizontal zigzag 2	7 h 3 min	84
Horizontal rejilla 1	7 h 11 min	83
Horizontal rejilla 2	7 h 11 min	83
Diagonal (45°) rejilla 1	9 h 55 min	100
Diagonal (45°) rejilla 2	9 h 55 min	100
Diagonal (45°) zigzag 1	9 h 55 min	101
Diagonal (45°) zigzag 2	9 h 55 min	101

Tabla 7. Construcción de probetas de compresión

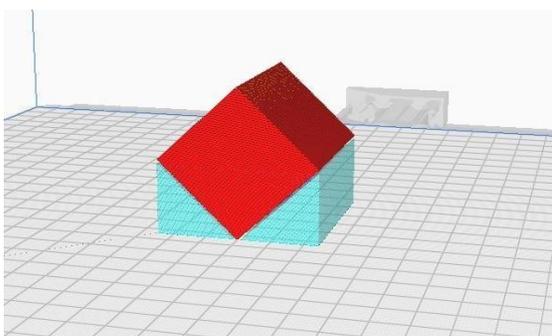


Figura 15. Simulación de la probeta de compresión con árbol

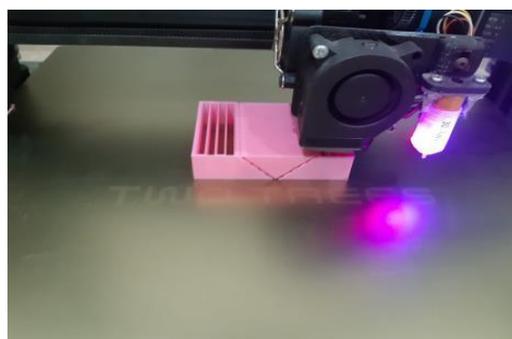


Figura 16. Impresión de probeta de compresión con árbol



Figura 17. Impresión de probeta de compresión

4.2 Etapa 2: Evaluación de resistencias

4.2.1 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión realizado se obtuvieron las variables de tiempo, desplazamiento de cruceta y resistencia; donde la resistencia máxima fue de 68 MPa fue soportada por la probeta con dirección de fibra diagonal a 45° y tipo de impresión en zigzag en un tiempo de 36,5 segundos y con un desplazamiento de cruceta de 17,88 mm. En la Figura 18 se pueden observar las resistencias obtenidas de los ensayos a flexión de las 12 probetas impresas en PLA. También en la figura 21, se muestra la gráfica obtenida del comportamiento de la probeta diagonal a 45° zigzag 1 que fue la que obtuvo mayor resistencia en este ensayo. Este ensayo de flexión se puede apreciar en la Figura 19 y Figura 20.

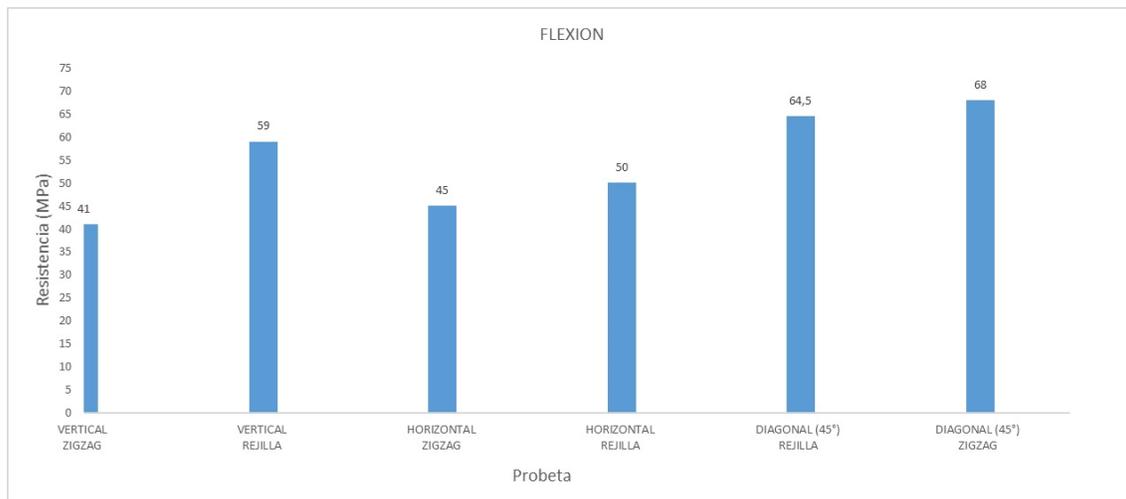


Figura 18. Resistencias de probetas a flexión



Figura 19. Ensayo de flexión



Figura 20. Probetas de flexión falladas

La probeta que se imprimió diagonal a (45°) zigzag 1, fue la que obtuvo una mayor resistencia con un valor de 68 MPa. Por su parte, la probeta con menor resistencia fue la que se imprimió en vertical (90°) rejilla, ya que alcanzó a llegar a los 40 MPa; lo que indica que la probeta impresa

diagonal a (45°) zigzag 1, tuvo un 41,17% de mayor resistencia en comparación con la que se imprimió en vertical (90°) rejilla. Para ver los resultados de todas las probetas en el ensayo a flexión mirar el archivo Anexo 1. Resultados ensayo flexión.

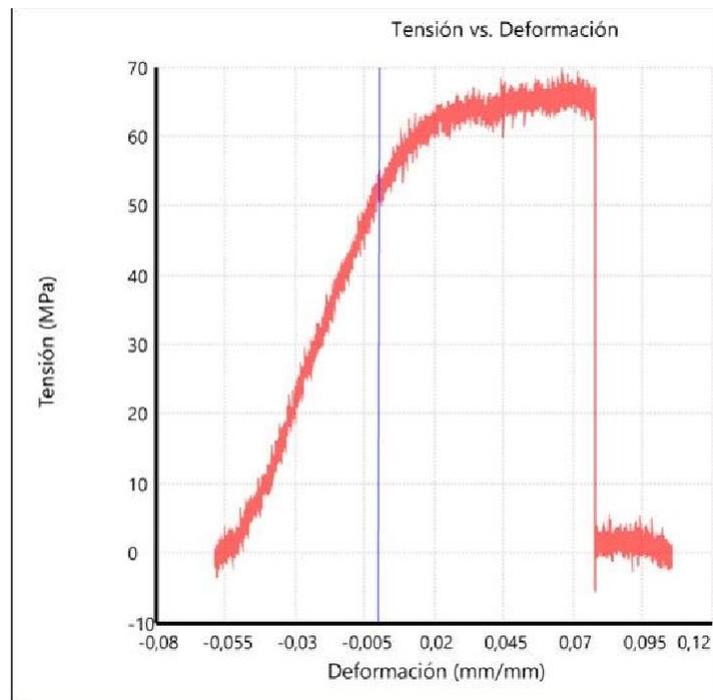


Figura 21. Gráfica de flexión de probeta con mayor resistencia

Esta información es de gran relevancia porque con ella se pueden mejorar la resistencia de elementos mecánicos como engranes que están sometidos a cargas de flexión, por lo que se recomienda utilizar la configuración diagonal a 45° con tipo de impresión en zigzag a la hora de imprimir para alcanzar unas mejores propiedades mecánicas en cuanto a la resistencia.

4.2.2 Ensayo de tensión

El ensayo de tensión realizado se obtuvieron las variables de tiempo, desplazamiento de cruceta y resistencia; donde la resistencia a la tensión máxima fue de 28 MPa fue soportada por la probeta con dirección de fibra horizontal y tipo de impresión en zigzag en un tiempo de 40,83 segundos y con un desplazamiento de cruceta de 3,33 mm. En la Figura 22 se pueden observar las resistencias obtenidas de los ensayos a flexión de las 12 probetas impresas en PLA. También en la Figura 24, se muestra la gráfica obtenida del comportamiento de la probeta horizontal zigzag 2 que fue la que obtuvo mayor resistencia en este ensayo. Este ensayo se puede apreciar la Figura 23.

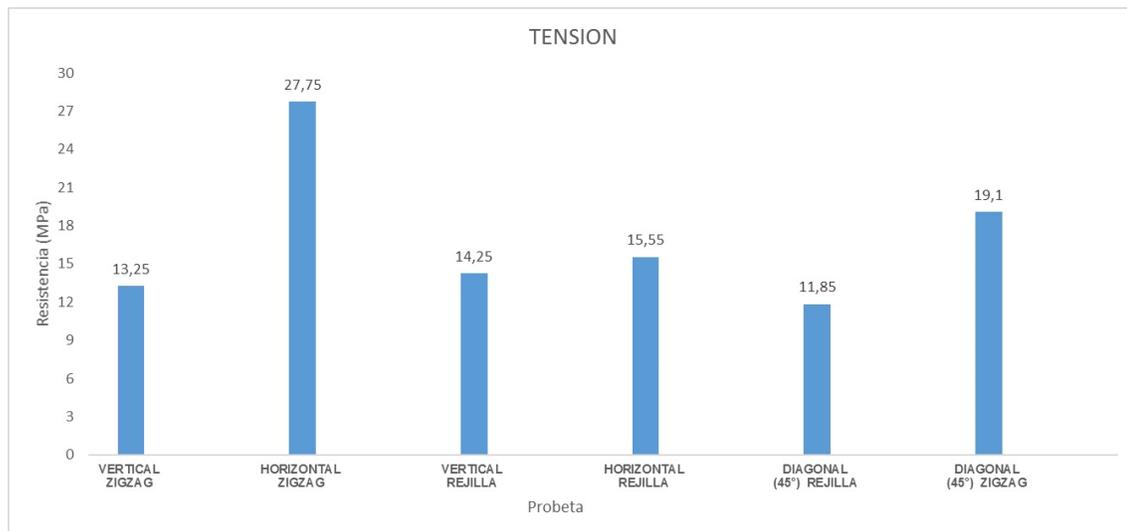


Figura 22. Resistencias de probetas a tensión



Figura 23. Ensayo de tensión

La probeta que se imprimió en horizontal (0°) zigzag 2 tuvo una resistencia de 28 MPa, la probeta con menor resistencia fue la que se imprimió en diagonal (45°) rejilla con una resistencia máxima de 11,5 MPa. La probeta impresa horizontal (0°) zigzag tuvo un 58,92 % de mayor resistencia en comparación con la que se imprimió en diagonal (45°) rejilla. Para ver los resultados de todas las probetas en el ensayo a flexión mirar el archivo Anexo 2. Resultados ensayo tensión.

De acuerdo con esta información obtenida se puede determinar que para aplicaciones a tensión como en productos de embalaje, juguetes o prototipos donde las piezas o elementos estén sometidas a un estiramiento es recomendable utilizar la configuración horizontal en zigzag.

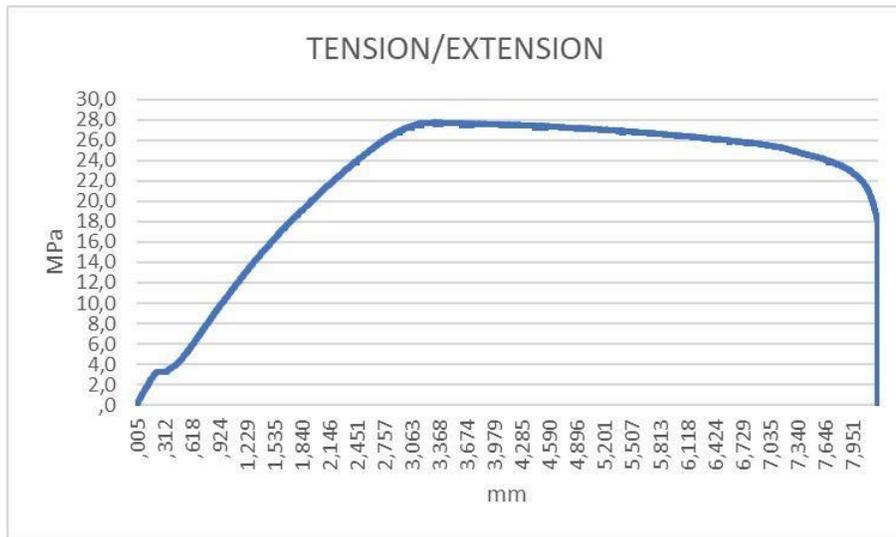


Figura 24. Gráfica de tensión de probeta con mayor resistencia

4.2.3 Ensayo de compresión

El ensayo de compresión realizado se obtuvieron las variables de tiempo, desplazamiento de cruceta y resistencia; donde la resistencia máxima fue de 27 MPa y fue soportada por la probeta con dirección de fibra horizontal y tipo de impresión en zigzag en un tiempo de 319 segundos y con un desplazamiento de cruceta de 6,369 mm. En la Figura 25 se pueden observar las resistencias obtenidas de los ensayos a flexión de las 12 probetas impresas en PLA. También en la Figura 27, se muestra la gráfica obtenida del comportamiento de la probeta horizontal zigzag 2 que fue la que obtuvo mayor resistencia en este ensayo y en la Figura 26 se observa la probeta fallada.

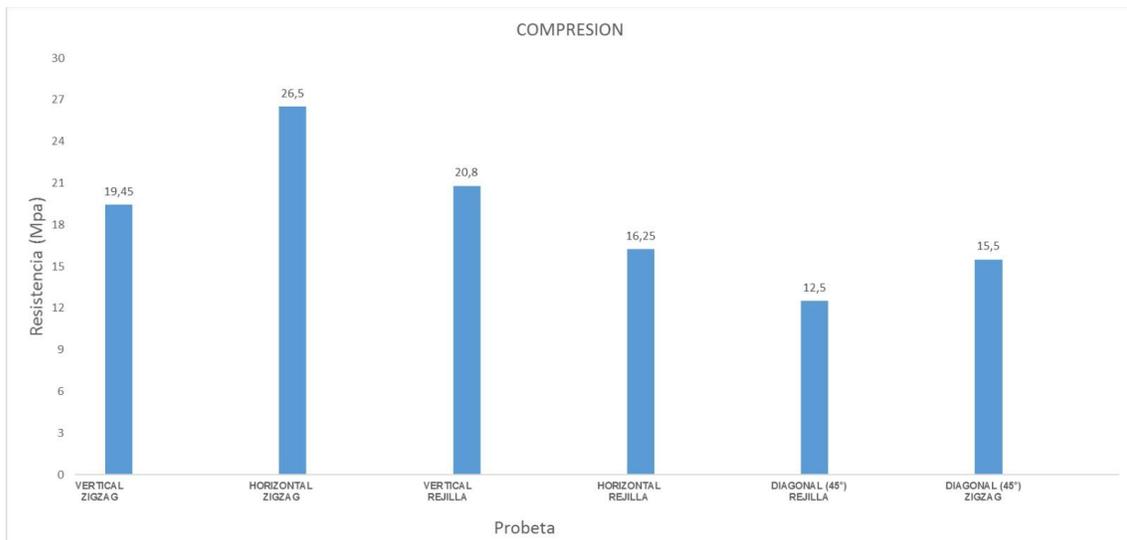


Figura 25. Resistencias de probetas a compresión

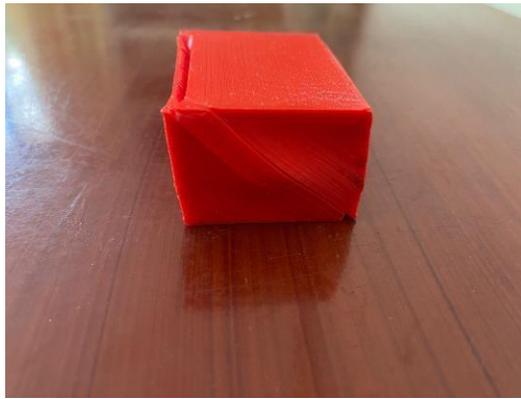


Figura 5. Probeta de compresión fallada

La probeta que se imprimió en horizontal (0°) zigzag 2 una resistencia de 27 MPa, la probeta con menor resistencia fue la que se imprimió en diagonal (45°) rejilla con una resistencia máxima de 14 MPa. La probeta impresa en horizontal (0°) zigzag tuvo un 56,29 % de mayor resistencia en comparación con la que se imprimió en diagonal (45°) rejilla.

De acuerdo con esta información obtenida se puede determinar que para productos de embalaje, juguetes o prototipos donde las piezas o elementos estén sometidas a esfuerzos de compresión recomendable utilizar la configuración horizontal en zigzag.

Si se compara este resultado con el ensayo de tensión, la probeta que presentó la mayor resistencia fue aquella impresa horizontalmente en un patrón de zigzag. Esto se debe a que la dirección de las fibras estaba alineada con la dirección de aplicación de la carga, independientemente de si se trataba de tensión o compresión. Por lo tanto, se puede inferir que esta configuración de impresión es ideal para los ensayos de tracción (tensión-compresión).

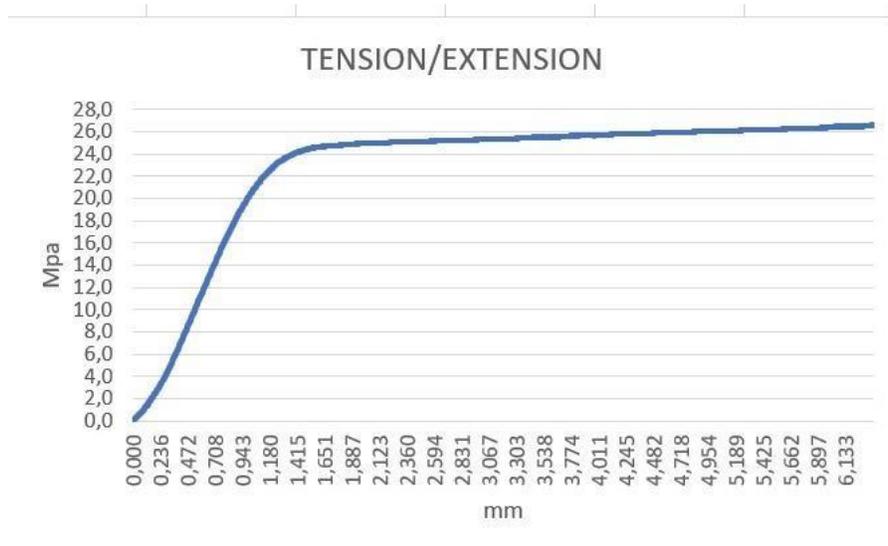


Figura 27. Gráfica de compresión de probeta con mayor resistencia

4.3 Etapa 3: Determinación de las mejores condiciones de los parámetros de impresión

De acuerdo con los resultados obtenidos de flexión se determinó que las mejores combinaciones que tuvieron mayor resistencia fueron las que se imprimieron en diagonal (45°) zigzag obteniendo una resistencia máxima de 68 MPa; en el caso del ensayo de tensión conforme en la dirección y forma de impresión fueron en horizontal (0°) zigzag con una resistencia máxima de 28 MPa y finalmente para los ensayos de compresión la mejor combinación de impresión fue horizontal (0°) zigzag con una resistencia máxima de 27 MPa. Además, se pudo evidenciar que para los ensayos a flexión, tensión y compresión impresos en zigzag tuvo mejores resistencias que los que se imprimieron en rejilla. (Ver tabla 8. Resultados de resistencia máxima).

Ensayo	Orientación Fibra	Tipo de impresión	Resistencia
Flexión	Diagonal (45°)	Zigzag	68 MPa
Tensión	Horizontal	Zigzag	28 MPa
Compresión	Horizontal	Zigzag	27 MPa

Tabla 8. Resultados de resistencia máxima

Los resultados obtenidos en el ensayo a flexión se deben a que, al imprimir una probeta en orientación diagonal, esta orientación puede promover una distribución más uniforme de las capas y minimizar la propagación de fisuras o debilidades en la estructura, lo que resulta en una mayor resistencia a la flexión. Adicionalmente, los elementos de la forma en zigzag actúan como vigas que ayudan a distribuir la carga de flexión y evitan la concentración de tensiones en puntos específicos. La malla en zigzag ayuda a distribuir las tensiones a lo largo de la probeta de manera más uniforme. La presencia de la forma de impresión zigzag permite que las capas de filamento queden mejor distribuidas y más compactas que las formas en rejilla que queda con algunos espacios sin rellenar lo que mejora la resistencia a la flexión y reduce la probabilidad de fractura.

En cuanto al ensayo a tensión, esta configuración aprovecha las propiedades de resistencia a la tracción del PLA, ya que las fibras horizontales son más efectivas para resistir fuerzas de tracción en comparación con fibras dispuestas en otras orientaciones debido a que la fuerza aplicada va en la misma dirección, por lo tanto, puede soportar esfuerzos mayores. El patrón de impresión zigzag proporciona un efecto de refuerzo adicional a la probeta. Al imprimir en zigzag, se generan capas con una mayor unión entre las mismas, lo que aumenta la cohesión y resistencia de la estructura. Esto ayuda a distribuir mejor la carga y evitar la propagación de fisuras o fallas. Adicionalmente, el PLA tiene propiedades anisotrópicas, lo que significa que sus propiedades mecánicas pueden variar según la dirección. Al imprimir la probeta con fibras horizontales, se aprovecha esta anisotropía y se maximiza la resistencia a la tensión en la dirección de las fibras.

Al igual que los casos anteriores, en el ensayo a compresión al imprimirse la probeta con una orientación horizontal, la carga de compresión se distribuye de manera más uniforme a través de las capas de PLA. Esto permite que las capas se apoyen unas sobre otras y compartan la carga, lo que aumenta la resistencia global a la compresión. Por su parte, el tipo de impresión en zigzag proporciona un refuerzo adicional a la probeta. Los elementos de la forma de impresión en zigzag actúan como vigas que ayudan a dispersar la carga de compresión y evitan la deformación excesiva o la fractura de la probeta. Por otro lado, cuando se imprime la probeta en orientación horizontal, se logra una mayor área de contacto entre las capas del PLA. Esto mejora la adhesión y la cohesión estructural entre las capas, lo que resulta en una mayor resistencia a la compresión proporcionando soporte y evita la propagación de grietas o fracturas en la probeta.

Esta información es de gran relevancia, ya que permite obtener un mayor beneficio de la resistencia de las piezas impresas en PLA al considerar la orientación de las fibras y el tipo de impresión. De esta manera, es posible aprovechar al máximo las propiedades mecánicas del PLA en elementos como engranajes, prototipos, maquetas, juguetes, utensilios, accesorios, herramientas y componentes estructurales ligeros, elementos decorativos y cualquier otro objeto en el que se requiera utilizar este material y que requieran una resistencia moderada.

5 CONCLUSIONES

Las impresiones 3D son la tecnología del futuro por su gran impacto en la manufactura, gracias a ella se puede crear piezas complejas que son simuladas mediante softwares. En comparación con otras tecnologías de manufactura reduce los residuos y tiene menor costo de producción. Por otra parte, el PLA es un material plástico muy comúnmente utilizado en las impresiones 3D. Es un material con diferentes variedades de acabados superficiales, no es un material frágil y fácil de usar en impresiones. Este material tiene alta compatibilidad con otros polímeros y una de las mejores propiedades es la resistencia a altas temperaturas. Es un material que se encuentra en diferentes gamas de colores y acabados, además de ser un material biodegradable y que no genera olor al imprimir.

Los parámetros de impresión tienen un impacto en la resistencia mecánica de las piezas impresas en PLA. Por lo tanto, es recomendable tenerlos en cuenta al utilizar esta tecnología para imprimir piezas, con el fin de garantizar una mayor resistencia frente a las cargas a las que puedan estar expuestas. En este estudio particular, se varió la forma de impresión y la dirección de las fibras, obteniendo resultados que demostraron una mayor resistencia en las probetas cuando la carga se aplicaba en la misma dirección de las fibras, independientemente de la forma de impresión utilizada. Esto indica que, sin importar el tipo o la estructura de impresión, siempre se obtendrá la máxima resistencia cuando la dirección de las fibras coincide con la dirección de la carga.

Por otro lado, se encontró que la forma de impresión afecta la resistencia de las piezas impresas en 3D. Al comparar dos tipos de estructuras (zigzag y rejilla), se obtuvieron mejores resultados de resistencia con la impresión en zigzag en los tres tipos de ensayos evaluados (flexión, tensión y compresión). A pesar de que la impresión en rejilla presentaba una mayor cohesión entre las capas al superponerse, la impresión en zigzag demostró una mayor resistencia debido a una adhesión más compacta entre las capas. Esto permitió que la capa inferior conservara suficiente temperatura para favorecer dicha adhesión.

Además, se concluyó que no hubo una variación significativa en los ensayos de flexión entre los dos tipos de impresión, con una diferencia de solo el 5% en resistencia máxima (68 MPa) en comparación con la configuración de impresión en la misma probeta (64.5 MPa). Esto se debe a que, al aplicar la carga en los ensayos de flexión, ambos tipos de impresión tienden a comportarse de manera similar al llenar los espacios generados por la forma de impresión. Sin embargo, en los ensayos de tensión y compresión, la diferencia de resistencia entre los dos tipos de impresión fue aproximadamente del 44%.

6 RECOMENDACIONES

- Las mallas de impresión son de gran relevancia a la hora de realizar impresiones 3D porque se evidencio que afectan en las propiedades del PLA, es recomendable seguir variando la forma de las mallas para evaluar sus propiedades mecánicas y analizar su comportamiento por lo que se sugiere utilizar dos formas de malla como la triangular y trihexagonal para futuras investigaciones manteniendo la orientación de fibra fija (estas siempre en la misma dirección de la carga).
- La temperatura de transición vítrea es un parámetro importante que se debe tener en cuenta al imprimir una pieza mediante la tecnología 3D para evitar el rápido enfriamiento de las capas inferiores con respecto a las capas superiores lo que produce que las capas inferiores tiendan a contraerse mas que las capas superiores, por esta razón se sugiere determinar la temperatura de la cama ideal que este muy cerca de su temperatura de transición vítrea dependiendo el filamento que se desea utilizar para que las contracciones sean de forma mas uniforme entre las capas inferiores y superiores.
- Un polímero podría ser tratado como un material compuesto mediante el uso de multicapas para mejorar sus propiedades mecánicas con diferentes capas de polímeros que sean complementarias, una sugerencia es que se podría realizar una capa con alta resistencia a la tracción para mejorar la resistencia mecánica y la otra capa complementaria que se podría incorporar es una con diferentes coeficientes de expansión para mejorar la estabilidad dimensional del material a distintas temperaturas.

7 BIBLIOGRAFÍA

Ebert LC, Thali MJ, Ross S. Getting in touch—3D printing in forensic imaging. *Forensic Sci Int.* (2011): e1-e6.

Y. Tao, Q. Yin, P. Li. An additive manufacturing method using large-scale wood inspired by laminated object manufacturing and plywood technology *Polymers*, 13 (1) (2021), p. 144

A. Jandyal, I. Chaturvedi, I. Wazir, A. Raina, M.I.U. Haq. 3D printing--A review of processes, materials and applications in industry 4.0 *Sustain. Oper. Comput.*, 3 (2022), pp. 33-42

B.A. Praveena, S. Vijay Kumar, H.N. Manjunath, B. Sachin, Shiv PratapSingh Yadav, B. Rakshith Lochan, G.L. Arun Kumar, J. Sudheer Reddy, (2020).

Investigation of moisture absorption and mechanical properties of natural fibre reinforced polymer hybrid composite *Mater. Today: Proc.*, volume 45, part 9 (2021), pp. 8219-8223

Shiv Pratap Singh Yadav, Vijay Kumar Shankar, L. Avinash, Abdulrajak Buradi, B. A. Praveena, Vikram Kedambi Vasu, N. Vinayaka, K. Dilip Kumar. Development of 3D printed electromyography controlled bionic arm, sustainable machining strategies for better performance. *Lecture Notes Mech. Eng.* Springer, (2021).

Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,» *Journal of Advance Research*, vol. 3, nº 1, pp. 81-90, (2011).

DIAS FWR "Comportamento mecânico do polímero PTFE sujeito a diferentes taxas de deformação". 1, (2011).

H.W. Kim, H. Bae, H.J. Park Reprint of: Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material *Journal of Food Engineering*, 220 (2018), pp. 28-37.