

**EFFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO Y LA
ORIENTACIÓN DE FIBRA EN LAS PROPIEDADES
MECÁNICAS DE UN COMPUESTO TERMOPLÁSTICO
REFORZADO CON FIBRA DE PLÁTANO OBTENIDO
MEDIANTE FABRICACIÓN POR FILAMENTO FUNDIDO
CON IMPREGNACIÓN *IN-SITU***



"VIGILADA MINEDUCACIÓN"

OSWALDO RIVERO ROMERO

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA
Montería, 2023**



Universidad de Córdoba
Facultad de ingenierías
Departamento de Ingeniería Mecánica
Maestría en Ingeniería Mecánica



**EFFECTO DE LA VARIACIÓN DEL CONTENIDO Y LA ORIENTACIÓN DE FIBRA EN
LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN COMPUESTO TERMOPLÁSTICO
REFORZADO CON FIBRA DE PLÁTANO OBTENIDO MEDIANTE FABRICACIÓN
POR FILAMENTO FUNDIDO CON IMPREGNACIÓN *IN-SITU***

OSWALDO RIVERO ROMERO

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA

Director:

JIMY UNFRIED SILGADO, PhD.

Codirector (a)

HENRY ALONSO COLORADO LOPERA, PhD.

Línea de Investigación:

Materiales y procesos de fabricación

Grupo de Investigación:

ICT-Grupo de investigación en ingeniería, ciencia y tecnología

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Montería, febrero, 2023



NOTA DE ACEPTACIÓN

JIMY UNFRIED SILGADO

Director

HENRY ALONSO COLORADO LOPERA

Codirector

LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUAN

Jurado 1

JAIME ALBERTO MESA COGOLLO

Jurado 2



A mi familia y especialmente a mi madre, Luz Dari Romero Villalba.

“Sapere Aude”

Horacio

*“Todos los triunfos nacen cuando
nos atrevemos a comenzar”*

Eugene Fitch Ware.

Agradecimientos

Quiero expresar mis sinceros agradecimientos al Ministerio de Ciencias, Tecnología e Innovación por la financiación de esta investigación a través de la Convocatoria 891-2020. Asimismo, un agradecimiento especial a la Universidad de Córdoba por permitir el uso de instalaciones y por el apoyo financiero previsto a partir del proyecto interno FI-06-19.

Un agradecimiento especial a mi director PhD. Jimmy Unfried Silgado, por sus constante guía, conocimiento y confianza brindada durante todo este proyecto; a quien considero mi mayor mentor durante mi recorrido académico como investigador. Sus recomendaciones siempre me ayudaron a tomar decisiones oportunas, además, su calidez como persona siempre me motivó a confrontar las adversidades que surgieron durante este proceso. Muchas gracias por asumir con tanta responsabilidad la dirección de este trabajo de investigación.

A mi codirector PhD. Henry Alonso Colorado Lopera, por sus sugerencias y orientaciones que me permitieron enriquecer mi trabajo de investigación. Gracias a su disponibilidad y conocimiento, aprendí mucho sobre la temática de este proyecto, lo cual se ve reflejado en cada corrección y recomendación que permitió el desarrollo y escritura de este trabajo de investigación.

Al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) de Medellín, sede Fraternidad, por brindarme el espacio para realizar gran parte de los ensayos de caracterización física y mecánica. Un especial agradecimiento, al equipo de trabajo del laboratorio de polímeros adscritos al ITM, por cada una de sus asistencias en el desarrollo de estos ensayos, siendo de gran importancia en la ejecución de este proyecto.

A Julián Montoya y Juan de Dios Negrete, por proveer y brindar información sobre las fibras del pseudotallo del plátano utilizadas en este trabajo.

Al Ingeniero Luis Carlos Aycardi, por su disponibilidad para las asesorías en la manipulación y desarrollo del equipo de impresión 3D. Su conocimiento y orientación me permitió aprender mucho sobre este tipo de tecnología.



Agradecimiento especial al PhD. Luis Armando Espitia Sanjuan y al ingeniero Iván Jiménez Guerrero, por brindarme la confianza y el espacio en las instalaciones del laboratorio de materiales y procesos de la Universidad de Córdoba, para la realización de las actividades durante la ejecución de este trabajo.

A mis compañeros Diego Pico, Marco Osorio, Álvaro Díaz, María José Paternina, Ismael Barrera y Samir Machado, por su compañía y apoyo brindado durante todo este proceso. Asimismo, aquellas personas allegadas que de alguna u otra manera contribuyeron al desarrollo de este trabajo.

Por último, a mi familia, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado en cada uno de los proyectos que he decidido emprender. Sin su ayuda, este logro no hubiese sido posible. Un especial agradecimiento a mi madre Luz Dari Romero Villalba, por ser el motor de mis días y por enseñarme que, a pesar de las dificultades, ser perseverante es el camino para lograr mis metas. De igual forma a mi hermano Luis Eduardo Rivero Romero, por su guía, y por la manera especial en que siempre me ha apoyado como uno de mis más grandes ejemplo de vida.



Tabla de contenido

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. Capítulo I. Descripción del trabajo de investigación	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Estructura de la tesis	6
1.4. Revisión de literatura.....	7
1.4.1. Materiales compuestos	7
1.4.1.1. Matriz polimérica	8
1.4.1.2. Ácido Poliláctico (PLA).....	9
1.4.1.3. Fibras naturales como material de ingeniería	9
1.4.1.4. Fibras del pseudotallo del plátano	10
1.4.1.5. Influencia del contenido de refuerzo en materiales compuestos	11
1.4.1.6. Orientación de las fibras en compuesto	12
1.4.2. Fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica a partir de impresión 3D	13
1.4.2.1. Fabricación por Filamento Fundido (FFF)	14
1.4.2.2. Fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación <i>in-situ</i>	15
1.4.2.3. Parámetros del proceso de fabricación del filamento fundido con impregnación <i>in-situ</i>	16
1.5. Trabajos derivados.....	19
2. Capítulo II. Diseño experimental.....	22
2.1. Hipótesis	22
2.2. Universo.....	22



2.3.	Variables	23
2.4.	Recolección de datos	25
2.5.	Limitaciones y supuestos.....	27
 3. Capítulo III. Fabricación de compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra de plátano mediante FFF con impregnación <i>in-situ</i>28		
3.1.	Introducción.....	28
3.2.	Materiales y métodos.....	29
3.2.1.	Materiales	29
3.2.1.1.	Fibra del pseudotallo del plátano.....	29
3.2.1.2.	Análisis morfológico de las fibras.....	31
3.2.1.3.	Análisis Termogravimétrico de las fibras.....	32
3.2.1.4.	Matriz termoplástica	33
3.2.1.5.	Calorimetría diferencial de barrido para la matriz.....	34
3.2.2.	Elaboración del material compuesto	35
3.2.2.1.	Preparación del equipo de impresión 3D.....	35
3.2.2.2.	Pruebas preliminares para impresión <i>in situ</i>	36
3.2.2.3.	Realización del Código G para el control de la pieza de impresión.....	37
3.2.2.4.	Fabricación del material compuesto	39
3.2.2.5.	Determinación del contenido de fibra	40
3.2.2.6.	Caracterización del material compuesto.....	40
3.2.2.7.	Defectos microestructurales y parámetros de impresión	41
3.3.	Resultados.....	45
3.3.1.	Caracterización morfológica de la fibra	45
3.3.2.	Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	47
3.3.3.	Deposición del material termoplástico impregnado con fibra de plátano	51
3.3.4.	Evaluación del contenido de fibra respecto la orientación	55
3.3.5.	Propiedades mecánicas.....	57
3.3.6.	Defectos microestructurales	59
3.3.6.1.	Resultados experimentales	59
3.3.6.2.	Efecto de parámetros del proceso en la excentricidad de la fibra.....	60
3.3.6.3.	Efecto de parámetros del proceso en el nivel de porosidad.....	61
3.3.6.4.	Formación de poros en el material compuesto	64

3.4. Conclusiones.....	66
4. Capítulo IV. Propiedades mecánicas de compuestos termoplásticos reforzado con fibra de plátano fabricado por FFF	68
4.1. Introducción.....	68
4.2. Materiales y métodos.....	69
4.2.1. Materiales	69
4.2.1.1. Caracterización del material de refuerzo	70
4.2.2. Fabricación de las muestras para ensayos mecánicos	71
4.2.3. Caracterización mecánica del material compuesto.....	73
4.3. Resultados.....	75
4.3.1. Caracterización del material de refuerzo	75
4.3.2. Propiedades mecánicas del material compuesto.....	79
4.3.2.1. Resistencia a tensión.....	79
4.3.2.2. Resistencia a flexión.....	83
4.4. Conclusiones.....	86
5. Capítulo V. Influencia de la variación del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas de compuesto termoplástico reforzado con fibra de plátano	88
5.1. Introducción.....	88
5.2. Materiales y métodos.....	88
5.2.1. Diseño experimental.....	88
5.3. Resultados.....	89
5.3.1. Resultados experimentales	89
5.3.2. Efecto del contenido y la orientación sobre la resistencia a tensión.....	90
5.3.3. Efecto del contenido y la orientación sobre la resistencia a flexión.....	94
5.4. Conclusiones.....	96
6. Conclusiones Generales y futuros trabajos	98
6.1. Objetivo específico I.....	98



6.2.	Objetivo específico II	99
6.3.	Objetivo específico III	99
6.4.	Futuros trabajos	100
7.	Anexos.....	101
7.1.	Impresión con fibra a partir de equipo FFF	101
7.1.1.	Junta de PLA en fibras del pseudotallo del plátano.....	101
7.1.2.	Adición de trayectorias en el código G para ingresar fibras.....	102
7.2.	Método de análisis de imágenes para determinar el nivel de porosidad	102
8.	Bibliografía.....	105

Lista de tablas

Tabla 1: Propiedades mecánicas y físicas relevantes para el ácido Poliláctico (PLA).....	9
Tabla 2: Composición química de fibras del pseudotallo del plátano.	11
Tabla 3: Propiedades mecánicas y físicas relevantes para las fibras del plátano.	11
Tabla 4: Variabilidad de las propiedades mecánicas a partir de datos obtenidos del estado de arte.....	24
Tabla 5: Tabla de riesgo para estimación del número de réplicas del experimento.	24
Tabla 6: Niveles de para los factores contenidos de fibra y orientación de fibra.	25
Tabla 7: Matriz de ejecución experimental.	25
Tabla 8: Codificación de las probetas para ensayos de Tensión y Flexión.	26
Tabla 9: Aleatorización del experimento.	26
Tabla 10: Composición química y propiedades mecánicas de la fibra del pseudotallo del plátano.....	31
Tabla 11: Propiedades del filamento de PLA proporcionadas por eSUN Filament.	34
Tabla 12: Parámetros de impresión de altura de capa (h), ancho de trama (w) y velocidad de impresión (v_i) recomendados en la literatura.	36
Tabla 13: Parámetros de impresión utilizados para la fabricación de probetas estándares con una unidad de fibra de plátano impregnada.	40
Tabla 14: Parámetros de entrada y niveles experimentales.....	42
Tabla 15: Matriz de diseño experimental para defectos microestructurales.....	43
Tabla 16: Calidad de impresión del material termoplástico impregnado con fibra de plátano bajo el proceso FFF con impregnación <i>in-situ</i>	51
Tabla 17: Cálculo de la relación E/L mediante la altura de capa y ancho de trama.	54
Tabla 18: Configuración experimental para ensayos mecánicos.....	56
Tabla 19: Resultados obtenidos para las diferentes corridas experimentales.....	60
Tabla 20: ANOVA para la excentricidad.	60
Tabla 21: ANOVA para el nivel de porosidad.	62
Tabla 22: Parámetros de impresión utilizados para pruebas definitivas.	72
Tabla 23: Propiedades mecánicas para las dos configuraciones de refuerzo.	78



Tabla 24: propiedades de tensión de las muestras fabricadas.	79
Tabla 25: Propiedades de flexión de las muestras fabricadas.	83
Tabla 26: Factores principales y niveles correspondientes.	88
Tabla 27: Matriz de diseño experimental.	89
Tabla 28: Resultados de las variables de respuesta.	90
Tabla 29: ANOVA para la resistencia a tensión.	90
Tabla 30: ANOVA para resistencia a tensión modificado.	92
Tabla 31: ANOVA para la resistencia a flexión.	94

Lista de figuras

Figura 1: Clasificación general de los materiales compuestos.	7
Figura 2: Orientación de fibra y ángulo de orientación.	12
Figura 3: Pasos para la realización del proceso de impresión 3D.	13
Figura 4: Representación esquemática de un equipo para el proceso de impresión 3D por fabricación de filamento fundido FFF.	14
Figura 5: Esquema representativo para el mecanismo de impresión 3D por FFF con impregnación <i>in-situ</i>	16
Figura 6: Muestra de material compuesto obtenido mediante FFF con impregnación <i>in-situ</i>	16
Figura 7: (a) Esquema general de disposición de altura de capa y ancho de trama y (b) generación de vacío en entre capas de material impreso.	18
Figura 8: Diseño de experimentos propuesto para este trabajo.	23
Figura 9: (a) Planta de plátano utilizada en esta investigación, (b) Calcetas del pseudotallo del plátano y (c) Fibras extraídas.	30
Figura 10: (a) Curva de secado para fibras del pseudotallo del plátano tratadas a 40°C y (b) Horno de secado BPG-9070A utilizado para el tratamiento de secado.	31
Figura 11: (a) Microscopio estereoscópico Motic®, (b) Microscopio electrónico de barrido (SEM) y (c) Equipo de pulverización catódica (Sputtering).	32
Figura 12: Equipo para análisis termogravimétrico.	33
Figura 13: Filamento de impresión 3D marca eSUN Filament de 1,75 mm como matriz termoplástica.	33
Figura 14: Equipo para análisis de calorimetría diferencial de barrido.	34
Figura 15: (a) Equipo de impresión 3D con tecnología FFF y (b) Cabezal de impresión para el mecanismo de impregnación <i>in-situ</i>	35
Figura 16: (a) Esquema representativo de los términos empleados en la Tabla 6, (b) Trayectoria de impresión e (c) Impresión de muestra para pruebas preliminares.	37
Figura 17: Flujo de sugerido para la realización del código G para FFF con impregnación <i>in-situ</i>	38
Figura 18: (a) Probetas fabricadas con matriz termoplástica impregnadas con fibra de plátano y (b) Código G visualizado en Repetier Host.	39
Figura 19: (a) Microscopio estereoscópico Leica® y (b) Máquina universal de ensayos Shimadzu®.	41
Figura 20: Muestra para estudio de defectos microestructurales.	43
Figura 21: Análisis de imágenes para la determinación del nivel de porosidad: (a) Imagen editada, (b) Imagen binaria y (c) Analyze Particles por ImageJ.	44

Figura 22: Proceso de determinación de la excentricidad de la fibra en la matriz de PLA: (a) Esquema para términos en la ecuación (3) y (b) Medición de W_s y W_i	45
Figura 23: Imagen SEM de la fibra de plátano de la sección (a) Longitudinal y (b) Transversal.....	46
Figura 24: Distribución de diámetro de fibra.	47
Figura 25: Curvas TGA y DTG de las fibras de plátano obtenidas mediante análisis termogravimétrico.	48
Figura 26: Curva DSC para ácido Poliláctico obtenida por análisis de calorimetría diferencial de barrido.	50
Figura 27: Defectos de impresión de las muestras fabricadas a 200 mm/min, altura de capa de 1 mm y ancho de trama de (a) 1 mm, (b) 1,6 mm; (c) 2,4 mm y (d) 2,8 mm.	53
Figura 28: Defectos de impresión de las muestras fabricadas a 300 mm/min, altura de capa de 1 mm y ancho de trama de (a) 1,6 mm y (b) 2,4 mm.....	53
Figura 29: Estado del cordón de deposición para diferentes condiciones de velocidad de impresión (V_i) y velocidad de extrusión (V_e).	55
Figura 30: (a) Contenido de fibras vs orientación y (b) Sección transversal de muestras con 3 capas de material impregnado para una orientación de 0, 45 y 90°.	56
Figura 31: Comparación entre las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido para los diferentes tratamientos a (a) tensión y (b) flexión.	58
Figura 32: Imágenes SEM de la superficie de fractura para probeta a tensión con orientación: (a) 0° con aumento de 100x y (b) 90° con aumento de 30x.	59
Figura 33: (a) Gráfica de probabilidad normal y (b) gráfica de residuales para la excentricidad.	61
Figura 34: Gráfica de probabilidad normal y (b) gráfica de residuales para el nivel de porosidad.....	62
Figura 35: (a) Gráficos de efectos principales y (b) gráfica de contorno para la superficie de respuesta estimada para el nivel de porosidad.....	64
Figura 36: (a) Esquema representativo para la formación de porosidad durante el proceso de FFF con impregnación in situ y (b) Proceso de mojabilidad de una sola fibra en la matriz termoplástica.....	65
Figura 37: Evolución de la porosidad alrededor de la fibra para los tratamientos experimentales: (a) 200 mm/min - 205 °C, (b) 250 mm/min - 200 °C y (c) 300 mm/min - 195 °C.	65
Figura 38: (a) Condiciones de las fibras de plátano como material de refuerzo y (b) Mecanismo de enrollado.	70
Figura 39: Montaje realizado para las pruebas de tensión de las fibras FP4 enrolladas.	71
Figura 40: Probetas de tensión Tipo IV bajo norma estándar ASTM D638 para (a) Matriz/0°, (b) FP1/0°, (c) FP4/0°, (d) Matriz/45°, (e) FP1/45° y (f) FP4/45°.	73

Figura 41: Probeta de flexión bajo norma estándar ASTM D790 para (a) Matriz/0°, (b) FP1/0°, (c) FP4/0°, (d) Matriz/45°, (e) FP1/45° y (f) FP4/45°	73
Figura 42: Montaje de probetas para ensayos de (a) de tensión bajo norma ASTM D638 y (b) de flexión bajo normas ASTM D790.....	74
Figura 43: Imagen SEM de las fibras FP4 enrolladas (a) sección longitudinal aumentada a 30x, (b) y (c) imágenes SEM aumentadas a 100x.	76
Figura 44: Distribución de frecuencia para el diámetro de las fibras FP4 enrolladas.	77
Figura 45: Curva de esfuerzo vs deformación de los materiales de refuerzos utilizados.....	78
Figura 46: Esfuerzo y módulo de elasticidad a tensión para material compuesto y material base.....	81
Figura 47: imágenes de SEM de la superficie de fractura a tensión para las muestras de compuesto con tratamientos: (a) FP1/ [0°], (b) FP4/ [0°], (c) FP1/ [45°] y FP4/ [45°], con aumento de 100x.....	83
Figura 48: Esfuerzo y módulo a flexión para material compuesto y material base.....	85
Figura 49: imágenes de SEM de la superficie de fractura a flexión para las muestras de compuesto con tratamientos: (a) FP1/ [0°], (b) FP4/ [0°], (c) FP1/ [45°] y FP4/ [45°], con aumento de 100x.....	86
Figura 50: (a) Gráfica de interacciones, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos para la resistencia a tensión.....	91
Figura 51: (a) Gráfica de interacciones, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos para la resistencia a tensión modificados.	93
Figura 52: (a) Diagrama de Pareto estandarizado, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos, para la resistencia a flexión.	96

RESUMEN

Los residuos provenientes de cultivos agroindustriales han mostrado ser fuentes interesantes de materia prima potencial para la obtención de materiales compuestos novedosos, ya sea como refuerzos de fibra o de partículas, lo que puede facilitar la posibilidad de mejorar a nivel socioeconómico la cadena de valor agroindustrial. Por tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto que tiene la variación del contenido y la orientación de fibra en las propiedades mecánicas de un material compuesto de matriz polimérica y refuerzo de fibra del pseudotallo del plátano aplicando la técnica de impresión 3D por fabricación de filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*. Para ello, fueron evaluados parámetros de impresión para establecer una adecuada deposición del material compuesto, donde se encontró una la relación existente entre las velocidades de impresión y la velocidad de extrusión, minimizando así daños en la integridad física de la fibra, y generando volúmenes 3D de material termoplástico impregnado con fibra continua de plátano. Los resultados mostraron una tendencia a la disminución de la resistencia a tensión y flexión del material obtenido al variar el contenido y la orientación fibra, que respaldados con el análisis de varianza ANOVA mostraron un efecto significativo. Esto fue atribuido a las condiciones en la intercara entre los materiales, y a las características morfológicas del material de refuerzo utilizado.

Palabras claves: Fabricación de filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, fibras del pseudotallo del plátano, materiales compuestos, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

Agro-industrial crop residues have shown to be interesting sources of potential raw material for obtaining novel composites, either as fiber or particulate reinforcements, which can facilitate the possibility of improving the agro-industrial value chain at the socioeconomic level. Therefore, the objective of this work was to evaluate the effect of both fiber content and orientation on the mechanical properties of a polymer matrix composite reinforced with banana pseudostem, fabricated with the fused filament fabrication (FFF) 3D printing technique with *in-situ* fiber impregnation. For this purpose, printing parameters were evaluated to establish an adequate deposition of the composite material, where the relationship between printing and extrusion speeds was found to minimize damage to the physical integrity of the fiber, and thus generate 3D volumes of thermoplastic material impregnated with continuous banana fiber. The results showed a trend to decrease the tensile and flexural strength of the material with the fiber content and orientation. This was supported by the ANOVA analysis of variance, revealing a significant effect. This was attributed to the interface conditions between the materials, and the morphological characteristics of the reinforcement material used.

Keywords: Fused filament fabrication (FFF) with *in-situ* impregnation, banana pseudostem fibers, composite materials, mechanical properties

Capítulo I. Descripción del trabajo de investigación

1.1. Introducción

El departamento de Córdoba tiene un alto potencial agroindustrial, siendo capaz de competir a nivel nacional en la producción de productos y materiales agroindustriales, a partir del aprovechamiento de la gran biodiversidad de materia prima de origen vegetal que posee. En la gran variedad de productos del departamento, se destacan los cultivos tradicionales como el maíz, arroz, coco y plátano, este último con un área sembrada de hasta 29.152 hectáreas, aproximadamente (ICA, 2020). Los residuos de estos cultivos han mostrado ser fuentes interesantes de materia prima, para la elaboración de productos artesanales tradicionales, además, poseen un enorme potencial para su uso en la fabricación de materiales compuestos novedosos, ya sea como refuerzo de fibras o partículas dispersas en matriz polimérica.

El plátano es uno de los frutos más consumidos a nivel mundial, con una producción de 116 millones de toneladas entre los años 2016 al 2019 (FAO, 2021). En Colombia, desde el 2015 se ha mantenido una producción anual de 2,1 millones de toneladas, con un rendimiento de 18,70 toneladas por hectárea (López B., 2019). Pero, a diferencia de cultivos como el arroz o el coco, tiene un alto grado de generación de residuos, ya que un 85 % de su biomasa residual, entre el pseudotallo, hojas y raquis, es considerada no utilizable (Cifuentes S. & Cifuentes R., 2019). En consecuencia, estos residuos generan contaminación, ya que en muchos casos no son tratados de manera adecuada, siendo arrojados a ríos, quebradas y suelos, o simplemente siendo acumulados, modificando negativamente el equilibrio de ecosistemas acuáticos y terrestre, debido a su proceso de descomposición.

Una importante alternativa para hacer frente a esta problemática del manejo de residuos agroindustriales es la implementación de tecnologías existentes que permitan el uso de estos materiales. Es muy común encontrar en la bibliografía el desarrollo de nuevos materiales compuestos con propiedades excepcionales que no se pueden obtener con otros materiales de ingeniería básicos. Por tal motivo, este campo de estudio puede ser una alternativa adecuada para el aprovechamiento de ciertos residuos agroindustriales de los cultivos tradicionales como el

plátano, con el fin de producir compuestos de buena calidad utilizando material derivado (fibras naturales) como posible refuerzo en matriz polimérica, y que se pueden extraer de la biomasa residual (pseudotallo del plátano). En algunas investigaciones se ha encontrado que, la adición de fibras como la del mesocarpio del coco y fibras de cáñamo en matriz polimérica, han logrado aumentar las propiedades mecánicas de compuestos con matriz termoplástica, lo que se prevé como un gran potencial para el uso y aplicación a nivel industrial (Šafka, 2016) (Stoof, et al., 2017). Además, el uso de fibras naturales extraídas de residuos agroindustriales puede tener un alto impacto tanto a nivel social como económico, ya que muchas zonas donde se cultivan las materias primas son áreas con condiciones económicas precarias. Por lo tanto, la posibilidad de añadir una actividad adicional para la obtención de fibras naturales en la cadena de producción y que puedan ser utilizadas para la fabricación de materiales compuestos, puede generar beneficios económicos adicionales para las comunidades que trabajan en estos cultivos (Kotik, 2019). De igual forma, la utilización de estos residuos puede significar para las industrias agrícolas tecnificadas, una oportunidad para la reducción de la contaminación ambiental que se genera debido a la descomposición de estos.

Unos de los procesos que más está impactando a nivel mundial es la manufactura aditiva (AM), por ser una herramienta poderosa que permite la fabricación de cualquier pieza independiente a su complejidad, ya que su insumo es el 3D entregado por un software de modelado, siendo un proceso versátil, y su impacto ambiental es menor comparado a otros procesos de manufactura como el mecanizado (Tang, et al., 2016). En el campo de la investigación de materiales compuestos, la manufactura aditiva está tomando mucha importancia en el desarrollo de compuestos reforzados con fibras naturales (NFRCS, por sus siglas en inglés) debido a las ventajas de su procesamiento, como los bajos niveles de consumo energético, reducción en el transporte de la cadena de suministro y los bajos costos relativos de la materia prima (Ford & Despeisse, 2016). Entre las técnicas utilizadas se encuentra la fabricación por filamento fundido (FFF), donde los materiales compuestos fabricados son reforzados mediante fibras de naturaleza discontinuos o cortas, y fibras continuas, respectivamente. Para el primer caso, lo que se hace es fabricar un filamento reforzado con fibras cortas, que luego es impreso en una máquina de impresión 3D con tecnología FFF para la obtención de objetos tridimensionales (Stoof, et al., 2017). Por su parte, para el segundo caso, se utilizan diferentes métodos o mecanismos de impresión para producir compuestos reforzados

con fibras continuas impregnadas en matriz termoplástica mediante la tecnología FFF (Kabir, et al., 2020) (He, et al., 2021).

La fabricación por filamento fundido con impregnación *in-situ*, es una técnica que permite la obtención de materiales compuestos reforzado por fibras continuas (CFRCs, por sus siglas en inglés) mediante la impregnación del material de refuerzo en matriz termoplástica durante el proceso *in-situ*. Actualmente, el campo de estudio de este mecanismo de impresión normalmente se extiende a fibras de naturaleza sintéticas, como las fibras de vidrio y las fibras de carbono. Las ventajas de utilizar este proceso, es la obtención de materiales con muy buenas propiedades mecánicas debido a la buena alineación de las fibras continuas con respecto a la dirección de impresión durante la deposición del material, lo que permite una muy buena distribución de los esfuerzos. Algunos investigadores han concluido que, al aumentar la fracción de volumen de fibra, y para orientaciones de fibras preferenciales, las propiedades mecánicas de los materiales compuestos aumentan significativamente, inclusive llegando a duplicar los valores obtenidos para la matriz pura (Sardinha, et al., 2019). Para compuestos con fibras unidireccionales orientadas longitudinalmente, se ha visto un incremento en la resistencia a tensión, ya que es mucho más fácil soportar esfuerzos debido al aumento de la rigidez en esa dirección (Dong, et al., 2018) (Sardinha, et al., 2019). Curiosamente, en la literatura se ha considerado mayormente el caso de las fibras de refuerzo alineadas en la dirección de la carga.

Con relación a las fibras naturales, la utilización de esta técnica de impresión 3D sólo se ha llevado a cabo utilizando fibras de uso comercial, tales como las fibras de lino y yute, obteniendo muy buenas propiedades mecánicas con un volumen de refuerzo hasta de un 40%, lo que no es posible con la obtención de un filamento compuesto con refuerzo discontinuo (Kuschmitz, et al., 2021). Sin embargo, no se ha encontrado en la literatura disponible trabajos relacionados sobre la fabricación de compuestos utilizando como fases de refuerzo fibras naturales procedentes de residuos agroindustriales como las fibras del pseudotallo del plátano. Lo que no es sorprendente, debido a su menor resistencia en comparación a fibras sintéticas y su baja demanda a nivel industrial con relación a las fibras naturales comerciales. Por lo tanto, si se tienen en cuenta aspectos como la relación resistencia/peso, la biodegradabilidad y el impacto a nivel ambiental, tiene un gran potencial para producir piezas termoplásticas reforzadas con fibras continuas, con propiedades mecánicas mejoradas y que se pueden utilizar para ciertas aplicaciones de ingeniería.

Por tal motivo, la importancia de esta investigación está íntimamente relacionada en el uso potencial de la materia prima obtenida de residuos procedente de cultivos agroindustrial de la región como el plátano, para la fabricación de un nuevo compuesto a partir de un proceso tecnológico que no ha tenido una fuerte aplicabilidad para este tipo de materiales, y generar valor agregado en la creación de productos y aprovechamientos de estos materiales, que en el departamento de Córdoba es muy escasa o prácticamente nula.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la variación del contenido y orientación de fibras en las propiedades mecánicas de un compuesto termoplástico reforzado con fibras de plátano obtenido mediante la tecnología de fabricación de filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*. La elaboración del material compuesto estudiado se realizó mediante un nuevo cabezal de impresión para el proceso *in-situ* adaptado a una impresora 3D con tecnología de FFF de tipo cartesiana, estableciendo parámetros de impresión que permitieron reducir los defectos microestructurales del compuesto. Las características mecánicas fueron evaluadas mediante las normas estándares ASTM D638 para determinar la resistencia y el módulo de elasticidad a tensión, y la ASTM D790 para determinar la resistencia a flexión y módulo a flexión del material obtenido. Mediante un diseño de experimentos factorial se evaluó el efecto del contenido y orientación de fibra sobre las propiedades mecánicas finales del compuesto bajo una prueba estadística de análisis de varianza ANOVA con un nivel de confianza del 95%.

1.2. Objetivos

Con el fin de lograr el desarrollo de la presente tesis, se muestra a continuación el objetivo general y los objetivos específicos que lo permiten.

1.2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la variación del contenido y la orientación de fibra en las propiedades mecánicas de un compuesto termoplástico reforzado con fibras del pseudotallo del plátano obtenido mediante la técnica de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*.

1.2.2. Objetivos específicos

Objetivo específico I

Implementar la técnica de fabricación de filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ* para la fabricación de muestras de compuesto termoplástico con refuerzo de fibra del pseudotallo del plátano variando el contenido y la orientación de fibra.

Objetivo específico II

Determinar las propiedades mecánicas de tensión y flexión de las muestras del compuesto desarrollado y de matriz en estado puro.

Objetivo específico III

Determinar la influencia de la variación del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas finales del material compuesto obtenido.

1.3. Estructura de la tesis

En el **Capítulo II** se establecen los criterios de evaluación para el diseño estadístico experimental seguido en la investigación, con el propósito de evaluar la influencia de los factores principales como el contenido de fibra y la orientación del refuerzo, en las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido.

En el **Capítulo III** se establece la metodología seguida para la elaboración del material compuesto con matriz termoplástica y refuerzo de fibra de plátano, variando el contenido y orientación de fibra. De igual forma, se abarcan los resultados obtenidos para evaluar los parámetros de impresión que permitan establecer una adecuada deposición sin tener daños en la integridad física de la fibra.

En el **capítulo IV** se establece la metodología usada para determinar las propiedades a tensión y flexión del compuesto obtenido. De igual forma, se abarca los resultados obtenidos de las propiedades mecánicas determinadas mediante las normas estándares ASTM D638 y ASTM D790.

En el **capítulo V** se abarcan los resultados obtenidos mediante una prueba estadística de análisis de varianza ANOVA, con un nivel de confianza del 95%, para evaluar la influencia de la variación del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas del compuesto obtenido.

1.4. Revisión de literatura

1.4.1. Materiales compuestos

Los materiales compuestos son materiales de ingeniería de origen artificial provenientes de mezclas heterogéneas, que están constituidos por la combinación de dos o más materiales de ingeniería básicos (típicamente Metales, Polímeros y Cerámicos), lo que les proporciona propiedades mejoradas en comparación a los materiales que les conforman (Campbell, 2010). El objetivo principal en el desarrollo de estos materiales es alcanzar propiedades que no se pueden obtener con los materiales básicos de ingeniería de manera individual (Callister & Rethwisch, 2007). El campo de los materiales compuestos en los últimos años ha logrado tener un alto interés en las áreas de las ciencias de materiales e ingeniería, debido a su gran versatilidad, siendo posible la fabricación de materiales que cumplan las especificaciones de un diseño óptimo y flexible (Chawla, 2012).

Los materiales compuestos normalmente están conformados por una matriz, que es la fase continua del compuesto en donde se sitúan y unen las fases dispersas, denominadas fases de refuerzo, que normalmente son fibras, tejidos o partículas con una resistencia más alta que la matriz (Callister & Rethwisch, 2007). La matriz puede ser de tipo polimérica, metálica o cerámica, mientras que los refuerzos comúnmente son de tipo cerámico, debido a que estos materiales poseen mejores propiedades mecánicas, mayor estabilidad térmica y mayor rigidez (Campbell, 2010) (Chawla, 2012). En la Figura 1, se muestra un esquema de la clasificación más general de los materiales compuestos según el tipo de refuerzo utilizado.

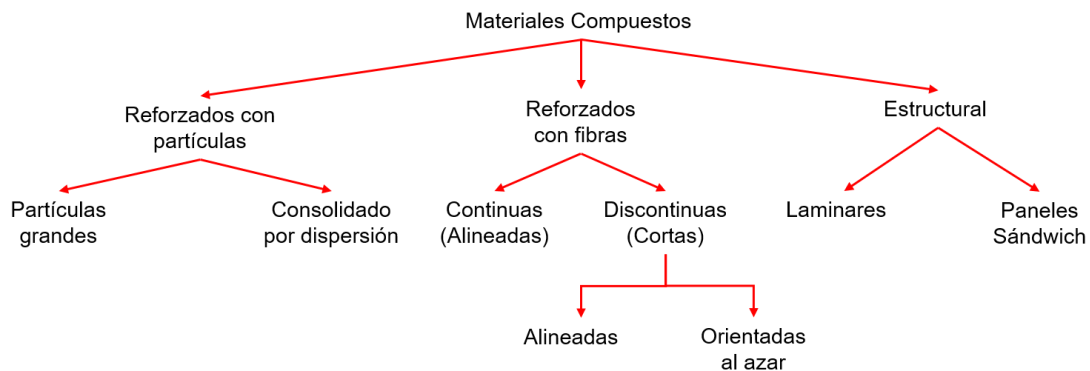


Figura 1: Clasificación general de los materiales compuestos.
Fuente: (Callister & Rethwisch, 2007).

En muchas aplicaciones los compuestos no son fabricados exclusivamente para tener la mejor resistencia mecánica, sino también para lograr otras propiedades, que dependiendo de la aplicación final pueden utilizarse como materiales con propiedades térmicas mejoradas (Ordoñez, et al., 2016) o como materiales en el campo de la construcción (Loaiza, et al., 2017). Además, una de las características más importantes de los materiales compuestos que es un atractivo en el campo de la ingeniería, es la relación resistencia-peso elevada que se puede obtener con la combinación de ciertos materiales y, asimismo, la posibilidad de fabricar productos a partir de materiales biodegradables (Quesada S., et al., 2005). Por lo que el estudio de materiales compuesto hecho con residuos agroindustriales particulados y con fibras naturales, como fase dispersa en matriz polimérica, ha tomado cierto interés en la actualidad (Morales, et al., 2021) (Llanes C., et al., 2019).

1.4.1.1. Matriz polimérica

En los materiales compuestos reforzados con fibras, la matriz las une, actuando como medio para que los esfuerzos aplicados al material se distribuyan en el refuerzo, por lo que una pequeña cantidad de las cargas aplicadas es soportada por la matriz (Callister & Rethwisch, 2007). De igual forma, la matriz protege las fibras individuales de daños superficiales como resultados de la abrasión mecánica o de las reacciones químicas con el entorno (Callister & Rethwisch, 2007). Los materiales poliméricos son utilizados como matrices de materiales compuestos debido a su baja densidad, fácil procesamiento y gran versatilidad para la obtención de formas complejas (Chawla, 2012). Los principales polímeros adoptados como matrices en materiales compuestos reforzados con fibras naturales (NFCs, por sus siglas en inglés) son de tipo termoestables, como las resinas de poliéster y las resinas epóxicas, y de tipo termoplásticas, como el polipropileno (PP) y el polietileno (PE) (Pickering, et al., 2016). Los termoplásticos son muy utilizados debido a la capacidad que tienen de fundirse y procesarse mediante la aplicación de calor, endurecerse mediante el enfriamiento, y por ser mucho más fáciles de reciclar; mientras que la mejor realización de las propiedades de las fibras se consigue generalmente con los termoestables (Pickering, et al., 2016) (Chawla, 2012).

1.4.1.2. Ácido Poliláctico (PLA)

Actualmente, se ha explorado la sustitución de matrices derivadas del petróleo por polímeros de origen biológico. Entre estos, podemos encontrar el Ácido Poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) como un destacado, debido a sus propiedades y porque ofrece mayor resistencia y rigidez con fibras naturales que el polipropileno (PP) (Pickering, et al., 2016). El PLA, es un polímero termoplástico biodegradable obtenido a través de polimerización del monómero LA (ácido láctico) derivado de fuentes naturales (Deshmukh, et al., 2017). El PLA industrial está compuesto principalmente, de poli (ácido L-láctico) y poli (ácido D-láctico), siendo el isómero L el componente principal (Sin, et al., 2013). Además, según sea el contenido de D-láctico o L-láctico, este polímero puede ser semicristalino o totalmente amorfo. Para usos tales como la impresión 3D por filamento fundido, el contenido de L-láctico y D-láctico es de 94,75% y 5,25% aproximadamente, (Kowalczyk, et al., 2011). En la Tabla 1, se muestran algunas propiedades del PLA de manera general.

Tabla 1: Propiedades mecánicas y físicas relevantes para el ácido Poliláctico (PLA).

Propiedad	Valor
Módulo de Young (GPa)	0,35-3,83
Resistencia a la tensión (MPa)	21-60
Elongación (%)	2,5-6
Densidad (kg/m ³)	1240
Temperatura de transición vítrea (°C)	55-60
Temperatura de Fusión (°C)	Aprox. 150

Fuentes: (Dicker, et al., 2014) (Sin, et al., 2013) (Cipriano, et al., 2014).

1.4.1.3. Fibras naturales como material de ingeniería

Los materiales compuestos fabricados con refuerzos de fibras naturales han sido muy poco estudiados en el área de la ingeniería en comparación a los materiales compuestos tradicionales fabricados con fibras sintéticas (Bourmaud, et al., 2018). Esto sucede, ya que, las fibras naturales presentan ciertas desventajas debido a la degradación de varias propiedades por efecto de la humedad, la temperatura y problemas en la intercara fibra-matriz (Kotik, 2019). Por lo que es notable que muchas de las investigaciones reportadas sobre uso de las fibras naturales hacen énfasis en el mejoramiento de estas características (Imoisili, et al., 2020). La utilización de estas fibras como refuerzos en materiales compuestos se justifica por los siguientes factores: (i) las fibras naturales son biodegradables, ya que provienen de fuentes renovables; (ii) pueden ser producidas

a muy bajo costo en comparación a sus contrapartes sintéticas; (iii) se pueden obtener a partir de residuos agroindustriales, lo que puede generar beneficios económicos adicionales para las comunidades que trabajan en los cultivos donde se extraen; (iv) las fibras poseen una alta relación resistencia/peso lo que las habilitan para múltiples de aplicaciones de ingeniería. Esto último es muy importante, ya que cuando se orientan la aplicación de las fibras naturales de manera adecuada, bajo el amplio espectro de propiedades y características tecnológicas para la fabricación de materiales compuestos, se pueden obtener resultados comparables con relación a compuestos con refuerzos de fibras sintéticas (Kotik, 2019).

1.4.1.4. Fibras del pseudotallo del plátano

El plátano (*musa paradisiaca*), es una planta herbácea que es cultivada en regiones cálidas y húmedas alrededor del mundo (Cifuentes S. & Cifuentes R., 2019). Su fruto es de alto consumo, especialmente en países de África, Latinoamérica y el Caribe, y en términos de valor económico, es el cuarto cultivo agrícola más importante a nivel mundial. Colombia ocupa el tercer lugar entre los países con mayor producción de plátano, después de Uganda y de Ghana (León A., et al., 2015). El plátano es un cultivo con una alta generación de residuos, que en su mayoría son hojas, pseudotallo y restos del fruto de la planta, siendo considerados como contaminantes debido a su proceso de descomposición (Cifuentes S. & Cifuentes R., 2019). Las hojas y el pseudotallo del plátano contiene un nivel importante de material lignocelulósico, mientras que el resto del fruto es rico en micronutrientes. Por otra parte, las fibras vegetales extraídas del pseudotallo del plátano son comparables con fibras como el yute, sisal o coco (Kalia, 2018), por su porcentaje significativo de Celulosa, biopolímero que tienen un alto potencial de ser utilizados para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica. En la Tabla 2, se muestra la composición química de las fibras de plátano extraídas del pseudotallo, con relación al porcentaje de constituyentes lignocelulósicos.

Tabla 2: Composición química de fibras del pseudotallo del plátano.

Componentes	Porcentaje (%)
Celulosa	49,33
Hemicelulosa	12,04
Lignina	13,88
Extractos	5,23
Contenido de ceniza	4,95
Contenido de humedad	12,43

Fuente: (Subagyo & Chafidz, 2018).

Las fibras del plátano presentan características físicas, químicas y mecánicas que la convierten en una fibra natural de alta calidad. Con relación a las características mecánicas, se ha reportado en la literatura que las fibras del pseudotallo del plátano poseen muy buena resistencia a la tracción y rigidez, lo que las convierten en un material de refuerzo prometedor (Subagyo & Chafidz, 2018). Si se compara con materiales tradicionales como las fibras de vidrio, estas presentan muy buenas propiedades mecánicas específicas gracias a su baja densidad (Bhatnagar, et al., 2015). En la producción de materiales compuestos, se ha utilizado las fibras de plátano en una matriz de resina de poliéster como fase de refuerzo, logrando aumentar la resistencia mecánica del compuesto con relación a la resina pura (Rodríguez S., 2014). Por tanto, su posible uso como refuerzo de materiales compuestos es considerable, siendo un posible sustituyente de los refuerzos no biodegradables como las fibras de vidrio o fibras petroquímicas. En la Tabla 3, se muestran las propiedades mecánicas y físicas para las fibras del plátano.

Tabla 3: Propiedades mecánicas y físicas relevantes para las fibras del plátano.

Propiedad	Valor
Módulo de Young (GPa)	$26,86 \pm 11,84$
Resistencia a la tensión (MPa)	620 ± 38
Elongación (%)	2*
Densidad (kg/m^3)	1350
Absorción de agua (%)	9,8-12

Nota: *alrededor de 2% de elongación.

Fuentes: (Xu, et al., 2015) (Cadena, et al., 2017) (Subagyo & Chafidz, 2018).

1.4.1.5. Influencia del contenido de refuerzo en materiales compuestos

En los materiales compuestos, uno de los parámetros más importante es la fracción en volumen de refuerzo, que se refiere a la cantidad de fase dispersa que contiene el material compuesto en la

matriz. La fracción de volumen de refuerzo influye en las propiedades mecánicas de los compuestos, ya que se mejoran al aumentar el contenido de este (Callister & Rethwisch, 2007). Sin embargo, la fracción máxima de volumen de fibra es de aproximadamente un 80%; para un valor mayor las fibras no quedarán totalmente rodeadas por la matriz, lo que producirá que la transferencia de las cargas no se realice con mayor eficiencia (Stupenengo, 2011). En materiales compuestos con refuerzo de fibras naturales se ha reportado una fracción de volumen de hasta un 60%, con un aumento significativo de las propiedades mecánicas (Le Duigou, et al., 2020).

1.4.1.6. Orientación de las fibras en compuesto

La orientación, se refiere a la forma en la que se disponen las fibras individuales en el material compuesto, mediante un ángulo de orientación de fibra en el plano bidimensional, que define la posición relativa de las fibras individuales con respecto a la dirección de la máquina de fabricación, que normalmente se adopta como un sistema de coordenadas externo (Mao & Russell, 2015) (Figura 2). Los compuestos con refuerzo de fibras continuas suelen adoptar orientaciones de fibra preferenciales, mientras que los reforzados con fibras discontinuas suele tener orientaciones aleatorias (Campbell, 2010). Entre los refuerzos continuos, normalmente se tienen fibras unidireccionales, tejidos o bobinados helicoidales. Una de las ventajas de utilizar refuerzos de fibras continuas es la facilidad con la que permiten fabricar laminados a partir de capas individuales con orientaciones de fibras diferentes, para obtener propiedades de resistencia y rigidez deseadas en una dirección específica y con volumen de fracción de refuerzo alto (Campbell, 2010).

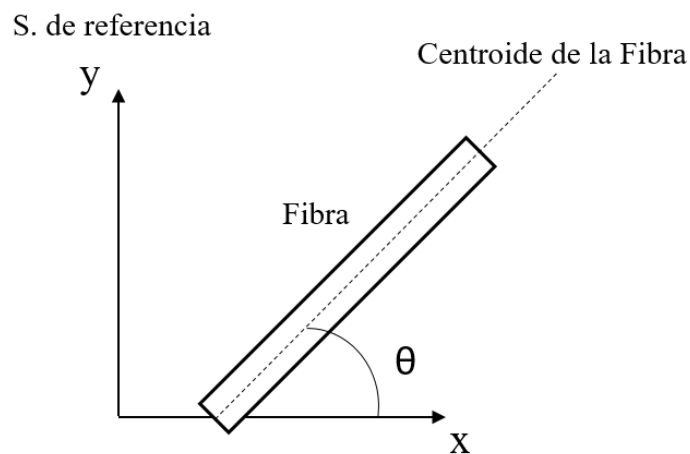


Figura 2: Orientación de fibra y ángulo de orientación.
Fuente: (Mao & Russell, 2015).

1.4.2. Fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica a partir de impresión 3D

La impresión 3D es un proceso de manufactura aditiva (MA) de prototipado rápido (RP), que permite la creación de objetos 3D mediante la deposición de material, normalmente por capas (ASTM F2792, 2015) (Wang, et al., 2017). Se comienza con la creación del modelo 3D mediante un software CAD (Computer-Aided Design) para obtener una representación gráfica tridimensional. Luego, a partir de un archivo de formato digital STL (Standard Triangle Language), derivado del software CAD, se prosigue con el diseño de capas por medio de un software Slicer 3D, conocido también como software de laminado o de corte 3D, convirtiendo el modelo en unas pilas de capas finas, las cuales proporcionan las instrucciones que orientan la creación de este mediante la impresora 3D. El archivo que se obtiene a partir de laminado es un código G (G-code, en su traducción al inglés) con comandos numéricos de programación CNC (control numérico por computadora) que contiene la programación como un listado de instrucciones sencillas que la impresora debe seguir para imprimir correctamente la pieza. Por último, se realiza el proceso de impresión, obteniendo la pieza final como una estructura física tridimensional ((Kabir, et al., 2020) (Wang, et al., 2017). En la Figura 3, se presentan los pasos que sigue el proceso de impresión 3D.

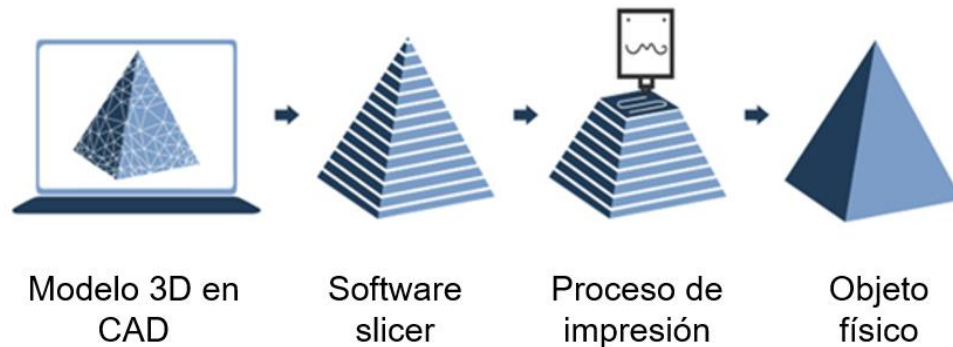


Figura 3: Pasos para la realización del proceso de impresión 3D.
Fuente: (Ferreira & Ramos, 2020).

Los materiales poliméricos, han permitido la fabricación de productos con geometrías complejas a partir de procesos de MA debido a su flexibilidad de procesamiento; pero la falta de resistencia mecánica y funcionabilidad es un gran reto para poder expandir su utilidad a nivel industrial. Por tal motivo, en los últimos años se ha enfocado en el desarrollo de compuestos de matriz polimérica

reforzados, con el propósito de obtener materiales con muy buenas propiedades, y que a su vez puedan ser obtenidos mediante las técnicas de impresión 3D disponibles.

1.4.2.1. Fabricación por Filamento Fundido (FFF)

La Fabricación por filamento fundido (FFF), también conocida como modelado por deposición fundida (FDM), es una de las tecnologías que se emplean en los procesos MA para la fabricación de objetos 3D (Parandoush & Lin, 2017). Mediante el FFF, la impresión se consigue a partir de la deposición controlada de material fundido por capas, predefinida en base a los parámetros establecidos en el equipo (Brenken, et al., 2017). En este caso, la boquilla de extrusión sigue una trayectoria X-Y, lo que permite la impresión de una capa completa, incluso con patrones de geometrías complejas y la plataforma de impresión se mueve en la dirección Z, permitiendo la deposición de la siguiente capa (Chennakesava & Shivraj N., 2014). En la Figura 4, se muestra una representación esquemática de un equipo FFF.

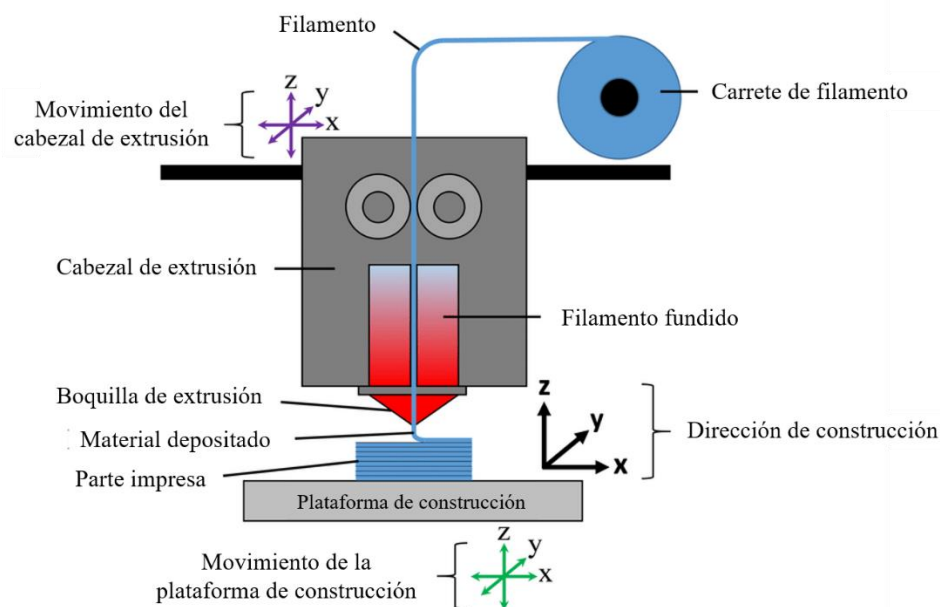


Figura 4: Representación esquemática de un equipo para el proceso de impresión 3D por fabricación de filamento fundido FFF.

Fuente: (Gordelier, et al., 2019).

Por lo general, el material base que se emplea en el proceso FFF, es un filamento continuo de material termoplástico, con bajas temperatura de fusión. Entre los materiales más usados se pueden encontrar el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), el Ácido Poliláctico (PLA), el Nylon y el Polieteretercetona (PEEK) (León B., et al., 2020). Sin embargo, realizar piezas o productos para

aplicaciones de la ingeniería con solo base polimérica puede resultar un problema, debido a las bajas resistencias mecánicas que alcanzan estos materiales, restringiendo la utilidad de esta tecnología a nivel industrial (Dickson, et al., 2020). De esta forma, para aumentar el rendimiento de estos materiales se utilizan refuerzos de fibras, para producir materiales compuestos con mejores propiedades mecánicas (Wang, et al., 2017). Las fibras de refuerzo pueden ser discontinuas (cortas) o continuas, dependiendo del tipo de método a utilizar en el FFF. Las fibras discontinuas normalmente se utilizan para reforzar el filamento de impresión, mientras que las fibras continuas se pueden impregnar en un preproceso para la formación del filamento de impresión reforzado o de manera *in-situ* durante la impresión 3D (Krajangsawasdi, et al., 2021). En la literatura se ha reportado que los materiales compuestos con fibras continuas fabricados por FFF poseen mejores cualidades de resistencia y rigidez en comparación a los compuestos con fibras discontinuas (Le Duigou, et al., 2020).

1.4.2.2. Fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*

La fabricación por filamento fundido con impregnación *in-situ*, es un método o mecanismo de impresión 3D que recientemente se está utilizando para la fabricación de materiales compuestos con fibras de refuerzo continuas a partir de la tecnología FFF. En éste, la impregnación del refuerzo en la matriz se realiza en el propio cabezal de impresión, por lo que, las fibras como el filamento termoplástico se suministran por separado. El filamento se funde dentro de la cámara de impresión, que se encuentra a cierta temperatura, y cuando la fibra de refuerzo pasa, se impregna en la matriz de polímero. Luego, el compuesto es extruido a través de la boquilla y se deposita en la plataforma de impresión donde se solidifica (Wickramasinghe, et al., 2020). Para poder realizar este proceso, se debe modificar el cabezal de impresión para que la entrada de ambos materiales ocurra al tiempo, y la extrusión y la deposición se genere simultáneamente (Prüß & Vietor, 2015). En la Figura 5, se muestra un esquema general del proceso FFF con impregnación *in-situ*.

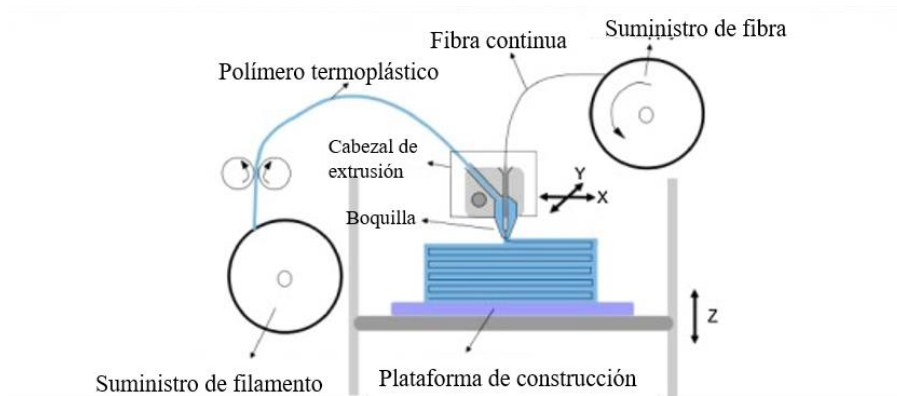


Figura 5: Esquema representativo para el mecanismo de impresión 3D por FFF con impregnación *in-situ*.
Fuente: (Kabir, et al., 2020).

Los materiales compuestos obtenidos mediante el proceso de fabricación por filamento fundido con impregnación *in-situ*, han presentado un comportamiento mucho más frágil, esto si se compara con la matriz sin refuerzo. En la Figura 6, se muestra un esquema de una muestra de material compuesto impreso por este proceso utilizando como refuerzo fibra de Yute. El material de refuerzo es recubierto por la matriz polimérico en el cabezal de impresión, luego es depositado en la plataforma de construcción de la impresora, según sea el patrón de impresión determinado, que posteriormente se solidifica generando una pieza totalmente sólida y rígida (Matsuzaki, et al., 2016).



Figura 6: Muestra de material compuesto obtenido mediante FFF con impregnación *in-situ*.
Fuente: (Matsuzaki, et al., 2016).

1.4.2.3. Parámetros del proceso de fabricación del filamento fundido con impregnación *in-situ*

Entre los parámetros del proceso que influyen en las propiedades de los materiales compuestos, se encuentran, la velocidad de extrusión (*extrusion rate*), la velocidad de impresión (*printing speed*), la temperatura de impresión, altura de capa (*layer thickness*), ancho de trama (*Raster Width*) y contenido de vacíos. En la Figura 7(a), se muestra un esquema general del proceso de impresión 3D por FFF para fibras continuas impregnadas. La velocidad de extrusión (V_e) y de impresión (V_i),

son parámetros importantes en el proceso de FFF con impregnación *in-situ*, ya que influyen en la calidad de la deposición del material compuesto fabricado (Kuschmitz, et al., 2021). La primera es la velocidad en la cual se alimenta el filamento de impresión hacia el bloque de calentamiento para ser fundido, mientras que, la segunda, es la velocidad en la cual se desplaza este mismo en las trayectorias X-Y y en la dirección Z, para realizar las deposiciones del material fundido (Krajangsawasdi, et al., 2021). Se debe garantizar una adecuada sincronización entre V_e y V_i , para evitar problemas de discontinuidades en las fibras impregnadas en el material polimérico, debido a la fuerza de fricción ejercida por la boquilla que genera daños en la integridad física de la misma. De igual forma, se debe controlar la velocidad de impresión para prevenir defectos por desprendimientos entre el refuerzo y la matriz termoplástica fundida, producto de la fuerza arrastre del cabezal de extrusión (Krajangsawasdi, et al., 2021). Asimismo, la temperatura en la boquilla juega un papel importante, ya que tiene un efecto significativo en las propiedades del material impreso. Si no se establece una temperatura adecuada, se puede degradar la fibra durante el proceso, lo que puede generar una disminución en las propiedades mecánicas del material obtenido (Akhoundi, et al., 2020). La altura de capa y el ancho de trama también son parámetros para considerar en el proceso de impresión 3D por FFF con fibra continuas, ya que permiten establecer la cantidad de deposiciones realizadas en la extrusión y, asimismo, controlar el contenido de refuerzo en el material impreso obtenido (Akhoundi, et al., 2020). Dado que la impresión se hace mediante filas consecutivas de cordones de material depositado por la boquilla, los materiales obtenidos presentarán vacíos o “air-gap” en su estructura, tal como se muestra en la Figura 7 (b). Para la disminución de estos vacíos, normalmente se hace control en el ancho de trama y altura de capa, disminuyendo los espacios entre cordones, logrando incluso porcentajes de alrededor del 3,2% (Le Duigou, et al., 2019). Por otro lado, el tiempo que demora el equipo al realizar la impresión también está sujeto a estos parámetros, ya que si se aumenta el número de capas depositadas a velocidades de impresión bajas, se pueden obtener tiempos de fabricación excesivamente grandes, los cuales pueden afectar la operatividad de los equipos e incluso comprometerlos, por tanto, se recomienda una adecuada selección de ellos antes de realizar el proceso de impresión (Tapia V. & Restrepo D., 2019).

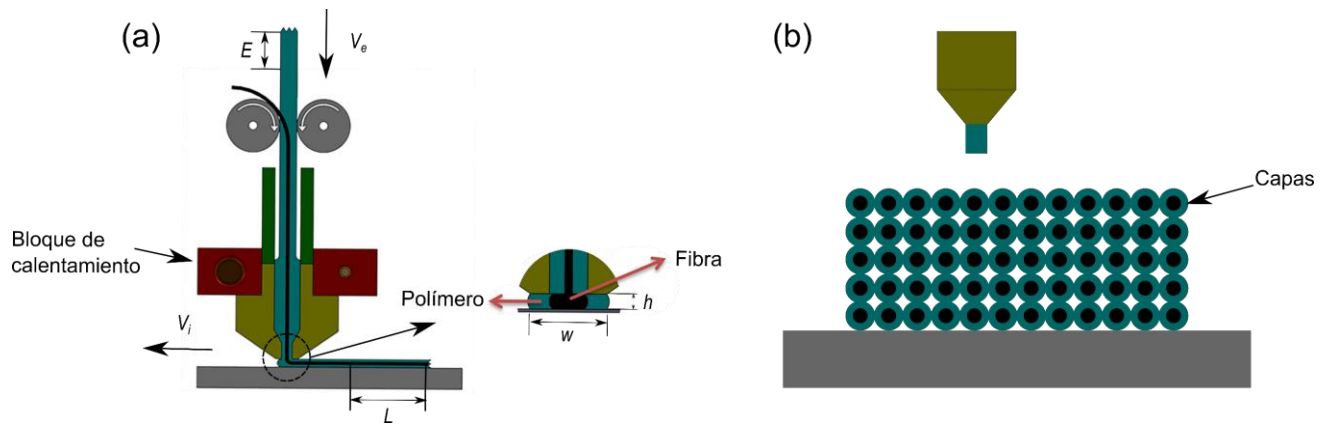


Figura 7: (a) Esquema general de disposición de altura de capa y ancho de trama y (b) generación de vacío en entre capas de material impreso.

Nota: E , representa la longitud de filamento extruido y L , la longitud de la deposición.

Fuente: (Akhoundi, et al., 2020), (Akhoundi, et al., 2019).

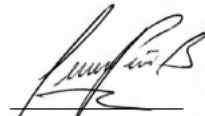
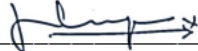


1.5. Trabajos derivados

A continuación, se relacionan los trabajos derivados de esta investigación.

RESULTADO/ PRODUCTO DERIVADO	INDICADOR	EVIDENCIA												
Patente	Comprobante de radicación por la superintendencia de Industria y Comercio.	   BANDEJA DE ENTRADA > NC2022/0012087 - Patente de Invención Nacional - DISPOSITIVO DE CABEZAL DE IMPRESIÓN 3D PARA EQUIPO FDM CON IMPREGNACIÓN IN-SITU DE FIBRA CONTINUA Y FILAMENTO CON RELACIÓN DE EXTRUSIÓN 3-1 Salir Datos de la solicitud <table><tr><td>Referencia del solicitante</td><td>1493-P</td><td>Fecha de radicación</td><td>24 ago. 2022</td></tr><tr><td>Número de patente</td><td>NC2022/0012087</td><td></td><td></td></tr><tr><td>Estado</td><td>Bajo Verificación de Requisitos Mínimos</td><td></td><td></td></tr></table>	Referencia del solicitante	1493-P	Fecha de radicación	24 ago. 2022	Número de patente	NC2022/0012087			Estado	Bajo Verificación de Requisitos Mínimos		
Referencia del solicitante	1493-P	Fecha de radicación	24 ago. 2022											
Número de patente	NC2022/0012087													
Estado	Bajo Verificación de Requisitos Mínimos													



Divulgación oral en evento internacional.	Certificado de presentación en el congreso XI CIM 2022.	 “Materiales para la vida” El comité organizador del XI Congreso Internacional de Materiales XI CIM 2022 Certifica que el trabajo titulado: <i>Implementación del proceso FFF con impregnación in-situ para la obtención de termoplásticos reforzados con fibras del pseudotallo de plátano.</i> Fue presentado por: Oswaldo Rivero Romero, Henry Alonso Colorado Lopera, Jiny Unfried Silgado En la modalidad de Ponencia Oral Santa Marta Colombia, 26-28 octubre, 2022  Darío Yesid Peña Ballesteros Organizador, UIS  Félix Echeverría Echeverría Organizador, UdeA  Hugo Armando Estupiñán Durán Organizador, Director, UNAL
--	--	---



Artículo científico

Artículo publicado en la
revista International Journal
of Advanced
Manufacturing Technology
(JAMT).

The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10799-8>

ORIGINAL ARTICLE



Effects of printing parameters on fiber eccentricity and porosity level in a thermoplastic matrix composite reinforced with continuous banana fiber fabricated by FFF with in situ impregnation

Oswaldo Rivero-Romero¹ · Ismael Barrera-Fajardo¹ · Jimmy Unfried-Silgado¹

Received: 28 October 2022 / Accepted: 29 December 2022
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2023

Abstract

In this work, thermoplastic matrix materials composite reinforced with banana fiber continuous by FFF with in situ impregnation was studied. The printing speed and temperature sets combination were analyzed using a statistical central composite design (CCD) experiment, aiming to evaluate effects on microstructural defects formation, fiber eccentricity, and porosity level. Samples of microstructure were observed using optical and stereo microscopy, whereas the porosity level and fiber eccentricity were determined using image analysis. The results showed that experimental variables did not affect the fiber eccentricity on the matrix, while the printing speed affected the porosity level. When the printing speed increases from 180 to 321 mm/min, the porosity level decreases from 9.5 to 0.63%, respectively. This behavior is attributed to the wetting conditions of the fiber on the thermoplastic matrix.

Keywords FFF with in situ impregnation · Continuous banana fibers · Porosity level · Fiber eccentricity

1 Introduction

Fused filament fabrication (FFF) is a 3D printing technology widely used for prototypes and parts manufacturing [1]. Fabrication of parts by FFF present limitations when is used in functional components due to their low load-bearing capacity, especially with thermoplastic polymers matrix [2]. Recently, aiming to increase the mechanical performance of 3D parts printed by FFF has been implemented fabrication of continuous fiber reinforced composites (CFRCs) methodology [3, 4]. In FFF with in situ impregnation process, the continuous fiber and thermoplastic polymer are fed separately, and afterwards mixing in the printing head, so the impregnation occurs during the printing process [5]. Products

manufactured by this printing method have displayed good mechanical properties because the obtained fiber volume fraction reaching reinforcement levels higher even than composites fabricated by short fibers pre-impregnated filament [6]. Main advantage of this process is the possibility of impregnation of the fiber on the polymeric matrix during printing, allowing the control of fiber volume percentage through the variation of parameters process [7]. Additionally, it has been found that the optimization of parameters such as the printing temperature, layer height, and printing speed can improve the tensile and flexural strength of the CFRCs [8]. Although the results obtained with FFF in situ impregnation process are relevant, presence of microstructure defects limiting the final properties of the composites [9, 10]. One of the most important defects observed in CFRCs fabricated by FFF are the porosity, which are located on the interface producing a poor impregnation of the fiber on the matrix [11, 12]. These abovementioned defects could create points of stress concentration that normally are distributed on longitudinal direction, tending to generate failures when external loads are applied on composite material [9–13]. Another important problem is related to fiber eccentricity regarding to distribution of thermoplastic material around the fiber, which could limit the tensile performance producing misalignment of the fiber in the formability direction

✉ Oswaldo Rivero-Romero
oriverromero@correo.unicordoba.edu.co
Ismael Barrera-Fajardo
ibarrerafajardo@correo.unicordoba.edu.co
Jimmy Unfried-Silgado
jimyunfried@correo.unicordoba.edu.co

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo ICT,
Universidad de Córdoba, Carrera 6 No. 76-103,
230002 Montería, Colombia

Published online: 16 January 2023



Capítulo II. Diseño experimental

2.1. Hipótesis

A partir de la revisión bibliográfica se entiende que el contenido y la orientación de fibra obtenido a través del proceso de Fabricación por filamento fundido con impregnación *in-situ*, son los causantes en gran medida de la variación de las propiedades mecánicas del material compuesto, se plantea entonces, una hipótesis estadística para comprobar dicho supuesto. A partir de esto, se consideró como hipótesis nula (H_0) que el efecto de la variación del contenido de fibra y el cambio de la orientación de fibras, y la interacción de estos factores, no generan cambios en la media muestral de la resistencia a tensión y flexión del material compuesto termoplástico reforzado con fibra del pseudotallo de plátano, los cuales fueron fabricados por el proceso de impresión 3D. Como hipótesis alternativa se tiene que al menos una media muestral es diferente de cero.

Hipótesis nula:

$$H_0: \text{Efecto } A (\text{Contenido}) = 0$$

$$H_0: \text{Efecto } B (\text{Orientación}) = 0$$

$$H_0: \text{Efecto interacción } A \text{ y } B = 0$$

Hipótesis alternativa:

$$H_A: \text{Cualquier efecto} \neq 0$$

2.2. Universo

El tema central de la investigación está enfocado en el estudio de las propiedades mecánicas de un material compuesto con matriz polimérica y refuerzos de fibra naturales fabricado mediante el proceso de impresión 3D. Por tanto, el alcance de los resultados de este trabajo se extiende al conjunto de materiales compuestos fabricados a partir de la técnica de fabricación de filamento fundido con el método de impregnación *in-situ*, utilizando como fase de refuerzo fibras del pseudotallo del plátano de la variedad Hartón, de los cultivos procedentes del corregimiento del Retiro de los Indios del municipio de Cereté, y sólo para dos contenidos de fibras, y dos orientaciones de fibra.

2.3. Variables

Para este diseño experimental se cuenta con dos factores que son, el contenido de fibras (%) y la orientación de fibras ($^{\circ}$) para el material compuesto obtenido del proceso de manufactura. Para cada factor se establecieron 2 niveles de tratamientos. Se tomaron dos variables de salidas que son la resistencia a tensión (S_U) y la resistencia a flexión (S_f). Las variables fijas para este experimento fueron la velocidad de impresión, temperatura de la boquilla y el área de impresión del material obtenido, que se pueden controlar como parámetros establecidos en el proceso. Como variable no controlada se tiene el porcentaje de vacíos o poros del material impreso manufacturado. Por lo tanto, el diseño experimental que se estableció fue un diseño 2^2 con 4 configuraciones experimentales o tratamientos, en el cual se busca estudiar la influencia de los factores y sus interacciones sobre la variable respuesta, bajo una prueba estadística de análisis de varianza ANOVA con un nivel de significancia de 0,05, y se utilizó como variable de control y como comparativo las propiedades mecánicas de la matriz base sin refuerzo. En la Figura 8, se muestra el diseño experimental propuesto en esta investigación.

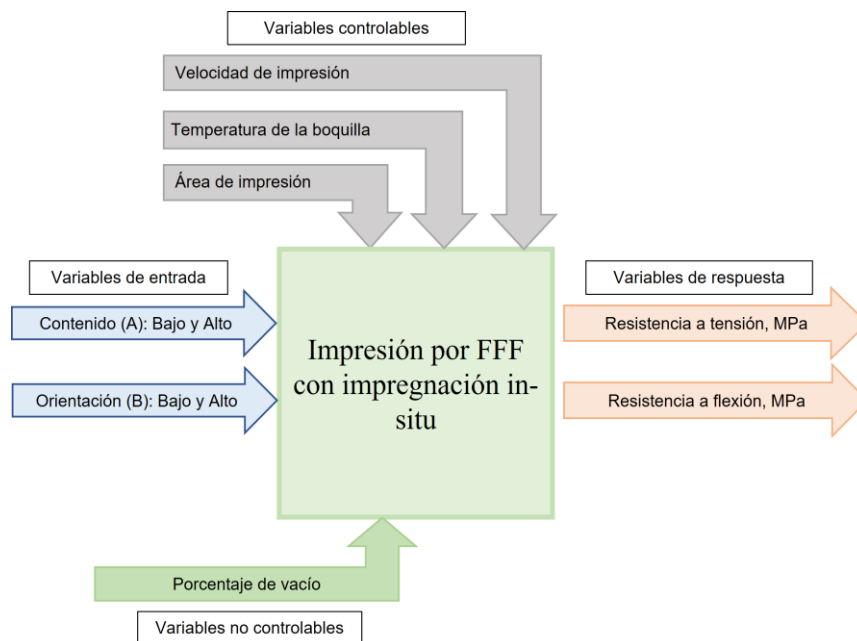


Figura 8: Diseño de experimentos propuesto para este trabajo.
Fuente: Autor.

La variabilidad natural, según datos obtenidos de otros investigadores, de las propiedades mecánicas de los materiales compuestos con refuerzo de fibra natural continuos obtenidos a partir

de FFF se resume en la Tabla 1 Tabla 4: Variabilidad de las propiedades mecánicas a partir de datos obtenidos del estado de arte.. En esta investigación se considerará una diferencia significativa (D) para la resistencia a tensión y flexión de 20 MPa, y para los módulos de tensión y flexión de 6 GPa.

Tabla 4: Variabilidad de las propiedades mecánicas a partir de datos obtenidos del estado de arte.

Propiedad Mecánica	Desviación estándar (σ)
Resistencia a tensión (MPa)	$\pm 6,0$
Módulo a tensión (GPa)	$\pm 2,0$
Resistencia a flexión (MPa)	$\pm 10,0$
Módulo a flexión (GPa)	$\pm 3,0$

Fuente: (Kuschmitz, et al., 2021), (Le Duigou, et al., 2019), (Matsuzaki, et al., 2016), (Zhang, et al., 2020).

Para determinar el tamaño de muestra (réplicas), se utilizó la ecuación (1).

$$\phi^2 = \frac{naD^2}{2b\sigma^2} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde a - define el número de niveles del factor contenido de fibra, b - el número de niveles del factor orientación de fibra y n es el número de réplica para cada tratamiento. De esta forma, se construyó la Tabla 5, para estimar el número de réplicas para el experimento.

Tabla 5: Tabla de riesgo para estimación del número de réplicas del experimento.

n	v_1	v_2	S_U		E		S_f		M	
			ϕ	β	ϕ	β	ϕ	β	ϕ	β
2	1	4	3,33	0,04	3	0,07	2	0,04	2	0,4
3	1	8	--	--	3,67	< 0,05	2,45	0,09	2,45	0,09
4	1	12	--	--	--	--	2,83	2%	2,83	0,02

Nota: β probabilidad de error tipo II.

Dado que para $n = 4$ réplicas se obtiene una probabilidad menor al 95% de rechazar la hipótesis nula para el módulo a flexión, siendo la variable más crítica en esta estimación, se propone usar este número para este proyecto, siempre que la desviación estándar no produzca ruido en el experimento. De esta forma, se trabajó con 4 réplicas experimentales para cada uno de los tratamientos, siendo un total de dieciséis muestras, tanto para pruebas de tensión como para pruebas de flexión, respectivamente. Se sumaron ocho muestras más sólo material base sin refuerzo y depositado por FFF, variando los dos niveles del factor B , es decir, cuatro muestras para una

orientación de baja y cuatro para una orientación de alta, para ambos ensayos, lo que dio un total de 48 pruebas mecánicas.

2.4. Recolección de datos

En la Tabla 6, se identifican los niveles de prueba para cada factor, y la notación que se estableció para la realización del experimento. Para el factor contenido de fibra se asigna la letra A y para el factor de orientación de fibra se asigna la letra B, tal como se muestra a continuación.

Tabla 6: Niveles de para los factores contenidos de fibra y orientación de fibra.

Factor	Niveles		Unidades
A: Contenido de fibra	Bajo	Alto	Porcentaje (%)
B: Orientación de fibra	Bajo	Alto	Grados (°)

Para la realización del diseño factorial 2^2 propuesto, los niveles de los factores estarán codificados arbitrariamente como “Bajo” y “Alto”. Por tanto, “Bajo” en A representa el nivel bajo de concentración, mientras que “Alto” representa el nivel alto de concentración, y “Bajo” en B denota la orientación 1 de la fibra, mientras que “Alto” denota la orientación 2. En la Tabla 7, se muestra la matriz de ejecución que se utilizará en el diseño experimental, para cada combinación de los niveles de los dos factores estudiados o tratamientos.

Tabla 7: Matriz de ejecución experimental.

Tratamientos	Factores	
	A	B
T1	Bajo	Alto
T2	Bajo	Bajo
T3	Alto	Alto
T4	Alto	Bajo

Dado que las mediciones de las variables de respuestas fueron realizadas a partir de ensayos mecánicos destructivos totalmente independientes (Tensión y Flexión), la matriz de ejecución se repitió para las dos variables de salida, es decir, tanto para la respuesta a la resistencia a tensión como a la resistencia a flexión. Por tanto, para la realización del experimento se estableció una codificación por niveles de tratamiento para cada probeta y por cada ensayo a realizar, tal como se muestra en la

Tabla 8.

Tabla 8: Codificación de las probetas para ensayos de Tensión y Flexión.

Tratamiento	Probeta	Asignación		Tratamiento	Probeta	Asignación	
		Tensión	Flexión			Tensión	Flexión
T1	1	LT1	LF1	T3	9	LT9	LF9
T1	2	LT2	LF2	T3	10	LT10	LF10
T1	3	LT3	LF3	T3	11	LT11	LF11
T1	4	LT4	LF4	T3	12	LT12	LF12
T2	5	LT5	LF5	T4	13	LT13	LF13
T2	6	LT6	LF6	T4	14	LT14	LF14
T2	7	LT7	LF7	T4	15	LT15	LF15
T2	8	LT8	LF8	T4	16	LT16	LF16

Nota: LT y LF asignación para probetas de tensión y flexión.

Para garantizar que el supuesto de independencia se cumpla, las corridas experimentales se realizarán de forma aleatoria en cada ensayo mecánico. Con ayuda del software Statgraphics® versión 19.1.2 se obtuvo el orden de corridas experimentales que se propuso para este proyecto. Cabe resaltar, que el orden de corridas para tensión y flexión se mantuvo iguales, dado que cada ensayo es independiente uno del otro. En la Tabla 9, se muestra el orden de corridas establecidas para el experimento, teniendo en cuenta la asignación de las probetas a ensayar. Además, la recolección de los datos se llevará a cabo mediante hojas de cálculo, para facilitar su posterior análisis.

Tabla 9: Aleatorización del experimento.

Corridas	Probetas		Corridas	Probetas	
	Tensión	Flexión		Tensión	Flexión
1	LT14	LF14	9	LT7	LF7
2	LT10	LF10	10	LT16	LF16
3	LT4	LF4	11	LT13	LF13
4	LT12	LF12	12	LT3	LF3
5	LT15	LF15	13	LT5	LF5
6	LF11	LF11	14	LT1	LF1
7	LT2	LF2	15	LT6	LF6
8	LT8	LF8	16	LT9	LF9

Nota: LT y LF asignación para probetas de tensión y flexión.



2.5. Limitaciones y supuestos

Esta investigación sólo tendrá como objetivo, evaluar efecto de la variación del contenido y la orientación de fibra en las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido por el proceso de impresión 3D, anteriormente mencionado, por lo que este estudio no abarca la evaluación del impacto socioeconómico del mismo en caso tal los resultados favorezcan a la hipótesis estadística alternativa que se propone. Además, se trabajó bajo el supuesto que, el cambio en el contenido y la orientación de fibra que se puedan obtener a través del proceso de Fabricación por filamento fundido con impregnación *in-situ*, afecta en gran medida la variación de las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido, ya que se tiene el respaldo de proyectos e investigaciones realizadas por otros investigadores donde se afirma esto (Kuschmitz, et al., 2021) (Terekhina, et al., 2021).

Capítulo III. Fabricación de compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra de plátano mediante FFF con impregnación *in-situ*

3.1. Introducción

La fabricación por filamento fundido (FFF), es una de las tecnologías de impresión 3D más ampliamente utilizada para la manufactura de prototipos y piezas (Parandoush, et al., 2017). Las piezas fabricadas por FFF presentan limitaciones para ser utilizados como componentes funcionales debido a su baja capacidad de carga, especialmente para los polímeros termoplásticos (Ferreira, et al., 2019). Por tanto, con el fin de mejorar la resistencia mecánica de las piezas impresas por FFF, en los últimos años se han implementado métodos para la fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras continuas (Safari, et al., 2022) (Kabir, et al., 2020). En el proceso FFF con impregnación *in-situ*, la fibra continua y el polímero termoplástico se suministran por separado, y la unión entre los materiales se genera dentro del cabezal de impresión, por lo que la impregnación ocurre directamente durante el proceso (Krajangsawasdi, et al., 2021).

Sin embargo, aunque los productos fabricados mediante este proceso han presentado buenas propiedades mecánicas, su aplicabilidad sigue siendo limitada por las dificultades que se hacen presente en la calidad de deposición de los materiales. Por lo tanto, en este capítulo se estudia las condiciones proceso en la implementación del mecanismo de FFF con impregnación *in-situ*, para la fabricación de piezas de compuesto termoplástico con refuerzo de fibra del pseudotallo del plátano. Mediante un estudio experimental se evaluó la influencia de parámetros de impresión en la calidad de la deposición del material, sin que se produzcan daños en la integridad física de la fibra. Además, se realizaron ensayos mecánicos para determinar las propiedades del compuesto al variar tanto el contenido de fibra como la orientación de la fibra, y se identificaron características microestructurales del material obtenido mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM).

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Materiales

3.2.1.1. Fibra del pseudotallo del plátano

En el presente trabajo, las fibras de plátano fueron proporcionadas por estudiantes del programa de ingeniería mecánica de la Universidad de Córdoba (proveedores), siendo extraídas del pseudotallo de una planta de la variedad Hartón, provenientes de cultivos en el municipio de Cereté, Córdoba (12 MSNM), en las coordenadas 8°51'33" N, 75°49'43" W. En la Figura 9(a), se muestra la planta de plátano seleccionada para la adquisición de la materia prima. El pseudotallo fue cortado cuando la planta tenía alrededor de 1 año de edad, siendo el tiempo estimado para la postcosecha, y una altura aproximada de 5 m. Para el proceso de extracción de la fibra, se cortó el pseudotallo de la planta a una medida de 1,5 m, y posteriormente, se retiraron las calcetas para su posterior tratamiento, tal como se muestra en la Figura 9(b). Finalmente, se implementó un método de extracción semi mecánico, simulando el proceso de decorticado manual, con una herramienta de peine con cerdas metálicas, logrando obtener unidades de fibras por la remoción de material vegetal. En la Figura 9(c), se muestran las fibras de plátano extraídas como materia prima. Para esta investigación se trabajó con un total de 170 g de fibras continuas del pseudotallo del plátano, con una longitud promedio de 0,7 m.



Figura 9: (a) Planta de plátano utilizada en esta investigación, (b) Calcetas del pseudotallo del plátano y (c) Fibras extraídas.

Fuente: Autor.

Posteriormente, las fibras fueron sometidas a un tratamiento de secado a temperatura controlada, con el propósito de disminuir su porcentaje de humedad. La selección de las condiciones del proceso de secado de la materia prima, fueron establecidas mediante los datos experimentales suministrados por los proveedores. En la Figura 10(a), se muestra la curva de secado estimada a una temperatura de 40°C para las fibras del pseudotallo del plátano de la variedad Hartón. Para esta investigación, se optó por un secado a una temperatura de 40°C con un tiempo de tratamiento de 3 horas y 30 minutos, condiciones suficientes para obtener fibras con un contenido de humedad aproximado del 14%. Este tratamiento se llevó a cabo en un horno de secado marca BPG-9070A, adscrito al laboratorio de ingeniería aplicada de la Universidad de Córdoba (Figura 10(b)). Después del tratamiento de secado, para prevenir la acumulación de humedad en las fibras debido a las condiciones ambientales, estas fueron empacadas en bolsas gofradas y almacenadas al vacío.

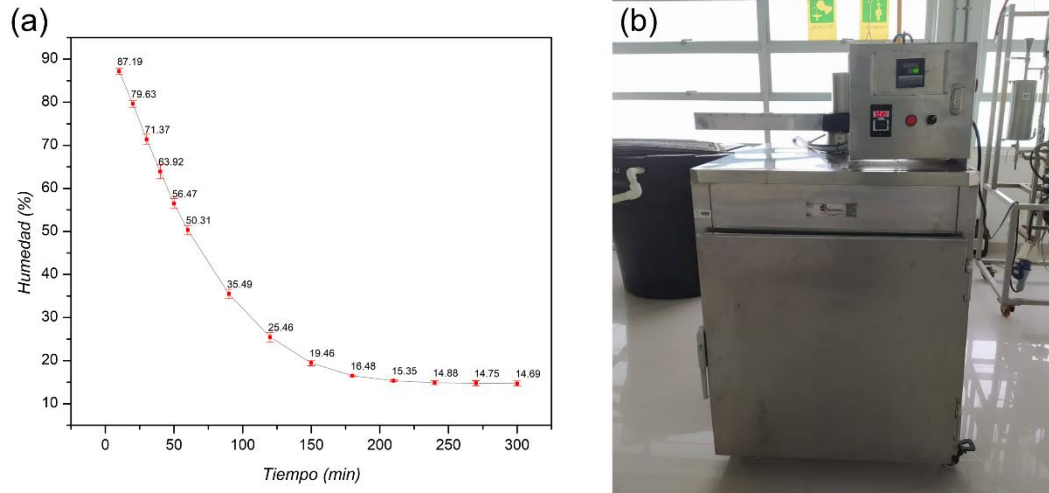


Figura 10: (a) Curva de secado para fibras del pseudotallo del plátano tratadas a 40°C y (b) Horno de secado BPG-9070A utilizado para el tratamiento de secado.
Fuente: (Montoya & Negrete., 2022).

En la Tabla 10, se muestran la composición química y las propiedades mecánicas de las fibras del pseudotallo del plátano suministradas por los proveedores.

Tabla 10: Composición química y propiedades mecánicas de la fibra del pseudotallo del plátano.

Composición química			
Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Otras sustancias (%)
41,17	11,51	13,61	33,71
Propiedades mecánicas			
Módulo de Young (GPa)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación (%)	
17,9 ± 15,1	247,5 ± 162,1	1,8 ± 0,3	

Fuente: (Montoya & Negrete., 2022).

3.2.1.2. Análisis morfológico de las fibras

Para el análisis morfológico de las fibras de plátano se implementaron técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido, para la medición del diámetro promedio y evaluar las características superficiales de las fibras de plátano secadas. La medición de los diámetros de las fibras se realizó mediante el software libre ImageJ®, a partir de imágenes de microscopía óptica de las superficies de las fibras obtenidas mediante un microscopio estereoscópico Motic modelo SMZ-171, dotado de una cámara digital marca OMAX® con resolución de 9 megapíxeles y software de adquisición de imagen OMAX® ToupView, adscrito al laboratorio de materiales y proceso de la Universidad de Córdoba. En la Figura 11(a), se muestra el microscopio óptico utilizado. Las características

topográficas de las fibras se evaluaron mediante un microscopio electrónico de barrido por emisión de campo (Field Emission Gun) FEG (Scanning Electron Microscope) SEM marca JEOL® modelo JSM-7100F, adscrito al Laboratorio de polímeros del Instituto Tecnológico metropolitano de la ciudad de Medellín (Figura 11(b)). La identificación topográfica de la superficie se realizó mediante un detector de electrones secundarios Bruker® a un voltaje de aceleración de 10 kV y una distancia de trabajo de 20 mm. Antes del análisis por SEM, las muestras se fijaron a un portamuestra de Latón mediante cinta de carbono conductora doble faz, y se le aplicó un recubrimiento de capa gruesa en cámara de vacío y atmósfera controlada de gas Argón, usando un ánodo de Oro (Au) durante un tiempo de 5 minutos, esto para garantizar la conductividad del material orgánico al ser sometido al haz de electrones. Para ello se utilizó un equipo de pulverización catódica (Sputtering) marca Quorum modelo Q300T D, como se muestra en la Figura 11(c).

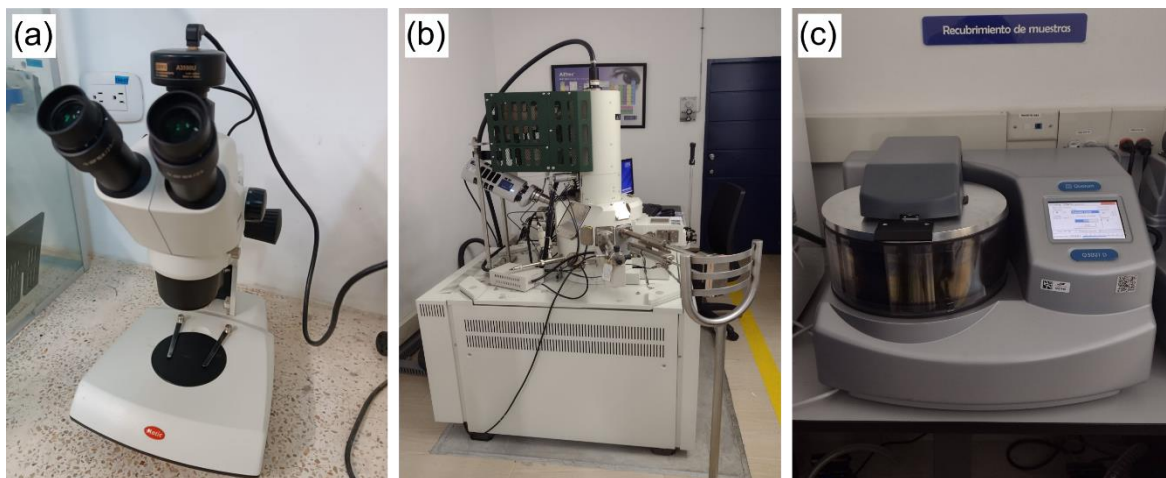


Figura 11: (a) Microscopio estereoscópico Motic®, (b) Microscopio electrónico de barrido (SEM) y (c) Equipo de pulverización catódica (Sputtering).

Fuente: Autor.

3.2.1.3. Análisis Termogravimétrico de las fibras

El análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) de las fibras de plátano se llevó a cabo mediante un analizador térmico T.A. Instruments® modelo TGA550, adscrito al laboratorio de polímero del Instituto Tecnológico metropolitano de la ciudad de Medellín. En la Figura 12, se muestra el equipo utilizado. Para el análisis TGA, 10 mg de muestra fueron ensayadas para condiciones de temperatura desde los 25°C hasta 940 °C, a una tasa de calentamiento de 15 °C/min y un flujo controlado de nitrógeno (N₂) de 100 ml/min. El análisis de los resultados se realizó

mediante el software TA universal analysis 2000 de T.A. instruments® para determinar los rangos de temperatura y las pérdidas en peso, a partir de la curva TGA.

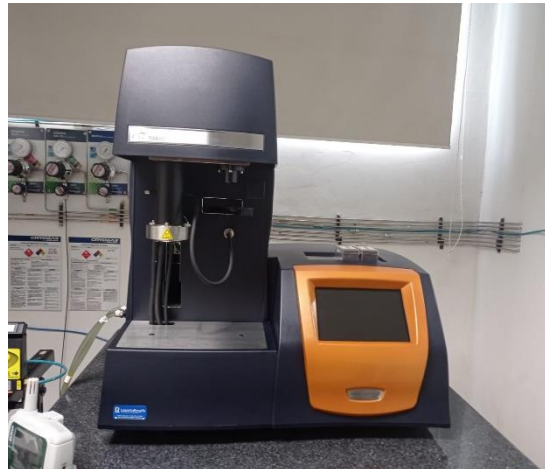


Figura 12: Equipo para análisis termogravimétrico.
Fuente: Autor.

3.2.1.4. Matriz termoplástica

En esta investigación, se usó como matriz termoplástica un filamento de impresión 3D de Ácido Poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés), con diámetro de $\varnothing 1,75$ mm comercial, de la marca eSUN® Filament, suministrado por la compañía ARROWTI3D. En la Figura 13, se muestra el filamento de PLA utilizado.



Figura 13: Filamento de impresión 3D marca eSUN Filament de 1,75 mm como matriz termoplástica.
Fuente: Autor.

En la Tabla 11, se muestran las propiedades generales del filamento de PLA, proporcionados por el fabricante.

Tabla 11: Propiedades del filamento de PLA proporcionadas por eSUN Filament.

Propiedades	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1,25
Resistencia a tensión	MPa	65
Porcentaje de elongación	%	8
Resistencia a flexión	MPa	97
Módulo a flexión	MPa	3600
Temperatura de impresión	°C	190-210
Temperatura de cama caliente	°C	60-80

Fuente: (Shenzhen Esun Industrial Co, 2021)

3.2.1.5. Calorimetría diferencial de barrido para la matriz

El análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) para la matriz termoplástica se llevó a cabo mediante un analizador térmico T.A. instruments® modelo SDT Q600, adscrito al laboratorio de polímero del Instituto Tecnológico metropolitano de la ciudad de Medellín. En la Figura 14, se muestra el equipo utilizado. Para el análisis DSC, 20 mg de muestra de ácido Poliláctico particulado fueron ensayadas a condiciones de temperatura desde los 25°C hasta 500 °C, a una tasa de calentamiento de 5 °C/min y un flujo controlado de nitrógeno (N₂) de 100 ml/min. El análisis de los resultados se realizó mediante el paquete de software TA universal analysis 2000 de T.A. instruments®, para determinar las temperaturas características del material termoplástico a partir de la curva de DSC.



Figura 14: Equipo para análisis de calorimetría diferencial de barrido.

Fuente: Autor.

3.2.2. Elaboración del material compuesto

3.2.2.1. Preparación del equipo de impresión 3D

Para la elaboración del material compuesto, se utilizó una máquina de impresión 3D de trabajo pesado, tipo cartesiana, con tecnología de Fabricación por filamento fundido (FFF), adscrita al laboratorio de materiales y proceso del programa de ingeniería mecánica de la Universidad de Córdoba. Este equipo cuenta con un volumen de impresión máximo de $220 \times 220 \times 210 \text{ mm}^3$ y con capacidad modular para cabezal de extrusión intercambiable. En la Figura 15(a), se muestra una imagen de la impresora utilizada en esta investigación. Con el propósito de efectuar el mecanismo de impregnación *in-situ* para la elaboración de compuestos con refuerzo de fibra continua, se fabricó un nuevo cabezal con dos entradas para el ingreso separado del filamento de impresión como matriz termoplástica, y la fibra como refuerzo, permitiendo la impregnación de dichos materiales en la zona de calentamiento, antes de la extrusión del material en la plataforma de construcción (Figura 15(b)). Este dispositivo se encuentra radicado como patente de invención nacional en la superintendencia de industria y comercio (SIC) bajo el número NC2022/0012087.

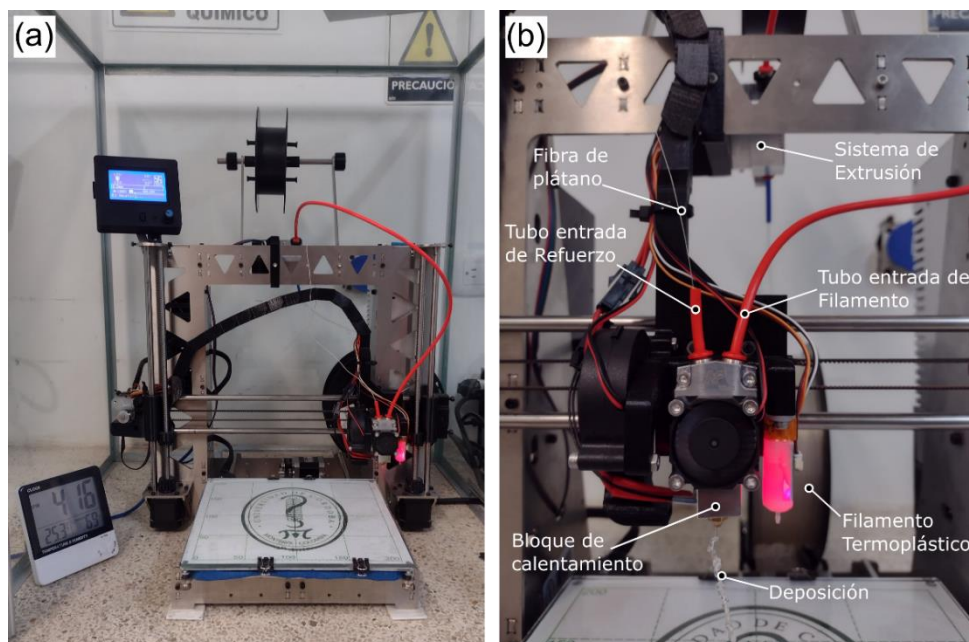


Figura 15: (a) Equipo de impresión 3D con tecnología FFF y (b) Cabezal de impresión para el mecanismo de impregnación *in-situ*.

Fuente: Autor.

3.2.2.2. Pruebas preliminares para impresión *in situ*

Inicialmente, para determinar los parámetros de impresión que favorecen una deposición del material termoplástico impregnado con refuerzo continuo, fue necesario realizar pruebas preliminares variando los parámetros de altura de capa (h), ancho de trama (w) y velocidad de impresión (v_i), con el propósito de determinar las condiciones de trabajo más óptimas que permitan una buena deposición del material, utilizando el nuevo cabezal impresión bajo el mecanismo de impregnación *in-situ*, sin que las fibras de plátano sufrieran daños en su integridad física. Para ello, se establecieron valores acordes a lo encontrado en la literatura disponible, tal como se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12: Parámetros de impresión de altura de capa (h), ancho de trama (w) y velocidad de impresión (v_i) recomendados en la literatura.

w (mm)		h (mm)		v_i (mm/min)	
Mín	Máx	Mín	Máx	Mín	Máx
d_N	d_L	d_f	d_N		
1	2,8	0,187	1	60	500

Nota: el diámetro promedio de la fibra de plátano fue determinado mediante microscopía óptica.

Fuente: ((Akhoundi, et al., 2020) (Ferreira, et al., 2019).

Donde los términos d_L y d_N - corresponde al diámetro exterior e interior de la boquilla de extrusión, respectivamente; mientras que d_f - corresponde al diámetro de la fibra continua de refuerzo. En la Figura 16(a), se muestra un esquema representativo de los términos empleados para la Tabla 12. Para la realización de las pruebas, se imprimieron muestras para una sola línea de impresión a lo largo del eje x , con una trayectoria de impresión diseñada utilizando un Código G como se muestra en la Figura 16(b). Parámetros como la temperatura de impresión y la temperatura de la plataforma de construcción se establecieron a partir de los valores recomendados por el fabricante del filamento de PLA (Tabla 11). En la Figura 16(c), se muestra el proceso de impresión realizado para las pruebas preliminares.

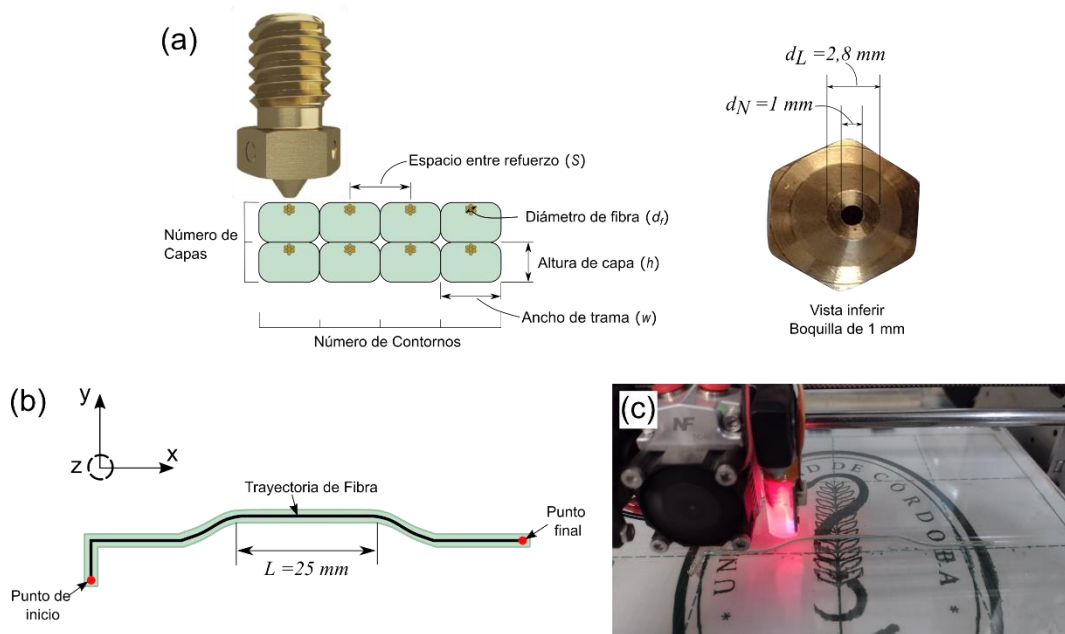


Figura 16: (a) Esquema representativo de los términos empleados en la Tabla 6, (b) Trayectoria de impresión e (c) Impresión de muestra para pruebas preliminares.
Fuente: Autor.

Con el propósito de estudiar la relación entre la velocidad de impresión y la velocidad de alimentación del filamento, se determinó la razón (r) entre la longitud de filamento extruido (E), estimada a partir del código G, y la longitud de material depositado (Longitud L en la Figura 16(b)), variando alturas de capa y anchos de trama entre los valores establecidos en la Tabla 12, usando la ecuación (2) (Krajangsawasdi, et al., 2021).

$$r = \frac{E}{L} \quad \text{Ecuación (2)}$$

3.2.2.3. Realización del Código G para el control de la pieza de impresión

La planificación de la trayectoria de impresión es un factor importante para el desarrollo de piezas, cuando se emplea el mecanismo de impresión por FFF con impregnación *in-situ*, ya que se debe establecer un patrón de impresión que permita conformar el volumen 3D sin cambios bruscos en el desplazamiento del cabezal de extrusión (Kuschmitz, et al., 2021). Por lo tanto, es importante establecer una ruta de proceso que permita utilizar diversas herramientas de diseño para apoyar la concepción y el desarrollo de las trayectorias de impresión, garantizando la manufactura de las piezas mediante la extrusión de los materiales en el cabezal de extrusión desarrollado, teniendo en cuenta el potencial y las limitaciones de la fabricación aditiva a partir de refuerzos con fibras

naturales continuas. En la Figura 17, se muestra la ruta de proceso sugerida para la realización del código G de las muestras fabricadas para esta investigación. Para el diseño del código G se implementó el software Full Control Gcode Designer© de código abierto, programado a partir del lenguaje de programación Microsoft VBA (Visual Basic for applications) y compatible con la interfaz de Microsoft® Excel. Esta herramienta permite el diseño sin restricción de trayectorias de impresión a partir de comandos propios del lenguaje de programación de equipos para la manufactura aditiva (MA), por lo que no es necesario la utilización de un software de laminado 3D para el desarrollo de los comandos lógicos de programación para MA (Gleadall A., 2021). Posteriormente, el archivo generado fue importado a Repetier-Host, el cual es un software de Slicing de acceso libre que permite la visualización de códigos G mediante la ventana de “*Print Preview*”. La ventaja de este software es que permite obtener una vista previa de las trayectorias de impresión desarrolladas para el modelo 3D (Repetier-Host, 2022). Por último, el archivo se guardó con extensión “. gcode” para luego ser almacenado en la tarjeta SD de la máquina de impresión 3D. Para la planificación y optimización de las trayectorias de impresión, se utilizó el programa NC-Viewer de acceso libre, que permite la visualización de los recorridos del cabezal de impresión y las líneas de deposición para la conformación del volumen 3D. Esto facilita la solución de problemas de línea de deposición superpuestas entre capas mediante la edición de las líneas de código diseñados.

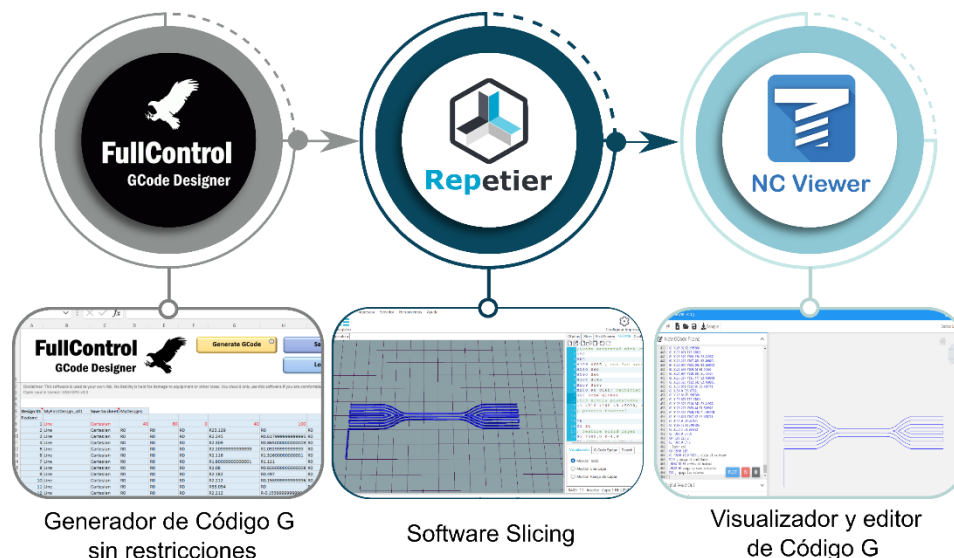


Figura 17: Flujo de sugerido para la realización del código G para FFF con impregnación *in-situ*.
Fuente: Autor.

3.2.2.4. Fabricación del material compuesto

Una vez establecidas las condiciones de trabajo que permitieron una correcta deposición del material compuesto, sin daño en la integridad física de la fibra de plátano, se llevó a cabo experimentos de fabricación de probetas sólidas de material termoplástico impregnado con fibras continuas de plátano. Para ello se realizó la fabricación de muestras con dos orientaciones: (i) 0° (longitudinal) y (ii) 90° (transversal) a lo largo de eje x , de acuerdo con las normas estándares ASTM D638 para espécimen Tipo I y ASTM D790, respectivamente (Figura 18(a)). El código G utilizado fue diseñado mediante el software Full Control Designer GCode y visualizado en Repetier Host, tal como se muestra en la Figura 18(b). Las muestras fueron fabricadas con dos y tres capas de deposición de matriz termoplástica impregnadas con una unidad de fibra, seleccionadas con una longitud promedio de 0,7 m, con el propósito de variar el contenido de fibra del material obtenido (bajo y alto). Además, gracias al control de las trayectorias de impresión, se establecieron puntos en el recorrido del cabezal de impresión a partir del código G diseñado, para el ingreso de las fibras, con el propósito de garantizar una continua impregnación en las capas del volumen 3D fabricado. En anexos se muestra en detalle el procedimiento seguido para la impresión con fibras de plátano.

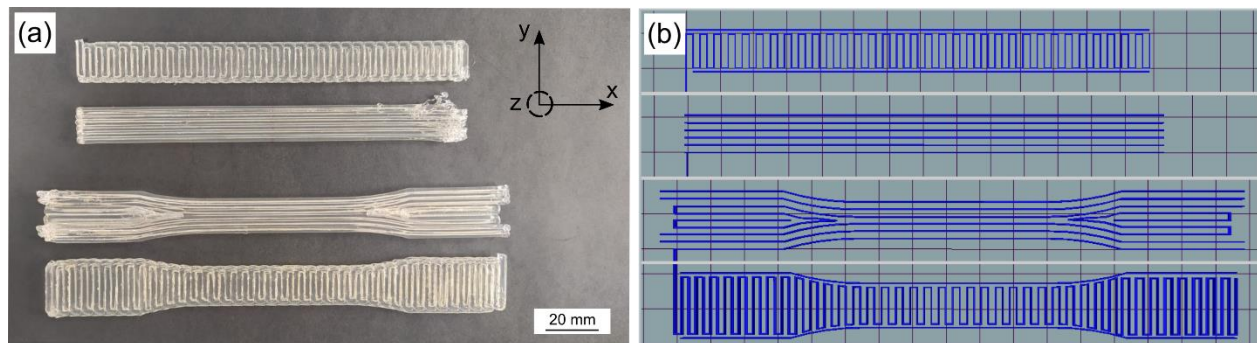


Figura 18: (a) Probetas fabricadas con matriz termoplástica impregnadas con fibra de plátano y (b) Código G visualizado en Repetier Host.

Fuente: Autor.

Antes de la deposición, el equipo de impresión 3D fue configurado para una distancia de nivelación (Z Offset) entre la boquilla y la plataforma de construcción de 0,5 mm, con el propósito de disminuir la fricción ejercida entre el borde de la boquilla y la plataforma de construcción o las capas depositadas, y evitar daños en la integridad física de fibra de plátano (Kuschmitz, et al.,

2021). En la Tabla 13, se resumen los parámetros de impresión empleados para la fabricación de las muestras.

Tabla 13: Parámetros de impresión utilizados para la fabricación de probetas estándares con una unidad de fibra de plátano impregnada.

Parámetros del proceso	Unidad	Valor
Diámetro de la boquilla	mm	1
Temperatura de impresión	°C	200
Temperatura de la plataforma	°C	60
Velocidad de impresión	mm/min	250
Altura de capa	mm	1
Ancho de trama	mm	2,4

3.2.2.5.Determinación del contenido de fibra

Para evaluar el contenido de refuerzo en las muestras fabricadas, se determinó la fracción volumétrica de fibra al analizar la sección transversal de las piezas obtenidas. Las muestras fueron cortadas mecánicamente con una sierra metálica en la sección de interés, y la superficie fue desbastada usando papel lijas con granulometría ASTM 1200 y 1500, asegurando un buen acabado para la adquisición de macrografías mediante el uso del microscopio estereoscópico Motic® modelo SMZ-171, adscrito al laboratorio de materiales y procesos de la Universidad de Córdoba. Posteriormente, las imágenes fueron procesadas a través del software libre ImageJ®, analizando la sección transversal de la fibra como una partícula, para calcular el área total ocupada por la misma en la micrografía. Con los datos obtenidos, se estimó la fracción volumétrica de fibra de las muestras a partir de la relación entre el área total de fibra con respecto al área total de la sección transversal de interés del compuesto, usando la ecuación (3) implementada por (Terekhina, et al., 2021) (Vargas, et al., 2020) (Berthelot, 1999).

$$V_f = \frac{A_f}{A} \times 100\% \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde, A_f – el área de sección transversal de las fibras en la sección transversal y A - representa el área de sección total de la muestra, respectivamente.

3.2.2.6.Caracterización del material compuesto

Las características morfológicas de las superficies de los materiales compuestos fabricado fueron observadas mediante un microscopio estereoscópico Leica® modelo EZ4 D, con software de

adquisición de imagen LAS® EZ (Figura 19(a)). Para evaluar las propiedades mecánicas, se utilizó una máquina universal de ensayos marca Shimadzu® modelo Autograph AG-X, adscrito al laboratorio de Polímeros del instituto tecnológico metropolitano de la ciudad de Medellín (ITM), con celda de carga de 10 kN y software de procesamiento de datos Trapezium Lite X (Figura 19(b)). Las muestras para ensayos de tensión fueron fabricadas bajo la norma ASTM D638 (espécimen tipo I) y para flexión bajo la norma ASTM D790, como se mencionó anteriormente. Cuatro probetas fueron ensayadas sistemáticamente tanto para material base como para muestras con orientación de 0° y 90°, con la combinación de contenidos de fibra bajo y alto, en cada ensayo individual, como se estableció en el diseño experimental mostrado en el capítulo II. Las pruebas de tensión y flexión se realizaron a una velocidad de 5 mm/s y 1,53 mm/s a temperatura controlada de 23 ± 2 °C y una humedad relativa del 50 ± 10 %, respectivamente. Las superficies de fractura de las muestras ensayadas fueron observadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca JEOL® modelo JSM-7100F.

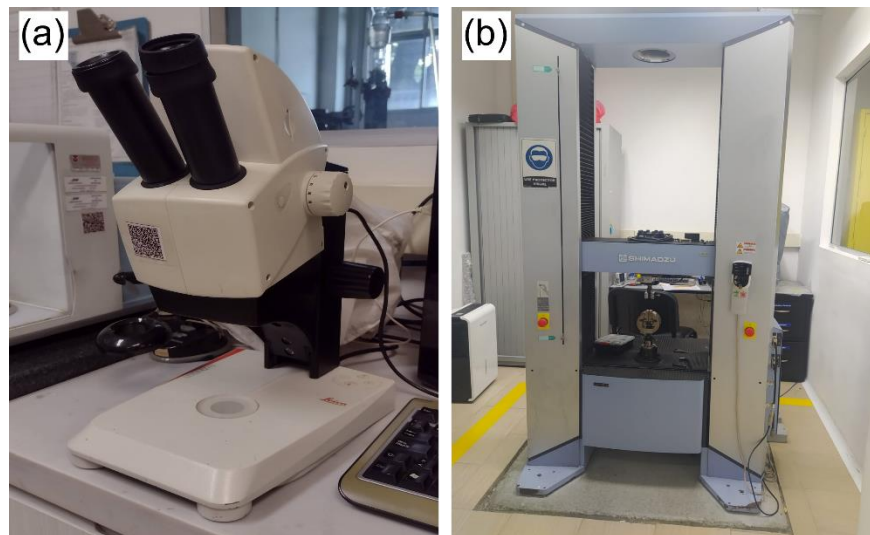


Figura 19: (a) Microscopio estereoscópico Leica® y (b) Máquina universal de ensayos Shimadzu®.
Fuente: Autor.

3.2.2.7. Defectos microestructurales y parámetros de impresión

Con el propósito de evaluar la influencia de parámetros de impresión, es decir, la temperatura a (A) y la velocidad de impresión (B), sobre los defectos microestructurales del material compuesto obtenido, como la excentricidad de la fibra y el nivel de porosidad, se planteó un diseño experimental central compuesto (BCC, por sus siglas en inglés) mediante la metodología de

superficie de respuesta. Los niveles de los parámetros de entradas se muestran en la Tabla 14. El rango de temperatura fue establecido para asegurar la fusión de la matriz, considerando las temperaturas de impresión recomendadas por el fabricante, y de igual forma, evitar la carbonización de la fibra de plátano (Shenzhen Esun Industrial Co, 2022) (Vanegas, et al., 2022). El rango de velocidad se estableció para garantizar la deposición continua de la fibra durante el proceso de impresión sin que se produzcan daños en la integridad física de la misma (Kuschmitz, et al., 2021)

Tabla 14: Parámetros de entrada y niveles experimentales.

Ítem	Parámetros de proceso	Identificación	Niveles	
			Bajo	Alto
1	Temperature (°C)	A	195	205
2	Printing speed (mm/min)	B	200	300

Las muestras fueron fabricadas con forma de prisma rectangular con las fibras paralelas a la dimensión más grande con una dimensión de 30×15×3 mm, utilizando una boquilla de 1 mm de diámetro, depositando un total de 3 capas. Todas las muestras fueron impresas con un patrón de relleno unidireccional. La trayectoria de impresión se diseñó utilizando un código G como se muestra en la Figura 20. Los otros parámetros de impresión como la altura de capa (1 mm), temperatura de la plataforma de construcción (60 °C) y ancho de extrusión (2,4 mm), se mantuvieron constantes. Para determinar el nivel de porosidad y la excentricidad de la fibra del material compuesto obtenido, se realizó un análisis de imágenes mediante el software libre ImageJ®, a partir de imágenes obtenidas de las superficies de las muestras por medio de un microscopio estereoscópico Leica® modelo EZ4 D, con software de adquisición de imagen LAS® EZ.

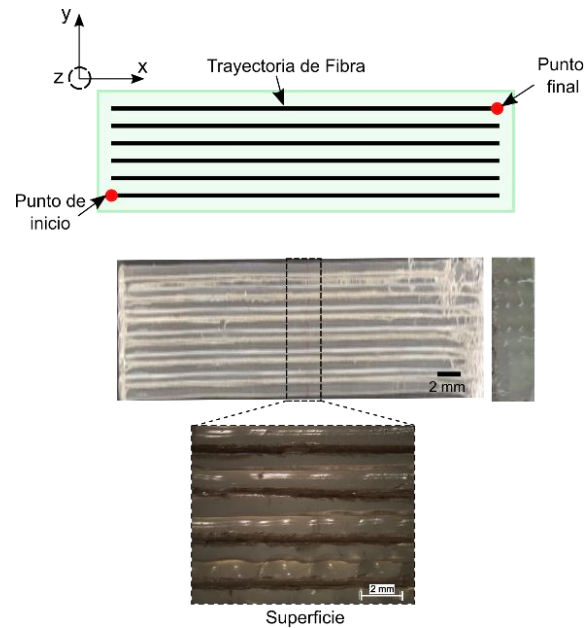


Figura 20: Muestra para estudio de defectos microestructurales.
Fuente: Autor.

Utilizando el software Statgraphics® versión 19.1.2. se formularon 10 conjuntos experimentales mediante la combinación de los diferentes niveles de los parámetros de entrada, mientras que los demás parámetros se mantuvieron constante durante el experimento. En la Tabla 15, se muestra la matriz experimental para el BCC realizado.

Tabla 15: Matriz de diseño experimental para defectos microestructurales.

Corridas	Temperatura (°C)	Velocidad de impresión (mm/min)
1	195	200
2	195	300
3	205	200
4	205	300
5	200	179
6	200	321
7	193	250
8	207	250
9	200	250
10	200	250

El nivel de porosidad se determinó como la relación porcentual del área total de la proyección plana de los poros y el área de la matriz para una simple línea de deposición de material termoplástico reforzado con fibra, utilizando la ecuación (4).

$$I_p = \frac{A_p}{A_T - A_f} \times 100\% \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde A_p - representa el área total de los poros en la superficie del material, A_f - representa el área de la fibra y A_T - el área total de la superficie capturada. Para ello, primero se realizó la edición digital de las imágenes para identificar los poros en la superficie y área de la fibra, mediante contornos y rellenos, utilizando un software de vectorización de imágenes. Posteriormente, las imágenes fueron analizadas por la técnica de Thresholding y así convertirlas en imágenes binarias, en las que el objeto se representa con píxeles en blanco y la matriz con píxeles en negros. Usando la opción “Analyze Particles”, se contaron y midieron los objetos en las imágenes Thresholding. Finalmente, se determinó el área de los poros y la fibra en la superficie capturada en cada imagen, y se procesaron los datos para el cálculo del nivel de porosidad a partir de la ecuación (4). En las Figura 21(a), (b) y (c), se muestra el procedimiento seguido para la identificación de los poros. Para el cálculo del nivel de porosidad, se analizaron un total de 60 imágenes con un aumento de 35x. En anexos se muestra en detalle el procedimiento seguido para el análisis de imagen.

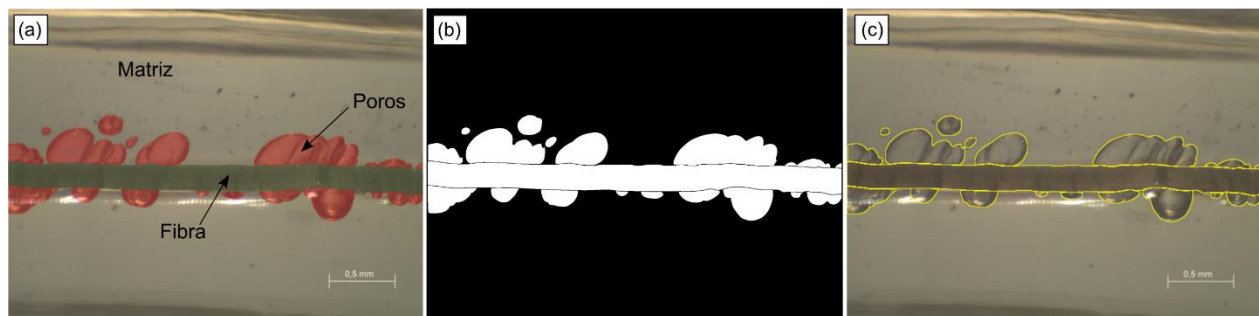


Figura 21: Análisis de imágenes para la determinación del nivel de porosidad: (a) Imagen editada, (b) Imagen binaria y (c) Analyze Particles por ImageJ.

Fuente: Autor.

La excentricidad de la fibra en la matriz termoplástica se determinó mediante el grado de asimetría de la fibra de plátano con relación al eje medio de una simple línea de deposición de material termoplástico reforzado, a partir de la distribución de la matriz de PLA a los lados de la fibra, usando la ecuación (5).

$$E_c = \frac{|W_s - W_i|}{W - d_f} \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde W_s y W_i representan el ancho superior e inferior de matriz de PLA alrededor de la fibra hasta el área de solapamiento, respectivamente; W representa el ancho total del filamento de deposición reforzado con fibra y d_f el diámetro de la fibra de plátano. En la Figura 22(a) se muestra un esquema representativo de los términos empleados para la ecuación (5). Si el valor de E_c tiende a cero, la distribución de matriz alrededor de la fibra es igual, por lo que se asume que se encuentra alineada en el eje medio del filamento de deposición. En caso contrario, si E_c es diferente de cero, la distribución de PLA alrededor de la fibra es desigual, por lo que esta se encuentra desalineada al eje medio del filamento de deposición. Se analizaron al menos cuatro imágenes para cada configuración experimental con un aumento de 10x, realizando 4 mediciones por cada línea de deposición, tal como se muestra en la Figura 22(b).

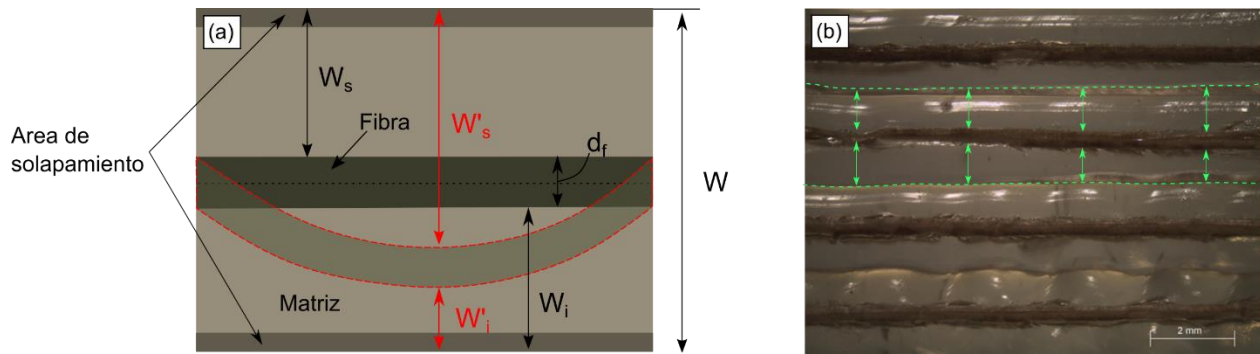


Figura 22: Proceso de determinación de la excentricidad de la fibra en la matriz de PLA: (a) Esquema para términos en la ecuación (3) y (b) Medición de W_s y W_i .

Fuente: Autor.

3.3. Resultados

3.3.1. Caracterización morfológica de la fibra

En la Figura 23(a), se muestra la sección longitudinal de la fibra del pseudotallo del plátano secado a 40°C. La estructura de la fibra corresponde a un conjunto de fibras elementales que se encuentran alineadas con respecto a la dirección longitudinal de la fibra. La superficie es irregular y de rugosidad variable, compuesta por una capa de depósitos que posiblemente estén constituidas por compuestos de hemicelulosa, lignina, y otras sustancias no celulósicas como pectinas y ceras que actúan como aglutinantes naturales, y que permanecen después de la extracción (Montoya & Negrete., 2022). No se evidenció procesos de fibrilación por el desprendimiento de material vegetal

y el tratamiento de secado. En la Figura 23(b) se muestra una imagen de la sección transversal de las fibras obtenidas para entender su estructura jerárquica. A partir de la imagen SEM, se puede evidenciar que la fibra está conformada por pequeñas estructuras cilíndricas que están constituidas por cavidades en toda su sección transversal. Estas estructuras son características de las fibras naturales, siendo conformadas por varias fibras elementales rodeada por una región cementante conocida como lámina media (Jaramillo, et al., 2018) (Montoya & Negrete., 2022). Cada fibra elemental tiene una forma poligonal y esta constituida por el lumen y la pared celular. A su vez, cada pared celular está conformada por microfibrillas de celulosa-helicoidalmente aglomeradas en una matriz de hemicelulosa y lignina que se extienden en toda su longitud (Montoya & Negrete., 2022). Por lo que este arreglo le brinda a la fibra resistencia a tensión y rigidez (Pedraza, et al 2019).

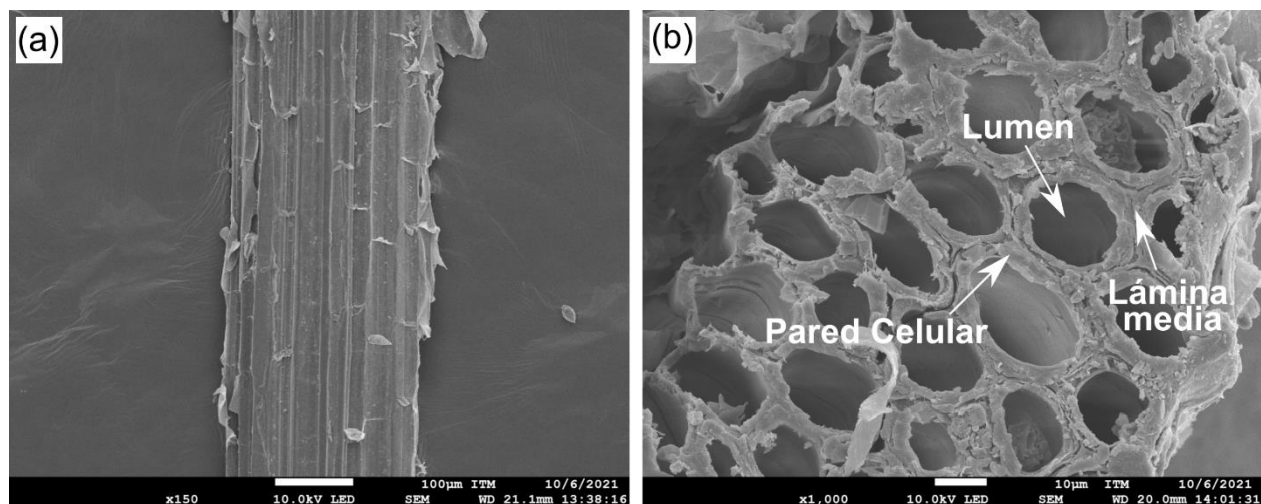


Figura 23: Imagen SEM de la fibra de plátano de la sección (a) Longitudinal y (b) Transversal.
Fuente: Autor.

En la Figura 24, se muestra la comparación entre la distribución del diámetro equivalente medido de las fibras de plátano extraídas y secadas a 40°C, suministrada por los proveedores y la obtenida para esta investigación. El diámetro equivalente de la fibra de plátano determinado por los proveedores fue de $251,69 \pm 74,70 \mu\text{m}$, con una distribución de frecuencia que se extiende en el rango de los 130 a 460 μm , respectivamente. Con el propósito de utilizar fibras de plátano con diámetros alrededor de un valor promedio, se realizó un proceso de selección de fibras, para alcanzar una distribución de diámetro más uniforme. El diámetro equivalente de la fibra de plátano medido fue de $187,68 \pm 55,46 \mu\text{m}$, generando un desplazamiento del diámetro medio de la fibra a

un intervalo de 150 a 200 μm . Sin embargo, debido a las características dimensionales típicas no uniformes de las fibras lignocelulósicas, la distribución obtenida se extiende entre el rango de los 100 a 350 μm (Inacio, et al. 2010). En la Figura 24, también se muestra el análisis estadístico para el diámetro D_{10} y para el diámetro D_{90} de las fibras, para ambas distribuciones. El valor de D_{10} es aproximadamente constante, pero el valor del diámetro D_{90} y su frecuencia son diferentes entre sí. Estos resultados muestran que las fibras utilizadas en este trabajo tienen un diámetro más pequeño y una distribución más definida, permitiendo obtener un tamaño más uniforme de la materia prima.

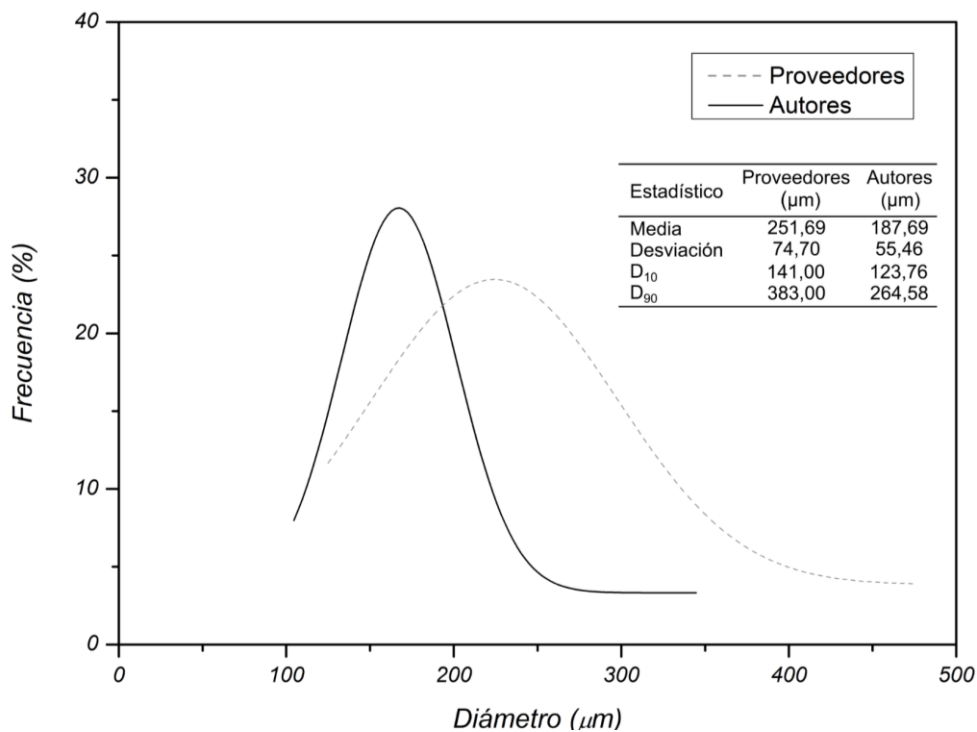


Figura 24: Distribución de diámetro de fibra.
Fuente: Autor.

3.3.2. Análisis Termogravimétrico (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la Figura 25, se muestra el termograma de descomposición térmica y el espectro de la primera derivada de la curva TGA (DTG) de la fibra del pseudotallo del plátano, obtenida por el análisis termogravimétrico. A partir de los resultados se puede apreciar cuatro etapas importantes en la que se presenta una pérdida de peso en la muestra, que pueden estar asociada a la evaporación de la humedad, la eliminación de extractivos, y la descomposición de componentes como la

hemicelulosa, la celulosa y la lignina propios de las fibras naturales (Montoya & Negrete., 2022). La primera etapa se presenta a un rango de temperatura de 25 a 124,61°C, en el cual se registró una pérdida de 6,951% en peso, que se puede asociar a la evaporación de la humedad y agua absorbida debido al carácter hidrofílico de las fibras naturales (Vargas J., et al. 2020). La segunda etapa tuvo lugar entre los 124,61 a 230,37°C con una pérdida en peso correspondiente al 5,987%, que se puede atribuir a la eliminación de extractivos tales como ceras o grasas, y la descomposición de sustancias no celulósicas, que permanecieron posiblemente después proceso de extracción de la fibra (Montoya & Negrete., 2022). La tercera etapa se presentó entre los 230,37 a 426,94°C en la cual se registró una pérdida de peso de 53,34%, que puede estar asociada a la descomposición térmica de la hemicelulosa y la celulosa presente en las fibras de plátano (Montoya & Negrete., 2022). Finalmente, la cuarta etapa corresponde a la combustión de las muestras, con una pérdida de peso del 22,34%, atribuido a la degradación de la lignina, la cual presenta mejor estabilidad térmica a mayores temperaturas (Montoya & Negrete., 2022) (Kumar, et al. 2021).

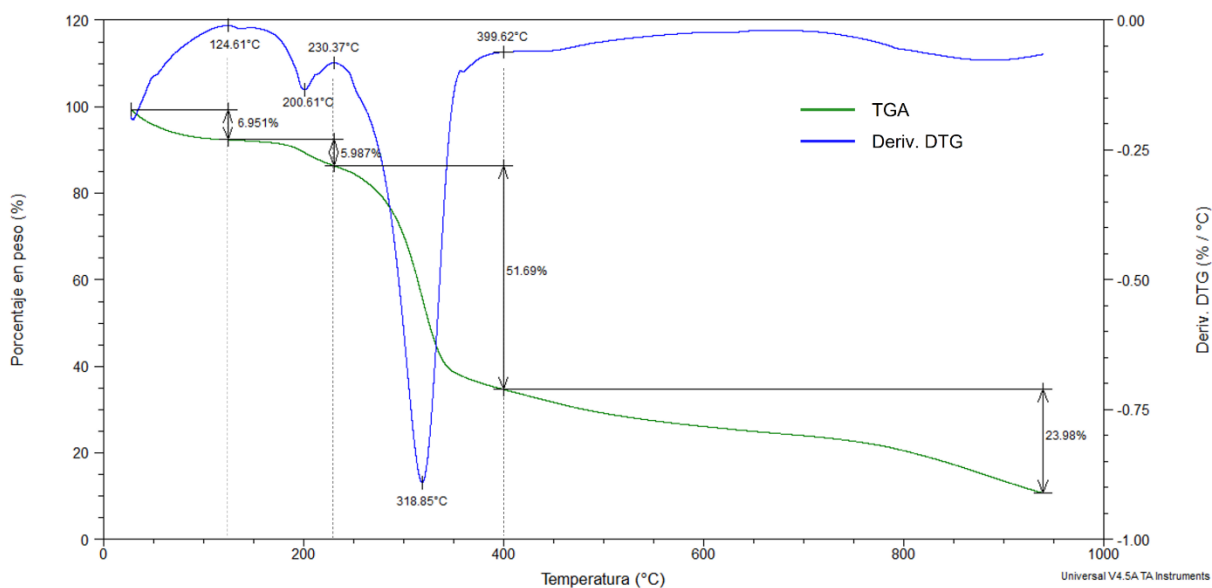


Figura 25: Curvas TGA y DTG de las fibras de plátano obtenidas mediante análisis termogravimétrico.
Fuente: Autor.

En la Figura 26, se muestra la curva DSC para la matriz termoplástica de ácido Poliláctico (PLA), obtenido por el análisis de calorimetría diferencial de barrido. Se puede observar que el material polimérico presentó cuatro transiciones características típicas de los materiales termoplásticos semicristalinos, que de izquierda a derecha se pueden definir de la siguiente forma: (i) cambio en

el flujo de calor a temperatura de transición vítrea, (ii) un exoterma asociado a la cristalización, (iii) un endoterma de fusión y (iv) un endoterma por la degradación térmica de la muestra (Cuiffo, et. al, 2017). La temperatura de transición vítrea (T_g) se presentó a un valor de 62,91°C con un cambio en la línea base de la curva DSC, siendo similar a la temperatura reportada en otras investigaciones para filamentos de impresión 3D de ácido Poliláctico (Blanco, et al., 2022) (Cobos, et al., 2019). Esta transición en la curva se atribuye a un aumento de la absorción de calor, que permite que las cadenas poliméricas ganen suficiente energía para iniciar un movimiento local de las regiones amorfas del material termoplástico (Bhagia, et al., 2021). La cristalización tuvo lugar entre los 100 a 125°C, en un pico exotérmico con temperatura de cristalización (T_c) de 105,89°C y con una entalpía de 17,744 J/g, siendo comparable con la temperatura reportada por Blanco et al. (2022). Esta transición se asocia a la formación exotérmica de fases cristalinas por encima de la temperatura de transición vítrea, debido a la reorganización de las cadenas poliméricas dando lugar a la liberación de calor en el entorno (Bhagia, et al., 2021) (Cuiffo, et al., 2016). Acorde a la literatura, se presentó un pico endotérmico entre los 150 a 200°C, que corresponde a la temperatura de fusión que sigue inmediatamente después de la exoterma de cristalización (Cobos, et al., 2019). La temperatura de fusión (T_m) se obtuvo a un valor de 179,69°C, con una entalpía de fusión de 16,957 J/g, siendo comparable con la temperatura reportada por (Blanco, et al., 2022). Esta transición se atribuye a un cambio en la absorción de calor en el material por el aumento de la temperatura, donde las regiones cristalinas son capaces de fluir gracias al movimiento de las cadenas poliméricas (Bhagia, et al., 2021). Finalmente, se presentó un pico endotérmico en el rango de temperatura de los 300 a 400°C, con un valor de 356,74°C y una entalpía de 603,30 J/g, que corresponde a la etapa de degradación del material termoplástico (Cobos, et al., 2019).

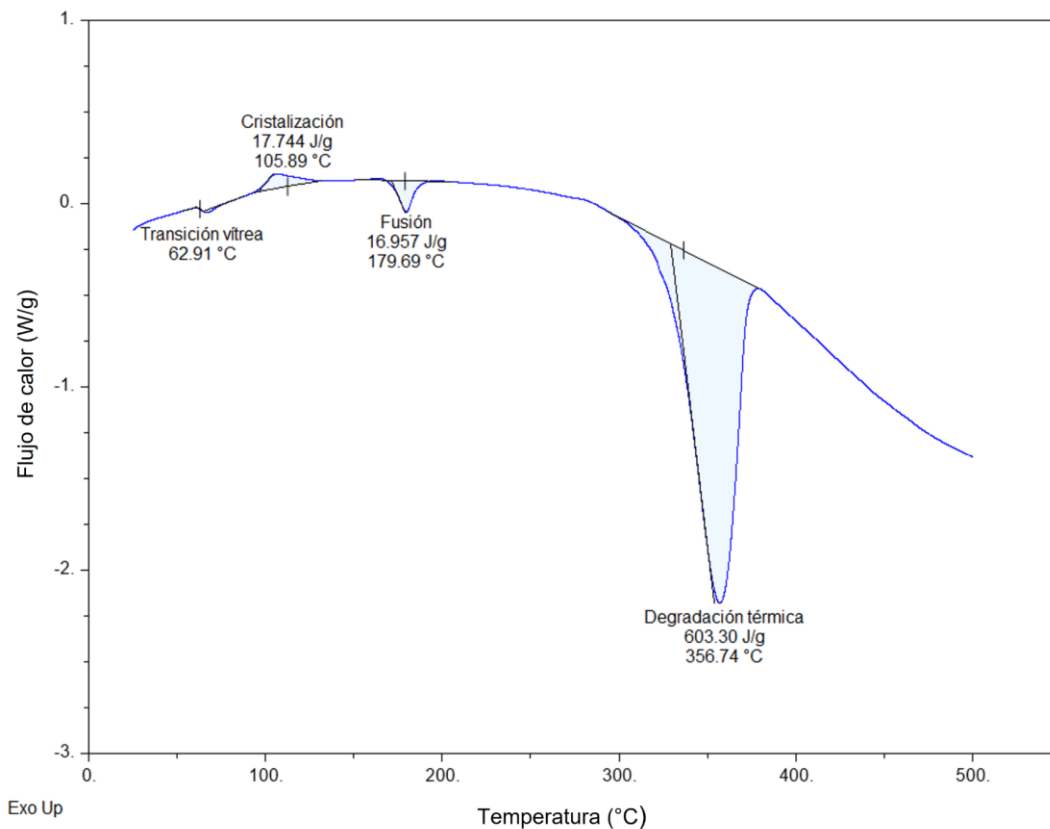


Figura 26: Curva DSC para ácido Poliláctico obtenida por análisis de calorimetría diferencial de barrido.
Fuente: Autor.

El análisis térmico de los materiales se enfocó en los posibles cambios que se presentan en el rango de temperatura entre los 190 y 210 °C, correspondiente a las temperaturas de impresión recomendada por el fabricante del filamento. En la curva DSC para el ácido Poliláctico, se puede considerar esta zona como térmicamente estable, ya que no se evidencia transiciones en este rango de temperaturas después de la transición endotérmica de fusión del material polimérico. Además, a partir del análisis TGA, se garantiza que las fibras del pseudotallo del plátano no sufrirán una descomposición térmica de la hemicelulosa y la celulosa, que puedan afectar sus propiedades mecánicas (Vargas J., et al. 2020). Por tanto, se puede establecer que los valores de temperaturas utilizados en esta investigación aseguran la fusión del material termoplástico sin que se produzca una degradación de componentes importante de la fibra del pseudotallo del plátano, para el proceso de impresión con impregnación *in-situ*.

3.3.3. Deposición del material termoplástico impregnado con fibra de plátano

En la Tabla 16, se muestran los resultados obtenidos de las pruebas preliminares para evaluar la calidad de impresión del material termoplástico impregnado con fibra de plátano con diferentes parámetros de impresión utilizados. A diferencia del proceso FFF, la altura de capa del cordón de deposición para el proceso de impregnación *in-situ* está limitada por el diámetro del material de refuerzo utilizado y el diámetro interior de la boquilla, para prevenir distorsiones en la sección transversal del cordón de deposición y evitar atascamientos de la fibra en la cavidad interior de la misma (An, et al., 2022) (Akoundi, et al., 2019). El diámetro equivalente de las unidades de fibras de plátano usadas en esta investigación fue de $187,68 \pm 55,46 \mu\text{m}$, lo que significa que la altura mínima del cordón de deposición debe ser de 0,187 mm; mientras que la altura máxima se estableció a 1 mm, considerando la geometría de la boquilla utilizada (Figura 16(a)). Como el ancho de trama se puede establecer a partir del diámetro exterior e interior de la boquilla de extrusión (Tabla 12), en esta investigación se evaluaron valores entre 1 a 2,8 mm, respectivamente. Por último, los valores de la velocidad impresión en las pruebas preliminares se establecieron para 200 y 300 mm/min, con el propósito de reducir daños en la integridad física de la fibra debido a la fuerza de arrastre del cabezal, y optimizar tiempo de impresión para las muestras fabricadas (Ferreira, et al., 2019).

Tabla 16: Calidad de impresión del material termoplástico impregnado con fibra de plátano bajo el proceso FFF con impregnación *in-situ*.

Velocidad de impresión (mm/min)	Altura de capa (mm)	Ancho de trama (mm)	Impresión
200	0,6	1	Fibra no adherida
		1,6	Fibra no adherida
		2	Fibra no adherida
		2,4	Fibra no adherida
		2,8	Fibra discontinua
	0,8	1	Fibra no adherida
		1,6	Fibra no adherida
		2	Fibra discontinua
		2,4	Fibra discontinua
		2,8	Fibra discontinua
	1	1	Fibra no adherida
		1,6	Fibra discontinua
		2	Fibra discontinua
		2,4	Imprimible
		2,8	Deformación de fibra

300	0,6	1	Fibra no adherida
		1,6	Fibra no adherida
		2	Fibra no adherida
		2,4	Fibra no adherida
		2,8	Fibra discontinua
	0,8	1	Fibra no adherida
		1,6	Fibra no adherida
		2	Fibra discontinua
		2,4	Fibra discontinua
		2,8	Fibra discontinua
	1	1	Fibra discontinua
		1,6	Fibra discontinua
		2	Fibra discontinua
		2,4	Imprimible
		2,8	Deformación de fibra

A una velocidad de impresión de 200 mm/min y una altura de capa de 1 mm, la calidad de impresión del material fue observado para diferentes valores de ancho de trama, tal como se muestra en la Figura 27. Para un ancho de cordón de 1 mm, la fibra no se adhirió bien a la matriz termoplástica, por lo que se presentó desprendimiento de la fibra en la matriz después de la deposición (Figura 27(a)). Para valores de ancho de 1,6 y 2 mm, se evidenciaron discontinuadas de las fibras de plátano en el cordón de deposición de material, producto de la ruptura de la fibra durante la impresión (Figura 27(b)). El daño en la integridad física de la fibra puede deberse a la fricción generada por la boquilla sobre el material depositado por la baja velocidad de extrusión del filamento (An, et al., 2022). Para un ancho de trama de 2,4 mm la impresión de ambos materiales fue posible, tal como se muestra en la Figura 27(c). Mientras que, para un valor de 2,8 mm se evidenció deformaciones de la fibra en la matriz termoplástica depositada (Figura 27(d)), que se pudo generar debido a un exceso de material polimérico extruido en el cordón de deposición (An, et al., 2022).

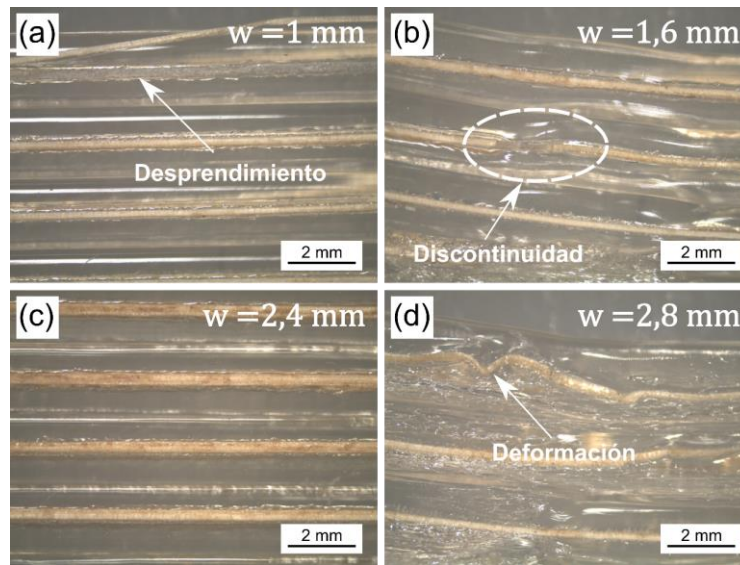


Figura 27: Defectos de impresión de las muestras fabricadas a 200 mm/min, altura de capa de 1 mm y ancho de trama de (a) 1 mm; (b) 1,6 mm; (c) 2,4 mm y (d) 2,8 mm.
Fuente: Autor.

Para una velocidad de 300 mm/min se tuvo un comportamiento similar en la calidad de deposición del material impreso, evidenciando una impresión sin defectos aparentes en la superficie del material depositado, para parámetros de altura de capa y ancho de trama de 1 y 2,4 mm, tal como se muestra en la Figura 28.

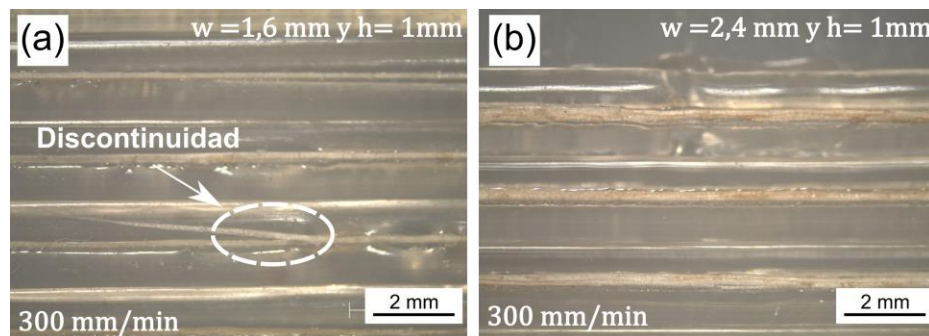


Figura 28: Defectos de impresión de las muestras fabricadas a 300 mm/min, altura de capa de 1 mm y ancho de trama de (a) 1,6 mm y (b) 2,4 mm.
Fuente: Autor.

En la Tabla 17, se muestran los valores calculados para la relación E/L a partir de los parámetros de impresión usados en las pruebas preliminares. Como la fibra es extruida junto con el material termoplástico, debido a la fuerza de arrastre ejercida por el sistema de extrusión, su velocidad de movimiento será igual a la velocidad de alimentación del filamento, V_e (Akhoundi, et al., 2019).

De esta forma, la longitud de fibra proporcionada por unidad de tiempo será igual a la longitud de material de filamento extruido, E (Yang, et al., 2022). Para obtener una deposición continua de la fibra en el material impregnando, se debe garantizar que la longitud depositada de la misma durante el proceso *in-situ* sea igual a la longitud de la trayectoria de impresión. En consecuencia, la velocidad de movimiento de la boquilla deberá ser igual a la velocidad de alimentación de la fibra para que se deposite correctamente, por lo que una relación 1:1 entre E y L para este mecanismo de impresión es deseado (Akhoundi, et al., 2020) (Yang, et al., 2022). Para los parámetros donde fue posible la impresión del polímero impregnado con fibra de plátano ($h = 1 \text{ mm}$ y $w = 2,4 \text{ mm}$), se obtuvo un valor de E/L cercana a 1, lo que confirma el suceso anteriormente mencionado. Por lo tanto, este resultado permite considerar estos valores de altura de capa y ancho de trama como óptimos para garantizar una buena deposición del material, sin que las fibras de plátano sufran daños en su integridad física. Sin embargo, cabe resaltar que la fracción en volumen de fibra que se puede obtener será extremadamente baja, y estará limitada al contenido que se pueda obtener a partir de los valores de altura de capa y ancho de trama, que posibilitan una deposición continua de los materiales (Akhoundi, et al., 2020).

Tabla 17: Cálculo de la relación E/L mediante la altura de capa y ancho de trama.

L (mm)	h (mm)	w (mm)	E (mm)	E/L
25	0,6	1,6	9,978	0,399
		2	12,473	0,499
		2,4	14,967	0,599
		2,8	17,462	0,698
25	0,8	1,6	13,304	0,532
		2	16,630	0,665
		2,4	19,956	0,798
		2,8	23,282	0,931
25	1	1,6	16,630	0,665
		2	20,788	0,832
		2,4	24,945	0,998
		2,8	29,103	1,164

Para entender los efectos de la velocidad de impresión (V_i) y de extrusión (V_e) en la calidad de la deposición, se presenta la Figura 29. Cuando la velocidad V_i es mayor a la velocidad de V_e , la longitud de la fibra proporcionada por unidad de tiempo es menor que la longitud del material depositado para la trayectoria de impresión, por lo que la fuerza de arrastre generada por la fricción dentro de la boquilla producirá una ruptura de la fibra, generando discontinuidades en el cordón de

deposición (Figura 29(a)). En el caso contrario, si la velocidad V_i es menor a la velocidad de V_e , la longitud de la fibra alimentada será mayor que a la longitud de deposición, lo que puede generar una sobreacumulación del material termoplástico en la cavidad interna de la boquilla, produciendo distorsiones en la fibra, afectando a la calidad de la deposición (Figura 29(b)). Si V_i y V_e son iguales, una deposición continua de los materiales se hace presente debido al equilibrio de las velocidades (Figura 29(c)).

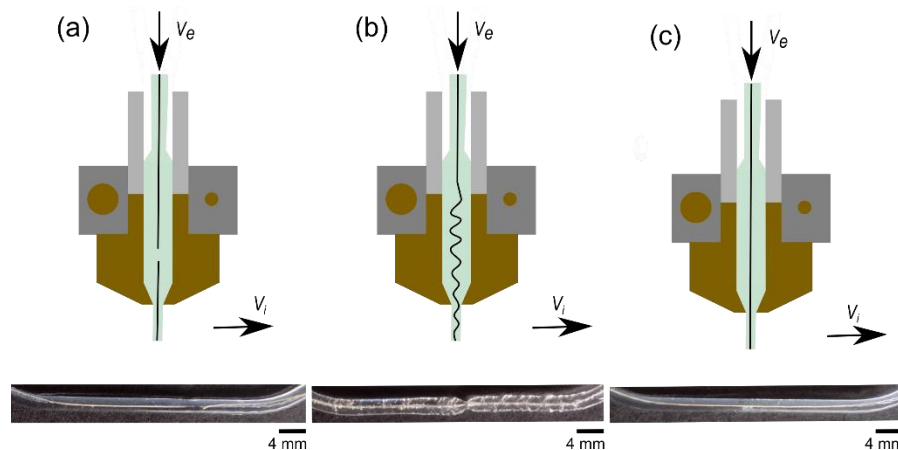


Figura 29: Estado del cordón de deposición para diferentes condiciones de velocidad de impresión (V_i) y velocidad de extrusión (V_e).

Fuente: Autor.

3.3.4. Evaluación del contenido de fibra respecto la orientación

Para estudiar la variación del contenido de fibra con respecto a la orientación, se fabricaron muestras con forma de prisma rectangular con altura y ancho de trama de 1 y 2,4 mm, y con 3 capas de deposición. Para variar el contenido de fibra, las muestras fueron impresas con 2 y 3 capas de material termoplástico impregnado con fibra de plátano, y con orientaciones de deposición de 0, 45 y 90°, respectivamente. En la Figura 30(a), se muestra una gráfica que relaciona el contenido de fibras con la orientación de impresión. En ella se observa que el valor promedio del contenido de fibra para 3 capas de material impregnado con relación a las tres orientaciones oscila alrededor de 1%, con una variabilidad de la media dentro de la desviación estándar estimada. El mismo comportamiento se puede apreciar para las muestras con 2 capas de material impregnado, obteniendo valores mayores al 0,5% en el contenido de fibra, respectivamente. En la Figura 30(b) se evidencia la sección perpendicular a la dirección de la fibra para muestras con 3 capas de material impregnado y orientación de 0, 45 y 90°. Se puede observar que el área total de las secciones no

muestran diferencias significativas al variar a la dirección de disposición, lo que es de esperarse, ya que al mantener la estabilidad del volumen de extrusión del ácido Poliláctico (PLA) fundido a partir de los parámetros establecidos, se garantiza la misma cantidad de polímero depositado, por lo que independiente a la orientación se tendrán valores muy similares en el contenido de fibra, siempre y cuando se garantice homogeneidad en el refuerzo. Este resultado es importante ya que se puede garantizar contenidos de fibras uniformes en las muestras fabricadas, al variar la orientación de deposición, en esta investigación.

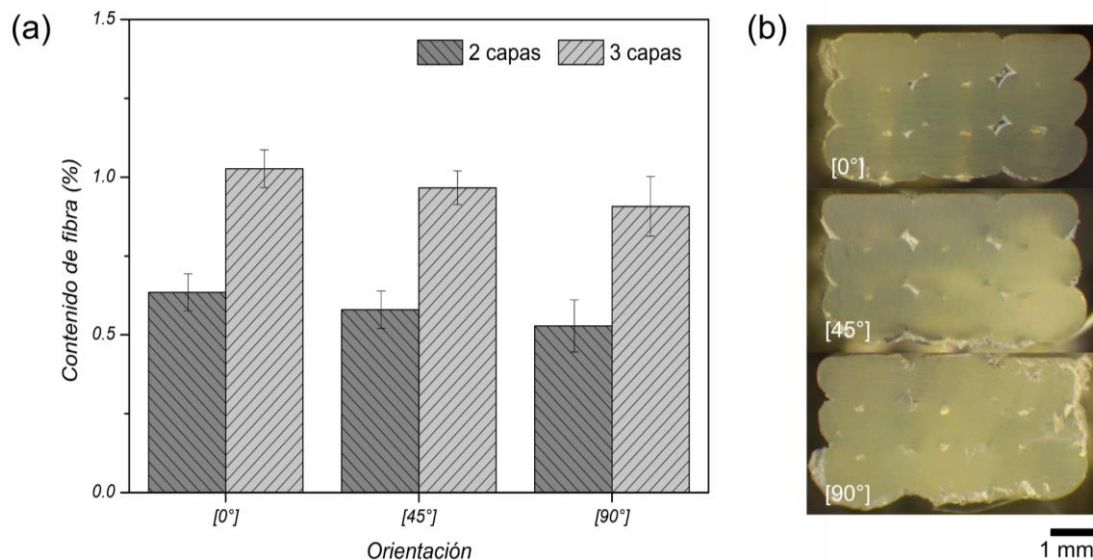


Figura 30: (a) Contenido de fibras vs orientación y (b) Sección transversal de muestras con 3 capas de material impregnado para una orientación de 0, 45 y 90°.

Fuente: Autor.

En la Tabla 18, se muestran los valores de contenido de fibra y orientación para los ensayos mecánicos, bajo el diseño experimental propuesto en el capítulo anterior.

Tabla 18: Configuración experimental para ensayos mecánicos.

Tratamiento	Contenido (%)	Orientación (°)
T1	0,58 ± 0,05	0
T2	0,58± 0,05	90
T3	0,96 ± 0,06	0
T4	0,96 ± 0,06	90
M0	Sin fibra	0
M90	Sin fibra	90

3.3.5. Propiedades mecánicas

En las Figura 31(a) y 31(b), se muestra los resultados obtenidos para la resistencia a tensión y flexión de las muestras fabricadas, en función de los diferentes tratamientos experimentales. La resistencia a tensión del material base para una orientación de 0° y 90° fue de $60,68 \pm 0,51$ MPa y $28,59 \pm 0,63$ MPa, mientras que la resistencia a flexión obtenidas fue de $99,07 \pm 0,87$ MPa y $61,06 \pm 7,02$ MPa, respectivamente. Al comparar los resultados, se puede evidenciar que el efecto causado por la variación del contenido de fibra no fue significativo, ya que los valores de la resistencia a tensión y flexión son cercanos, y se encuentran dentro del rango de la desviación estándar de medición para cada uno de los tratamientos en las diferentes orientaciones. Esto puede asociarse a los bajos contenidos de fibra obtenidos y su baja variabilidad, lo que no produjo cambios perceptibles en la resistencia mecánica del compuesto (Terekhina, et al., 2021). Autores como Matzusaki et al. (2016), proponen utilizar contenidos de fibras mayores al 5% para garantizar un efecto significativo de la fracción de refuerzo en las propiedades mecánicas del material fabricado. Por su parte, la variación de la orientación sí afectó significativamente el valor de la resistencia a tensión y flexión de los materiales, con una reducción del 53% y 38%, respectivamente. Estos resultados permiten inferir, que la variación de la orientación genera cambios en la media muestral de la resistencia a tensión y flexión del material compuesto, que puede estar asociado a la distribución de la carga en el material debido al cambio en la dirección de los cordones de deposición del material polimérico impregnado con fibra (Le Duigou, et al., 2020). Sin embargo, autores como Terekhina et al. (2021), han encontrado que para una orientación a 90° , las fibras impregnadas en el material termoplástico no soportan completamente la carga axial a tensión, por lo que el esfuerzo es soportado mayormente por la matriz polimérica. De esta manera, para el estudio del efecto de la orientación de fibra posteriormente se optó evaluar orientaciones de 0 y 45° , respectivamente (ver capítulo IV).

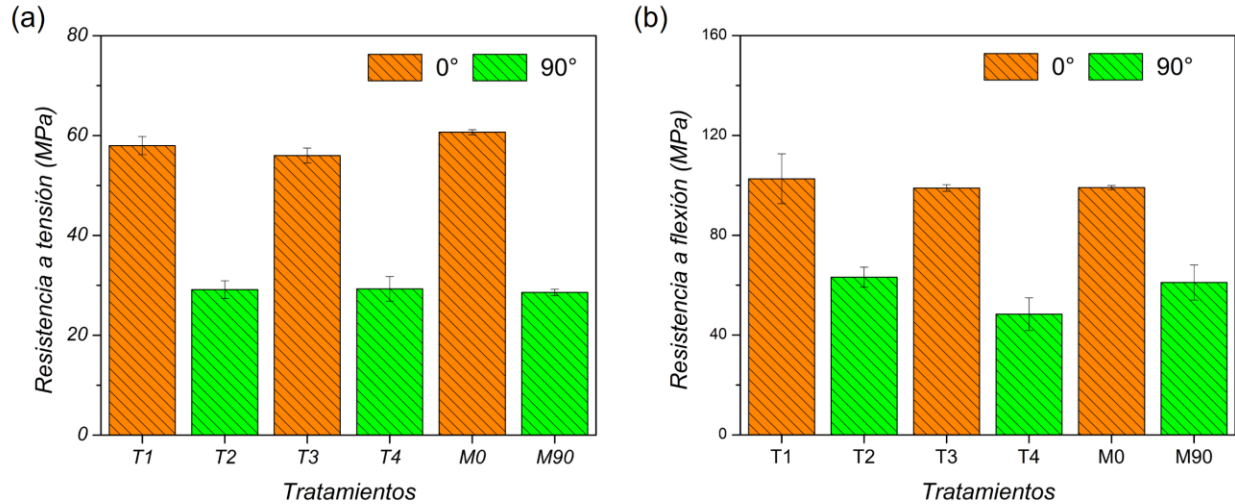


Figura 31: Comparación entre las propiedades mecánicas del material compuesto obtenido para los diferentes tratamientos a (a) tensión y (b) flexión.

Fuente: Autor.

En la Figura 32, se muestran las micrografías de la superficie de fractura para muestras de tensión con una orientación de 0 y 90°, respectivamente. La presencia de poros y el desprendimiento de la fibra en la superficie de fractura, sugiere una débil intercara fibra-matriz del material compuesto fabricado. Estos poros pueden actuar como concentradores de esfuerzos en el material durante el proceso de tracción, afectando seriamente su resistencia mecánica (Hou, et al., 2021). Autores como Cheng et al. (2021), encontraron que un aumento en la cantidad de poros en la intercara fibra-matriz genera una débil unión de estos materiales, lo que puede producir un desprendimiento de las líneas depositadas de fibra durante el ensayo de tracción por lo que la transferencia de esfuerzos de la matriz hacia las fibras en el compuesto no será lo suficientemente fuerte y en consecuencia se tendrá una menor resistencia mecánica. Debido a estos inconvenientes, se propuso un estudio de defectos microestructurales con el propósito de evaluar el efecto de parámetros como la temperatura y la velocidad de impresión, en la formación de poros en el material fabricado, tal como se discutirá en la siguiente sección.

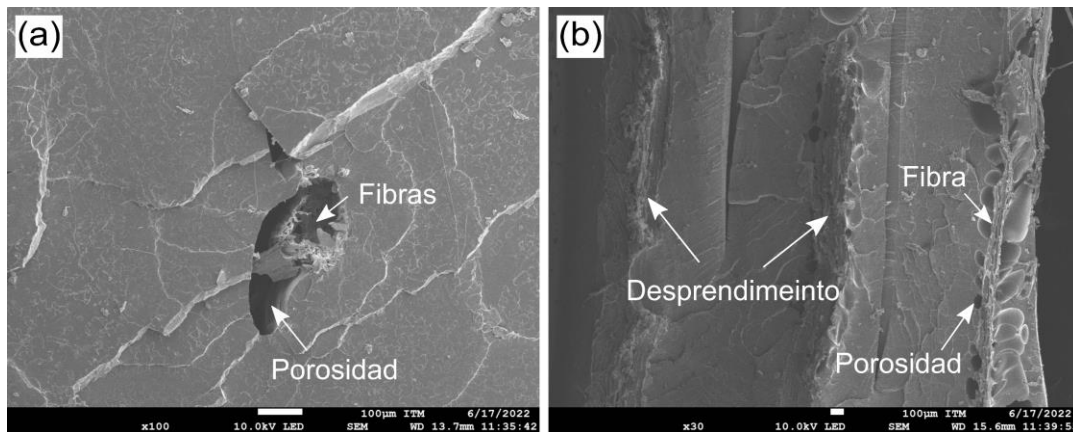


Figura 32: Imágenes SEM de la superficie de fractura para probeta a tensión con orientación: (a) 0° con aumento de 100x y (b) 90° con aumento de 30x.

Fuente: Autor.

3.3.6. Defectos microestructurales

3.3.6.1. Resultados experimentales

En la Tabla 19, se resumen los resultados experimentales para la excentricidad y el nivel de porosidad. La excentricidad de la fibra varió entre 0,08 y 0,25, respectivamente. Para una temperatura de 195 °C y una velocidad de impresión de 200 mm/min, presentó el menor grado de asimetría; mientras que la muestra impresa con una temperatura de 200 °C y velocidad de 320,711 mm/min obtuvo el valor más alto. Además, las muestras fabricadas con una temperatura de 200 °C y velocidad de impresión de 250 mm/min, presentaron un valor medio de 0,14, respectivamente. Por otra parte, el nivel de porosidad varió entre el 0,63 y el 9,5%, donde el valor más bajo se dio a una temperatura de 200°C y velocidad 320,711 mm/min, y el más alto a una temperatura de 200 °C y velocidad de 179,289 mm/min, respectivamente. Puede observarse que ninguna de las variables medidas mostró una tendencia clara.

Tabla 19: Resultados obtenidos para las diferentes corridas experimentales.

Corridas	Respuesta	
	Excentricidad	Nivel de porosidad (%)
1	0,08	5,98
2	0,15	2,74
3	0,21	3,96
4	0,17	4,48
5	0,11	9,5
6	0,25	0,63
7	0,13	4,73
8	0,11	5,25
9	0,15	6,15
10	0,13	5,50

3.3.6.2. Efecto de parámetros del proceso en la excentricidad de la fibra

Para determinar el efecto de la temperatura y la velocidad de impresión sobre la excentricidad de la fibra en la matriz termoplástica, se utilizó análisis de la varianza ANOVA con un intervalo de confianza del 95%. Los valores del ANOVA se muestran en la Tabla 20. Si el valor-P es inferior a 0,05, el parámetro es significativo en términos de la variable de respuesta. Los resultados de la Tabla 20 muestran que tanto la temperatura y la velocidad de impresión, como la interacción de dichos factores no afectan significativamente al valor de la excentricidad de la fibra de plátano en la matriz termoplástica.

Tabla 20: ANOVA para la excentricidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Contribución (%)	Observación
A: Temperatura	0,0019	1	0,0019	0,960	0,383	8,30	Insignificante
B: Velocidad de impresión	0,0065	1	0,0065	3,370	0,140	28,38	Insignificante
AA	0,0004	1	0,0004	0,210	0,672	1,75	Insignificante
AB	0,0030	1	0,0030	1,570	0,279	13,10	Insignificante
BB	0,0019	1	0,0019	1,010	0,372	8,30	Insignificante
Error	0,0077	4	0,0019			8,30	
Total	0,0229	9					

En la Figura 33(a), se muestra el gráfico de probabilidad normal de los resultados experimentales para la excentricidad de la fibra. Este gráfico se utiliza para determinar si los residuos siguen o no la distribución normal supuesta (Gutiérrez, 2012). Los resultados indican que los datos

experimentales de la variable de respuesta se aproximan a la línea ajustada y no se muestra una clara desviación de los puntos que señalen una conducta no normal, por lo que se concluye que no se viola el supuesto de normalidad. Para determinar el supuesto de homogeneidad de la varianza de los residuos, se estableció el gráfico de residuales con relación a los valores predichos, como se muestra en la Figura 33(b). En este gráfico se puede observar que los puntos no siguen un patrón claro y contundente, siendo distribuidos aleatoriamente sobre la banda horizontal alrededor de la línea cero, lo que sugiere que el supuesto de homogeneidad se cumple satisfactoriamente. A partir de estos resultados se puede inferir que los niveles estudiados para la temperatura y la velocidad de impresión son prácticamente imperceptibles por la variable de respuesta estudiada. Cuando se deposita un simple filamento de matriz termoplástica reforzado con fibra continua, la excentricidad de la fibra se puede ver afectada por la cantidad de material termoplástico extruido y por la trayectoria de impresión, debido a la distribución de la matriz alrededor de la fibra (Yang, et al, 2022) (Li, et al., 2016). En esta investigación, al variar la temperatura y velocidad de impresión en los rangos establecidos con un patrón de relleno unidireccional, es posible que no se obtuviese un efecto significativo sobre la variación de la excentricidad de la fibra en la matriz debido a la estabilidad del volumen de extrusión de ácido Poliláctico (PLA) fundido por unidad de tiempo, lo que pudo generar una distribución de matriz depositada relativamente uniforme (Yang, et al, 2022).

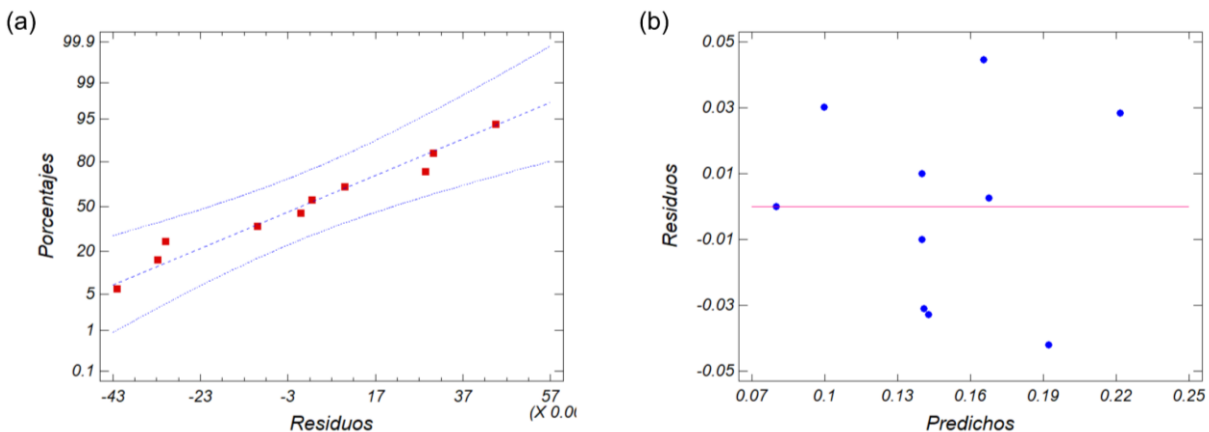


Figura 33: (a) Gráfica de probabilidad normal y (b) gráfica de residuales para la excentricidad.
Fuente: Autor.

3.3.6.3.Efecto de parámetros del proceso en el nivel de porosidad

Para determinar el efecto de la temperatura y la velocidad de impresión sobre el nivel de porosidad del material compuesto obtenido, se utilizó análisis de la varianza ANOVA con un intervalo de

confianza del 95%. Los valores del ANOVA se muestran en la Tabla 21. Estos resultados muestran que sólo la velocidad de impresión tuvo un efecto significativo en el nivel de porosidad del material con una contribución del 60,23 %. Por su parte, la temperatura y la interacción de ambos parámetros no tienen influencia estadística en la variación de la respuesta acorde al valor-P obtenido.

Tabla 21: ANOVA para el nivel de porosidad.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Contribución (%)	Observación
A: Temperatura	0,0259	1	0,0019	0,010	0,934	0,05	Insignificante
B: Velocidad de impresión	29,1241	1	0,0065	8,630	0,043	60,23	Significante
AA	1,6561	1	0,0004	0,490	0,522	3,42	Insignificante
AB	3,5344	1	0,0030	1,050	0,364	7,31	Insignificante
BB	1,4561	1	0,0019	0,430	0,547	3,01	Insignificante
Error	13,4919	4	0,0019				
Total	48,3582	9					

En la Figura 34, se muestran los gráficos de probabilidad normal y de residuos de los datos experimentales para el nivel de porosidad medido. De acuerdo con estos resultados se puede establecer que no hay problemas con los supuestos de normalidad y homogeneidad de la varianza. En la Figura 34(a) se puede observar que los residuos se ajustan bien a una línea recta, por lo que la normalidad se cumple aceptablemente. Por su parte, en la Figura 34(b) los puntos caen aleatorios sobre una banda horizontal alrededor de la línea cero, lo que sugiere que el supuesto de homogeneidad se cumple satisfactoriamente.

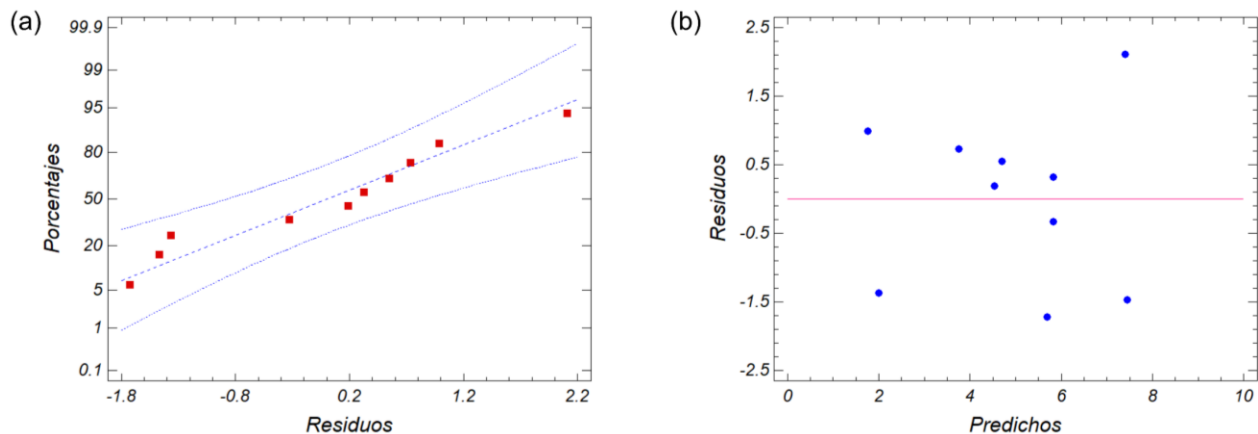


Figura 34: Gráfica de probabilidad normal y (b) gráfica de residuales para el nivel de porosidad.

Fuente: Autor.

En la Figura 35(a), se muestra el gráfico de efectos principales para el nivel de porosidad. Se puede observar que los niveles estudiados de temperatura son prácticamente imperceptibles y no se presentan cambios significativos en el nivel de porosidad del material compuesto obtenido. En cambio, para la velocidad de impresión, sí se muestra un cambio importante en la variable de respuestas, mostrando una disminución del nivel de porosidad cuando se aumenta el valor de dicho factor. Este comportamiento puede atribuirse a las diferentes condiciones de mojabilidad de la fibra de plátano sobre la matriz termoplástica que se obtuvieron con las diferentes velocidades de impresión establecidas en el experimento (Nguyen, et al., 2022) (Qiu, et al., 2016). Se ha encontrado que la fibra de plátano sin tratar y el PLA no presentan una alta compatibilidad, lo que ayuda a promover problemas de mojabilidad en la intercara fibra-matriz y favorecer a la formación de defectos microestructurales en el material (Nguyen, et al., 2022). En la Figura 35(b) se muestra el gráfico de contornos de la superficie de respuesta estimada para el nivel de porosidad obtenido en el experimento mediante el uso de un software estadístico comercial. Se observa claramente que las curvas de nivel son mucho más estrechas en la dirección del eje de ordenadas, lo que indica que la variable de respuesta estudiada cambia más rápidamente debido al efecto del cambio asociado a la velocidad de impresión que por la temperatura, tomando valores más pequeños cuando se aumenta el valor de la velocidad de impresión para un rango de temperatura de entre 190 a 200 °C. Por lo que la interacción entre los factores estudiados no afecta en gran medida a los valores de la superficie de respuesta. Estos resultados sugieren que, con relación a defectos microestructurales y para la optimización del proceso se deben fijar niveles altos de velocidad de impresión y niveles bajos de temperatura en la región experimental establecida, para minimizar el nivel de porosidad del material compuesto obtenido.

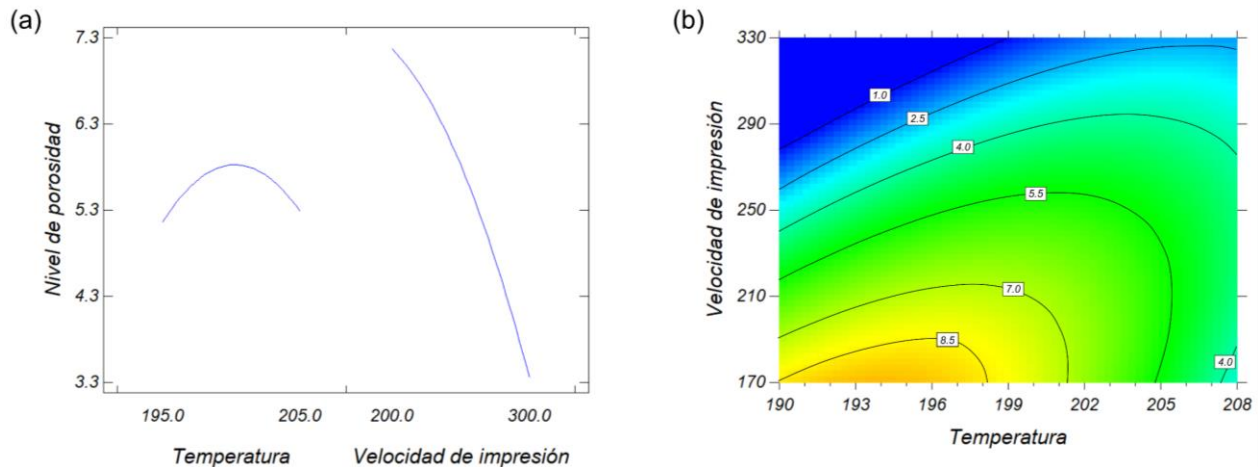


Figura 35: (a) Gráficos de efectos principales y (b) gráfica de contorno para la superficie de respuesta estimada para el nivel de porosidad.

Fuente: Autores.

3.3.6.4. Formación de poros en el material compuesto

Se piensa que la formación de poros en el material compuesto obtenido se ve afectada por las condiciones de mojabilidad de la fibra, como se mencionó anteriormente. En la Figura 36(a), se muestra un diagrama esquemático sugerido sobre el proceso de impregnación de la fibra de plátano en la matriz. Durante el proceso FFF con impregnación *in-situ*, la fibra es extruida junto con el material termoplástico, por lo que el flujo de masa fundida genera una fuerza de arrastre que parcialmente presiona la fibra fuera de la línea depositada (Figura 36(a)). Esto puede producir problemas en la intercara, por la generación de brechas entre la fibra de refuerzo y la matriz termoplástica (Cheng, et al., 2021). Cuando el material compuesto es depositado, el grado de mojabilidad de la fibra se verá afectada por la velocidad de deslizamiento de la fibra en movimiento y la matriz termoplástica fundida, que puede caracterizarse por un ángulo de contacto dinámico (α) en la superficie de la fibra (Qiu, et al., 2016), tal como se muestra en la Figura 36(b). Para velocidades de impresión bajas y para una alta tasa de flujo de material fundido (en esta investigación se trabajó con un flujo lo suficientemente alto), el ángulo de contacto dinámico de la fibra puede disminuir, lo que posibilita la creación de sitios de nucleación de vacíos alrededor de la fibra (Pappas, et al., 2021). De esta manera, el gas atrapado en las pequeñas brechas en la intercara se mezcla con el material termoplástico fundido, provocando la formación de los poros.

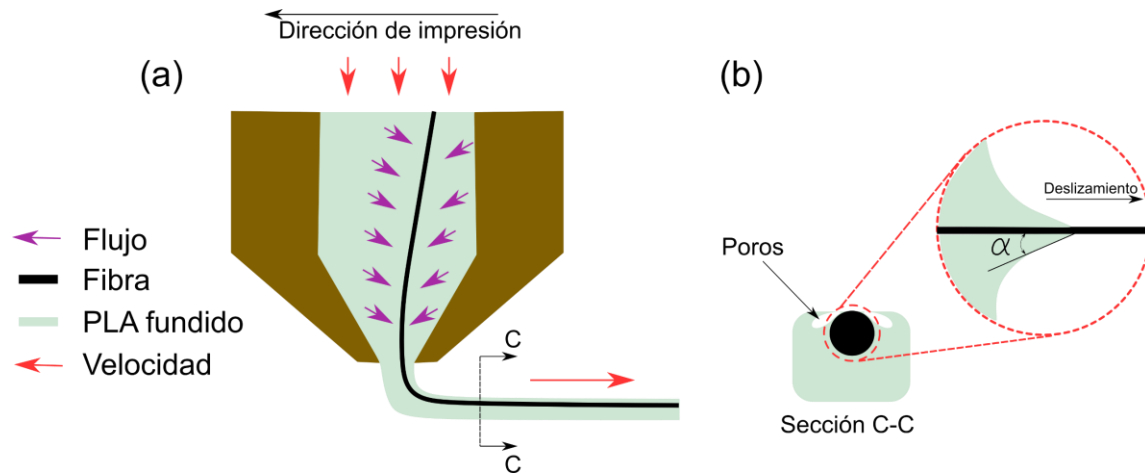


Figura 36: (a) Esquema representativo para la formación de porosidad durante el proceso de FFF con impregnación in situ y (b) Proceso de mojabilidad de una sola fibra en la matriz termoplástica.

Fuente: Autor.

En la Figura 37, se muestra la evolución de la porosidad del material para diferentes temperaturas y velocidades de impresión experimentales. Se puede apreciar el cambio en la forma y la concentración de los poros en la extensión de la fibra a medida que aumenta la velocidad de impresión. Se cree que la fracción de porosidad se ve afectada por el tiempo de permanencia de la fibra en el cabezal durante el proceso de impresión *in-situ*. Una menor velocidad de impresión puede inducir una condición de mojabilidad de la matriz que generen la superposición de los sitios de nucleación de vacíos, provocando la formación de poros en forma de burbujas alrededor de la fibra. De esta forma, la fracción de vacíos en la extensión de la fibra crece, induciendo un aumento en el nivel de porosidad del material compuesto obtenido.

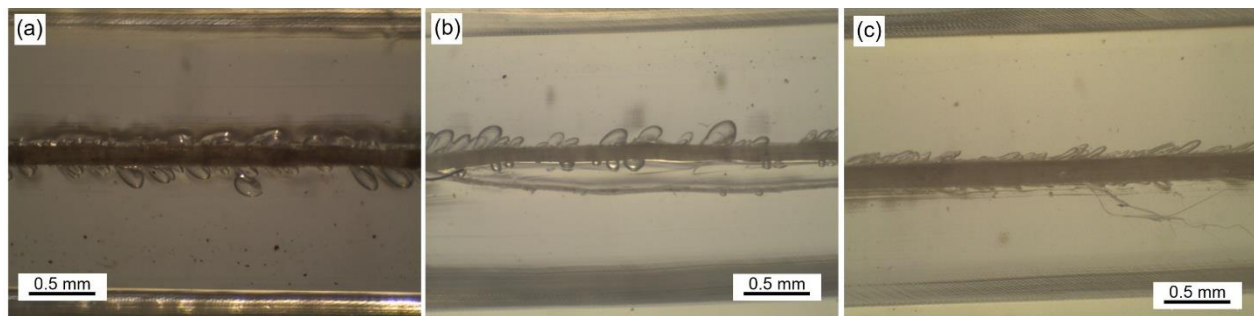


Figura 37: Evolución de la porosidad alrededor de la fibra para los tratamientos experimentales: (a) 200 mm/min - 205 °C, (b) 250 mm/min - 200 °C y (c) 300 mm/min - 195 °C.

Fuente: Autor.

3.4. Conclusiones

En este capítulo, las condiciones del proceso de impresión 3D con el mecanismo de FFF con impregnación *in-situ*, para la fabricación de piezas de compuesto termoplástico con refuerzo de fibra del pseudotallo del plátano, fue investigado. Los resultados más relevantes se resumen a continuación:

1. Para garantizar una buena deposición del material, sin que las fibras de plátano sufran daños en su integridad física, a partir del mecanismo de impregnación *in-situ*, se debe establecer una relación entre la longitud de filamento extruido y una longitud de material depositado aproximadamente a 1, lo cual fue asociado a la relación entre las velocidades de impresión y extrusión, para el proceso.
2. Al variar la orientación de fibra de los materiales impresos, no se evidenció cambios significativos en el contenido de fibra estimado, atribuido a la estabilidad del volumen de extrusión del material termoplástico.
3. A partir de los ensayos mecánicos, se pudo evidenciar un efecto en la variación de la resistencia a tensión y flexión de los materiales compuestos fabricados, debido al cambio de la orientación. Este hecho puede estar asociado a la distribución de la carga en el material por el cambio de la dirección de los cordones de deposición del material polimérico impregnado con fibra.
4. El cambio del contenido de fibra no mostró un efecto en la variación de la media muestra de las propiedades mecánicas, atribuido a los bajos contenidos de fibra obtenidos y la presencia de porosidades en la intercara.
5. No se evidenció cambio significativo en la excentricidad de la fibra de plátano sobre la matriz termoplástica, cuando se varió la temperatura y la velocidad de impresión. Este hecho fue atribuido a la estabilidad del volumen de extrusión de PLA fundido por unidad de tiempo logrado mediante el proceso de FFF con impregnación *in-situ*, generando una distribución de matriz depositada relativamente uniforme.
6. Acorde al análisis estadístico realizado para el estudio de los defectos microestructurales, se encontró que la velocidad de impresión tuvo mayor contribución en la variabilidad del nivel de porosidad del material compuesto, en comparación a los rangos de temperatura establecidos. Este hecho fue atribuido a las condiciones de mojabilidad de la fibra sobre la matriz termoplástica alcanzadas para las diferentes velocidades de impresión.



7. La formación de poros en el material compuesto obtenido está probablemente relacionada a la condición de mojabilidad de la fibra en la matriz. Si se reduce la velocidad de impresión, el tiempo de permanencia de la fibra en el cabezal durante el proceso de impresión aumenta, posibilitando la creación de sitios de nucleación de poros alrededor de la fibra por la disminución del ángulo de contacto dinámico en la superficie de esta.
8. Con los resultados se hace evidente el alto potencial del proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, para la obtención de materiales compuestos de matriz termoplásticas reforzados con fibras de plátano continuas en condiciones experimentales, ya que a partir de los parámetros del proceso se pudo realizar la impresión de ambos materiales para la generación de volúmenes 3D.

Capítulo IV. Propiedades mecánicas de compuestos termoplásticos reforzado con fibra de plátano fabricado por FFF

4.1. Introducción

Las fibras naturales se han convertido en un tema de creciente interés para la fabricación de materiales compuestos con base de matriz polimérica. Las fibras vegetales como el lino, el cáñamo y el yute, actualmente se consideran sustitutos potenciales de las fibras sintéticas y tradicionales, como la fibra de vidrio o de carbono (Kuschmitz, et al., 2021) (Matsuzaki et al. 2016). Sin embargo, con el propósito de disminuir la contaminación de los residuos generados en las industrias agropecuarias, muchos investigadores se han interesado en el uso de fibras extraídas de estos materiales, las cual han mostrado tener características interesantes por su naturaleza lignocelulósica (Stoof, et al., 2017).

En la búsqueda de la determinación del valor agregado de estos residuos, se han implementado tecnologías existentes para la fabricación de nuevas materias que permitan el uso de estas biomásas. Una tecnología que en la actualidad ha tomado relevancia en la fabricación de compuestos, es el mecanismo de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, en el cual la impregnación de fibras continuas sobre una matriz termoplástica se da durante el proceso de impresión (Prüß & Vietor, 2015). Autores como Matsuzaki et al. (2016), han encontrado que este método de fabricación, implementando fibras sintéticas ha generado buenos resultados con relación a las propiedades mecánicas de tensión y flexión. Sin embargo, su uso con fibras extraídas de residuos agroindustriales como el pseudotallo del plátano no ha sido reportado. Por tanto, el objetivo de este capítulo es evaluar la resistencia mecánica de un material termoplástico impregnado con fibra del pseudotallo del plátano, mediante el proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, variando la orientación y el contenido de fibra. Para ello se utilizaron fibras de plátano simples y enrolladas para obtener contenido de refuerzo entre 0,96 y 3,98%. Además, se varió la orientación de fibra a 0 y 45°, respectivamente. Se llevaron a cabo

ensayos de tensión y flexión, para determinar la resistencia del material compuesto fabricado comparado con el material base sin refuerzo.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Materiales

Como se mencionó en el capítulo anterior, se utilizaron como material de refuerzo fibras continuas del pseudotallo del plátano, que fueron extraídas de cultivos de la variedad *Hartón* procedentes del municipio de Cereté, Colombia (12 MASL). La composición química medida de las fibras mediante ensayos de bromatología fue de 41,17 % celulosa, 11,51 % hemicelulosa, 13,61 % lignina y 33,71 % de otras sustancias (Montoya & Negrete., 2022). El diámetro equivalente de las unidades de fibra fue de $187,68 \pm 55,46 \mu\text{m}$, que se determinó mediante imágenes de microscopía óptica. Las fibras fueron secadas a una temperatura de 40°C por un tiempo de 4 horas, sin ningún tratamiento químico superficial, y por su naturaleza higroscópicas, estas fueron guardadas en bolsas gofradas y almacenadas al vacío. Se usó como matriz termoplástica un filamento de impresión 3D de Ácido Poliláctico (PLA), con diámetro de $\varnothing 1,75 \text{ mm}$, comercial. De igual forma, para controlar el exceso de humedad del filamento se usó gel de sílice en recipiente cerrados. Para garantizar la variación del contenido de fibra, considerando las restricciones del proceso de FFF con impregnación *in-situ* para los valores de altura de capa y ancho de trama, se decidió utilizar 1 unidad de fibra (denominada como FP1) para obtener contenidos de refuerzo de baja, y 4 unidades de fibras enrolladas (denominada como FP4) para el contenido de alta. En la Figura 38(a), se muestra las dos configuraciones de las fibras de plátano como material de refuerzo. Para la obtención de las FP4 enrolladas, se utilizó un mecanismo giratorio que funciona de forma similar a una bobinadora de hilos manual, para formar un hilo con espiras de fibras retorcidas. En la Figura 38(b) se muestra una imagen del mecanismo utilizado. Para el enrollado de las fibras FP4, se siguió el siguiente procedimiento. Cuatro unidades de fibras del pseudotallo del plátano, con una longitud nominal de 0,7 m, fueron adheridas al tambor giratorio del mecanismo de enrollado mediante cinta adhesiva, separadas a distancias iguales. Luego de esto, se aplica silicona en el extremo libre de las fibras para después sujetarlas, garantizando un extremo fijo. A continuación, se acciona el motor eléctrico para hacer girar el tambor, con el propósito de enrollar las fibras gracias al movimiento rotativo. Posteriormente, se aplica silicona a las fibras en el extremo opuesto, y se retiró la cinta adhesiva del tambor garantizando la mayor precaución posible. La velocidad de rotación se ajustó

mediante una resistencia variable (potenciómetro), con el control de la intensidad de corriente. Finalmente, con este proceso se obtuvieron fibras FP4 enrolladas con una longitud aproximada de 0,67 m, siendo impresas según el procedimiento descrito en Anexos.

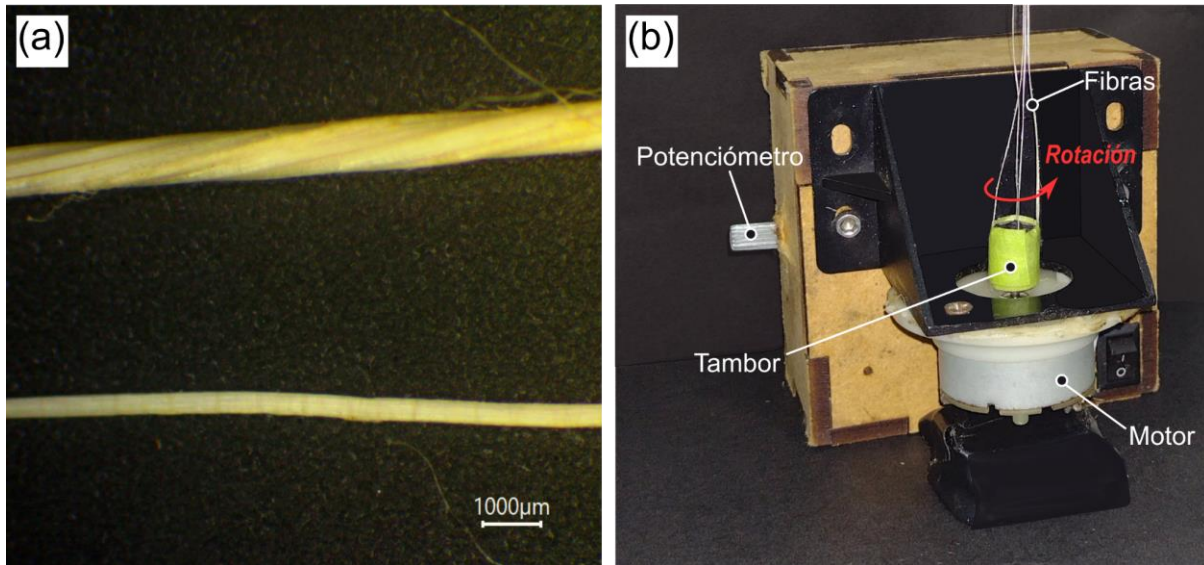


Figura 38: (a) Condiciones de las fibras de plátano como material de refuerzo y (b) Mecanismo de enrollado.

Fuente: Autor.

4.2.1.1. Caracterización del material de refuerzo

En esta sección se muestra el procedimiento seguido para la caracterización mecánica, y morfológica de las fibras FP4 enrolladas; para las fibras como FP1 los resultados fueron mostrados en el capítulo anterior. Para determinar la resistencia a tensión de las fibras FP4, se realizaron pruebas de tensión en una máquina universal de ensayos marca Shimadzu® modelo Autograph AG-X, con una celda de carga de 500 N, a una velocidad de 2 mm/min. El montaje de las probetas se realizó acorde a la norma estándar ASTM C1557, utilizando moldes de cartón paja (sustrato) para una longitud calibrada de 50 mm y un diámetro de agujero de 15 mm, respectivamente. Las fibras fueron adheridas al sustrato mediante un pegante adhesivo en base etilo de curado rápido de la marca LOCTITE® 495, en la zona Grip, ejerciendo presión hasta su fijación. En la Figura 39, se muestra el montaje realizado para las pruebas de tensión de las fibras FP4 enrolladas. Se ensayaron un total de 15 muestras. Antes de realizar los ensayos, las muestras fueron acondicionadas en una cámara climática con control de CO₂ y humedad, a una temperatura de 23°C durante un tiempo de 24 horas, aproximadamente. Finalmente, la resistencia a la tensión se calculó

a partir de la relación entre la fuerza máxima y el área de la sección transversal, que se determinó como el área estimada a partir del perfil del hilo; mientras que el módulo de Young se determinó a partir de la pendiente de la región lineal en la curva de esfuerzo vs deformación. Las características topográficas se evaluaron mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL® modelo JSM-7100F, adscrito al Laboratorio de polímeros del Instituto Tecnológico metropolitano de la ciudad de Medellín; mientras que las mediciones de los diámetros se realizaron mediante el software libre ImageJ®, a partir de imágenes de microscopía óptica obtenidas mediante un microscopio estereoscópico Motic® modelo SMZ-171.

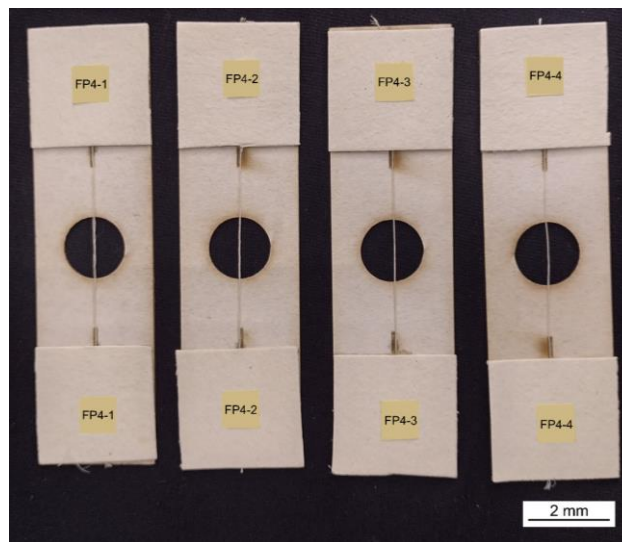


Figura 39: Montaje realizado para las pruebas de tensión de las fibras FP4 enrolladas.
Fuente: Autor.

4.2.2. Fabricación de las muestras para ensayos mecánicos

Las muestras de material compuesto fueron fabricadas en una impresora 3D con tecnología FFF a partir del mecanismo de impregnación *in-situ*, adscrita al laboratorio de materiales y proceso de la universidad de Córdoba. A partir de los resultados obtenidos en el capítulo III, se decidió implementar parámetros de impresión de altura de capa y ancho de trama, con una relación de E/L cercana a 1, para garantizar una adecuada deposición del material termoplástico impregnado sin que se produzcan daños en la integridad física de la fibra. A su vez, la temperatura y la velocidad de impresión se establecieron con el propósito de minimizar los defectos microestructurales bajo la estimación del diagrama de contornos para la superficie de respuesta mostrada en la Figura 35.

En la Tabla 22, se resumen los parámetros de impresión utilizados para la manufactura de las muestras.

Tabla 22: Parámetros de impresión utilizados para pruebas definitivas.

Parámetros del proceso	Unidad	Valor
Diámetro de la boquilla	mm	1
Temperatura de impresión	°C	195
Temperatura de la plataforma	°C	60
Velocidad de impresión	mm/min	300
Altura de capa	mm	1
Ancho de trama	mm	2,4

Se fabricaron cuatro probetas para ensayos de flexión y cuatro probetas para ensayos de tensión, bajo las normas ASTM D790 y ASTM D638, tanto para material base como para material compuesto, a una orientación de 0 y 45°, con la configuración de fibra FP1 y FP4 enrolladas, acorde a los diferentes tratamientos del diseño experimental propuesto en el capítulo II. Las trayectorias de impresión fueron diseñadas con el software Full Control Disegner GCode®, estableciendo puntos en el recorrido del cabezal de impresión, para el ingreso de las fibras, con el propósito de garantizar una continua impregnación en las capas de las piezas fabricadas. En las Figura 40 y Figura 41, se muestran las probetas utilizadas para los ensayos de tensión y flexión, respectivamente. En esta investigación se decidió fabricar probetas espécimen tipo IV para las pruebas de tensión, ya que al ser más pequeñas requieren menos material de refuerzo, disminuyendo tiempos de trabajo para la formación de las fibras enrolladas.

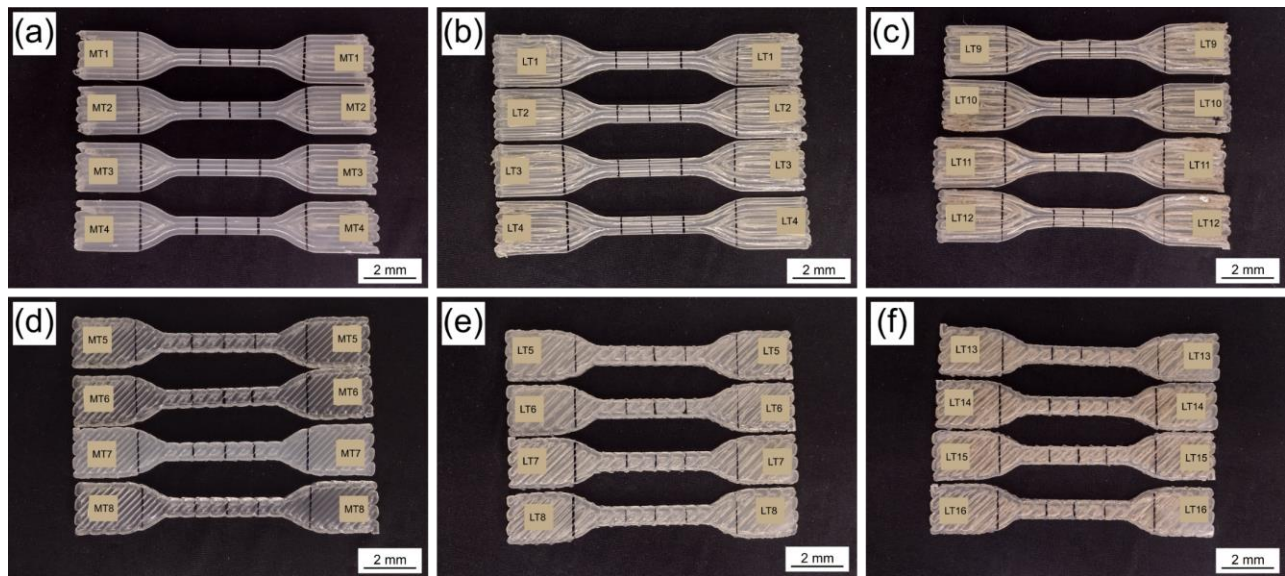


Figura 40: Probetas de tensión Tipo IV bajo norma estándar ASTM D638 para (a) Matriz/ 0° , (b) FP1/ 0° , (c) FP4/ 0° , (d) Matriz/ 45° , (e) FP1/ 45° y (f) FP4/ 45° .

Fuente: Autor.

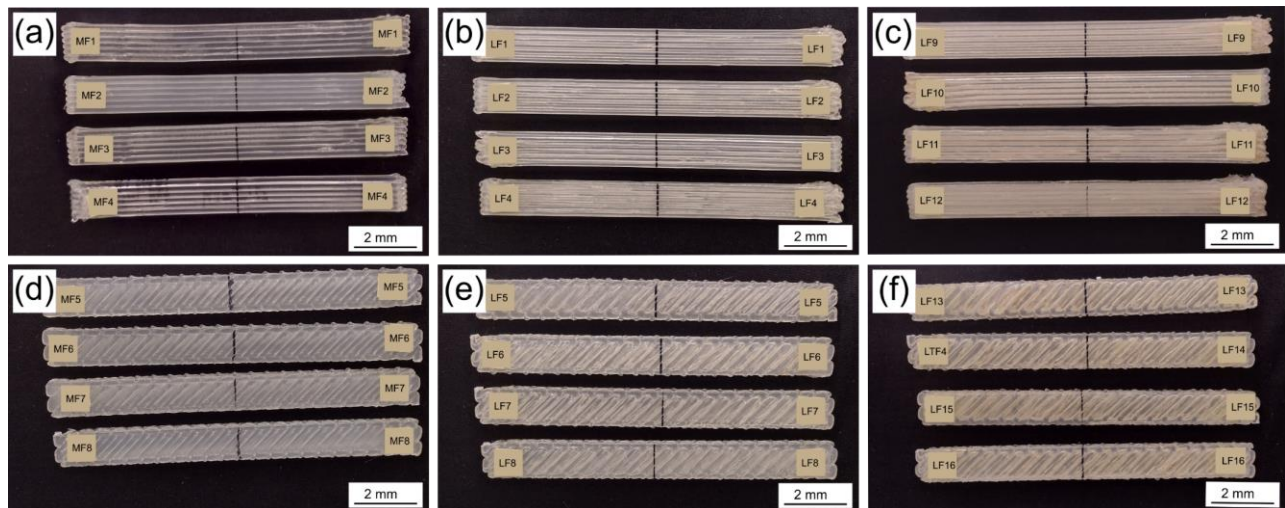


Figura 41: Probeta de flexión bajo norma estándar ASTM D790 para (a) Matriz/ 0° , (b) FP1/ 0° , (c) FP4/ 0° , (d) Matriz/ 45° , (e) FP1/ 45° y (f) FP4/ 45° .

Fuente: Autor.

4.2.3. Caracterización mecánica del material compuesto

Para evaluar las propiedades mecánicas, se utilizó una máquina universal de ensayos marca Shimadzu® modelo Autograph AG-X, adscrito al laboratorio de Polímeros del Instituto Tecnológico Metropolitano de la ciudad de Medellín (ITM), con celda de carga de 10 kN y software de procesamiento de datos Trapezium Lite X. Las pruebas de tracción se realizaron a una velocidad

de desplazamiento de la mordaza de 5 mm/min y una precarga de 1 kN. Se utilizó un extensómetro con una longitud de 25 mm para medir con precisión la deformación durante el ensayo de tracción, tal como se muestra en la Figura 42(a); mientras que los ensayos de flexión se realizaron utilizando un dispositivo de flexión de tres puntos con una distancia entre apoyos de 57,5 mm y una velocidad de ensayo de 1,53 mm/min, respectivamente. Dada la geometría de las mordazas y las irregularidades en la superficie de las muestras de impresión, los ensayos de flexión se realizaron con una disposición de las probetas con la cara plana de mayor área sobre los apoyos (Figura 42(b)). Antes de realizar los ensayos, las muestras fueron acondicionadas en una cámara climática, a una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa de 50 ± 10 %, durante un tiempo de 48 horas.

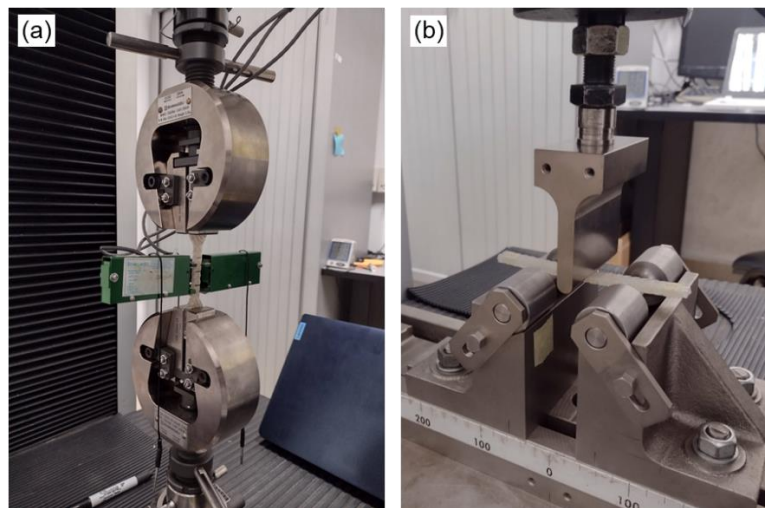


Figura 42: Montaje de probetas para ensayos de (a) de tensión bajo norma ASTM D638 y (b) de flexión bajo normas ASTM D790.

Fuente: Autor.

Finalmente, los datos obtenidos se procesaron y analizaron con el software Microsoft® Excel 365. A partir de los ensayos de tensión, se determinó el valor del esfuerzo último, el módulo de elasticidad y la deformación máxima acorde al procedimiento descrito en la Normas ASTM D638-14. Mientras que, para los ensayos de flexión, se determinó el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad a flexión tangente, según en el procedimiento establecido en la norma ASTM D790-17. En esta investigación, no se calculó la deformación máxima a flexión, ya que los ensayos se finalizaron cuando se alcanzó una deformación unitaria de 0,05 mm/mm, porque no se produjo el fallo final en el material, sin embargo, las propiedades mencionadas anteriormente se pueden establecer siempre y cuando se garantice un comportamiento elástico lineal en las muestras (ASTM

D790-17). Las superficies de fractura de las muestras ensayadas fueron observadas mediante un microscopio electrónico de barrido marca JEOL® modelo JSM-7100F, para evaluar los mecanismos de fallas presentados en las muestras bajo las condiciones establecidas.

4.3. Resultados

4.3.1. Caracterización del material de refuerzo

En la Figura 43, se muestran imágenes de la sección longitudinal de las fibras FP4 obtenidas a partir de microscopía SEM. La estructura de la fibra enrollada está dada por la distribución de las cuatro unidades de fibras de plátano que la conforman, que se doblan en formas de espiras retorcidas debido a la torsión inducida por el movimiento giratorio en el proceso de enrollado. Esta arquitectura de torsión forma una superficie irregular, que se extiende en toda su dirección longitudinal (Shah, et al., 2013). En la Figura 43(a), se puede observar la presencia de brechas en la intercara de las unidades de fibra, producto de la pobre compactación en la arquitectura de torsión de las fibras enrolladas (Teng, et al., 2021). De igual forma, se hace evidente la presencia de zonas en la que se produjo desfibrilación de las fibras elementales y fisuras en la superficie de las unidades de fibra, que se pudieron desarrollar durante el proceso de formación, tal como se muestran en las Figura 43(b) y Figura 43(c) (Teng, et al., 2021). Como las fibras son enrolladas por un extremo, al liberar la carga de torsión producto del movimiento rotatorio, se libera gran parte de la energía potencial acumulada, lo que produce un movimiento residual al sentido contrario del giro del tambor, que permite una recuperación elástica de las fibras (Cooper, et al., 2017) (Ozkaya, et al., 2010). Este movimiento puede permitir que se pierda gran parte de la torsión en las fibras enrolladas, posibilitando, además, la generación de defectos en la superficie de las unidades de fibras (Teng, et al., 2021).

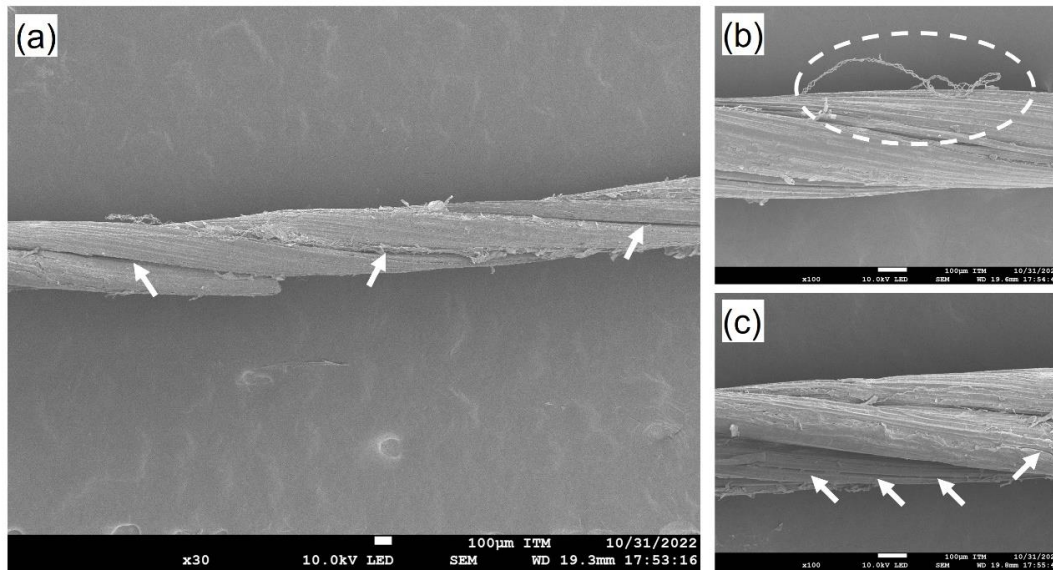


Figura 43: Imagen SEM de las fibras FP4 enrolladas (a) sección longitudinal aumentada a 30x, (b) y (c) imágenes SEM aumentadas a 100x.

Fuente: Autor.

Una de las estructuras más simples y ampliamente aceptada de un hilo enrollado, es el modelo “*Splied twist*”, donde se considera que las unidades de fibras son distribuidas de forma simétrica con un ángulo de torsión constante, dentro de un cilindro recto (Naik & Madhavan, 2000). A partir de esta estructura idealizada, se asume que el área de sección transversal del hilo enrollado será igual al área circular plana de diámetro D (Figura 44(a)). Aunque este modelo puede generar errores de cálculo en las propiedades mecánicas de las fibras FP4 enrolladas, en esta investigación fue considerado como una estimación para determinar el área aparente de las fibras enrolladas obtenidas. En la Figura 44(b), se muestra la distribución del **diámetro equivalente** medido de las fibras FP4. El diámetro equivalente fue de $348,59 \pm 62,27 \mu\text{m}$, con una distribución de frecuencia que se extiende en el rango de los 230 a 580 μm , respectivamente. La mayor frecuencia de datos se encontró entre el intervalo de 300 a 400 μm , con un valor en el pico más alto de 47%. En la Figura 44(b) también se muestran las medidas de tendencia central de la distribución de frecuencia para el diámetro de las fibras FP4 enrollada. Como la mediana (D_{50}), la moda y la media presentaron valores similares, se puede considerar que los diámetros de las fibras FP4 conformadas, presentaron uniformidad y consistencia (Goos & Meintrup, 2015).

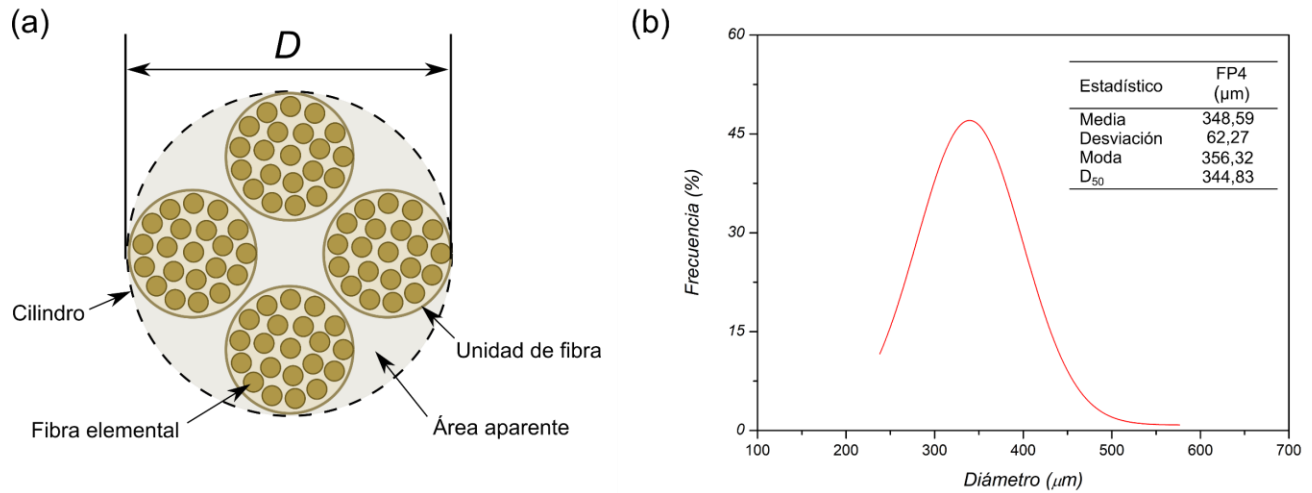


Figura 44: Distribución de frecuencia para el diámetro de las fibras FP4 enrolladas.

Fuente: Autor.

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**, se muestran las propiedades mecánicas de las fibras utilizadas como material de refuerzo en esta investigación. Para las fibras enrolladas se obtuvo un valor en el esfuerzo máximo y el módulo de Young de $94,42 \pm 23,6$ MPa y $5,37 \pm 1,2$ GPa, respectivamente, representando una disminución en la media muestral del 61 y 70% con relación a las propiedades registradas de las fibras FP1 por los proveedores. Este comportamiento puede atribuirse a los efectos negativos que se generan durante la torsión de los haces de fibras, por el proceso de enrollado, disminuyendo la resistencia a tensión de las fibras FP4 (Teng et al. 2021). Asimismo, la arquitectura de torsión obtenida puede ocasionar deficiencias en la transferencia de los esfuerzos entre las unidades de fibras por la diferencia entre la dirección de la carga y su orientación, lo que influye en la respuesta mecánica del material calculado (Dalfi, et al., 2021) (Shah, et al., 2013). Por otro lado, la deformación que se obtuvo para las fibras enrolladas fue de $2,70 \pm 1,1$ % que representa un aumento en la media muestral del 50%, en comparación a la deformación obtenida para las fibras FP1, y que puede estar asociado a la distribución de la carga entre las fibras individuales que permiten prolongar la ruptura prematura del hilo enrollado sometido a tensión (Dalfi, et al., 2021).

Tabla 23: Propiedades mecánicas para las dos configuraciones de refuerzo.

Denominación	Esfuerzo máximo (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Deformación (%)	Información
FP1	$247,5 \pm 162,1$	$17,9 \pm 15,1$	$1,8 \pm 0,3$	Proveedores
FP4	$94,42 \pm 23,6$	$5,37 \pm 1,2$	$2,70 \pm 1,1$	Autores

En la Figura 45, se muestra las curvas representativas del esfuerzo vs deformación de los materiales de refuerzo utilizados en esta investigación. Las fibras FP1 muestran un comportamiento lineal antes de la ruptura, que puede estar asociado a una fractura predominantemente frágil (Montoya & Negrete., 2022), mientras que en la fibra FP4, se presentó una transición en el esfuerzo antes del fallo total del hilo. Esta transición puede ser atribuida al efecto de la arquitectura de torsión de los hilos enrollados, que favorecen la distribución de la carga axial entre las unidades de fibras individuales, permitiendo una recuperación del comportamiento elástico cuando se produce una ruptura prematura de un haz de fibra, prolongando la fractura final del material (Teng, et al., 2021). Esta característica puede mejorar en cierta forma, la deformación de los materiales compuestos con matriz termoplástica (Dalfi, et al., 2021).

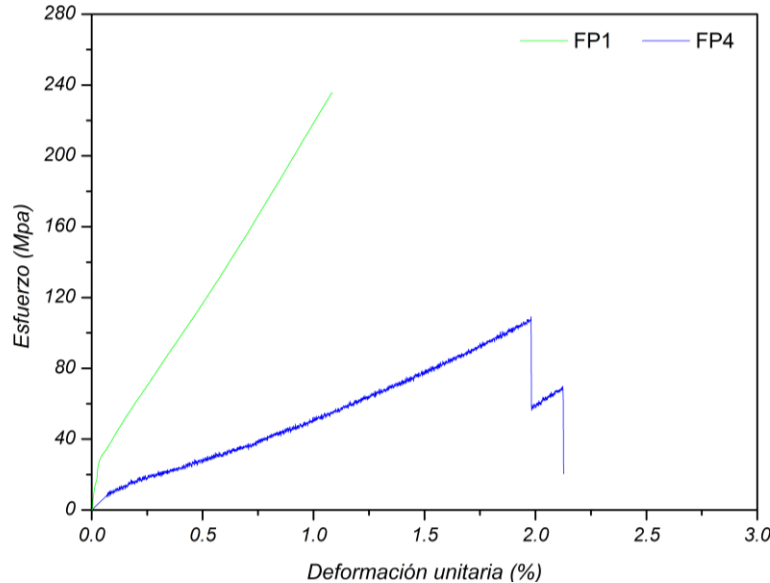


Figura 45: Curva de esfuerzo vs deformación de los materiales de refuerzos utilizados.
Fuente: Autor.

4.3.2. Propiedades mecánicas del material compuesto

4.3.2.1. Resistencia a tensión

En la Tabla 24, se muestran las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados, para cada uno de los tratamientos y para el material base, respectivamente. Para cada propiedad, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en las diferentes series de ensayos, y se estableció como valor de respuesta, incluyendo su respectiva desviación estándar (ASTM D638, 2014). El valor en el contenido de fibra para cada muestra experimental, también se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24: propiedades de tensión de las muestras fabricadas.

Muestras	Contenido de fibra (%)	Resistencia a tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación (%)
FP1/ [0°]	0,96 ± 0,06	48,61 ± 0,62	2,82 ± 0,10	6,14 ± 0,37
FP1/ [45°]		36,26 ± 0,83	2,87 ± 0,11	6,25 ± 0,86
FP4/ [0°]	3,98 ± 0,09	46,95 ± 0,53	2,80 ± 0,11	6,14 ± 0,81
FP4/ [45°]		30,35 ± 2,14	2,46 ± 0,10	6,74 ± 1,49
Matriz/ [0°]	Sin fibra	49,98 ± 0,73	2,88 ± 0,01	5,75 ± 0,31
Matriz/ [45°]		33,01 ± 2,87	3,22 ± 0,58	4,75 ± 0,57

En la Figura 46, se muestran los resultados obtenidos del esfuerzo último a tensión y el módulo de elasticidad de las muestras ensayadas. Para el grupo de materiales termoplásticos impregnados con fibras de plátano a una orientación de 0°, se pudo evidenciar una disminución entre los valores promedios de la resistencia a tensión, al aumentar la fracción de refuerzo del material compuesto obtenidos mediante las configuraciones de fibras FP1 y FP4. Para una unidad de fibra FP1, la resistencia media a tensión disminuyó un 2,74%, con relación al valor obtenido del material base, mientras que para las fibras enrolladas se tuvo una disminución del 6,05%, respectivamente. Aunque las muestras con fibras enrolladas presentaron un contenido de refuerzo de 3,98 %, la tendencia a la disminución en su resistencia a tensión puede estar influenciado por la naturaleza del material de refuerzo utilizado. Autores como Dalfi et al. (2021), han reportado que, la arquitectura de torsión de las fibras enrolladas no favorece a la penetración de los haces de fibra en el material polimérico, debido a la falta de permeabilidad que dificulta su impregnación en la matriz termoplástica (Dalfi, et al., 2021). Asimismo, se ha encontrado que la orientación adoptada por los

haces de fibra, debido a la torsión, puede influir en la respuesta mecánica del material, ya que su estructura helicoidal puede afectar la transferencia efectiva del esfuerzo dentro del mismo (Shah, et al., 2013). Lo cual puede evidenciarse en la respuesta a tracción de cada configuración de refuerzo, tal como se mostró en la sección anterior, donde el esfuerzo máximo de las fibras enrolladas (FP4) disminuyó un 61% en comparación a una sola unidad de fibra de plátano (FP1), respectivamente. Por otro lado, para las muestras fabricadas con una orientación de 45° , se evidenció un comportamiento algo diferente, donde aparentemente se tuvo un aumento y disminución de la media muestral de la resistencia a tensión del material compuesto obtenido con contenidos de fibra de 0,96 y 3,98 %, con relación al material base. Dada que la dispersión de los datos obtenidos para el material sin refuerzo mostró una alta variabilidad, no se puede concluir, si el cambio en la variable de respuesta puede atribuirse al efecto de la variación del contenido de fibra de refuerzo. Sin embargo, en la literatura se ha encontrado que la baja adhesión entre cordones de deposición para orientaciones de deposición de 45° , pueden afectar la respuesta a tracción del material termoplástico (Zhang & Osswald, 2019). En la Figura 46, también se hace evidente el efecto de la orientación sobre la resistencia a tensión del material impreso, donde los valores del esfuerzo último son menores para una orientación de 45° . Este comportamiento puede estar asociado al hecho de que las fibras impregnadas en el material termoplástico con una orientación de 45° , no soportan completamente la carga axial durante el ensayo de tracción, por lo que gran parte de los esfuerzos son soportados por la matriz de PLA (Terekhina, et al., 2021).

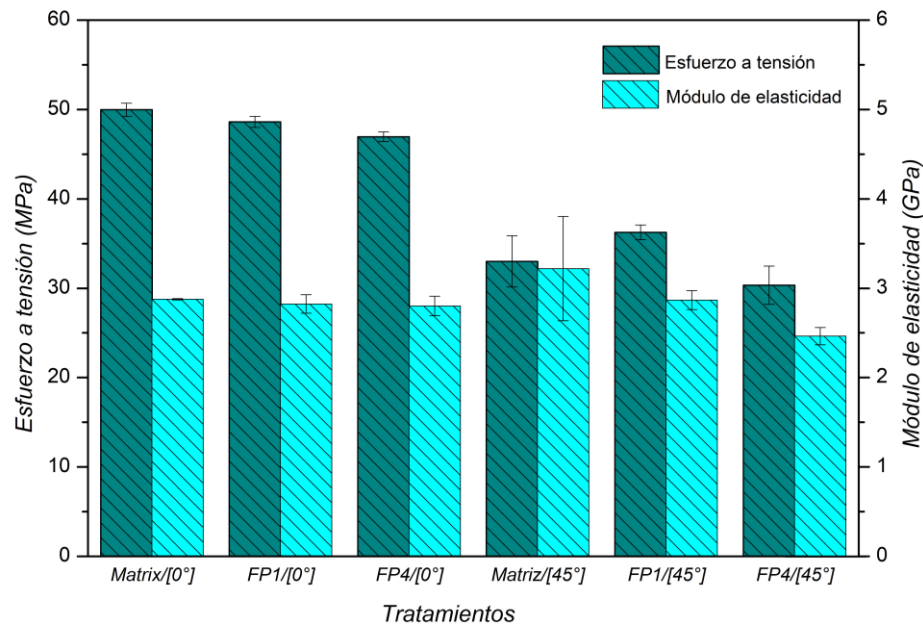


Figura 46: Esfuerzo y módulo de elasticidad a tensión para material compuesto y material base.
Fuente: Autor.

Con relación al módulo de elasticidad, en la En la Tabla 24, se muestran las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados, para cada uno de los tratamientos y para el material base, respectivamente. Para cada propiedad, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en las diferentes series de ensayos, y se estableció como valor de respuesta, incluyendo su respectiva desviación estándar (ASTM D638, 2014). El valor en el contenido de fibra para cada muestra experimental, también se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24, también se pudo apreciar que el compuesto impregnado fibras FP4 enrolladas, presentó el menor valor obtenido $2,46 \pm 0,10$ GPa, con relación a las demás muestras impresas. Autores como Shah et al (2013), asocian este comportamiento a la impregnación obstaculizada de la fibra enrolladas sobre la matriz polimérica, gracias a la falta de penetración por la arquitectura de torsión generando una débil intercara, por lo que no transfiere las cargas efectivamente. De igual forma, en la En la Tabla 24, se muestran las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los ensayos de tracción realizados, para cada uno de los tratamientos y para el material base, respectivamente. Para cada propiedad, se calculó la media aritmética de los valores obtenidos en las diferentes series de ensayos, y se estableció como valor de respuesta, incluyendo su respectiva desviación estándar (ASTM D638, 2014). El valor en el contenido de fibra para cada muestra experimental, también se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24, también se hace evidente un aumento aparente de la deformación en las muestras con mayor contenido de fibra, que se puede atribuir a la capacidad de deformación de las fibras enrolladas con relación a una unidad de fibra individual, tal como se evidenció en la sección anterior.

La Figura 47, muestra las micrografías de la superficie de fractura de las probetas de material compuestos ensayadas a tensión. Para las muestras con contenido de refuerzo de 0,96% y una orientación de 0° , se puede evidenciar una mejor condición de impregnación del haz de fibra de plátano en el material termoplástico, si se compara con los resultados mostrados del capítulo anterior (Figura 32). Este comportamiento puede atribuirse al efecto de la temperatura y velocidad de impresión sobre la formación de porosidades en la intercara del material compuesto (Cheng, et al., 2021). Para los parámetros establecidos en esta segunda corrida experimental (Temperatura de 195°C y velocidad de impresión de 300 mm/min), el nivel de porosidad estimada fue de 2,74%, representando una disminución del 45,82% con relación al nivel de porosidad estimada para las temperatura y velocidad utilizadas en la primera corrida experimental (Temperatura de 200°C y velocidad de impresión de 250 mm/min). Para las muestras FP1/[45°], se observó desprendimiento de la fibra de plátano en la matriz o “pull-out” de la fibra, que se hace evidente por la aparición de huellas en el material termoplástico. Este fenómeno también fue encontrado por Nguyen et al. (2022), en fibras del pseudotallo del plátano sin tratar impregnadas en ácido Poliláctico, quienes lo atribuyeron a las bajas condiciones de adhesión debido a la naturaleza hidrofílica de la fibra natural y la naturaleza hidrofóbica de la matriz termoplástica. Para los compuestos con mayor contenido de fibra, se observó el efecto de la arquitectura de torsión de las fibras enrolladas sobre el PLA, evidenciándose desprendimientos de las unidades de fibra de plátano producto de una débil impregnación por falta de penetración de la matriz en el refuerzo (Shah, et al., 2013). Este suceso, probablemente, pudo ocasionar la disminución de la resistencia a tensión para el contenido más alto de refuerzo, registrados en esta investigación.

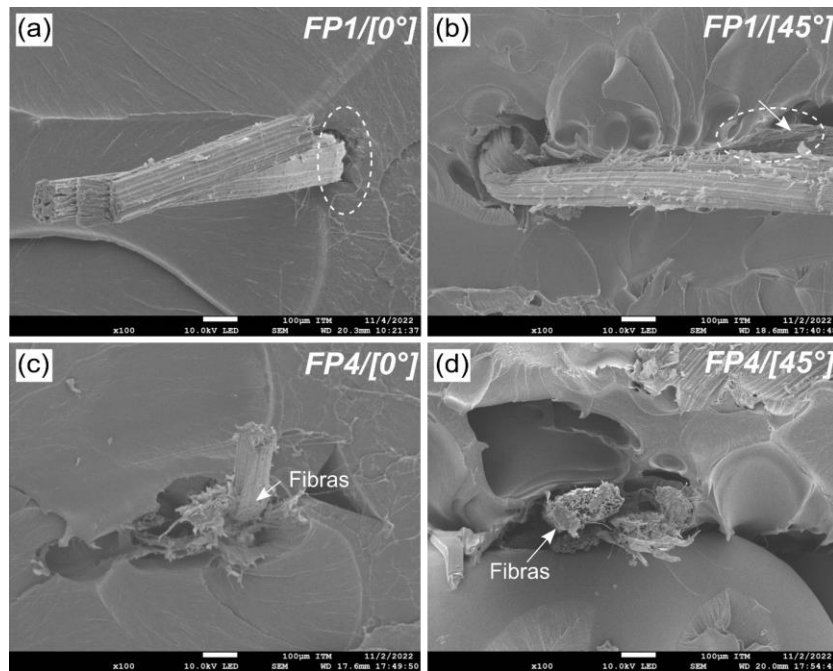


Figura 47: imágenes de SEM de la superficie de fractura a tensión para las muestras de compuesto con tratamientos: (a) FP1/ [0°], (b) FP4/ [0°], (c) FP1/ [45°] y FP4/ [45°], con aumento de 100x.

Fuente: Autor.

4.3.2.2.Resistencia a flexión

En la Tabla 25, se muestran las propiedades mecánicas a flexión obtenidas a partir de los ensayos realizados para cada uno de los tratamientos y para el material base, respectivamente. Tal como se realizó para las propiedades a tensión, los valores registrados en la Tabla 25 para cada propiedad, se establecieron a partir de la media aritmética de los valores obtenidos en las diferentes series de ensayos, incluyendo su respectiva desviación estándar.

Tabla 25: Propiedades de flexión de las muestras fabricadas.

Tratamientos	Contenido de fibra (%)	Esfuerzo último (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
FP1/ [0°]	0,96 ± 0,06	75,88 ± 1,81	2,63 ± 0,14
FP1/ [45°]		70,07 ± 5,17	2,62 ± 0,19
FP4/ [0°]	3,98 ± 0,09	75,21 ± 2,46	2,63 ± 0,10
FP4/ [45°]		66,24 ± 7,74	2,59 ± 0,20
Matriz/ [0°]	Sin fibra	83,36 ± 8,74	2,98 ± 0,20
Matriz/ [45°]		67,61 ± 7,70	2,55 ± 0,16

En la Figura 48, se muestran los resultados obtenidos del esfuerzo a flexión y el módulo a flexión de las muestras ensayadas. Para el grupo de materiales termoplásticos impregnados con fibras de plátano a una orientación de 0° , no se evidenció un cambio significativo en la media muestral del esfuerzo a flexión obtenido, para las dos condiciones de contenido de refuerzo logradas con las configuraciones FP1 y FP4. Asimismo, si se comparan con el valor del esfuerzo del material base, se tuvo una disminución del 8,97 y 9,78 %, respectivamente. La desviación estándar de los datos muestra que el esfuerzo a flexión para el contenido de fibra de 0,96 y 3,98% son estadísticamente iguales, lo cual permite inferir que no se logró reforzar la matriz para condiciones de carga a flexión. Este comportamiento puede estar asociado a la falta de adhesión entre la fibra de plátano y la matriz de PLA, debido a una débil intercara entre los materiales. Se han encontrado en la literatura que una débil intercara, no permite una efectiva transferencia de esfuerzos entre la fibra y la matriz, lo que a su vez genera una deficiente respuesta mecánica de los compuestos termoplásticos impregnados (Liu, et al., 2018). Para ensayos de flexión esto es un muy importante, ya que, a diferencia de los ensayos a tensión, donde se asume que gran parte de la carga es soportada por la fibra, la trayectoria de la fuerza de flexión afecta tanto a la fibra de refuerzo, como a las múltiples intercaras del material (Tian, et al., 2016). Estos resultados sugieren, que el aumento del contenido de fibra con la configuración de refuerzo utilizado no contribuyó al refuerzo de la matriz en la dirección longitudinal. Para los materiales fabricados a una orientación de 45° , se obtuvieron valor de esfuerzo a flexión $70,07 \pm 5,17$ MPa para el contenido de fibra de baja, y $75,21 \pm 2,46$ MPa para el contenido de alta, respectivamente. Al considerar la desviación estándar de estos dos valores, y comparándola con el valor obtenido de para el material base, no se observan diferencia entre la resistencia a flexión de los materiales, a pesar que para la configuración FP1/[45°] se haya obtenido un aumento en la media muestral del 11% con relación al material base. Este comportamiento se le puede atribuir a la baja adhesión entre capas de deposición para a una orientación de 45° (Zhang & Osswald, 2019). En la Figura 48, también se hace evidente el efecto de la orientación sobre la resistencia a flexión del material impreso, donde los valores del esfuerzo son menores para una orientación de 45° . Este comportamiento puede estar asociado al carácter anisotrópico de las fibras naturales (Woigk, et al., 2019).

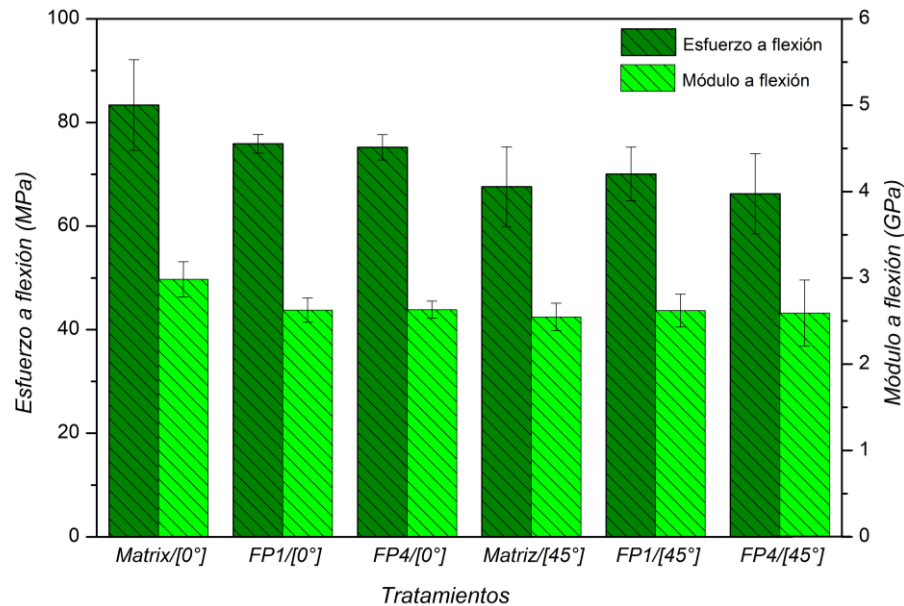


Figura 48: Esfuerzo y módulo a flexión para material compuesto y material base.
Fuente: Autor.

En la Tabla 25, también se puede apreciar que los compuestos impregnados con fibra de plátano no presentaron ningún cambio significativo con relación al módulo de elasticidad, sin embargo, se obtuvo un valor más elevado para la matriz base con una orientación de 0°, de $2,98 \pm 0,20$ GPa. Por lo tanto, es posible que la rigidez del material compuesto pudo estar comprometida por la débil intercara obtenida entre la fibra de plátano y la matriz de PLA.

En la Figura 49, se muestran las micrografías de la superficie de fractura a flexión de las muestras de material compuestos ensayadas a flexión. Para las fibras con una orientación de 0°, se puede evidenciar que la falla del material es debida a la fractura del PLA por los estados de esfuerzo a flexión, y por el desprendimiento de la fibra de la matriz, producto de una débil adhesión. El mismo comportamiento se puede evidenciar en la muestra con orientación de 45°, donde la transmisión de la carga generó desprendimiento de la fibra o “pull-out” de la fibra, atribuido a los problemas en la intercara del material (Nguyen, et al., 2022). Para los compuestos con mayor contenido de fibra, se observó nuevamente el efecto de la arquitectura de torsión de las fibras enrolladas, evidenciándose desprendimientos de las unidades de fibra de plátano y la generación de cavidades en la intercara por la falta de impregnación del refuerzo (Shah, et al., 2013).

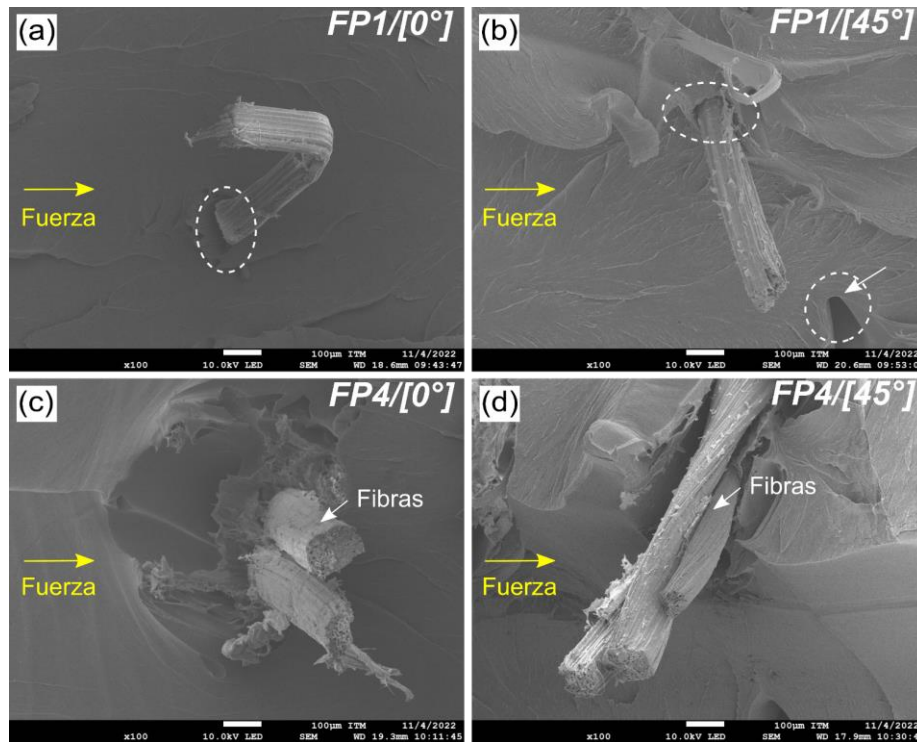


Figura 49: imágenes de SEM de la superficie de fractura a flexión para las muestras de compuesto con tratamientos: (a) FP1/ [0°], (b) FP4/ [0°], (c) FP1/ [45°] y FP4/ [45°], con aumento de 100x.

Fuente: Autor.

4.4. Conclusiones

En este capítulo, se evaluó la resistencia mecánica de un material termoplástico impregnado con fibra del pseudotallo del plátano, fabricado mediante el método de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, variando la orientación y el contenido de fibra. Los resultados más relevantes se resumen a continuación:

1. Las fibras enrolladas utilizadas para la fabricación del material compuesto con contenidos de fibra de 3,98%, presentaron una menor resistencia a tensión en comparación a las unidades de fibras FP1. Este suceso fue atribuido a la arquitectura características de torsión obtenidas, que ocasionaron posiblemente una deficiente transferencia de los esfuerzos entre los haces de fibra.
2. La resistencia a tensión del material compuesto disminuyó al variar el contenido de fibra, utilizando configuraciones de refuerzo para una unidad de fibra y cuatro fibras enrolladas de plátano. Este comportamiento fue asociado a la débil intercara entre la fibra y la matriz, que produjo una baja adhesión entre los materiales. El mismo comportamiento fue



observado al variar la orientación de las fibras, probablemente producido por la falta de transferencia de la carga axial, por lo que gran parte de los esfuerzos fueron soportado por la matriz de PLA.

3. La resistencia a flexión del material compuesto fabricado disminuyó al variar la orientación de fibra, que fue asociado al comportamiento anisotrópico de las fibras de plátano. Con relación al contenido de refuerzo, no se observaron cambios, atribuido a las condiciones débiles de la intercara de los materiales.

Capítulo V. Influencia de la variación del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas de compuesto termoplástico reforzado con fibra de plátano

5.1. Introducción

El contenido y la orientación de fibra son factores importantes que puede influenciar las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Algunos investigadores han concluido que, al aumentar el contenido y para orientaciones preferenciales de fibras, las propiedades mecánicas de los materiales compuestos pueden afectarse significativamente (Sardinha, et al., 2019). Por tal motivo, en este capítulo se estudia el efecto de estos factores mediante un diseño estadístico experimental factorial, a través de análisis de varianza ANOVA con un 95% de confianza.

5.2. Materiales y métodos.

5.2.1. Diseño experimental

En este estudio, se planteó un diseño experimental factorial 2^2 para evaluar el efecto del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas de tensión y flexión de los materiales compuestos obtenidos mediante la Fabricación de Filamento Fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, tal como se mencionó en el capítulo II. Los niveles de los parámetros de entradas se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Factores principales y niveles correspondientes.

Ítem	Factores principales	Niveles		
		Identificación	Bajo	Alto
1	Contenido (%)	A	0,96	3,98
2	Orientación (°)	B	0	45

Utilizando el software Statgraphics® versión 19.1.2. se formularon 16 conjuntos experimentales mediante la combinación de los diferentes niveles de los factores principales, mientras que los demás parámetros del proceso a lo largo de la experimentación se mantuvieron constantes durante

la fabricación de las muestras. En la Tabla 27, se muestra la matriz experimental seguida y codificada.

Tabla 27: Matriz de diseño experimental.

No.	Tratamientos	Contenido (%)	Orientación (°)
1	T1	Bajo	Bajo
2	T2	Bajo	Alto
3	T3	Alto	Bajo
4	T4	Alto	Alto
5	T1	Bajo	Bajo
6	T2	Bajo	Alto
7	T3	Alto	Bajo
8	T4	Alto	Alto
9	T1	Bajo	Bajo
10	T2	Bajo	Alto
11	T3	Alto	Bajo
12	T4	Alto	Alto
13	T1	Bajo	Bajo
14	T2	Bajo	Alto
15	T3	Alto	Bajo
16	T4	Alto	Alto

5.3. Resultados

5.3.1. Resultados experimentales

En la Tabla 28, se muestran los resultados obtenidos del diseño factorial propuesto para cada una de las variables de respuestas estudiadas.

Tabla 28: Resultados de las variables de respuesta.

No.	Resistencia a tensión (MPa)	Resistencia a flexión (MPa)
1	48,04	76,06
2	36,05	75,26
3	47,05	72,85
4	30,62	74,47
5	49,07	76,01
6	37,47	72,88
7	46,42	76,44
8	31,54	68,27
9	48,11	73,53
10	35,60	68,65
11	46,69	73,49
12	27,26	66,39
13	49,23	77,93
14	35,92	63,47
15	47,65	78,05
16	31,99	55,84

5.3.2. Efecto del contenido y la orientación sobre la resistencia a tensión

Para determinar el efecto del contenido y la orientación, sobre la resistencia a tensión de los materiales compuestos fabricados, se utilizó un análisis de varianza ANOVA con una significancia del 95%. Los valores del ANOVA se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29: ANOVA para la resistencia a tensión.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Contribución (%)	Observación
A: Contenido	57,28	1	57,28	38,61	0,0000	6,15	Significante
B: Orientación	838,30	1	838,30	565,02	0,0000	90,00	Significante
AB	18,03	1	18,03	12,16	0,0045	1,94	Significante
Residuos	17,80	12	1,48				
Total	931,41	15					

De acuerdo con la columna del valor-P, cuyos valores son menores al 0,05, se infiere que los efectos del contenido, la orientación y la interacción de estos factores, son significativos en la resistencia a tensión de los materiales fabricados, con una contribución del 6,15; 90 y 1,94 %, respectivamente. Cualitativamente hablando, este resultado muestra que el contenido y la orientación de la fibra de refuerzo, además de los efectos combinados de estas dos variables, tienen efecto sobre la tensión

del material compuesto desarrollado. Sin embargo, al evaluar los supuestos para la verificación del ANOVA, tal como se muestra en Figura 50, se identificó un valor alejado (señalado en rojo) de los demás datos, en el gráfico de residuales y en el gráfico de probabilidad normal, que puede estar atribuido a un valor atípico en la medición para el tratamiento correspondiente (Gutiérrez, 2012).

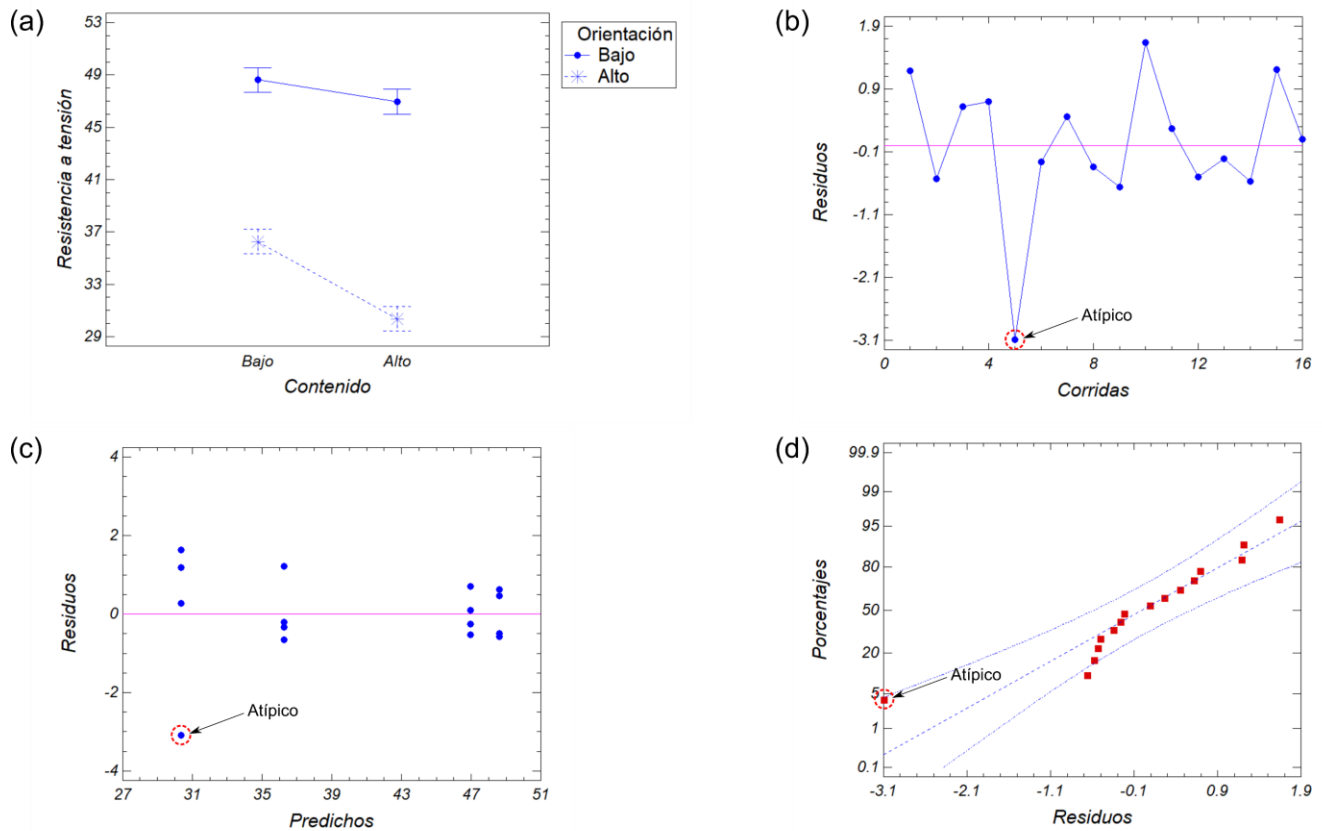


Figura 50: (a) Gráfica de interacciones, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos para la resistencia a tensión.

Fuente: Autor.

En la literatura se considera que la presencia de un valor atípico puede introducir ciertas distorsiones en el análisis de la varianza ANOVA, por lo que es recomendado tomar una decisión para su tratamiento (Gutiérrez, 2012) (Díaz, 2009). Autores como Montgomery D. (2012), recomiendan que se haga la comparación en el análisis de varianza, tanto para los datos originales, como para los datos con el valor atípico omitido, para estudiar su efecto en la significancia de los factores principales. De esta forma, en la Tabla 30, se muestra el ANOVA para el nuevo análisis de datos sin el valor atípico.

Tabla 30: ANOVA para resistencia a tensión modificado.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Contribución (%)	Observación
A: Contenido	39,45	1	39,45	85,89	0,0000	5,31	Significante
B: Orientación	719,69	1	719,69	1566,9	0,0000	96,84	Significante
AB	9,55	1	9,55	20,78	0,0008	1,28	Significante
Residuos	5,05	11	0,46				
Total	743,17	14					

A partir de la Tabla 30, se puede observar que los valores de la columna valor-P siguen siendo menores a 0,05, por lo tanto, este resultado puede ser suficiente para poder garantizar la validación del análisis de varianza ANOVA para la resistencia a tensión de los datos obtenidos, por lo que se puede concluir que el contenido, la orientación y la interacción de estos factores tienen un efecto significativo en la resistencia a tensión del material compuesto obtenido (Caminati, et al., 2022). Para entender el efecto de los factores y su interacción sobre la variable de respuesta, en la Figura 51, se muestra el gráfico de efecto de interacción. La significancia de la interacción detectada por el ANOVA se puede observar por el cambio relativo de las pendientes en las líneas. A medida que aumenta el contenido de refuerzo, claramente se observa una disminución de la resistencia a tensión en el material, que se ve afectada por la orientación. Para una orientación de 0° , los valores de la resistencia son mucho más grandes con un contenido de refuerzo de 0,96%, mientras que, para el contenido de refuerzo más alto, se ve claramente una disminución en la variable de respuesta. Para una orientación de 45° , se muestra la misma tendencia, ya que con un contenido de refuerzo de 3,98%, el material compuesto toma valores en resistencia a tensión en un rango mucho menor. Estos resultados contrastan con lo mencionado en el capítulo anterior, que puede estar asociado a una mala adhesión entre ambos materiales producto de una débil intercara, que no permite una buena distribución de los esfuerzos entre la matriz y el material de refuerzo. Del ANOVA, se puede observar que el nivel de contribución en la variabilidad de la media es mucho mayor por el efecto de la orientación, en comparación al contenido de refuerzo y la interacción de los factores, que puede estar atribuido al hecho de que las fibras impregnadas en el material termoplástico con orientación de 45° , no soportan completamente la carga axial durante el ensayo de tracción, por lo que gran parte de los esfuerzos son soportados por la matriz de PLA (Terekhina, et al., 2021). De igual forma, se ha encontrado en la literatura, que, por las características del proceso, las

orientaciones de impresión juegan un papel importante en la transmisión de la carga, ya que influye en la unión entre las capas adyacentes (Kabir, et al., 2020).

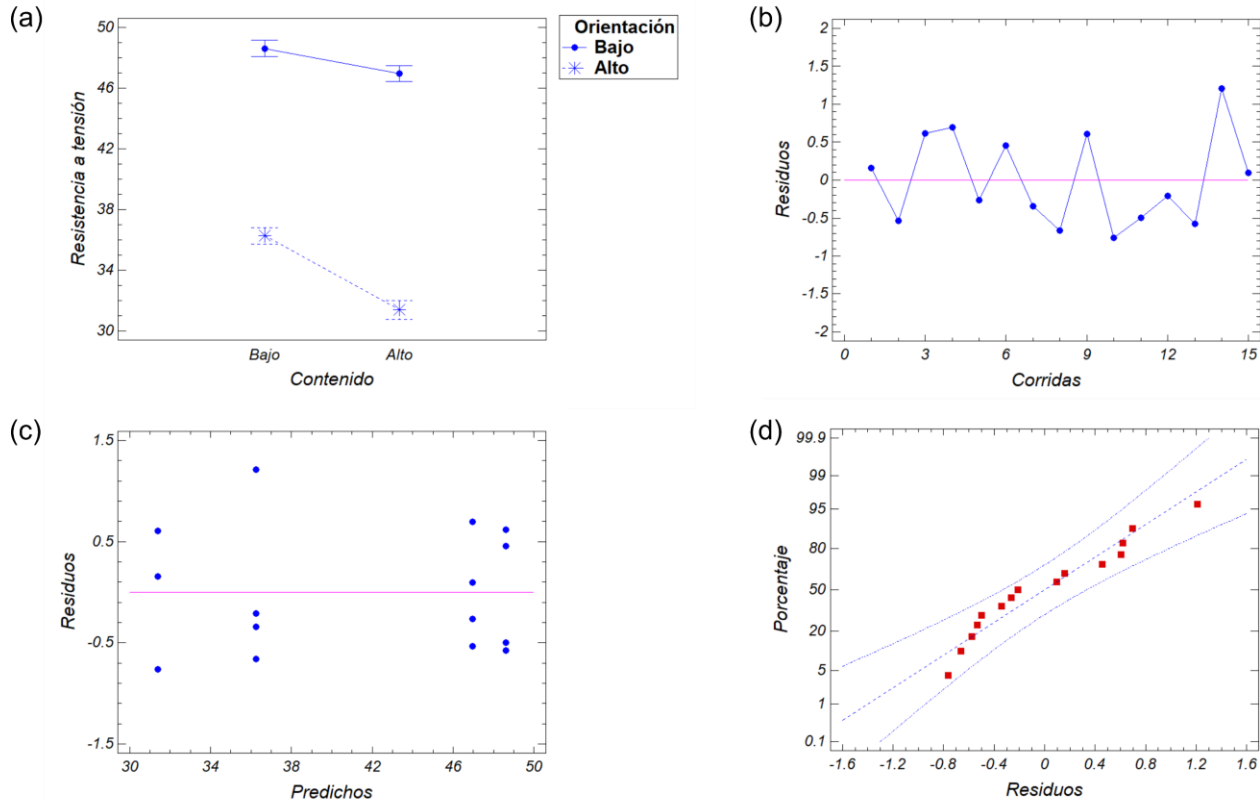


Figura 51: (a) Gráfica de interacciones, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos para la resistencia a tensión modificados.

Fuente: Autor.

Los supuestos de independencia, de homogeneidad de la varianza y de normalidad de los residuos, se pueden verificar a partir de las Figura 51(b), (c) y (d), respectivamente. En la Figura 51(b), se muestra el gráfico de dispersión de residuos contra el orden de corrida experimental. Se puede apreciar claramente que no se presenta alguna tendencia o patrón definido en los datos obtenidos, por lo que no existe correlación entre los errores estadísticos del ANOVA. De esta forma se puede concluir que los datos provienen de un diseño experimental completamente aleatorizado. En la Figura 51(c), se muestra el gráfico de residuos contra los valores predichos, en la cual se observa que se cumple satisfactoriamente el supuesto de varianza constante, al caer todos los puntos de forma aleatoria alrededor de la banda horizontal. En la Figura 51(d), se muestra el gráfico de probabilidad normal de los residuos, en el cual se puede observar que los residuos se aproximan

mejor a la línea ajustada dentro del intervalo de confianza, por lo que se puede asumir que se cumple satisfactoriamente el supuesto de normalidad para el ANOVA con la omisión del valor atípico. De esta forma, se rechaza la hipótesis nula establecida en esta investigación y se acepta la hipótesis alternativa, ya que los resultados muestran que tanto la orientación como el contenido de fibra, y su interacción, sí afectan significativamente a la resistencia a tensión del material compuesto reforzado con fibra de plátano a partir del proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*. Pero la naturaleza de esta afectación es debido a una tendencia en la disminución de la respuesta analizada, ya que, para los niveles más altos de los dos factores principales, es decir, para un contenido de 3,98% y una orientación de 45°, la resistencia a tensión del material fue menor en comparación a los niveles más bajos.

5.3.3. Efecto del contenido y la orientación sobre la resistencia a flexión

Para determinar el efecto del contenido y la orientación, sobre la resistencia a flexión de los materiales compuestos fabricados, se utilizó un análisis de varianza ANOVA con una confianza del 95%. Los valores del ANOVA se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31: ANOVA para la resistencia a flexión.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P	Contribución (%)	Observación
A: Contenido	20,23	1	20,23	0,84	0,38	3,77	No significativa
B: Orientación	218,42	1	218,42	9,10	0,01	40,69	Significante
AB	9,90	1	9,90	0,41	0,53	1,84	No significativa
Residuos	288,19	12	24,02				
Total	536,75	15					

Estos resultados muestran que sólo la orientación tuvo un efecto significativo en la resistencia a flexión del material compuesto obtenido con una contribución del 40,69%. Por su parte, el contenido y la interacción de ambos factores no tienen influencia estadística en la variación de la respuesta acorde al valor-P obtenido. En la Figura 52(a), se muestra el diagrama de Pareto estandarizado correspondiente al ANOVA de la resistencia a flexión, en donde se representa en orden decreciente por su influencia, el efecto que produce cada factor y su interacción sobre la variable analizada (Miranda, et al., 2018). Dado que, la barra de orientación (B) supera la línea de referencia del efecto estandarizado que se encuentra a un valor de 2,26 su efecto es estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta con una confianza del 95% (Gutiérrez, 2012).

Asimismo, al estar representado en azul, indica que la variable se ve afectada negativamente, es decir, disminuye debido al aumento en el nivel del factor B, ya que la resistencia a flexión del material compuesto tiende a disminuir para una orientación de 45° . Este comportamiento puede estar atribuido al carácter anisotrópico de las fibras de plátano, como se mencionó en el capítulo anterior (Woigk, et al., 2019). En la Figura 52(b), se puede ver claramente que los puntos no siguen un patrón definido, por lo que se cumple satisfactoriamente el supuesto de independencia. Para determinar el supuesto de homogeneidad de la varianza de los residuos, se estableció el gráfico de residuales con relación a los valores predichos, como se muestra en la Figura 52(c). Se puede observar que los valores predichos en la columna del conjunto de datos para los tratamientos 2 y 4, muestran una mayor dispersión, con relación a los otros 2 grupos experimentales. Dada las condiciones no balanceadas de los puntos predichos en el gráfico de residuos, se decidió realizar la prueba de Bartlett para evaluar el supuesto de varianza constante para el ANOVA. De esta forma, si el valor-P obtenido por el estadístico de Bartlett es menor al 0,05; se concluye que no todos los tratamientos experimentales tienen varianza constante (Gutiérrez, 2012). En la Figura 52(c), se muestra que el valor-P del estadístico de prueba es de 0,102; por lo que el supuesto homocedasticidad de la varianza se cumple satisfactoriamente con un nivel de confianza del 95%. Además, la menor dispersión ocurre justo en los puntos donde la orientación es de 45° , lo cual refuerza las conclusiones obtenidas sobre el efecto de dicho factor mostrada en el diagrama de Pareto. En la Figura 52(d), se muestra el gráfico de probabilidad normal de los resultados experimentales para la resistencia a flexión. Los resultados indican que los datos experimentales de la variable de respuesta se aproximan a la línea ajustada y no se muestra una clara desviación de los puntos que señalen una conducta no normal, por lo que se concluye que no se viola el supuesto de normalidad. A partir de estos resultados se puede inferir que los niveles estudiados para la orientación, tiene un efecto significativo en la variable de respuesta. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula establecida en esta investigación para esta variable de respuesta, ya que los resultados muestran que la orientación afecta significativamente la resistencia a flexión del material compuesto reforzado con fibra de plátano a partir del proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*. Pero la naturaleza de esta afectación es debido a una tendencia en la disminución en la variable de respuesta analizada, ya que para el nivel más alto del factor orientación, la resistencia a flexión del material fue menor en comparación al nivel más bajo.

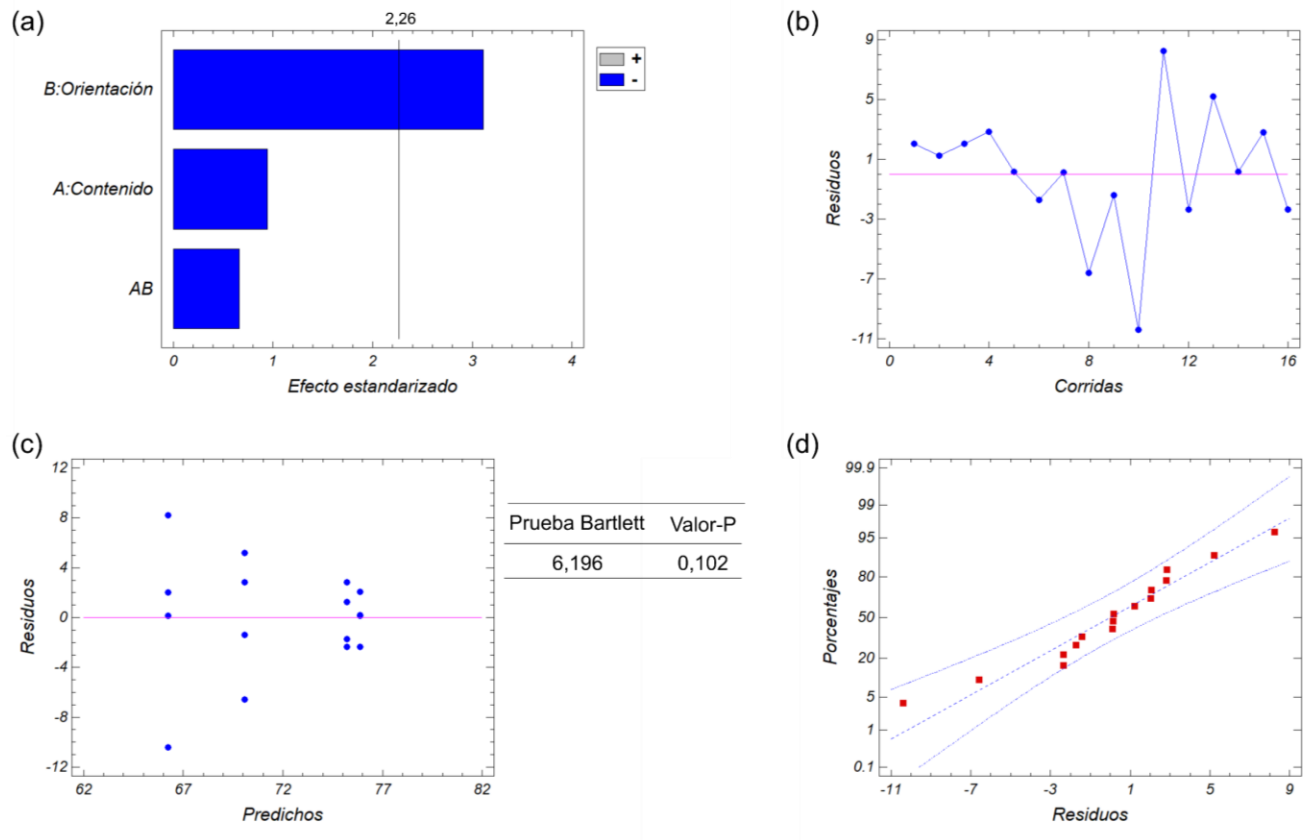


Figura 52: (a) Diagrama de Pareto estandarizado, (b) residuos vs corridas experimentales, (c) residuos vs valores predichos y (d) probabilidad normal de residuos, para la resistencia a flexión.

Fuente: Autor.

5.4. Conclusiones

En este capítulo, se evaluó el efecto del contenido y orientación de fibras sobre la resistencia mecánica de un material termoplástico impregnado con fibra del pseudotallo del plátano, fabricado mediante el método de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, mediante un diseño estadístico experimental por análisis de varianza ANOVA. Los resultados más relevantes se resumen a continuación:

1. Para los análisis de varianza ANOVA realizados con una 95% de confianza, de los datos originales y con la omisión del valor atípico, no se observó un cambio significativo en los valores de la columna valor-P asociada, siendo menores a 0,05 para cada uno de los factores estudiados. Lo que permite garantizar la validación del ANOVA para la resistencia a tensión de los datos obtenidos. Por lo que se pudo establecer, que tanto el contenido, la orientación y su interacción tienen un efecto significativo en la resistencia a tensión del

material compuesto fabricado. El primer hecho fue atribuido al efecto de la arquitectura de torsión de las fibras enrolladas y la débil intercara sobre la matriz y el refuerzo. De igual forma, el efecto de la orientación fue atribuido al hecho de que las fibras impregnadas *in-situ* en el material termoplástico con orientación de 45° , no soportan completamente la carga axial durante el ensayo de tracción, por lo que gran parte de los esfuerzos son soportados por la matriz de PLA.

2. Según el análisis ANOVA realizado para flexión con un 95% de confianza, se pudo establecer que sólo la orientación tuvo un efecto significativo en la resistencia a flexión del material fabricado. Este hecho fue atribuido a la disminución de la resistencia del material debido al cambio del factor orientación, donde la mayor dispersión observada ocurre en los tratamientos con una orientación de 45° , y que puede estar asociado al comportamiento anisotrópico de la fibra de plátano.

Conclusiones Generales y futuros trabajos

6.1. Objetivo específico I

Del objetivo I, que consiste en la implementación de la técnica de fabricación de filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ* para la fabricación de muestras de compuesto termoplástico reforzados con fibra del pseudotallo del plátano variando el contenido y la orientación de fibra, se puede concluir, que:

Para garantizar una buena deposición del material, sin que las fibras de plátano sufran daños en su integridad física, a partir del mecanismo de impregnación *in-situ*, se debe establecer una relación entre la longitud de filamento extruido y una longitud de material depositado aproximadamente a 1, lo cual fue asociado a la relación entre las velocidades de impresión y extrusión, para el proceso. Asimismo, al variar la orientación de fibra de los materiales impresos, no se evidenció cambios significativos en el contenido de fibra estimado, atribuido a la estabilidad del volumen de extrusión del material termoplástico. Por último, acorde al estudio de defectos microestructurales, se encontró que la velocidad de impresión tuvo mayor contribución a la formación de porosidades del material compuesto. Este hecho fue atribuido a las condiciones de mojabilidad de la matriz termoplástica sobre la fibra alcanzada para las diferentes velocidades de impresión. Si se reduce la velocidad de impresión, el tiempo de permanencia de la fibra en el cabezal durante el proceso de impresión aumenta, posibilitando la creación de sitios de nucleación de poros alrededor de la fibra por la disminución del ángulo de contacto dinámico en la superficie de esta. De igual forma, estos resultados hacen evidente el alto potencial del proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*, para la obtención de materiales compuestos de matriz termoplásticas reforzados con fibras de plátano continuas en condiciones experimentales, ya que a partir de los parámetros del proceso se pueden realizar la impresión de ambos materiales para la generación de volúmenes 3D.

6.2. Objetivo específico II

Del objetivo II, que consiste en determinar las propiedades mecánicas de tensión y flexión de las del compuesto termoplástico desarrollado y de matriz en estado puro, se puede concluir, que:

Las fibras enrolladas utilizadas para la fabricación del material compuesto con contenidos de fibra de 3,98%, presentaron una menor resistencia a tensión en comparación al material compuesto con contenido de 0,96% lo cual fue atribuido a la arquitectura característica de torsión obtenida, que ocasionaron una probable deficiente transferencia de los esfuerzos entre los haces de fibra. Por su parte, la resistencia a tensión del material compuesto tuvo una disminución al variar el contenido de fibra, utilizando configuraciones de refuerzo de una unidad de fibra y fibras enrolladas de plátano. Este comportamiento fue asociado a la débil intercara entre la fibra y la matriz, que produjo una mala adhesión de los materiales. El mismo comportamiento fue observado al variar la orientación de las fibras, produciendo transferencia deficiente de la carga axial, por lo que gran parte de los esfuerzos fueron soportados por la matriz de PLA. De igual forma, la resistencia a flexión del material compuesto disminuyó al variar la orientación de fibra, lo cual fue asociado al comportamiento anisotrópico de las fibras de plátano. Mientras que, con relación al contenido de refuerzo, no hubo un cambio significativo, atribuido a las condiciones débiles de la intercara de los materiales.

6.3. Objetivo específico III

Del objetivo III, que consistió en determinar la influencia de la variación del contenido y orientación de fibra en las propiedades mecánicas finales del material compuesto obtenido, se puede concluir, que:

A partir del diseño estadístico experimental, se estableció que tanto el contenido, la orientación y la interacción de los dos factores tuvieron un efecto significativo en la resistencia a tensión del material compuesto fabricado, con una contribución del 6,15; 90 y 1,94 %, respectivamente. El primer hecho fue atribuido a la débil intercara de la matriz y el refuerzo. De igual forma, el efecto de la orientación fue atribuido al hecho de que las fibras impregnadas por el material termoplástico con orientación de 45°, no soportaron completamente la carga axial durante el ensayo de tracción, por lo que gran parte de los esfuerzos fueron soportados por la matriz de PLA. De igual forma, para la resistencia a flexión se obtuvo un efecto en la variabilidad de la respuesta debido a la orientación, con una una contribución del 40,69%, atribuido al comportamiento anisotrópico de la

fibra de plátano. De esta forma, se rechazó la hipótesis nula establecida en la investigación para cada variable de respuesta, ya que los resultados muestran que existe un efecto significativo de por lo menos un factor en la resistencia mecánica del material compuesto reforzado con fibra de plátano a partir del proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) con impregnación *in-situ*.

6.4. Futuros trabajos

Como trabajo futuro, se propone realizar una modificación del cabezal de impresión para poder aumentar el contenido de fibra variando parámetros como altura de capa y ancho de trama, y así poder superar las limitaciones encontradas en esta investigación. Asimismo, se propone realizar un análisis en la intercara de la fibra sobre la matriz utilizando un proceso de funcionalización, para poder mejorar la adhesión de ambos materiales. Por último, realizar un estudio modelación computacional para el desarrollo de piezas estructurales con forma complejas y su evaluación experimental para análisis de impacto.

Anexos

7.1. Impresión con fibra a partir de equipo FFF

Para garantizar una continua impregnación de las fibras del pseudotallo del plátano en la matriz termoplástica de PLA, en esta investigación se siguieron dos procedimientos para la impresión del material compuesto, como se presentan a continuación.

7.1.1. Junta de PLA en fibras del pseudotallo del plátano

Las fibras de plátano extraídas del pseudotallo, contaron con una longitud nominal de 0,7 m, como se mencionó en el capítulo III. Por tal motivo, antes de realizar el proceso de impresión, las fibras utilizadas como refuerzo (FP1 y FP4) se unieron en sus extremos opuestos mediante una gota de PLA, para formar un hilo continuo. Esto permitió realizar impresiones con fibras continuas del material compuesto. En la Figura A1, se muestra la unión con PLA para formar un hilo continuo de hilo de fibra de plátano. Este procedimiento puede ocasionar dificultades en el proceso de impresión, ya que la fuerza de arrastre del PLA fundido hacia la fibra puede producir fracturas en la unión y ocasionar problemas en la impresión. Se recomienda realizar dicha unión de fibras para piezas pequeñas, como las utilizadas en el estudio de defectos microestructurales (Sección 3.2.2.7).

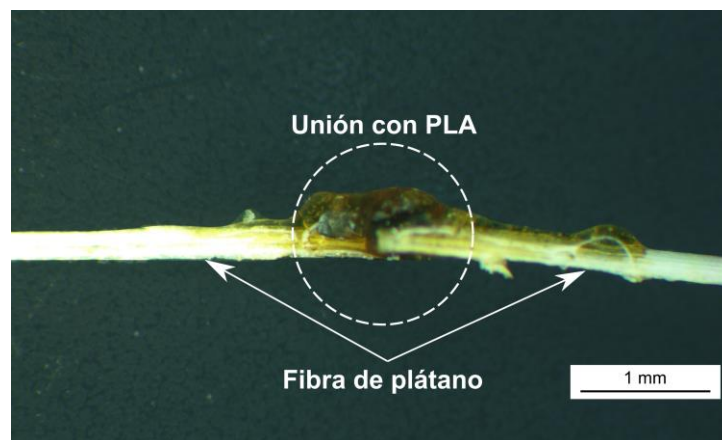


Figura A1: Unión entre fibras con PLA para formar un hilo continuo de fibra de plátano.

7.1.2. Adición de trayectorias en el código G para ingresar fibras

El código G es un archivo con comandos numéricos de programación CNC que se ingresa en la máquina de impresión, para el proceso de fabricación de piezas 3D, y que contiene todo el instructivo que entiende la impresora para hacer las diferentes operaciones, tanto de movimiento como comandos de operaciones. De esta forma, se establecieron líneas adicionales en el código G diseñado para las muestras, con el propósito de ingresar la fibra dentro del cabezal de impresión, a partir de un desplazamiento vertical hacia arriba y una extrusión de material. Esto permitió garantizar que la deposición de la fibra fue continua en el compuesto fabricado. La trayectoria y extrusión adicional fueron establecidas en el software Full Control Designer GCode y posteriormente visualizadas en Repetier Host o NC-Viewer. En la Figura A2 se muestra un ejemplo del procedimiento seguido. Se recomienda este procedimiento para volúmenes como los obtenidos con las probetas bajo la norma ASTM D638 o ASTM D790, siempre que el material de refuerzo utilizado no sea completamente continuo.

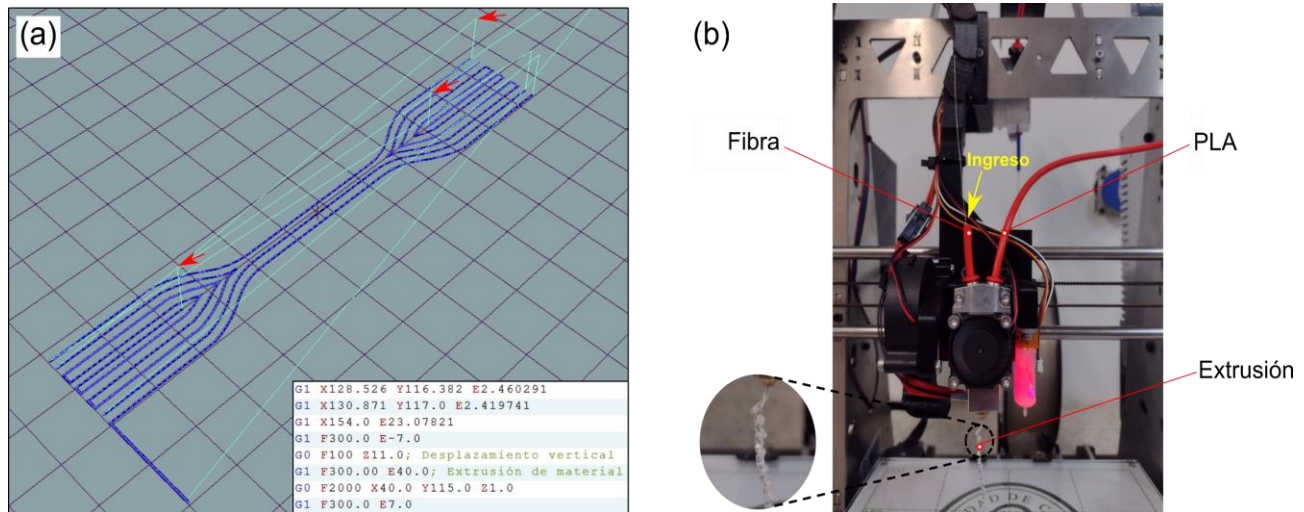


Figura A2: (a) Código G para el desplazamiento vertical del cabezal y extrusión adicional de material y
(b) Esquema del procedimiento.

7.2. Método de análisis de imágenes para determinar el nivel de porosidad

a) Para la identificación de los poros y el área de fibra (denominados a continuación como objetos) en la superficie de las muestras, se realizó un procedimiento de edición digital con el software Inkscape® sobre las imágenes obtenidas a 35x. Para ello, mediante líneas de contornos, los objetos fueron identificados con color bajo el modelo HSL. Para los poros fueron establecidos valores

alrededor de los siguientes porcentajes de H:0%, S:100%, L:30% y una transparencia del 70%. Mientras que al área de fibra se establecieron porcentajes de H:0%, S:0%, L:0% y transparencia del 50%, respectivamente. Se configuró el contraste de la imagen antes de la edición digital para facilitar el análisis por la técnica Thresholding de los objetos.

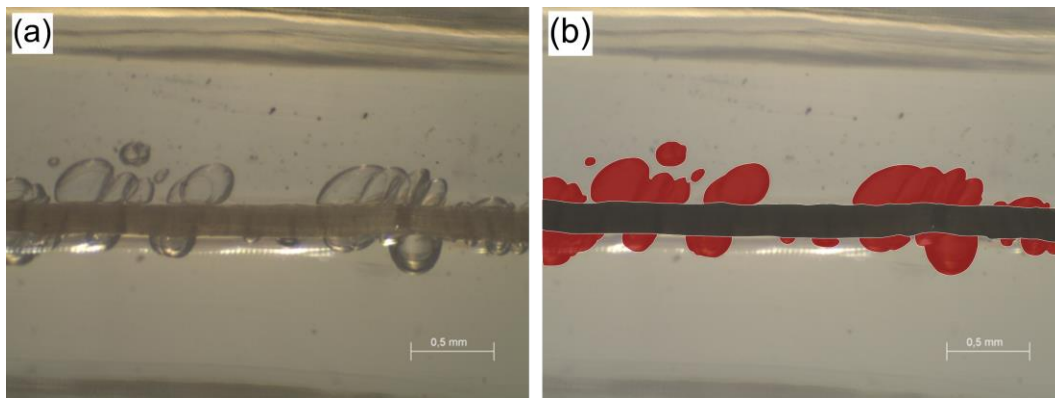


Figura A3: (a) Imagen original obtenida mediante el microscopio estereoscópico Leica® modelo EZ4 D y (b) Imagen editada mediante el software Inkscape®.

b) Posteriormente, las imágenes editadas fueron importadas en el software ImageJ® para el análisis por la técnica de Thresholding. Antes de establecer el umbral de color, se configuraron las imágenes al formato de 8 bits y se aplicó un filtro Gaussiano para suavizar y eliminar ruido. Luego se aplicó el ajuste Thresholding según el histograma de intensidad, para poder obtener una imagen binaria donde los objetos se representan con píxeles en blanco y la matriz con píxeles en negros, respectivamente.

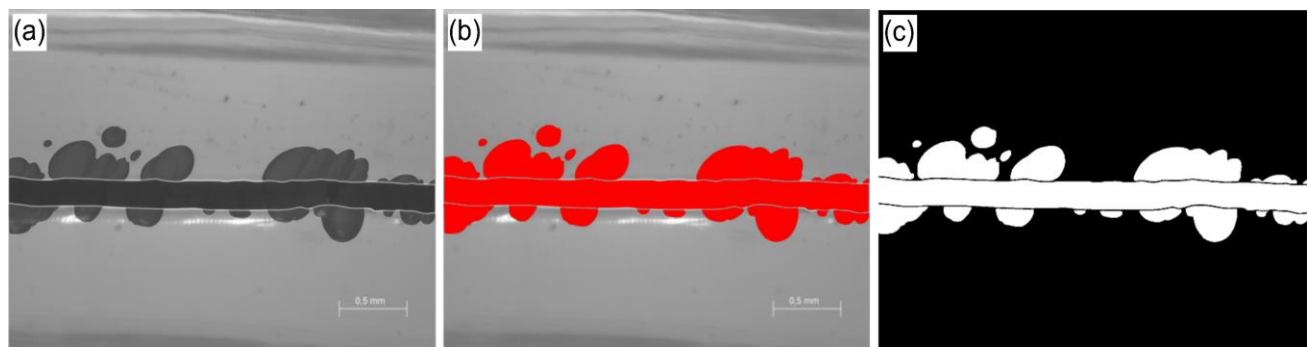


Figura A4: (a) Imagen en formato de 8 bits con filtro Gaussiano, (b) Imagen ajustada por análisis Thresholding y (c) Imagen binaria obtenida.

c) Por último, usando la opción “Analyze Particles” del software ImageJ®, se hizo la detección de los objetos en la imagen, y las regiones de interés se guardaron como un registro ROIs. Luego, a la imagen original se le aplicó el registro ROIs y se calculó el área proyectada de los objetos a partir

del tamaño de los pixeles, según la escala establecida de las imágenes obtenidas a un aumento de 35x. Finalmente, se exportaron las mediciones en formato Excel®, para luego hacer el respectivo cálculo del nivel de porosidad a partir de la ecuación (4), como se mencionó en el capítulo 3.

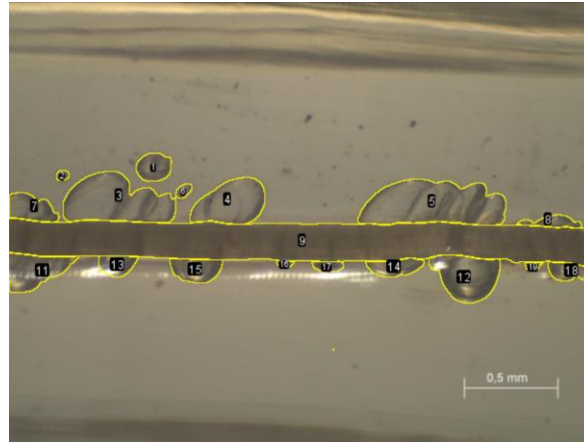


Figura A5: Imagen original con registro ROIs obtenido mediante la opción “Analyze Particles”.

Bibliografía

Akhoundi, B., Behraves, A. H., & Bagheri Saed, A. (2019). Improving mechanical properties of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites produced by FDM 3D printer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(3), 99–116. <https://doi.org/10.1177/0731684418807300>.

Akhoundi, B., Behraves, A. H., & Bagheri Saed, A. (2020). An innovative design approach in three-dimensional printing of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites via fused deposition modeling process: In-melt simultaneous impregnation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 234(1–2), 243–259. <https://doi.org/10.1177/0954405419843780>.

An, Y., Myung, J. H., Yoon, J., & Yu, W. R. (2022). Three-dimensional printing of continuous carbon fiber-reinforced polymer composites via in-situ pin-assisted melt impregnation. *Additive Manufacturing*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102860>.

ASTM C1557 (2020). Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers. *ASTM International*.

ASTM D638 (2014). Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. *ASTM International*.

ASTM D790 (2017). Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. *ASTM International*.

ASTM F2792 (2015). Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *ASTM International*.

Berthelot, Jean-Marie (1999). *Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis*. Springer. New York.

Bhagia, S., Bornani, K., Agarwal, R., Satlewal, A., Đurković, J., Lagaña, R., Bhagia, M., Yoo, C. G., Zhao, X., Kunc, V., Pu, Y., Ozcan, S., & Ragauskas, A. J. (2021). Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. In *Applied Materials Today* (Vol. 24). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078>.

Bhatnagar, R., Gupta, G., & Yadav, S. (2015). *A Review on Composition and Properties of Banana Fibers*. <http://www.ijser.org>.

Blanco, I., Cicala, G., Recca, G., & Tosto, C. (2022). Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity Measurements of PLA-Based 3D-Printed Parts with Milled Carbon Fiber Reinforcement. *Entropy*, 24(5). <https://doi.org/10.3390/e24050654>.

Bourmaud, A., Beaugrand, J., Shah, D. U., Placet, V., & Baley, C. (2018). Towards the design of high-performance plant fiber composites. In *Progress in Materials Science* (Vol. 97, pp. 347–408). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>.

Brenken, B., Barocio, E., Favaloro, A., Kunc, V., & Pipes, R. B. (2018). Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review. In *Additive Manufacturing* (Vol. 21, pp. 1–16). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>.

Cadena Ch, E. M., Vélez R, J. M., Santa, J. F., & Otálvaro G, V. (2017). Natural Fibers from Plantain Pseudostem (*Musa Paradisiaca*) for Use in Fiber-Reinforced Composites. *Journal of Natural Fibers*, 14(5), 678–690. <https://doi.org/10.1080/15440478.2016.1266295>.

Callister, W. D. & Rethwisch, D. G., 2007. Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. *John Wiley & Sons, Inc.* United States.

Campbell, F., 2010. Structural Composite Materials. *ASM International*. Ohio

Carminati, M., Quarto, M., D'urso, G., Giardini, C., & Borriello, C. (2022). A Comprehensive Analysis of AISI 316L Samples Printed via FDM: Structural and Mechanical Characterization. *Key Engineering Materials*, 926 KEM, 46–55. <https://doi.org/10.4028/p-szzd04>.

Chawla, K. K., 2012. Composite Materials. *Springer*. New York.

Cheng, P., Wang, K., Chen, X., Wang, J., Peng, Y., Ahzi, S., & Chen, C. (2021). Interfacial and mechanical properties of continuous ramie fiber reinforced biocomposites fabricated by in-situ impregnated 3D printing. *Industrial Crops and Products*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113760>.

Chennakesava, P., Pilani, S. B., & Narayan, Y. S. (2014). *Fused Deposition Modeling-Insights Fabrication of a low cost 3D printed drone View project Development of Flex sensor array to Identify Damage to Sheet Metal View project Fused Deposition Modeling-Insights*. <https://www.researchgate.net/publication/269702639>.

Cifuentes s. Wilmer g. & Cifuentes r., Édison (2019). Propuesta de aprovechamiento de la fibra de plátano en la región del ariari departamento del meta. Magister en Ciencias Naturales y Matemáticas. *Universidad pontificia bolivariana*. Medellín.

Cipriano, T. F., da Silva, A. L. N., da Fonseca Thomé Da Silva, A. H. M., de Sousa, A. M. F., da Silva, G. M., & Rocha, M. G. (2014). Thermal, rheological and morphological properties of poly (Lactic Acid) (PLA) and talc composites. *Polimeros*, 24(3), 276–282. <https://doi.org/10.4322/polimeros.2014.067>.

Cobos, C. M., Garzón, L., López Martinez, J., Fenollar, O., & Ferrandiz, S. (2019). Study of thermal and rheological properties of PLA loaded with carbon and halloysite nanotubes for

additive manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 25(4), 738–743. <https://doi.org/10.1108/RPJ-11-2018-0289>.

Cooper, C. B., Arutselvan, K., Liu, Y., Armstrong, D., Lin, Y., Khan, M. R., Genzer, J., & Dickey, M. D. (2017). Sensors: Stretchable Capacitive Sensors of Torsion, Strain, and Touch Using Double Helix Liquid Metal Fibers (Adv. Funct. Mater. 20/2017). *Advanced Functional Materials*, 27(20). <https://doi.org/10.1002/adfm.201770124>.

Cuiffo, M. A., Snyder, J., Elliott, A. M., Romero, N., Kannan, S., & Halada, G. P. (2017). Impact of the fused deposition (FDM) printing process on polylactic acid (PLA) chemistry and structure. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(6). <https://doi.org/10.3390/app7060579>.

Dalfi, H. K., Tausif, M., & yousaf, Z. (2022). Effect of twist level on the mechanical performance of S-glass yarns and non-crimp cross-ply composites. *Journal of Industrial Textiles*, 51(2), 2921S–2943S. <https://doi.org/10.1177/1528083720987206>.

Deshmukh, K., Basheer Ahamed, M., Deshmukh, R. R., Khadheer Pasha, S. K., Bhagat, P. R., & Chidambaram, K. (2017). Biopolymer Composites with High Dielectric Performance: Interface Engineering. In *Biopolymer Composites in Electronics* (pp. 27–128). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809261-3.00003-6>.

Díaz, A. (2009). Diseño estadístico de experimentos. *Universidad de Antioquia*. Medellín.

Dicker, M. P. M., Duckworth, P. F., Baker, A. B., Francois, G., Hazzard, M. K., & Weaver, P. M. (2014). Green composites: A review of material attributes and complementary applications. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 56, pp. 280–289). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.014>.

Dickson, A. N., Abourayana, H. M., & Dowling, D. P. (2020). 3D printing of fiber-reinforced thermoplastic composites using fused filament fabrication-A review. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/POLYM12102188>.

Dong, G., Tang, Y., Li, D., & Zhao, Y. F. (2018). *Mechanical Properties of Continuous Kevlar Fiber Reinforced Composites Fabricated by Fused Deposition Modeling Process*. 26, 774–781. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.090>.

FAO (2021). Análisis del mercado del banano. Internet, <http://www.fao.org/3/ca9212es/ca9212es.pdf> [Último acceso: 20 junio 2021].

Ferreira, A. B. & Ramos, D. (2020). 3D printing and its applications in everyday life. Internet, <https://pt.ufrjnautilus.com/post/impress%C3%A3o-3d-e-suas-aplica%C3%A7%C3%B5es-no-dia-a-dia-1> [Último acceso: 29 junio 2021].

Ferreira, I., Machado, M., Alves, F., & Torres Marques, A. (2019). A review on fiber reinforced composite printing via FFF. In *Rapid Prototyping Journal* (Vol. 25, Issue 6, pp. 972–988). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/RPJ-01-2019-0004>.

Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.

Gleadall, A. (2021). FullControl GCode Designer: Open-source software for unconstrained design in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102109>.

Goos, P. & Meintrup, D. (2015). Statistics with JMP: Graphs, Descriptive Statistics, and Probability. *John Wiley & Sons, Ltd.* United Kingdom.

Gordelier, T. J., Thies, P. R., Turner, L., & Johanning, L. (2019). Optimising the FDM additive manufacturing process to achieve maximum tensile strength: a state-of-the-art review. In *Rapid Prototyping Journal* (Vol. 25, Issue 6, pp. 953–971). Emerald Group Holdings Ltd. <https://doi.org/10.1108/RPJ-07-2018-0183>.

Gutiérrez, P. (2012). Análisis y diseño de experimentos. *McGraw-Hill, Inc.* México.

He, X., Ding, Y., Lei, Z., Welch, S., Zhang, W., Dunn, M., & Yu, K. (2021). 3D printing of continuous fiber-reinforced thermoset composites. *Additive Manufacturing*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101921>.

Hou, Z., Tian, X., Zheng, Z., Zhang, J., Zhe, L., Li, D., Malakhov, A. v., & Polilov, A. N. (2020). A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content. *Composites Part B: Engineering*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107893>.

ICA (2020). Los cultivos de plátano de Córdoba, una prioridad para el ICA. Internet, <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-cultivos-platano-cordoba-prioridad> [Último acceso: 20 junio 2021].

Imoisili, P. E., Ukoba, K., & Jen, T. C. (2020). Physical, mechanical and thermal properties of high frequency microwave treated plantain (*Musa Paradisiaca*) fibre/MWCNT hybrid epoxy nanocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 4933–4939. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.012>.

Inacio, W. P., Lopes, F. P. D., & Monteiro, S. N. (2010). Diameter dependence of tensile strength by weibull analysis: Part iii sisal fiber. *Revista Materia*, 15(2), 176–182. <https://doi.org/10.1590/s1517-70762010000200006>.

Jaramillo-Quiceno, N., Vélez R, J. M., Cadena Ch, E. M., Restrepo-Osorio, A., & Santa, J. F. (2018). Improvement of Mechanical Properties of Pineapple Leaf Fibers by Mercerization Process. *Fibers and Polymers*, 19(12), 2604–2611. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-8522-3>.

Kabir, S. M. F., Mathur, K., & Seyam, A. F. M. (2020). A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. In *Composite Structures* (Vol. 232). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111476>.

Kalia, S. (2018). *Lignocellulosic Composite Materials*. Springer International Publishing AG. Dehradun.

Kotik, H. G. (2019). Natural fibers and composite materials reinforced with natural fibers: The motivation for their research and development. In *Revista Materia* (Vol. 24, Issue 3). Universidade Federal do Rio de Janeiro. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0801>.

Kowalczyk, M., Piorkowska, E., Kulpinski, P., & Pracella, M. (2011). Mechanical and thermal properties of PLA composites with cellulose nanofibers and standard size fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(10), 1509–1514. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.07.003>.

Krajangsawasdi, N., Blok, L. G., Hamerton, I., Longana, M. L., Woods, B. K. S., & Ivanov, D. S. (2021). Fused deposition modelling of fibre reinforced polymer composites: A parametric review. In *Journal of Composites Science* (Vol. 5, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jcs5010029>.

Kumar, K. R., Mohanavel, V., & Kiran, K. (2022). Mechanical Properties and Characterization of Polylactic Acid/Carbon Fiber Composite Fabricated by Fused Deposition Modeling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(6), 4877–4886. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06566-7>.

Kuschmitz, S., Schirp, A., Busse, J., Watschke, H., Schirp, C., & Vietor, T. (2021). Development and processing of continuous flax and carbon fiber-reinforced thermoplastic composites by a modified material extrusion process. *Materials*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/ma14092332>.

le Duigou, A., Barbé, A., Guillou, E., & Castro, M. (2019). 3D printing of continuous flax fibre reinforced biocomposites for structural applications. *Materials and Design*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107884>.

le Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuzaki, R., & Castro, M. (2020). A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites. In *Materials and Design* (Vol. 194). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108911>.

León B., J., Díaz-Rodríguez, J. G., & González-Estrada, O. A. (2020). Daño en partes de manufactura aditiva reforzadas por fibras continuas. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), 161–175. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020018>.

León-Agatón, L., Mejía-Gutiérrez, L. F., & Montes-Ramírez, L. M. (2015). Caracterización socioeconómica y tecnológica de la producción del plátano en el bajo occidente del departamento de caldas. *Luna Azul*, 41, 184–200. <https://doi.org/10.17151/luaz.2015.41.11>.

Li, N., Li, Y., & Liu, S. (2016). Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.matprotec.2016.07.025>.

Liu, T., Tian, X., Zhang, M., Abliz, D., Li, D., & Ziegmann, G. (2018). Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 114, 368–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.001>.

Loaiza, A., Cifuentes, S., & Colorado, H. A. (2017). Asphalt modified with superfine electric arc furnace steel dust (EAF dust) with high zinc oxide content. *Construction and Building Materials*, 145, 538–547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.050>.

López B., J. M. (2019). Agronegocios. Internet, <https://www.agronegocios.co/agricultura/mas-de-90-del-banano-local-es-de-exportacion-2887702> [Último acceso: 20 junio 2021].

Mao, N., & Russell, S. J. (2015). Fibre to Fabric: Nonwoven Fabrics. In *Textiles and Fashion: Materials, Design and Technology* (pp. 307–335). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-84569-931-4.00013-1>.

Matsuzaki, R., Ueda, M., Namiki, M., Jeong, T. K., Asahara, H., Horiguchi, K., Nakamura, T., Todoroki, A., & Hirano, Y. (2016). Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep23058>.

Miranda Pérez, R., Allende Alonso, S., Pérez Cañedo, B., & Bouza Allende, G. (2018). Desempeño computacional de estrategias híbridas para la solución de problemas cuadráticos no convexos con restricciones de caja. *Revista investigación operacional*. VOL. 39(1), 42-53.

Montgomery, D. (2012). Design and Analysis of Experiments. *John Wiley & Sons, Inc.* Arizona.

Montoya B., Julián & Negrete, Juan de Dios (2022). Caracterización de la fibra del pseudotallo del plátano como potencial refuerzo para la elaboración de materiales compuestos. Ingeniería mecánica (Trabajo de pregrado inédito). *Universidad de Córdoba*. Montería.

Morales, M. A., Atencio Martinez, C. L., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2021). Development and characterization of rice husk and recycled polypropylene composite filaments for 3d printing. *Polymers*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/polym13071067>.

Naik N.K. & Vijay Madhavan. (1998). Twisted impregnated yarns: Elastic properties. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. Vol 35(2):83-91
DOI: 10.1243/0309324001514044.

Nguyen, T. A., & Nguyen, T. H. (2022). Study on Mechanical Properties of Banana Fiber-Reinforced Materials Poly (Lactic Acid) Composites. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8485038>.

Ordoñez, Jeny G. (2016). Evaluación de las propiedades térmicas y mecánicas del polipropileno reforzado con zeolitas tipo ZSM-5. Magister en Gestión energética industrial. *Instituto Tecnológico Metropolitano*. Medellín.

Ozkaya, Y. A., Acar, M., & Jackson, M. R. (2010). Yarn twist measurement using digital imaging. *Journal of the Textile Institute*, 101(2), 91–100. <https://doi.org/10.1080/00405000802263476>.

Pappas, J. M., Thakur, A. R., Leu, M. C., & Dong, X. (n.d.). A parametric study and characterization of additively manufactured continuous carbon fiber reinforced composites for high-speed 3D printing. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06723-1/Published>.

Parandoush, P., & Lin, D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. In *Composite Structures* (Vol. 182, pp. 36–53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.08.088>.

Pedraza A., Cristy (2019). Caracterización de la fibra del pseudo tallo de plátano como refuerzo y desarrollo de un material compuesto para fabricación de tejas. Diseño Industrial. *Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia*. Duitama.

Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. In *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* (Vol. 83, pp. 98–112). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>.

Prüß, H., & Vietor, T. (2015). Design for Fiber-Reinforced Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(11). <https://doi.org/10.1115/1.4030993>.

Qiu, S., Fuentes, C. A., Zhang, D., van Vuure, A. W., & Seveno, D. (2016). Wettability of a single carbon fiber. *Langmuir*, 32(38), 9697–9705. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.6b02072>.

Quesada-Solís, K., Alvarado-Aguilar, P., Sibaja-Ballesteros, R., & Vega-Baudrit, J. (2005). Utilización de las fibras del rastrojo de piña (ananas comusus, variedad champaka) como material de refuerzo en resinas de poliéster. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Volumen 6(2).

Repetier-Host, Hot-World GmbH & Co. KG, Alemania. G-Code Verification and Preparation. Internet, <https://www.repetier.com/documentation/repetier-host/gcode-editor/>.

Rocha-Hoyos, J. C., Llanes-Cedeño, E. A., Peralta-Zurita, D., & Pucha-Tambo, M. (2019). Caracterización mecánica a flexión de materiales compuestos con matriz fotopolimérica reforzados

con fibras de abacá y cabuya mediante impresión 3D. *Ingenius*, 22, 100–112. <https://doi.org/10.17163/ings.n22.2019.10>.

Rodríguez S., Lady (2014). Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano. Magíster en ingeniería industrial. *Universidad Nacional de Colombia*. Manizales.

Safari, F., Kami, A., & Abedini, V. (2022). 3D printing of continuous fiber reinforced composites: A review of the processing, pre- and post-processing effects on mechanical properties. In *Polymers and Polymer Composites* (Vol. 30). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/09673911221098734>.

Šafka, J., Ackermann, M., Bobek, J., Seidl, M., Habr, J., & Běhálek, L. (2016). Use of composite materials for FDM 3D print technology. *Materials Science Forum*, 862, 174–181. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.174>.

Shah, D. U., Schubel, P. J., & Clifford, M. J. (2013). Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fibre yarn composites. *Journal of Composite Materials*, 47(4), 425–436. <https://doi.org/10.1177/0021998312440737>.

Shenzhen Esun Industrial Co., Ltd., China. PLA. Internet, <https://www.esun3d.net>.

Sin, L. T., Rahmat, A. R., & Rahman, W. A. W. A. (2013). Overview of Poly(lactic Acid). In *Handbook of Biopolymers and Biodegradable Plastics: Properties, Processing and Applications* (pp. 11–54). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4557-2834-3.00002-1>.

Stoof, D., Pickering, K., & Zhang, Y. (2017). Fused deposition modelling of natural fibre/polylactic acid composites. *Journal of Composites Science*, 1(1). <https://doi.org/10.3390/jcs1010008>.

Stupenengo, & Franco (2011). Materiales y materia prima. *Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

Tang, Y., Mak, K., & Zhao, Y. F. (2016). A framework to reduce product environmental impact through design optimization for additive manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1560–1572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.037>.

Tapia, Luis C. & Resrepo J. (2019). Efecto de los parámetros de construcción en la resistencia a la tensión, resistencia a flexión y tiempo de impresión de piezas fabricadas mediante manufactura aditiva con ácido Poliláctico (PLA) en la empresa 3d Design. Ingeniería mecánica. *Universidad de Córdoba*. Montería.

Teng, x., Shi, d., Jing, x., Lyu, s., & Yang, x. (2021). Experimental, analytical and numerical investigation on tensile behavior of twisted fiber yarns. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(5), 278–288. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.08.006>.

Terekhina, S., Egorov, S., Tarasova, T., Skornyakov, I., Guillaumat, L., & Hattali, M. L. (2022). In-nozzle impregnation of continuous textile flax fiber/polyamide 6 composite during FFF process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106725>.

Tian, X., Liu, T., Wang, Q., Dilmurat, A., Li, D., & Ziegmann, G. (2017). Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1609–1618. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.139>.

Vargas L., Johnattan (2020). Análisis interfacial de un material compuesto fabricado en matriz polimérica reforzado con fibras de fique para potenciar sus propiedades mecánicas. Magister en Ingeniería – Materiales y Procesos. *Universidad Nacional de Colombia*. Medellín.

Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 110, pp. 442–458). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>.

Wickramasinghe, S., Do, T., & Tran, P. (2020). FDM-Based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments. In *Polymers* (Vol. 12, Issue 7, pp. 1–42). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym12071529>.

Woigk, W., Fuentes, C. A., Rion, J., Hegemann, D., van Vuure, A. W., Dransfeld, C., & Masania, K. (2019). Interface properties and their effect on the mechanical performance of flax fibre thermoplastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 122, 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.015>.

Xu, S., Xiong, C., Tan, W., & Zhang, Y. (2015). Microstructural, thermal, and tensile characterization of banana pseudo-stem fibers obtained with mechanical, chemical, and enzyme extraction. *BioResources*, 10(2), 3724–3735. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3724-3735>.

Yang, L., Zheng, D., Jin, G., & Yang, G. (2022). Fabrication and Formability of Continuous Carbon Fiber Reinforced Resin Matrix Composites Using Additive Manufacturing. *Crystals*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/cryst12050649>.

Zhang, X., Chen, L., Mulholland, T., & Osswald, T. A. (2019). Effects of raster angle on the mechanical properties of PLA and Al/PLA composite part produced by fused deposition modeling. *Polymers for Advanced Technologies*, 30(8), 2122–2135. <https://doi.org/10.1002/pat.4645>.

Zhang, H., Liu, D., Huang, T., Hu, Q., & Lammer, H. (2020). Three-dimensional printing of continuous flax fiber-reinforced thermoplastic composites by five-axis machine. *Materials*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/ma13071678>.