

**Fabricación de filamentos para impresora 3D utilizando bio-materiales compuestos
reforzados con fibras naturales de fique**

Adriana Sofía López Uribe

Johnier Camilo Calle Barrientos

Trabajo de grado para optar por al título de Ingeniero Mecánico

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

**Fabricación de filamentos para impresora 3D utilizando bio-materiales compuestos
reforzados con fibras naturales de fique**

Adriana Sofía López Uribe

Johnier Camilo Calle Barrientos

Trabajo de grado para optar por al título de Ingeniero Mecánico

Director

Ph.D. Rolando Enrique Guzmán López

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	12
Justificación del Problema	12
Objetivos	14
Alcance.....	15
Marco Teórico.....	16
2.1 Materiales Compuestos Reforzados con Fibras.....	16
2.2 Fabricación de Filamentos para Impresión 3D	17
2.3 Caracterización Morfológica	17
2.4 Evaluación de Viabilidad del Material.....	18
2.5 Materia Prima	19
2.6 Maquinas para la Elaboración y Prueba de Viabilidad del Filamento.....	25
2.7 Maquinas de Medición y Apoyo para la Producción del Proyecto	32
2.8 Objetos	36
Metodología.....	39
Procedimiento Experimental	40
Fase 1. Tratamiento de Alcalinización de las Fibras	40
Fase 2. Secado y Cortado de las Fibras	44
Fase 3. Parámetros de Velocidad y Temperatura.	46

Fase 4. Calculo de Fracción Volumétrica de las Fibras	51
Fase 5. Creación del Filamento con el Nuevo Material Compuesto	51
Fase 6. Microscopía Electrónica de Barrido	53
Fase 7. Dimensionamiento de Probeta: Norma ASTM D638	55
Fase 8. Impresora 3D	57
Fase 9. Caracterización Mecánica (Norma ASTM D3552 – 17).....	59
Coclusiones.....	81
Referencias	82
Apendice.....	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Objetos	35
Tabla 2. Parámetros de soluciones para el ataque alcalino	42
Tabla 3. Parámetros de la extrusora con PLA	50
Tabla 4. Parámetros de ensayo de probeta 1 con PLA	69
Tabla 5. Parámetros de ensayo de probeta 2 con PLA	71
Tabla 6. Parámetros de ensayo de probeta 3 con PLA	73
Tabla 7. Parámetros de ensayo de probeta 1 con material compuesto.....	75
Tabla 8. Parámetros de ensayo de probeta 2 con material compuesto.....	77

Lista de Figuras

Figura 1. Tipos de orientación de la fibra en materiales compuestos	16
Figura 2. Descripción detallada de las partes de una extrusora.....	17
Figura 3. Diagrama de microscopía electrónica de barrido	18
Figura 4. Diagrama de una máquina utilizada para ensayos de tensión.....	19
Figura 5. Rollos de filamentos de colores de PLA.....	20
Figura 6. Fibras naturales de fique.....	21
Figura 7. Pastillas de NaOH.....	22
Figura 8. Cal viva.....	23
Figura 9. Ácido acético marca Merck.....	24
Figura 10. Gota de agua en caída.....	25
Figura 11. Extrusora marca Wellzoom	26
Figura 12. Micrótopo marca TED PELLA.....	27
Figura 13. Sputtering marca CRESSINGTON	28
Figura 14. Microscopio marca TESCAN	29
Figura 15. Horno marca BINDER.....	30
Figura 16. Impresora 3D marca Creality Halot-One.....	31
Figura 17. Máquina de ensayos universal marca MTS	32
Figura 18. Bascula electrónica	33
Figura 19. Calibrador digital	33

Figura 20. Celular.....	34
Figura 21. Computador portátil	35
Figura 22. Balde rojo.....	35
Figura 23. Bolsas de ziploc	35
Figura 24. Cinta.....	36
Figura 25. Cinta doble faz.....	36
Figura 26. Cuaderno de rayas.....	36
Figura 27. Cuchara de metal	36
Figura 28. Envase de vidrio de 500 ml	36
Figura 29. Mazo.....	37
Figura 30. Pala	37
Figura 31. Envases petri con tapa.....	37
Figura 32. Pinzas verdes de laboratorio	37
Figura 33. Probeta de 500 ml	37
Figura 34. Tijeras	37
Figura 35. NaOH marca Merck.....	40
Figura 36. Componentes de una fibra natural.....	41
Figura 37. Bascula pesando 40 gramos de NaOH.....	43
Figura 38. Muestras de fique en tratamiento con NaOH	43
Figura 39. Muestras de fique en tratamiento con CaO	44

Figura 40. Fibras de fique diluidas en vinagre	45
Figura 41. Fibras de fique dispuestas a ser secadas	46
Figura 42. Fibras en proceso de secado con el horno a 45°C	46
Figura 43. Extrusora expulsando el material usado anteriormente.....	47
Figura 44. Residuos de la limpieza aplicada a la maquina	48
Figura 45. Residuos de fibra	49
Figura 46. Extrusora en funcionamiento	50
Figura 47. Filamentos del material compuesto	52
Figura 48. Muestras de filamento listas para bombardeo iónico.....	53
Figura 49. Sputtering con una presión de 25 bar	54
Figura 50. Sputtering por la parte de atrás	54
Figura 51. Imagen SEM: 80 x Aumentos de filamento de PLA	55
Figura 52. Dimensiones de la probeta.....	57
Figura 53. Estadística de la impresión probeta de tracción.....	58
Figura 54. Probeta impresa únicamente con PLA.....	58
Figura 55. Probeta impresa con material compuesto.....	59
Figura 56. Superficie de una probeta hecha con material compuesto.....	59
Figura 57. Máquina lista para hacer ensayos.....	60
Figura 58. Especificaciones de la maquina	61
Figura 59. Dimensiones de la probeta.....	61

Figura 60. Probetas de PLA listas para la prueba de tensión	62
Figura 61. Probetas de material compuesto listas para la prueba de tensión.....	63
Figura 62. Probetas situadas en la máquina de ensayos universal.....	64
Figura 63. Probetas de PLA justo después de la fractura	65
Figura 64. Probetas de PLA después de la prueba de tensión.....	66
Figura 65. Probetas del material compuesto justo después de la fractura.....	66
Figura 66. Probetas del material compuesto después de la prueba de tensión	67
Figura 67. Ejecución de ensayo de probeta 1 con PLA.....	68
Figura 68. Módulo de elasticidad de probeta 1 con PLA	69
Figura 69. Ejecución de ensayo de probeta 2 con PLA.....	70
Figura 70. Módulo de elasticidad de probeta 2 con PLA	71
Figura 71. Ejecución de ensayo de probeta 3 con PLA.....	72
Figura 72. Módulo de elasticidad de probeta 3 con PLA	73
Figura 73. Ejecución de ensayo de probeta 1 con material compuesto	74
Figura 74. Módulo de elasticidad de probeta 1 con material compuesto	75
Figura 75. Ejecución de ensayo de probeta 2 con material compuesto	76
Figura 76. Módulo de elasticidad de probeta 2 con material compuesto	77

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Fabricación de Filamentos para Impresora 3D Utilizando Bio-Materiales Compuestos Reforzados con Fibras Naturales de Fique

AUTOR(ES): Johnier Camilo Calle Barrientos
Adriana Sofía López Uribe

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): Msc. Rolando Enrique Guzmán López

RESUMEN

Esta investigación abordó el tema de la creación de un filamento para impresión 3D basándose en matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales de fique buscando mejorar las propiedades básicas del PLA. Realizamos la preparación de la materia prima, atacando superficialmente las fibras de fique con NaOH y obtuvimos los parámetros necesarios para el momento de realizar la combinación de los materiales base en la extrusora (Temperatura, Velocidad). Para finalizar caracterizamos muestras de los filamentos y realizamos pruebas de tensión mediante la fabricación de probetas en la impresora 3D. En conclusión, este proyecto de grado ha demostrado que es viable utilizar PLA reforzado con fibras de fique para la fabricación de filamentos para impresoras 3D, destacando sus beneficios ambientales, la reducción de costos y potenciales aplicaciones en la industria de fabricación aditiva.

PALABRAS CLAVE:

Filamento, Impresión 3D, Fibras, Temperatura, Velocidad, Aditivo, Probetas



V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Manufacture of Filaments for 3D Printer Using Bio-Materials Composites Reinforced with Natural Fibers from Fique

AUTHOR(S): Johnier Camilo Calle Barrientos
Adriana Sofía López Uribe

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Msc. Rolando Enrique Guzmán López

ABSTRACT

This research deals with the creation of a filament for 3D printing based on polymeric matrices reinforced with natural fibers of fique, seeking to improve the basic properties of PLA. We prepared the raw material, superficially attacking the fique fibers with NaOH and we obtained the necessary parameters for the combination of the base materials in the extruder (temperature, speed). Finally, we characterized samples of the filaments and performed stress tests by manufacturing test pieces in the 3D printer. In conclusion, this degree project has demonstrated that it is feasible to use PLA reinforced with fique fibers for the manufacture of filaments for 3D printers, highlighting its environmental benefits, cost reduction and potential applications in the additive manufacturing industry.

KEYWORDS:



Filament, 3D Printing, Fibers, Temperature, Speed, Additive, Test Tubes

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

Planteamiento del Problema

Hoy en día la impresión 3D se ha consolidado como una tecnología revolucionaria con un potencial para transformar la producción de piezas y prototipos en diversas industrias, permitiendo la creación de objetos tridimensionales de manera rápida y eficiente, adaptándose a una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, a pesar de sus innegables ventajas, la continua expansión y consolidación de esta tecnología conlleva desafíos significativos que deben ser abordados para aprovechar todo su potencial.

Uno de los principales desafíos radica en la búsqueda constante de materiales avanzados que cumplan con requisitos cada vez más exigentes de rendimiento, sostenibilidad y costo. En este contexto, el desarrollo de filamentos para impresora 3D que utilizan matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales, emerge como una solución potencialmente disruptiva en la industria de la fabricación aditiva. El empleo de fibras naturales, como el uso de fique como refuerzo en las matrices poliméricas plantea ventajas fundamentales en sostenibilidad ambiental y reducción de costos. Sin embargo, este proceso de fabricación y la implementación de estos filamentos no están exentos de desafíos técnicos y tecnológicos.

Justificación del Problema

Desde la Universidad Pontificia Bolivariana, se propone explorar la posibilidad de emplear nuevos materiales en la fabricación de filamentos destinados a impresoras 3D. En este contexto, se considera relevante el aprovechamiento de recursos locales de la región de Santander, como las fibras naturales de fique, brindando así una nueva y beneficiosa aplicación. El proyecto radica en varios aspectos fundamentales:

- **Sostenibilidad Ambiental:** El uso de fibras naturales como el fique en la matriz polimérica permite reducir la dependencia de materiales plásticos tradicionales, promoviendo una producción más sostenible y eco amigable.
- **Reducción de Costos:** La implementación de filamentos compuestos a partir de materiales naturales y económicos puede reducir los costos asociados con la impresión 3D, lo que resulta atractivo tanto para la industria como para usuarios finales.
- **Desarrollo Tecnológico:** La investigación en este campo contribuirá al avance de la tecnología de impresión 3D y a la diversificación de materiales disponibles en el mercado.
- **Colaboración Interdisciplinaria:** El proyecto se alinea con el proyecto BIC-008-0822-F4M, lo que fomenta la colaboración interdisciplinaria y aprovecha sinergias entre diferentes áreas del conocimiento.

Objetivos

Objetivo General

Fabricar filamentos para impresora 3D utilizando biomateriales compuestos reforzados con fibras naturales de fique, según lineamientos estipulados en el proyecto BIC-008-0822-F4M.

Objetivos Específicos

- Fabricar filamentos para impresión mediante extrusión del bio-polímero PLA, junto con fibras naturales de fique. **Indicador:** Parámetros de temperatura y velocidad del tornillo de la maquina extrusora de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Resultado: Filamentos de material compuesto reforzado por fibras naturales para la impresión 3D.

- Caracterizar los filamentos fabricados utilizando el Microscopio electrónico de barrido (SEM). **Indicador:** Análisis de la morfología superficial de las fibras y la adhesión entre matriz y fibra. **Resultado:** Imágenes Microscópicas de las fibras de refuerzo.

- Caracterizar mecánicamente probetas de tracción, utilizando la máquina universal MTS. **Indicador:** Norma ASTM D3552 – 17 (Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Metal Matrix Composites). **Resultado:** Curvas tensión-deformación verdadera.

Alcance

El proyecto se enfocará en la fabricación y caracterización morfológica y mecánica de filamentos para impresoras 3D utilizando matrices poliméricas de PLA reforzadas con fibras naturales de fique, según lineamientos estipulados en el proyecto BIC-008-0822-F4M.

Primero, se fabricarán filamentos para impresora 3D utilizando únicamente PLA, definiendo así los parámetros de funcionamiento de la máquina extrusora de la Universidad Pontificia Bolivariana. Luego, se llevará a cabo un proceso de alcalinización para preparar las fibras naturales para la mezcla de los dos elementos y a continuación, se procederá a determinar los porcentajes adecuados en peso para unir los dos componentes y crear un nuevo filamento de material compuesto en la extrusora. Posteriormente, se procederá a evaluar la viabilidad del uso de estos filamentos en la impresora 3D realizando la impresión de probetas.

Finalmente, se llevará a cabo la observación microscópica de los filamentos para analizar su microestructura y las probetas impresas serán sometidas a una prueba de tensión para evaluar su comportamiento y determinar si el material cumple con los estándares de calidad necesarios y si las fibras naturales ofrecen beneficios para desarrollar un mejor filamento.

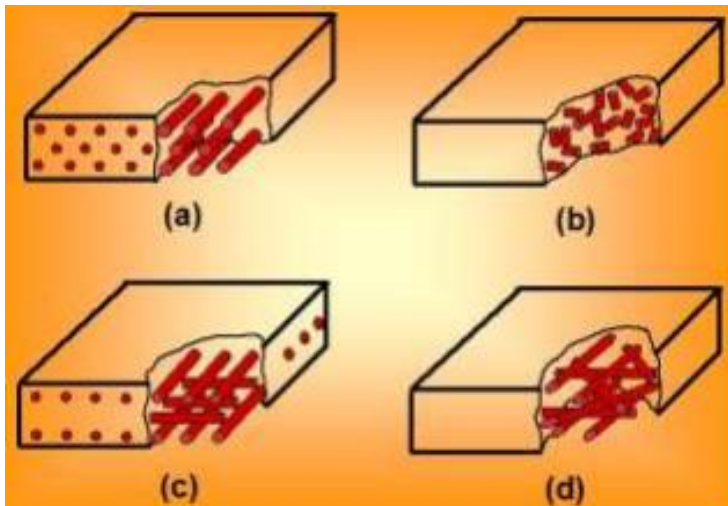
Marco Teórico

Materiales Compuestos Reforzados con Fibras

Es la unión de dos materiales que pueden ser de origen natural o sintético, cada uno con propiedades diferentes que al combinarse mejoran las propiedades finales del nuevo elemento compuesto. Se pueden elegir estos componentes para obtener mejores propiedades como la rigidez o capacidad de resistencia a las altas temperaturas, entre otras propiedades. Estos compuestos están formados por una fase continua llamada matriz y una discontinua llamada refuerzo. La fibra se puede encontrar en diferentes tamaños, formas y diferente orientación como se muestra a continuación en la figura 1.

Figura 1

Tipos de orientación de la fibra en materiales compuestos



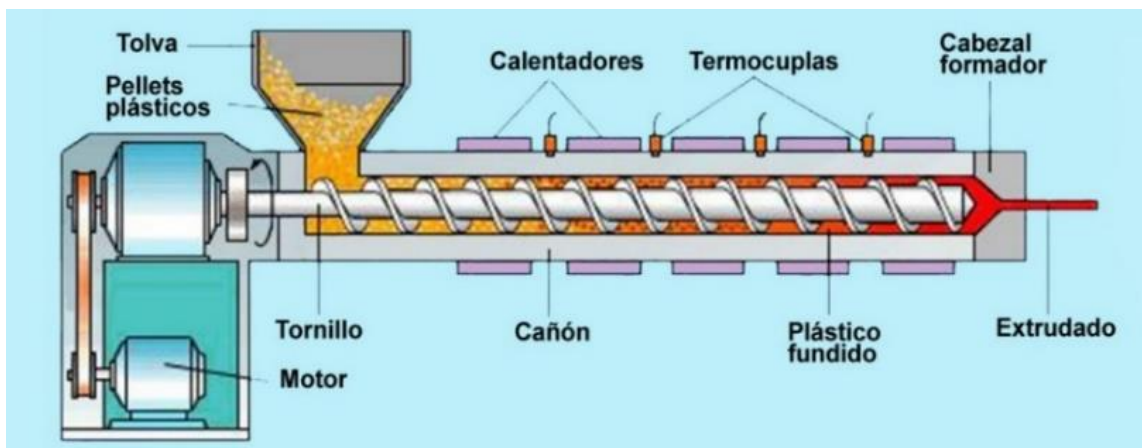
Nota. (a) Fibras continuas unidireccionales, (b) Fibras discontinuas orientadas al azar, (c) Fibras ortogonales o tejidos, (d) Fibras en capas múltiples.

Fabricación de Filamentos para Impresión 3D

Es un proceso esencial en la impresión 3D, ya que a que la selección de materiales y las técnicas de fabricación afectan directamente la calidad de los filamentos, influyendo en la precisión y la durabilidad de las piezas impresas. Para este proyecto, se crearán filamentos con matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales de fique mediante una extrusora la cual tiene ventajas como ser compatible con una amplia gama de materiales, lo que ayuda con la investigación en constante evolución de materiales más sostenibles con el medio ambiente, dando flexibilidad de elegir los materiales más adecuados para las necesidades de impresión del proyecto.

Figura 2

Descripción detallada de las partes de una extrusora



Nota. Esquema del proceso de extrusión de plástico (2021), Trade, D

<https://blog.fdtecsl.com/peletizadoras-pequenas-pruebas-plasticos/extrusora-esquema>.

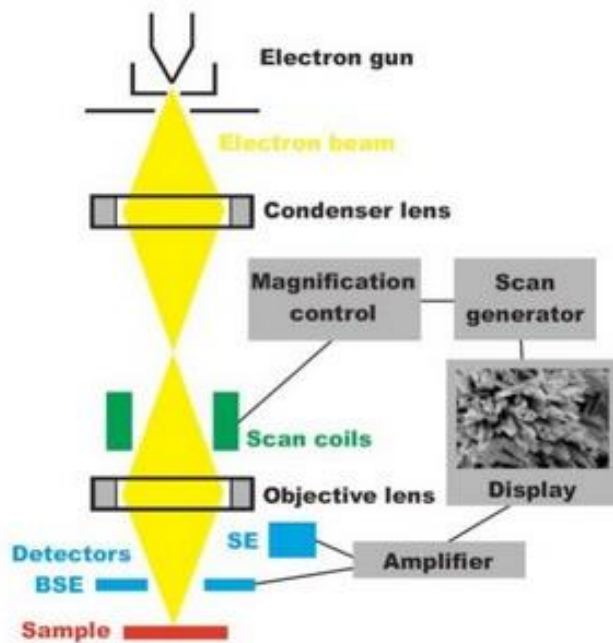
Caracterización Morfológica

Sirve para determinar la microestructura de un material, la cual influye en sus propiedades mecánicas, eléctricas, térmicas y químicas. Para el proyecto se empleará Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), que es una técnica que utiliza un haz de electrones que interactúan con la muestra, generando diferentes tipos de señales que se recopilan y se utilizan para crear una imagen

de alta resolución de la superficie de la muestra, esto permitirá analizar la adhesión entre la matriz y las fibras de refuerzo.

Figura 3

Diagrama de microscopía electrónica de barrido



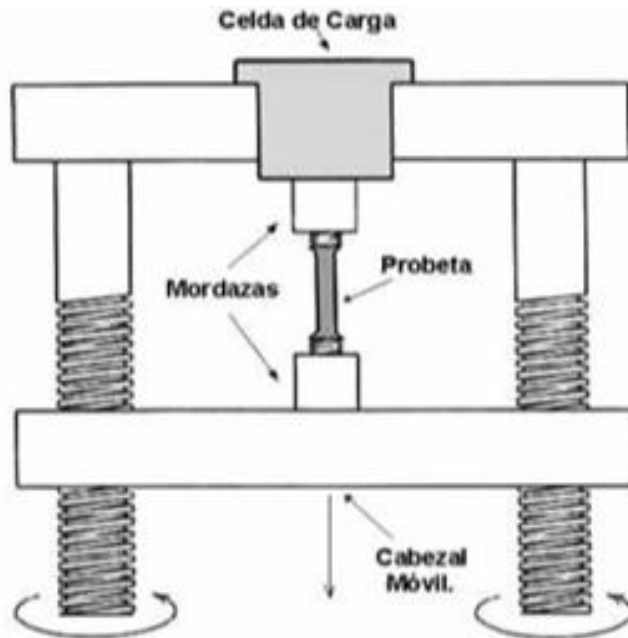
Nota. SEM (2021), ETH, Z, <https://www.microscopy.ethz.ch/sem.htm>.

Evaluación de la Viabilidad del Material

La viabilidad de los filamentos fabricados se evaluará mediante la impresión de probetas las cuales serán sometidas a pruebas de tensión en la máquina de ensayos universal, donde se comparará la tensión ejercida en la probeta con la deformación que se produce en ella, esto permitirá determinar la idoneidad del material para diferentes aplicaciones y asegurar que cumple con los estándares de calidad necesarios.

Figura 4

Diagrama de una máquina utilizada para ensayos de tensión



Nota. Ensayo tracción, Medina, W (2015), <https://es.slideshare.net/slideshow/ensayo-de-traccin-48023201/48023201>.

Materia Prima

- **Matriz → Ácido Poli láctico**

Se prefiere utilizar este material en forma de filamento como se muestra en la figura 5, como la matriz polimérica del proyecto, ya que es un material fuerte, rígido, duradero, resistente a la humedad y a la grasa, ideal para lograr un nuevo material compuesto con excelentes propiedades. Además, es un termoplástico biodegradable derivado de recursos renovables lo que lo hace un componente muy útil para el proyecto desde el punto de vista ambiental y sostenible.

Parámetros de impresión para el PLA:

- Temperatura: Imprime mejor a unos 210 °C, pero puede funcionar bien entre 180 °C y 230 °C. La temperatura de la cama de impresión puede configurarse entre 20 y 60 °C, aunque no es necesaria.
- Velocidad: La velocidad de impresión intermedia es de 30-60 mm/s.
- Altura de capa: La altura de la capa debe ser el 50% del diámetro de la boquilla, pero puede oscilar entre el 75% y el 80% y el 25%. Por ejemplo, una boquilla de 0,4 mm tendría una altura de capa de 0,2 mm.
- Ventiladores: Cuando se imprime con PLA, es importante mantener encendidos los ventiladores de refrigeración.
- Ángulo: El ángulo máximo recomendado para el PLA es 45°.

Figura 5

Rollos de filamentos de colores de PLA



- **Refuerzo → Fibras Naturales de Fique**

Es una fibra natural obtenida de una planta con el mismo nombre y se escogieron estas fibras como refuerzo de la matriz polimérica para mejorar sus propiedades mecánicas, debido a que puede ayudar con la estabilidad dimensional de la matriz, lo que significa que el nuevo material compuesto será menos propenso a deformarse o contraerse debido a cambios en la temperatura o

la humedad, además ayuda a contribuir con la sostenibilidad y a reducir el impacto ambiental de los materiales compuestos, teniendo en cuenta que el fique es una fibra biodegradable.

Figura 6

Fibras naturales de fique



- **Hidróxido de Sodio**

El hidróxido de sodio es un compuesto iónico sólido blanco que consta de cationes de sodio (Na^+) y aniones de hidróxido (OH^-). En este caso se utiliza porque reacciona con ciertos grupos químicos presentes en el fique, como los grupos hidroxilo y ésteres, lo que da lugar a cambios en la composición química del material, y genera nuevas fibras con propiedades más adecuadas para ser usadas como refuerzo en la creación de un nuevo material compuesto. Es importante tener en cuenta que el hidróxido de sodio es muy corrosivo por lo que no debe exponerse al aire durante un largo lapso de tiempo. Además, no debe tampoco manipularse con espátulas y es necesario usar guantes para evitar irritación, quemaduras en la piel y en los ojos.

Figura 7*Pastillas de NaOH*

- **Cal Viva**

Es un polvo extremadamente reactivo con el agua, que cuando se mezcla con esta sustancia experimenta una reacción exotérmica y se convierte en hidróxido de calcio liberando una gran cantidad de calor en el proceso, esto genera una rápida elevación de temperatura que puede provocar la vaporización del agua. Al igual que el hidróxido de sodio, se utiliza para que las fibras naturales de fique presentes en la mezcla se vean afectadas por la reacción química y el calor, ocasionando un debilitamiento estructural para obtener fibras más pequeñas. Es importante manipular la cal viva con cuidado y tomar medidas para controlar la reacción, evitando un aumento excesivo de temperatura ya que puede ser corrosiva y causar quemaduras si entra en contacto con la piel o los ojos.

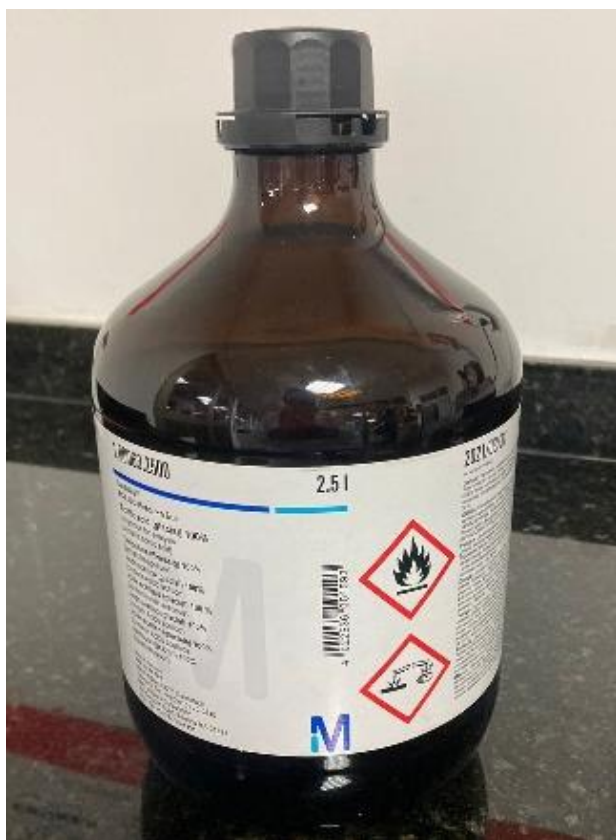
Figura 8*Cal viva*

- **Ácido Acético**

Constituye una sustancia orgánica presente en la composición del vinagre, al cual se le atribuye su característico aroma y sabor agrio, se utilizará para limpiar las fibras naturales junto con abundante agua. Químicamente, está compuesto por un grupo metilo CH_3 - enlazado a un grupo carboxilo $-\text{COOH}$ mediante un enlace simple entre sus átomos de carbono. Debido a su naturaleza inflamable y corrosiva, es importante manejar el ácido acético con precaución. Se debe utilizar equipo de protección personal durante la limpieza y desechar los materiales contaminados de manera segura, dado que puede ocasionar irritación severa en la piel, los ojos y el tracto digestivo por ingestión o por inhalación.

Figura 9

Ácido acético marca Merck



- **Agua**

Este elemento es un componente fundamental en la naturaleza, es una sustancia líquida que carece de olor, sabor y color. Su composición química se caracteriza por la presencia de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, unidos a través de un enlace covalente. El agua se reconoce como el solvente universal por su capacidad para disolver la mayoría de las sustancias y adicionalmente, exhibe una notable conductividad eléctrica y tiene la capacidad de retener y almacenar calor.

Figura 10

Gota de agua en caída

**Máquinas para la Elaboración y Pruebas de Viabilidad del Filamento**

- **Extrusora**

Es una herramienta versátil y eficiente que permite juntar varios elementos para la producción de un nuevo material mediante filamentos para impresoras 3D. En la Universidad Pontificia Bolivariana se cuenta con una como se muestra en la figura 11, con un diseño minimalista y fácil de usar, también dispone de la función de control de velocidad y temperatura, y gracias a su motor de pasos, tiene una excelente escalabilidad.

Parámetros del dispositivo:

- Velocidad de extrusión: 254mm ~ 660.4mm / min.
- Diámetro de la boquilla: 1.75mm.
- Temperatura de trabajo: 300 °C (max).
- Precisión PID: +/- 1 °C.
- Requerimiento de Potencia: 120 W.

- Capacidad de la tolva: 400 ml.

Figura 11

Extrusora marca Wellzoom



- **Micrótopo**

Es un instrumento de corte que permite obtener rebanadas muy finas de material, conocidas como secciones. Es una herramienta muy importante porque permite la preparación de varias muestras de los filamentos obtenidos en la extrusora, para su correcta observación en el microscopio electrónico de barrido. Los cortes transversales pueden tener espesores entre 0.5 micrómetros y 60 micrómetros en materiales blandos y muestras biológicas principalmente.

Figura 12

Micrótomo marca TED PELLA



- **Metalizador Sputter Coater**

Su función es cubrir las muestras anteriormente cortadas con una capa delgada de un material conductor en este caso oro, por medio de bombardeo iónico. Este procedimiento es necesario porque las muestras de filamento obtenidas no son conductoras y esta propiedad la necesitamos para poder caracterizar los filamentos fabricados utilizando el microscopio electrónico de barrido.

Figura 13

Sputtering marca CRESSINGTON



- **Microscopio Electrónico de Barrido**

Este microscopio permitirá observar detalladamente la microestructura de las muestras de los filamentos, una vez que hayan adquirido sus características conductoras, pudiendo alcanzar hasta un 1'000.000 de aumentos y a escalas de hasta 1 nanómetro bajo condiciones controladas muy específicas, también proporciona la composición química de la superficie de las muestras a través de un Detector Especial de Electrones de Rayos X por EDS; logrando hacer cuantificación, mapeos e hipermapeos, entre otros.

Figura 14

Microscopio marca TESCAN



- **Horno**

El funcionamiento de un horno de laboratorio se basa en unas resistencias eléctricas que se calientan al pasar una corriente eléctrica y así transmiten calor a la cámara donde se colocan las muestras. Es un aparato que permite calentar materiales a temperaturas elevadas y se utiliza también para deshidratar, esterilizar, calcinar, fundir o en este caso, secar las muestras de fibras naturales obtenidas después del proceso de alcalinización, de esta manera, las muestras quedaran listas para la fase en la que se unen los componentes y se crea el filamento de material compuesto. Es fundamental que el horno esté ubicado en un área bien ventilada para permitir la dispersión de los vapores y gases generados durante el proceso de calentamiento.

Figura 15

Horno marca BINDER



- **Impresora 3D**

Es un dispositivo capaz de reproducir un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material capa por capa, desde abajo hacia arriba. En el proyecto, ayudará con la impresión de varias probetas cuyo diseño se realizará en computadora en el programa SolidWorks según la norma establecida. Posteriormente serán sometidas a un ensayo de tensión en una máquina de ensayos universal para comprobar la calidad del material.

Figura 16

Impresora 3D marca Creality Halot-One



- **Máquina de Ensayos**

Una máquina de ensayos de fuerza universal se utiliza para realizar ensayos de tracción y compresión, entre otros; con una amplia variedad de materiales y para muchas aplicaciones distintas, ya que cuenta con un diseño modular, lo que permite cambiar el sentido de compresión (presión) a la dirección de tracción (tensión) y realizar ensayos de forma flexible con diferentes fuerzas y velocidades de ensayo, de esta manera ayudará a determinar la viabilidad de las probetas y comprobar si el nuevo material compuesto funciona para aplicaciones específicas, Además, permitirá evidenciar si cumple con los estándares de calidad necesarios.

Figura 17

Máquina de ensayos universal marca MTS



Máquinas de Medición y Apoyo para la Producción del Proyecto

- **Bascula**

Se utiliza para determinar el valor de la masa de un objeto con una alta precisión. Las básculas electrónicas cuentan con celdas de carga que son sensores con piezas metálicas unidas a galgas extensométricas que, al comprimirse, modifican su resistencia eléctrica y permiten medir el peso en unidades de medida como gramos, kilogramos, libras, entre otros; mostrando el resultado en una pantalla digital.

Figura 18

Bascula electronica



- **Calibrador**

Es un instrumento utilizado para obtener mediciones de longitud en dimensiones internas, externas y de profundidad de diferentes objetos. En este caso, se utiliza un calibrador digital que cuenta con una pantalla que muestra la medida con alta precisión, eliminando la necesidad de realizar lecturas manuales y reduciendo así el riesgo de errores en la toma de datos.

Figura 19

Calibrador digital

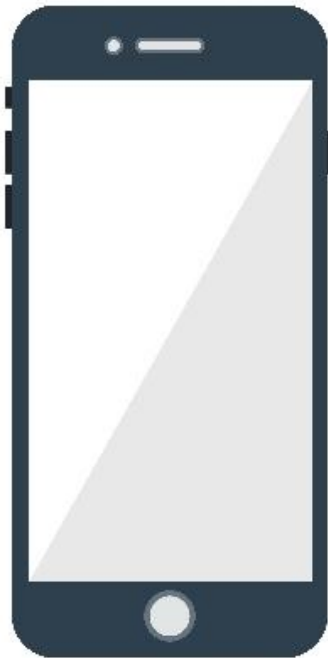


- **Celular**

Es un dispositivo portátil que ofrece una amplia variedad de funciones desempeñando un papel importante en la gestión de tareas del proyecto, que ayuda con la comunicación y productividad, además está equipado con una cámara que permite tomar fotografías para poder evidenciar mejor los procedimientos realizados durante el desarrollo de este trabajo.

Figura 20



Celular








- **Computador**

Es un dispositivo electrónico diseñado para procesar, almacenar y manipular datos de acuerdo con instrucciones programadas, permite acceder a una amplia gama de recursos en línea, como bases de datos académicos, revistas científicas, libros electrónicos y materiales de investigación, facilitando la recopilación y redacción de información relevante para el proyecto.

Figura 21*Computador portatil***Tabla 1***Objetos*

Nombre	Descripción	Foto	Figura X.
Balde	Un balde es un recipiente cóncavo con un asa abatible que sirve para almacenar y transportar líquidos.		Figura 22 Balde rojo
Bolsas de ziploc	Estas bolsas cuentan con un cierre hermético en la parte superior que se asegura de que el contenido permanezca fresco y libre de aire, son ideales para almacenar y organizar objetos.		Figura 23 bolsas de ziploc

Nombre	Descripción	Foto	Figura X.
Cinta	La cinta adhesiva tiene como principal objetivo pegar, unir y sujetar materiales.		Figura 24 Cinta
Cinta doble faz	La cinta doble faz es un tipo de cinta que tiene adhesivo en ambos lados.		Figura 25 Cinta doble faz
Cuaderno	Es un instrumento de aprendizaje compuesto por varias hojas de papel destinado a plasmar diferentes tipos de anotaciones.		Figura 26 Cuaderno de rayas
Cuchara	Es un utensilio que se compone de una parte cóncava prolongada en un mango y que sirve para llevar cosas líquidas.		Figura 27 Cuchara de metal
Envases de vidrio	Conservan las cualidades originales de su contenido y lo protege frente a agentes externos. El vidrio se crea al fundir las materias primas en hornos a una temperatura próxima a los 1000 °C.		Figura 28 Envase de vidrio de 500 ml

Nombre	Descripción	Foto	Figura X.
Mazo	Es una herramienta de percusión compuesta de una cabeza, por lo común de hierro, y un mango, generalmente de madera.		Figura 29 Mazo
Pala	Una pala es una herramienta de mano utilizada para excavar o mover materiales con cohesión relativamente pequeña.		Figura 30 Pala
Petri	La función de esta pieza es la observación de fenómenos biológicos y la puedes usar como una base en actividades de pesaje con diferentes balanzas.		Figura 31 Envases petri con tapa
Pinzas de laboratorio	Se usan para sostener y separar los tejidos de diferentes materiales.		Figura 32 Pinzas verdes de laboratorio
Probeta	Es un tubo cilíndrico y transparente con una base plana y una boca estrecha, es un instrumento utilizado en laboratorios para medir volúmenes de líquidos.		Figura 33 Probeta de 500 ml
Tijeras	Las tijeras son una herramienta de corte que consta de dos hojas afiladas con un punto de pivote en el		Figura 34 Tijeras

Metodología

- **Recolección y preparación de materia prima:**
 - ✓ Seleccionar varias muestras de fibras naturales de fique.
 - ✓ Limpiar impurezas visibles de las muestras de fibras naturales.
 - ✓ Cortar las fibras en segmentos similares para disponerlas al proceso de alcalinización.
 - ✓ Obtención y cortado del filamento de PLA en pedacitos de 3 milímetros.
- **Proceso de alcalinización:**
 - ✓ Preparar las soluciones alcalinas específicas, en este caso, hidróxido de sodio y cal viva con agua.
 - ✓ Sumergir las muestras de fibras en la solución alcalina durante un tiempo estipulado.
 - ✓ Realizar agitación periódica para una correcta distribución de la solución.
 - ✓ Al finalizar el proceso alcalino, limpiar las fibras para realizar el proceso de cocción.
- **Proceso de cocción:**
 - ✓ Transportar las fibras al horno a una temperatura adecuada para su correcto secado.
 - ✓ Al finalizar el proceso de secado, martillamos y cortamos las fibras, para buscar unas fibras más delgadas y aptas para fabricar el filamento de material compuesto.
- **Parámetros de funcionamiento:**
 - ✓ Análisis de los parámetros de temperatura, velocidad y tiempo de la matriz polimérica (PLA), mediante ensayos en la extrusora.
- **Mezcla de componentes:**
 - ✓ Se calculan las cantidades en los porcentajes adecuados en peso para unir los dos componentes.

- ✓ Introducir los materiales (PLA y fique) en la extrusora para poder unirlos, creando un nuevo filamento del material compuesto.
- **Análisis morfológico:**
 - ✓ Preparar las muestras de filamentos para el respectivo análisis, cortándolas y cubriéndolas con una capa delgada de un material conductor.
 - ✓ Realizar observaciones de microscopía electrónica de barrido para evaluar la adhesión entre la matriz y la fibra de refuerzo.
- **Pruebas de probetas:**
 - ✓ Fabricación y evaluación de la viabilidad de los filamentos compuestos, mediante la impresión de probetas utilizando la impresora 3D.
 - ✓ Por medio de la máquina de ensayo universal, se hace la prueba de tensión a las probetas para analizar el comportamiento del material mediante gráficas.
- **Conclusiones:**
 - ✓ Resumir y analizar los resultados obtenidos para dar las conclusiones principales del proyecto.

Procedimiento Experimental

Fase 1. Tratamiento de Alcalinización de las Fibras

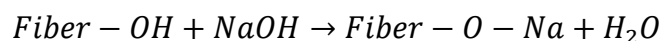
Se realizó un ataque químico a la superficie del fique en el Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología (K - 006) de la Universidad Pontificia Bolivariana. Ese ataque superficial consistió en la alcalinización de las fibras naturales, un proceso en el cual estas fueron sumergidas por largos periodos de tiempo en una solución de agua con el NaOH que se muestra en la figura 35, lo que genero un proceso de ionización del grupo hidroxilo con los alcóxidos, con el objetivo de romper las fibras naturales y poder obtener microfibras de menores diámetros, además también se quería eliminar cierta cantidad de lignina, ceras y aceites existentes.

Figura 35

NaOH marca Merck



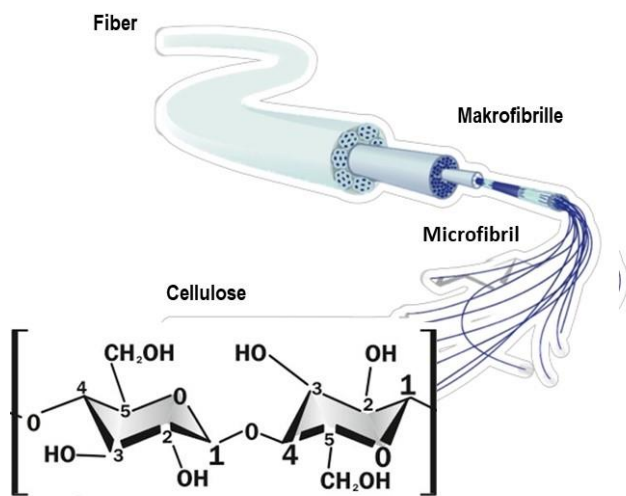
La reacción anteriormente mencionada y representada en la siguiente ecuación, permitió la interrupción de los enlaces de hidrogeno en la estructura, aumentando la rugosidad de la superficie, lo que nos brindó un mejor anclaje mecánico en el nuevo material compuesto.



En la figura 36 se muestra la estructura de una fibra natural, donde se puede observar que esta fibra está compuesta por microfibras y macrofibras, las cuales se componen principalmente de celulosa, que es un elemento fundamental de la pared de las células vegetales en plantas, madera y fibras naturales. Se encuentra combinada, generalmente, con sustancias como la lignina, hemicelulosas (carbohidratos más cortos principalmente pentosanos), pectinas y ácidos grasos. La celulosa es un polímero lineal compuesto por unidades de glucosa y las cadenas de celulosa se acoplan en haces unidos por puentes de hidrógeno.

Figura 36

Componentes de una fibra natural



Nota. Sena, R (2017),

https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/3257/modificacion_microfibras.pdf?sequence=1&isAllowed=

Para esta fase primero se escogió y limpio 40 gramos de fibra necesarios para cada recipiente como se puede ver en la tabla 1.

Tabla 2*Parámetros de soluciones para el ataque alcalino*

Ratio (1:X)	Fibra (g)	Concentración de NaOH (w/v %)	NaOH (g)	Volumen (ml)	kg fiber / kg NaOH
10	40	5	20	400	4
10	40	10	40	400	1
5	40	5	10	200	4
5	40	10	20	200	2

Después se procedió a calcular la masa del soluto en gramos de NaOH utilizando la siguiente ecuación, en la que se manejó una concentración del soluto de 5 (w/v%) y 10 (w/v%) y se utilizó un volumen de la solución de 400 mililitros.

$$\text{Concentración}_{\text{ soluto}}(W / V\%) = \frac{\text{Masa}_{\text{ Soluto}}(g)}{\text{Volumen}_{\text{ Solución}}(ml)} \cdot 100$$

Donde para una relación (1:10), se calculó que se requerían 20 y 40 gramos de NaOH, los cuales se pesaron en la báscula sobre un papel como se puede observar en la figura 24 debido a su alta corrosividad. De forma rápida, se procedió a crear la solución con agua para sumergir las fibras de fique en los recipientes de vidrio que tenían una capacidad volumétrica de 500 mililitros para su tratamiento superficial como lo muestra la figura 24.

Figura 37

Bascula pesando 40 gramos de NaOH

**Figura 38**

Muestras de fique en tratamiento con NaOH



También se realizó un ataque a las fibras naturales de fique mediante su inmersión en una solución de agua con CaO como se puede ver en la figura 39. Este producto es bastante

higroscópico, lo que significa que puede absorber el agua en forma de vapor o de líquido de su ambiente, lo que ayuda a encontrar las características del fique necesarias. De las opciones, se seleccionan las fibras naturales de fique que estuvieron en tratamiento de alcalinización con NaOH al 10 (w/v%), ya que eran las que al contacto se sentían más débiles y permitían obtener fibras más pequeñas y delgadas.

Figura 39

Muestras de fique en tratamiento con CaO



Fase 2. Secado y Cortado de las Fibras

Una vez las fibras naturales terminaron su proceso de alcalinización, fueron retiradas de los recipientes de vidrio para lavarlas con abundante agua y también con ácido acético mediante un spray, adicionándolo en muy pequeñas dosis para obtener un pH homogéneo en todas las partes de las fibras. Esto se hizo ya que se esperaban valores de pH elevados en las soluciones alcalinas y esto ayudo a regularlo. Posteriormente, las fibras fueron cortadas en trozos pequeños y se martillaron con un mazo, para disponerlas en recipientes de vidrio Petri, como se puede observar

en la figura 40 para poder transportarlas hasta el Laboratorio de Transferencia de Calor (I – 205) de la Universidad Pontificia Bolivariana donde se encontraba el horno.

Figura 40

Fibras de fique diluidas en vinagre



En este lugar, las fibras fueron transferidas a bandejas de metal, las cuales fueron llevadas al horno para secar las fibras a 45°C durante 14 horas. Una vez secas las fibras, se realizó nuevamente un proceso de cortado para obtener trozos más pequeños de fibras, los cuales están listos para el proceso de la fase 5 donde se fabrica el filamento con la mezcla de nuestros componentes.

Figura 41

Fibras de fique dispuestas a ser secadas

**Figura 42**

Fibras en proceso de secado a una temperatura de 45°C



Fase 3. Parámetros de Velocidad y Temperatura

Los parámetros para la obtención de filamentos fueron obtenidos a prueba y error en el Laboratorio de Procesos Industriales (K - 003) de la Universidad Pontificia Bolivariana,

estableciendo la temperatura “set point” y la velocidad en el tornillo. El PLA es un material que viene en un rollo de aproximadamente 3 kilogramos en forma de filamento, se cortó en trozos entre 2 milímetros y 3 milímetros, los cuales se situaron en la tolva de la extrusora previamente encendida y precalentada a una temperatura de 160 °C, cuando se encendió el tonillo empezó a salir el polímero demasiado líquido y no formaba nuevamente el filamento, por lo que se concluyó que la temperatura era demasiado alta, sin embargo también se observó que la impresora aun contenía residuos de otro material anteriormente usado en ella ya que salían trozos de un color diferente al filamento original como se puede observar en la figura 43, debido a ello se contempló una limpieza profunda para dejarla funcionando únicamente con PLA, para así encontrar los parámetros correctos.

Figura 43

Extrusora expulsando el material usado anteriormente

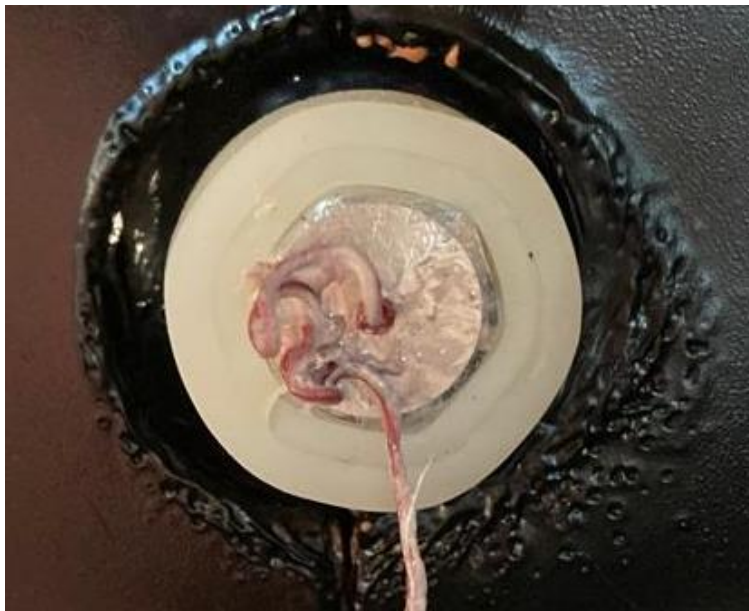
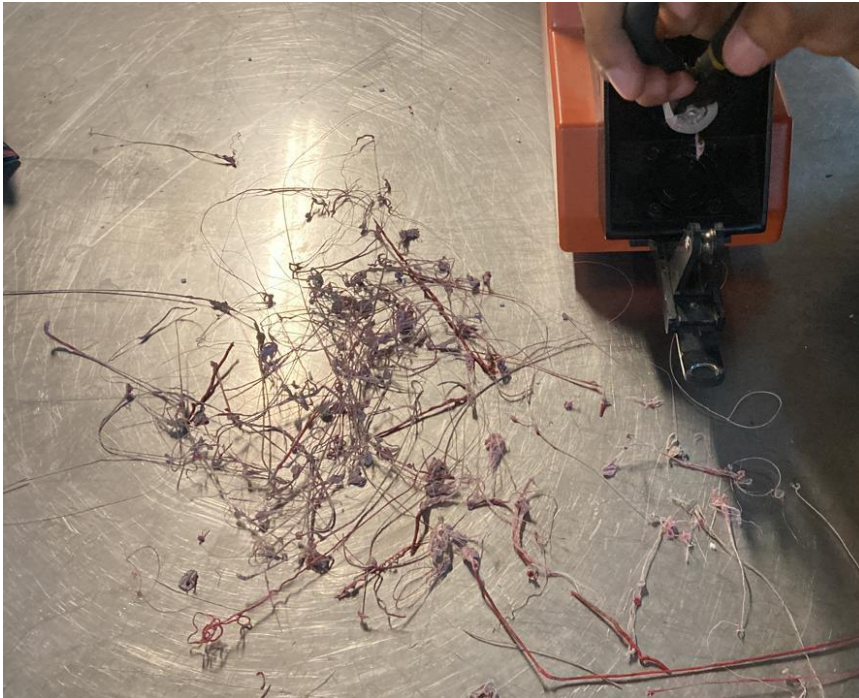
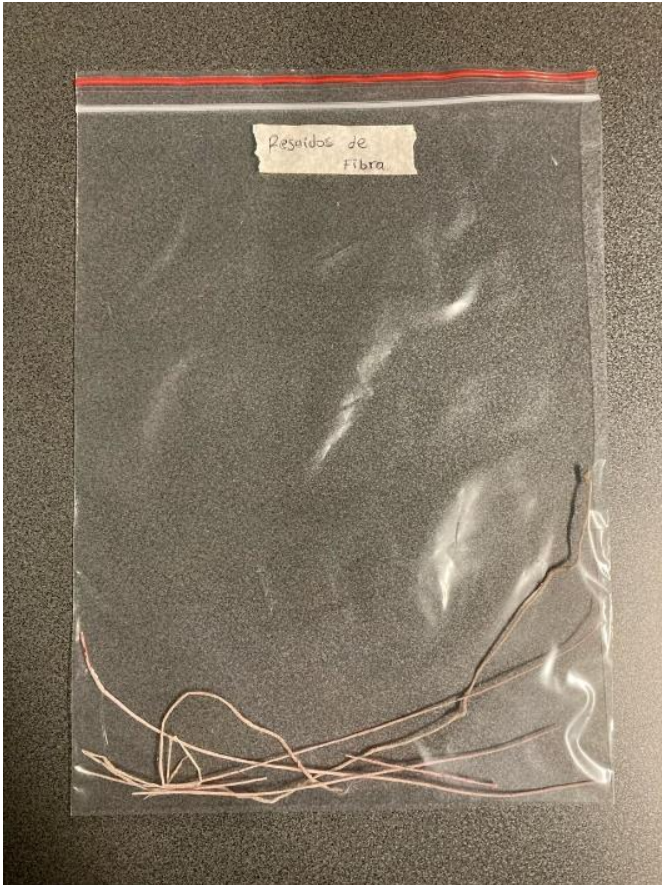


Figura 44

Residuos de la limpieza aplicada a la maquina



En seguida a esto, se desconectó la máquina para dejar enfriar la resistencia y obtener una temperatura más baja ya que se necesitaba que el PLA saliera más duro. Luego se realizó nuevamente el procedimiento a una temperatura de 145 °C. Se observó que con esta temperatura el filamento empezó a salir muy rígido y sus características no servían para la impresora 3D ya que como salía más lento quedaba más grueso y con bultos, como se puede ver en la figura 45.

Figura 45*Residuo de fibra*

Se concluyó que la temperatura conveniente estaba entre 160°C y 145°C, por lo cual se hizo un ajuste a una temperatura de 155°C, siendo esta la adecuada para el filamento. Teniendo la temperatura útil, se procedió a encontrar la velocidad de extrusión de la maquina ya que esta no cuenta con un tablero numérico que diera el dato. Para calcular la velocidad en m/s utilizamos la siguiente formula:

$$V = \frac{x}{t}$$

Para encontrar la distancia representada como x, se midió de la boquilla de la extrusora hasta el soporte del filamento y posteriormente, para encontrar el tiempo representado como t se hizo una marca en el filamento que salía por la boquilla cuidadosamente con las tijeras y se registró

el tiempo con un cronometro de celular, de cuanto tardaba en llegar esta marca hasta el soporte de la misma máquina.

Tabla 3

Parámetros de la extrusora con PLA

Ítem	Distancia x (m)	Tiempo t (s)
1	0,24	13
2	0,24	12
3	0,24	14
4	0,24	12
5	0,24	13

Nota. Se repitió el procedimiento varias veces para encontrar un tiempo promedio y ser más precisos al obtener la velocidad.

Finalmente se calcula un tiempo promedio de 13 segundos, con lo cual se encontró que la velocidad de la extrusora trabajando con PLA es de $0,01846 \frac{m}{s}$.

Figura 46

Extrusora en proceso de creación del filamento



Fase 4. Cálculo de Fracción Volumétrica de las Fibras

Las propiedades de rigidez y resistencia de los materiales compuestos dependen de la fracción volumétrica de las fibras, esta proporción es muy importante para el proyecto ya que es considerado un indicador de la calidad del material. Se debe determinar la fracción volumétrica de las fibras a partir de los pesos de las fibras y de la matriz (W_f y W_m), de sus densidades conocidas (ρ_f y ρ_m), donde se supone que el contenido en huecos del material compuesto es despreciable; la fracción volumétrica de fibras V_f , se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{\rho_m * W_f}{\rho_f * W_m + \rho_m * W_f} * 100\%$$

$$V_f = \frac{1,43 \frac{g}{cm^3} * 10 g}{0,870 \frac{g}{cm^3} * 40 g + 1,43 \frac{g}{cm^3} * 10 g} * 100\%$$

$$V_f = 29,12423625\%$$

Fase 5. Creación del Filamento con el Nuevo Material Compuesto

Teniendo listos los dos componentes principales de del proyecto, el PLA como matriz polimérica y las fibras de fique como refuerzo de fibra natural, en el Laboratorio de Procesos Industriales (K - 003) de la Universidad Pontificia Bolivariana, se intentó mezclar inicialmente en una bolsa ziploc ambos componentes para disponerlos juntos en la tolva de la extrusora, entonces se colocó primero el PLA y el fique fue esparcido por la parte de arriba, se cerró la bolsa y se agitó, pero los materiales no se mezclaron, sino que las fibras de fique se pegaban entre si formando grumos. Por este motivo se decidió introducir los dos componentes directamente en la extrusora por capas, intercalando cada material, poniendo en total 40 gramos de PLA y 10 gramos de fibras fique que cubrieron completamente el tornillo de la extrusora.

Anteriormente se realizó el proceso de encendido y precalentado para la correcta preparación de la máquina con los ajustes de los parámetros de velocidad y temperatura anteriormente hallados en la fase 3. A medida que los materiales se iban acabando, se rellenaba la tolva de la misma manera. Al principio, se obtuvieron algunos residuos de fibra cortos, mientras se estabilizaba el proceso y se lograba producir un filamento de varios centímetros de largo. El resultado de este procedimiento dio unos filamentos de 180 centímetros y 140 centímetros como se puede ver en la figura 47, los cuales presentaban el grosor adecuado para ser llevados a la impresora 3D.

Figura 47

Filamentos del material compuesto

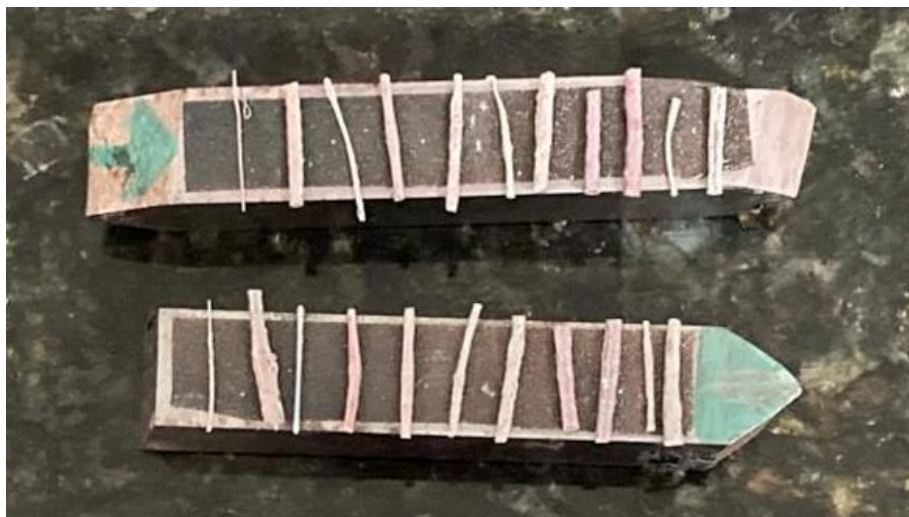


Fase 6. Microscopía Electrónica de Barrido

Esta parte del proyecto también fue realizada en el Laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología (K - 006) de la Universidad Pontificia Bolivariana. En primer lugar, se utilizó el micrótopo para cortar correctamente las muestras de los filamentos obtenidos en la extrusora en la fase 5. Posteriormente, las muestras fueron ubicadas en la cinta doble faz, la cual se adhirió a dos barras de metal para ser llevadas al Sputtering. Este equipo, mediante un bombardeo iónico, permite cubrir las muestras con oro, un procedimiento necesario para hacerlas conductoras y así poder observarlas en el Microscopio Electrónico de Barrido.

Figura 48

Muestras de filamento listas para bombardeo iónico



Una vez ubicadas las muestras en la máquina se procede a cerrar su tapa e iniciar con el proceso de cubrimiento de las muestras, primero se encendió el compresor y posteriormente el Sputtering, el cual procedió a aumentar su presión hasta 25 bar como se observa en la figura 49. En ese momento se presionó el botón de start y pasados 15 segundos se oprimió el botón de start de nuevo, después de otros 15 segundos se presionó el botón flush y se soltó el caucho ubicado en

la parte de atrás, como se puede ver en la figura 50, cuando dejó de sonar la máquina, se presionó el botón leak y cuando la presión llegó a 0 se apagó el Sputtering y consecutivamente el compresor.

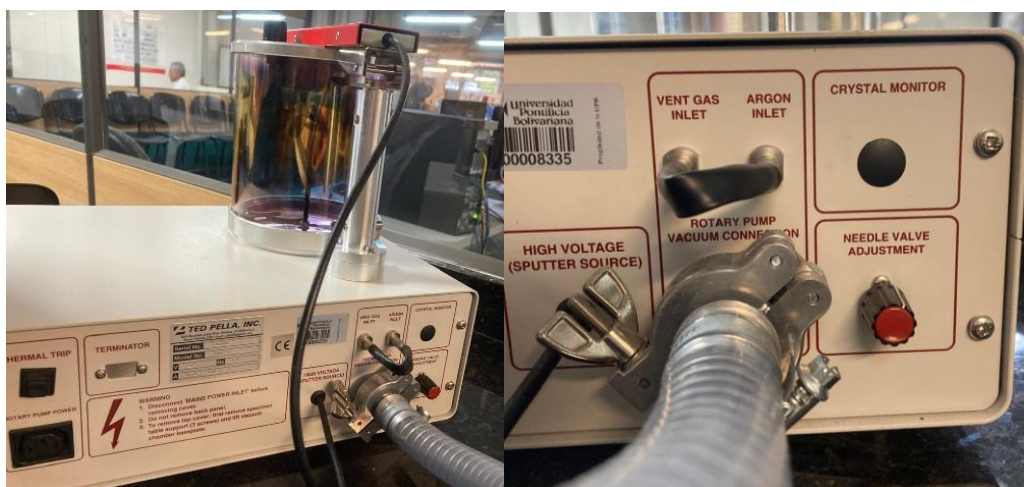
Figura 49

Sputtering con una presión de 25 bar



Figura 50

Sputtering por la parte de atrás



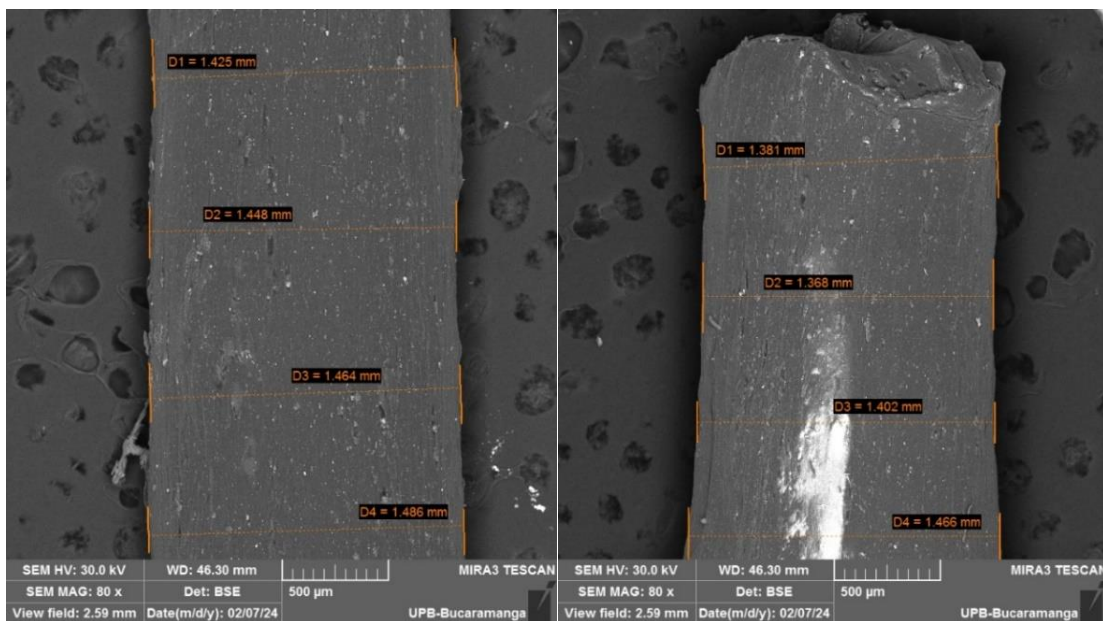
El Microscopio Electrónico de Barrido es un equipo especial que emite electrones que, al ser direccionados correctamente, interactúan con los átomos de la superficie de una muestra previamente preparada, produciendo varios tipos de radiación que son analizados por sendos tipos

de detectores que proporcionan información morfológica como la forma y el tamaño de las fibras, topográfica que muestra las características de la superficie de las fibras y de composición química elemental en la cual se observa las cantidades relativas de los elementos de la fibra, a través de imágenes que pueden alcanzar 1'000.000 de aumentos hasta con una resolución de unos 2 nanómetros.

Los diámetros de filamentos obtenidos en la extrusora con las condiciones de operación de la extrusora anteriormente calculadas, fueron medidos en el Microscopio Electrónico de Barrido de la Universidad Pontificia Bolivariana. Con una boquilla de diámetro 1.75 mm, en la que se puede ver diámetros de filamentos entre 1.3 -1.5 mm como se observa en la figura 51, con 80x aumentos.

Figura 51

Imagen SEM: 80 x Aumentos de filamento de PLA



Fase 7. Dimensionamiento de Probeta: Norma ASTM D638

El ensayo de tracción en plásticos según la norma ASTM D638 proporciona las principales características mecánicas del material, como la tensión a tracción, la deformación, el módulo de

tracción, la resistencia a la tracción, el punto de fluencia y el punto de rotura. Las probetas utilizadas para los ensayos según la norma ASTM D638 se clasifican así:

- **ASTM D638 Tipo I** - Se emplea preferiblemente una probeta tipo I, que con un espesor de 3,2 mm (1/8 de pulgada) y una longitud de medición de 50 mm (2 pulgadas) todavía está relativamente cerca de los espesores de material habituales en componentes y, a su vez, permite alcanzar una buena precisión en la medición de la deformación.

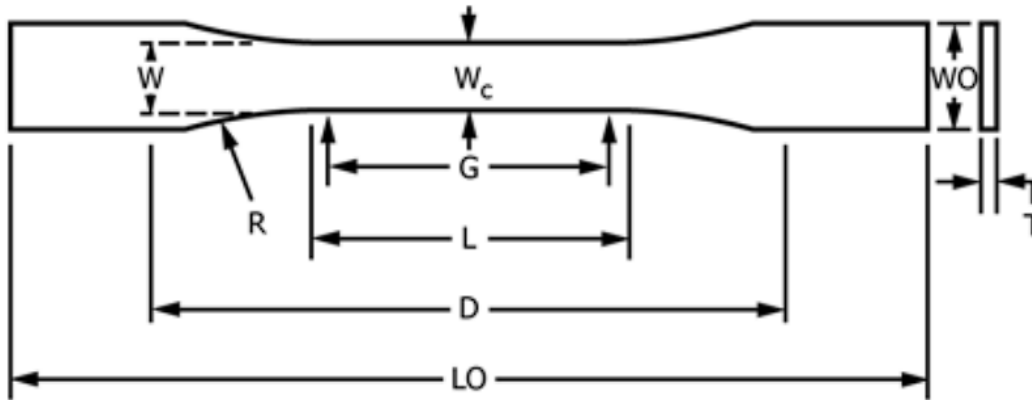
- **ASTM D638 Tipo II** - Si con la probeta tipo I no se produce una rotura en la parte estrecha y paralela, la norma ASTM D638 recomienda la probeta tipo II, con un ancho de la sección paralela estrecha significativamente reducido.

- **ASTM D638 Tipo III** - Si se obtienen probetas de espesores de material de más de 7 mm a través del mecanizado, se emplea la probeta tipo III. En este caso, tanto el ancho de la sección paralela estrecha como el ancho de cabeza y la longitud total se incrementan, de modo que el espesor de la probeta es inferior al ancho. En caso de grosores superiores a 14 mm, se ajusta el espesor mediante el mecanizado.

- **ASTM D638 Tipo IV** - La probeta tipo IV es ideal para el ensayo de polímeros muy blandos (por ejemplo, caucho) y se utiliza cuando se busca una comparación entre polímeros blandos y otros más rígidos.

- **ASTM D638 Tipo V** - Si solo se dispone de una pequeña cantidad de material, o si no es posible extraer una probeta más grande de un componente, entonces se usa una probeta tipo V, reducida en todas sus dimensiones respecto al tipo I.

Las dimensiones de la probeta de tracción según la norma ASTM D638, se obtuvieron para una probeta tipo V, tal como se muestra en la siguiente figura:

Figura 52*Dimensiones de la probeta*

Nota. La probeta tipo V fue la seleccionada para el desarrollo del proyecto.

$$W = 3.18 \text{ mm}$$

$$L = 9.53 \text{ mm}$$

$$L_o = 63.5 \text{ mm}$$

$$W_O = 9.53 \text{ mm}$$

$$R = 12.7 \text{ mm}$$

$$D = 25.4 \text{ mm}$$

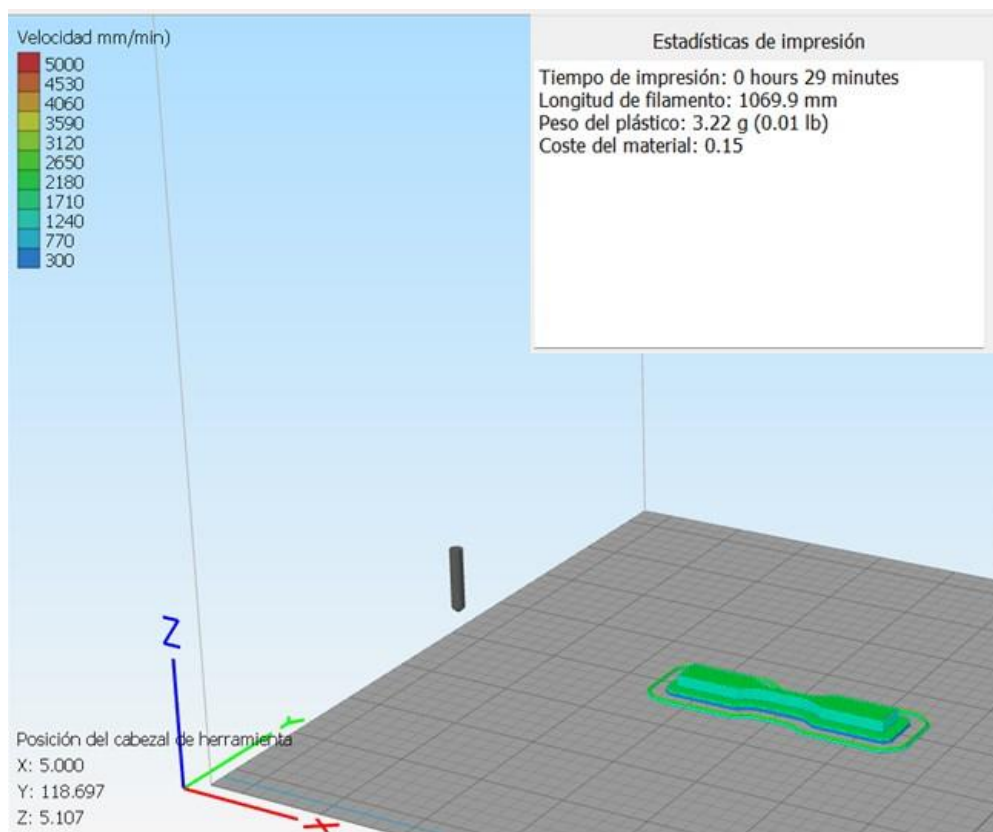
$$T = 3.2 \text{ mm}$$

Fase 8. Impresora 3D

Se fabricaron varias impresiones de probetas de tracción de PLA con fibras de fique y sin refuerzo. En la figura 53 se puede ver la velocidad de impresión, el tiempo de impresión, la longitud de filamento utilizado y el peso de material utilizado. El proceso de impresión es simple ya que es totalmente automatizado, únicamente es necesario diseñar la probeta en el programa SolidWorks guiándose de las especificaciones requeridas para la prueba de tensión y luego enviar el archivo al software de la impresora para iniciar la impresión.

Figura 53

Estadística de la impresión probeta de tracción



Nota. Descripción del software.

Figura 54

Probeta impresa únicamente con PLA



Figura 55

Probeta impresa con material compuesto

**Figura 56**

Superficie de una probeta hecha con material compuesto



Fase 9. Caracterización Mecánica (Norma ASTM D3552 – 17)

Se realizó una prueba de tensión en el Laboratorio de Elementos y Maquinas (I – 305) de la Universidad Pontificia Bolivariana, con la toma de datos de 5 probetas, las cuales 3 eran del material utilizado a lo largo del proyecto (PLA) y los 2 restantes contenían la combinación del material compuesto (PLA y fibras de fique).

Figura 57

Máquina lista para hacer ensayos



Nota. Esta máquina se maneja a una velocidad de 100hz.

Figura 58

Especificaciones de la maquina



Para esto, primero se marcaron cada una de las probetas con un número para no confundirlas y se midieron con un calibrador las dimensiones de la parte delgada de cada probeta (ancho, grosor, largo) como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 59

Dimensiones de la probeta



Nota. Medidas requeridas por el software de la máquina de ensayos.

W = Ancho

T = Grosor

L = Largo

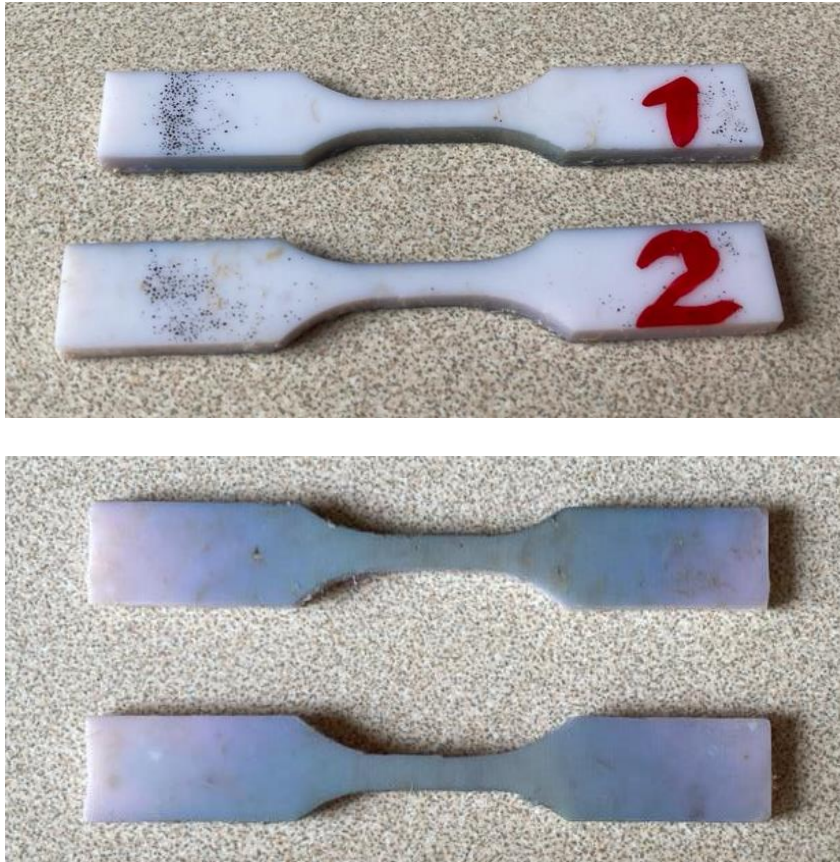
Figura 60

Probetas de PLA listas para la prueba de tensión



Figura 61

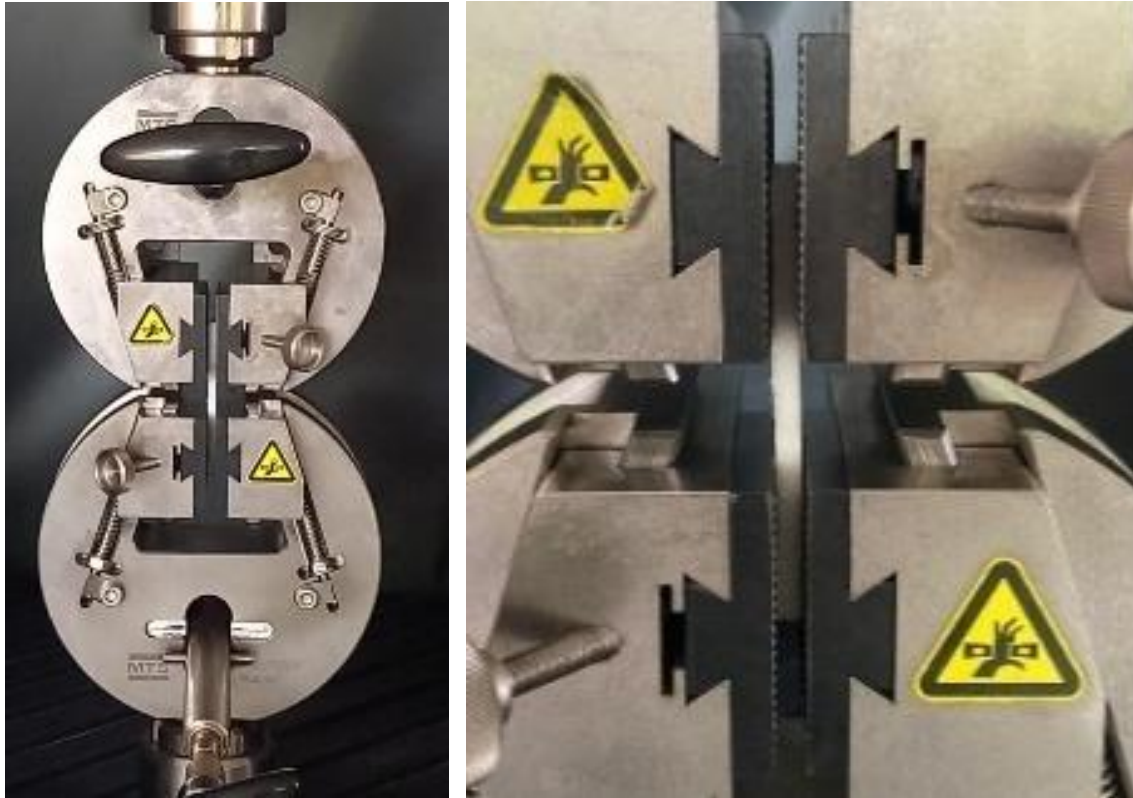
Probetas de material compuesto listas para la prueba de tensión



Después, se posicionaron cada una en la máquina de ensayos de fuerza universal, sujetando cada extremo de la probeta en forma vertical para empezar la prueba de tensión mediante el software TW Elite. En este, se añadieron las medidas de ancho, grosor y largo anteriormente tomadas junto con la velocidad del ensayo que fue de 100 Hz.

Figura 62

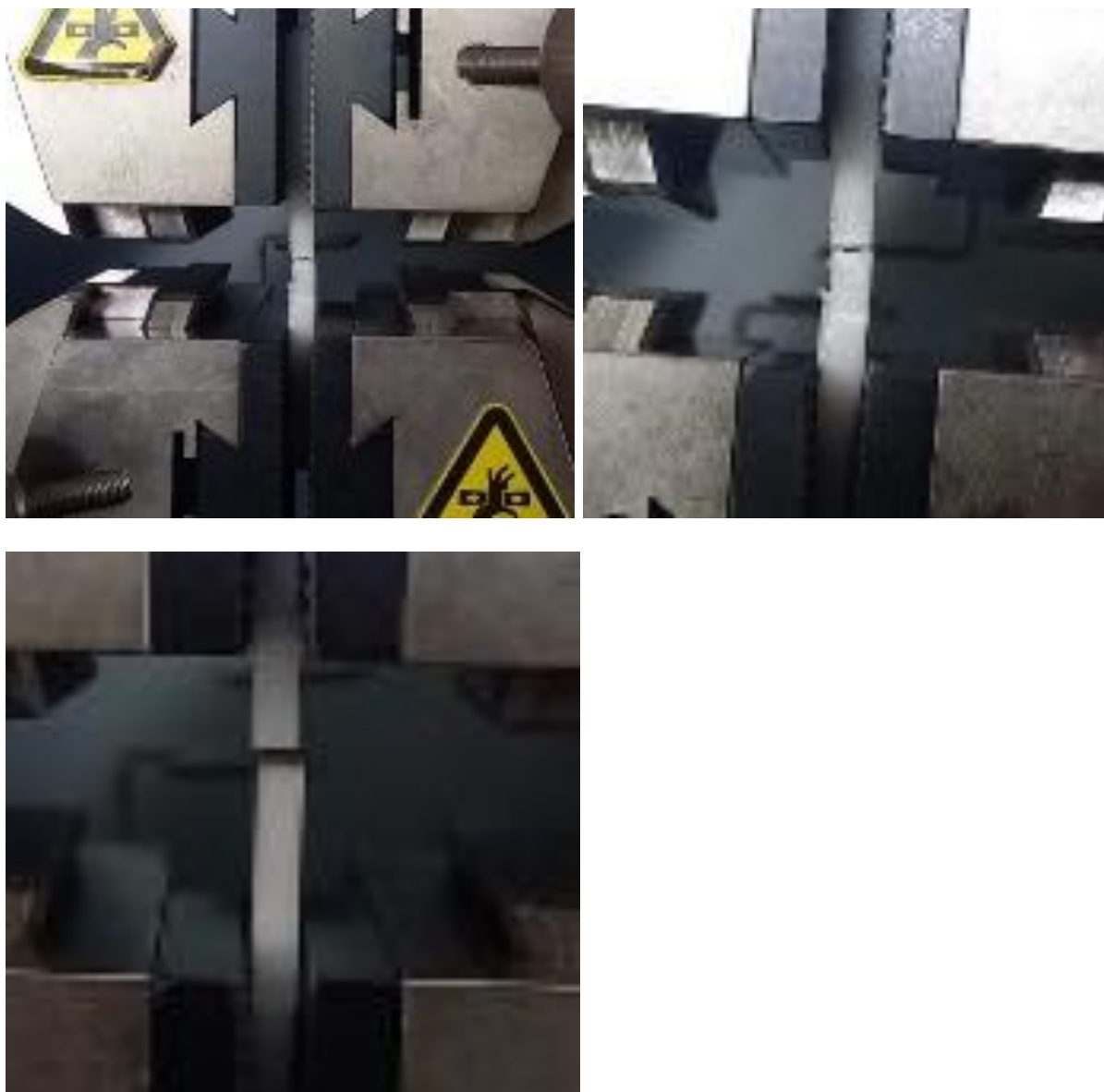
Probetas situadas en la máquina de ensayos universal



Al finalizar la prueba, cada probeta terminó dividida en dos partes, como se puede observar en las imágenes a continuación.

Figura 63

Probetas de PLA justo después de la fractura



Nota. Probeta en su punto de rotura.

Figura 64

Probetas de PLA después de la prueba de tensión

**Figura 65**

Probetas del material compuesto justo después de la fractura





Nota. Probetas en su punto máximo de tensión.

Figura 66

Probetas del material compuesto después de la prueba de tensión



Gracias a la prueba de tensión, se obtuvieron las siguientes gráficas para cada probeta, en las que se comparó la tensión ejercía con la deformación que se produjo en cada una, e identificaron los datos de tensión y carga en el momento en qué se fracturaron. Estos datos ayudaron a evaluar la resistencia y el comportamiento mecánico del material bajo una carga.

Figura 67

Ejecución de ensayo de probeta 1 con PLA

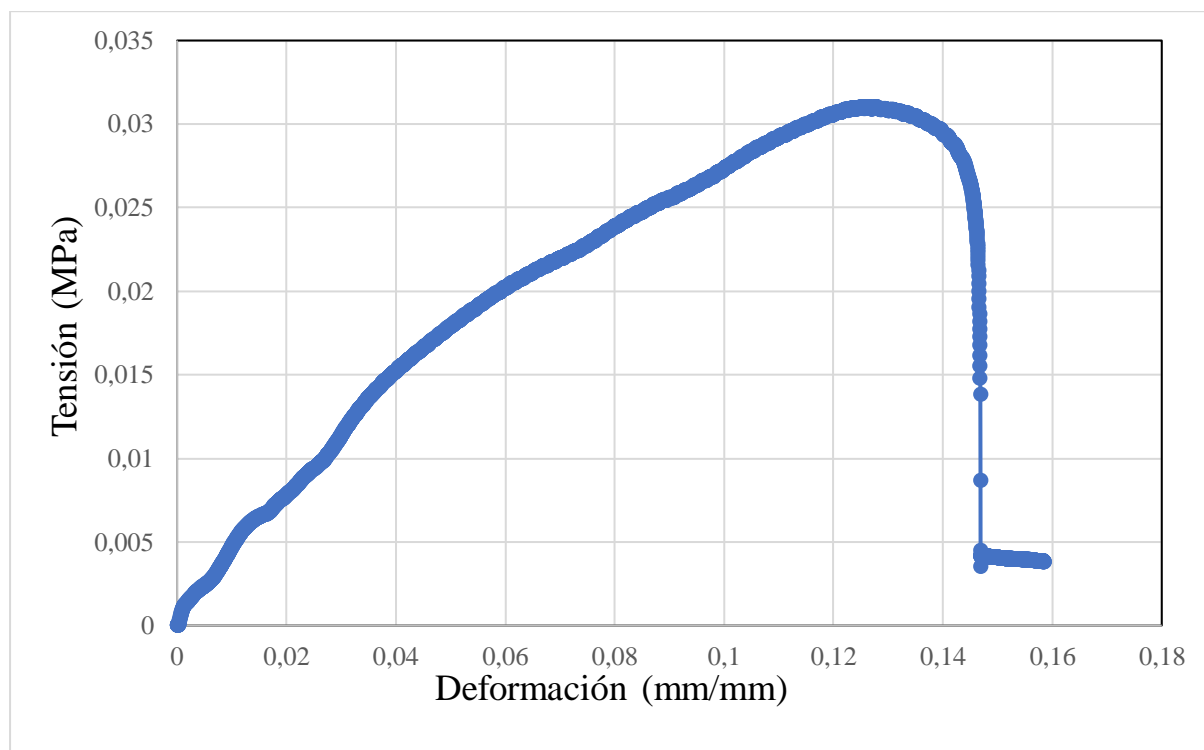
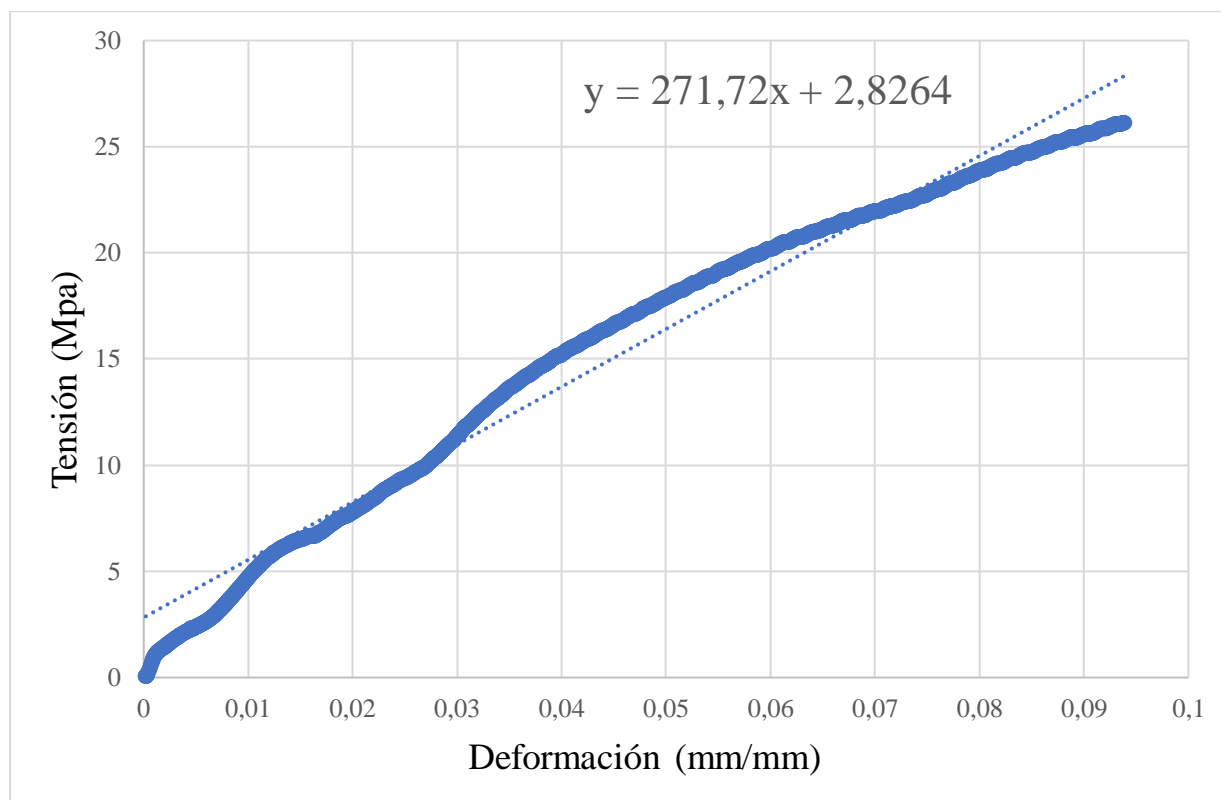


Figura 68*Módulo de elasticidad de probeta 1 con PLA***Tabla 4***Parámetros de ensayo de probeta 1 con PLA*

Nombre visualizado	Valor	Unidad
Tensión de pico	31,02617	N/mm ²
Carga de pico	398,863	N
Deformación a la rotura	0,1269362	mm/mm
Módulo	271,728945	N/mm ²
Anchura	3,41	mm
Grosor	3,77	mm

Nota. Motivo de finalización de ensayo: Rotura detectada.

Figura 69

Ejecución de ensayo de probeta 2 con PLA

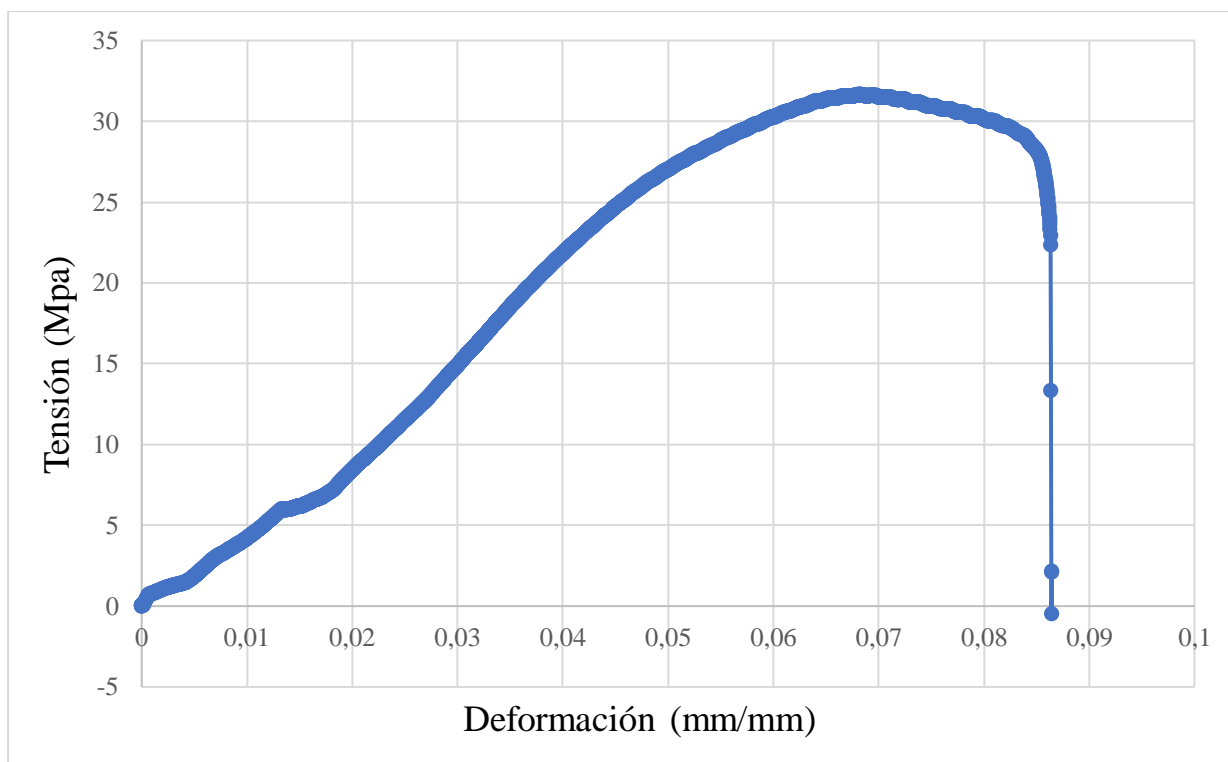
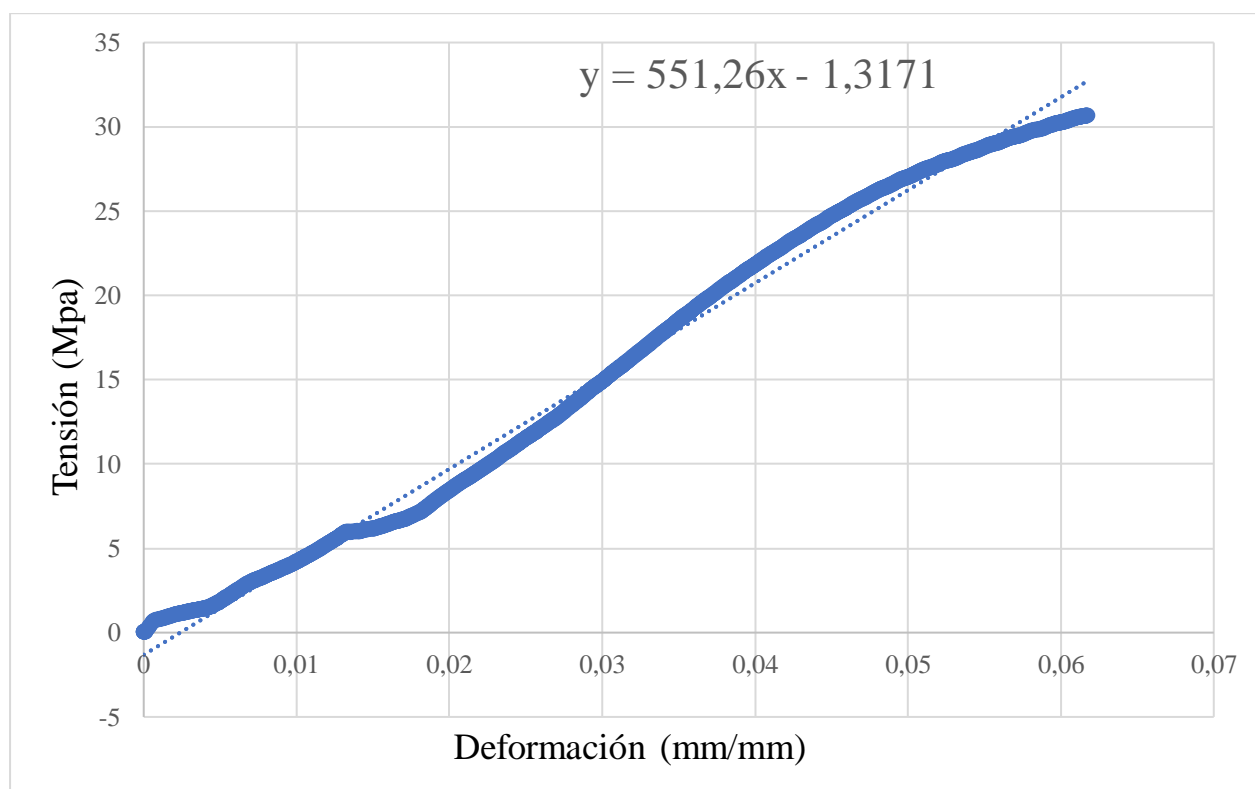


Figura 70*Módulo de elasticidad de probeta 2 con PLA***Tabla 5***Parámetros de ensayo de probeta 2 con PLA*

Nombre visualizado	Valor	Unidad
Tensión de pico	31,62208	N/mm ²
Carga de pico	415,438	N
Deformación a la rotura	0,0589319	mm/mm
Módulo	551,2678318	N/mm ²
Anchura	3,36	mm
Grosor	3,91	Mm

Nota. Motivo de finalización de ensayo: Rotura detectada.

Figura 71

Ejecución de ensayo de probeta 3 con PLA

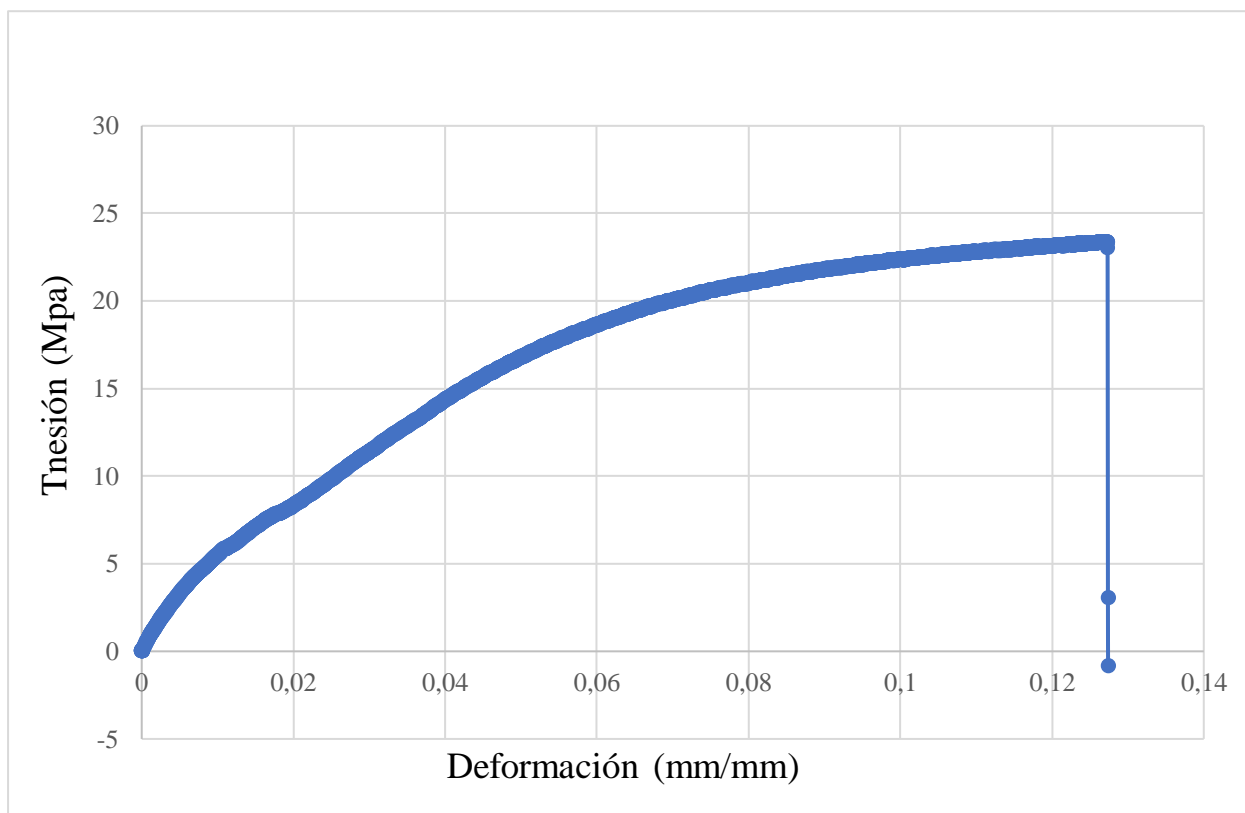
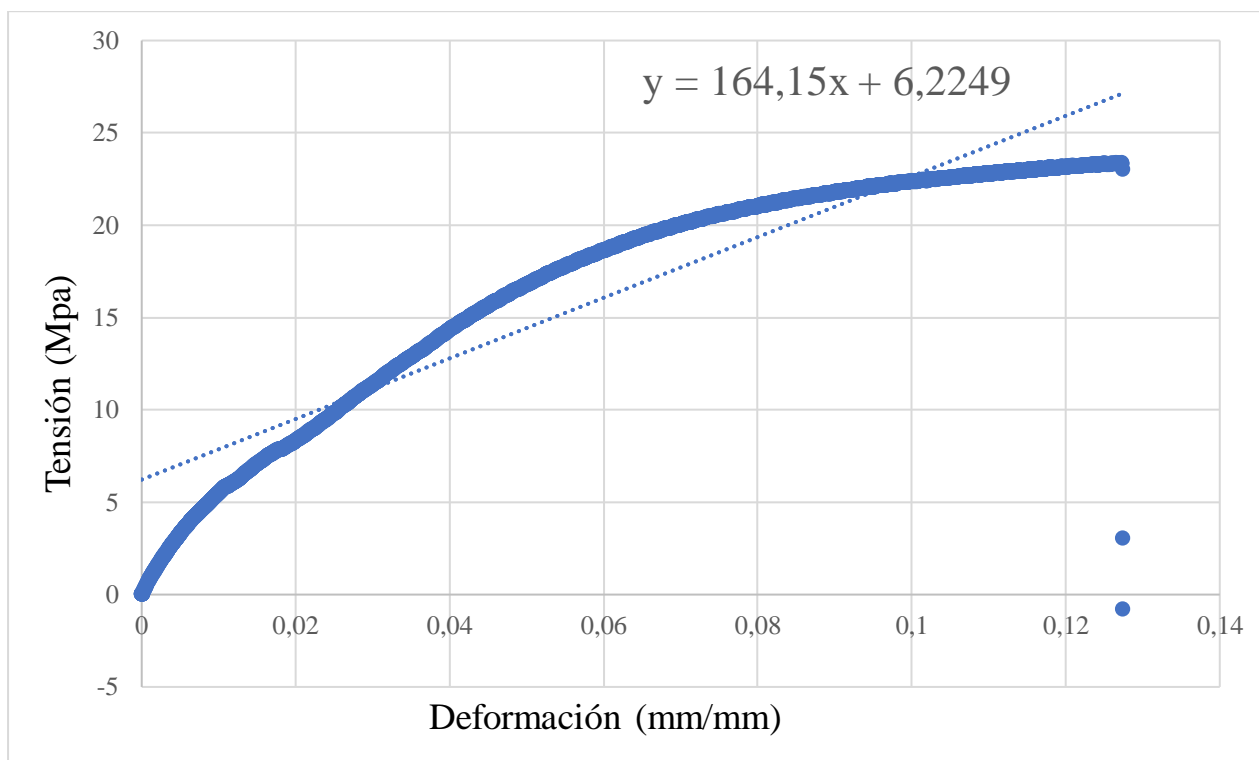


Figura 72*Módulo de elasticidad de probeta 3 con PLA***Tabla 6***Parámetros de ensayo de probeta 3 con PLA*

Nombre visualizado	Valor	Unidad
Tensión de pico	23,356638	N/mm ²
Carga de pico	257,869	N
Deformación a la rotura	0,1269064	mm/mm
Módulo	164,1548923	N/mm ²
Anchura	3,55	mm
Grosor	3,11	mm

Nota. Motivo de finalización de ensayo: Rotura detectada.

Figura 73

Ejecución de ensayo de probeta 1 con material compuesto

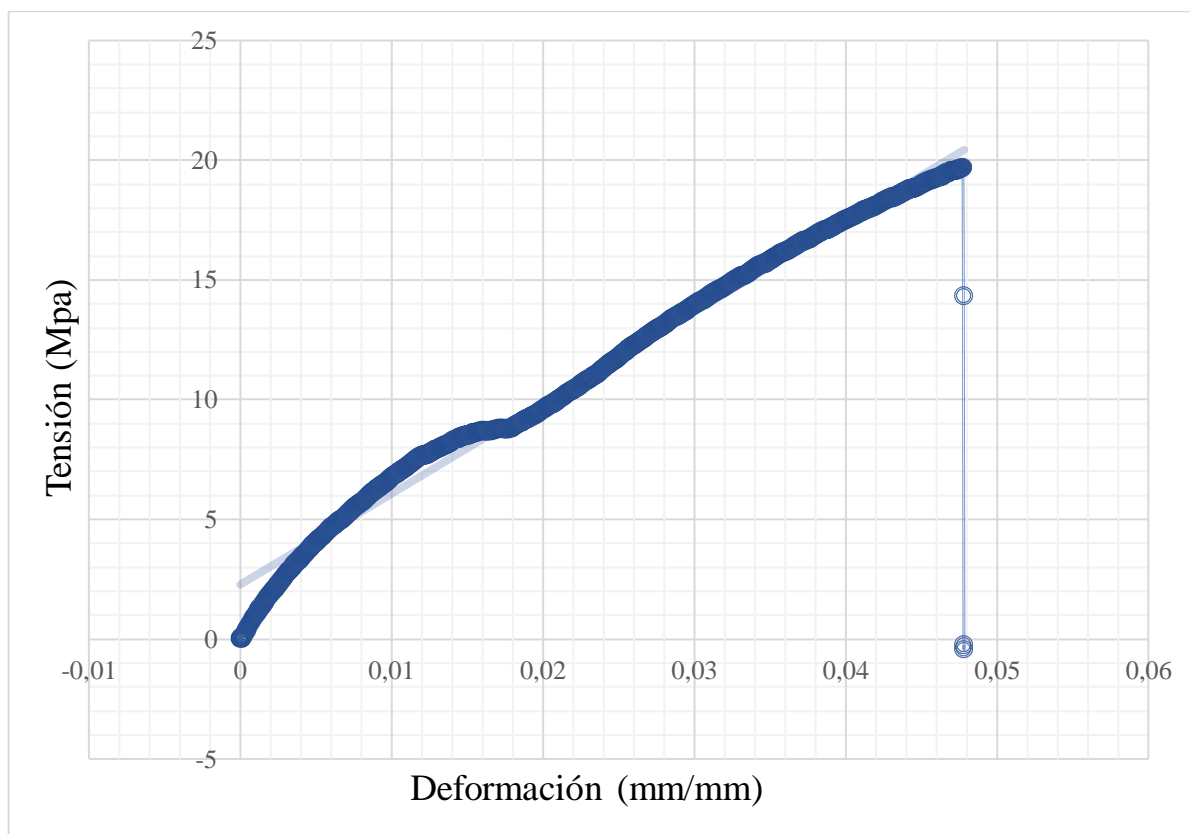
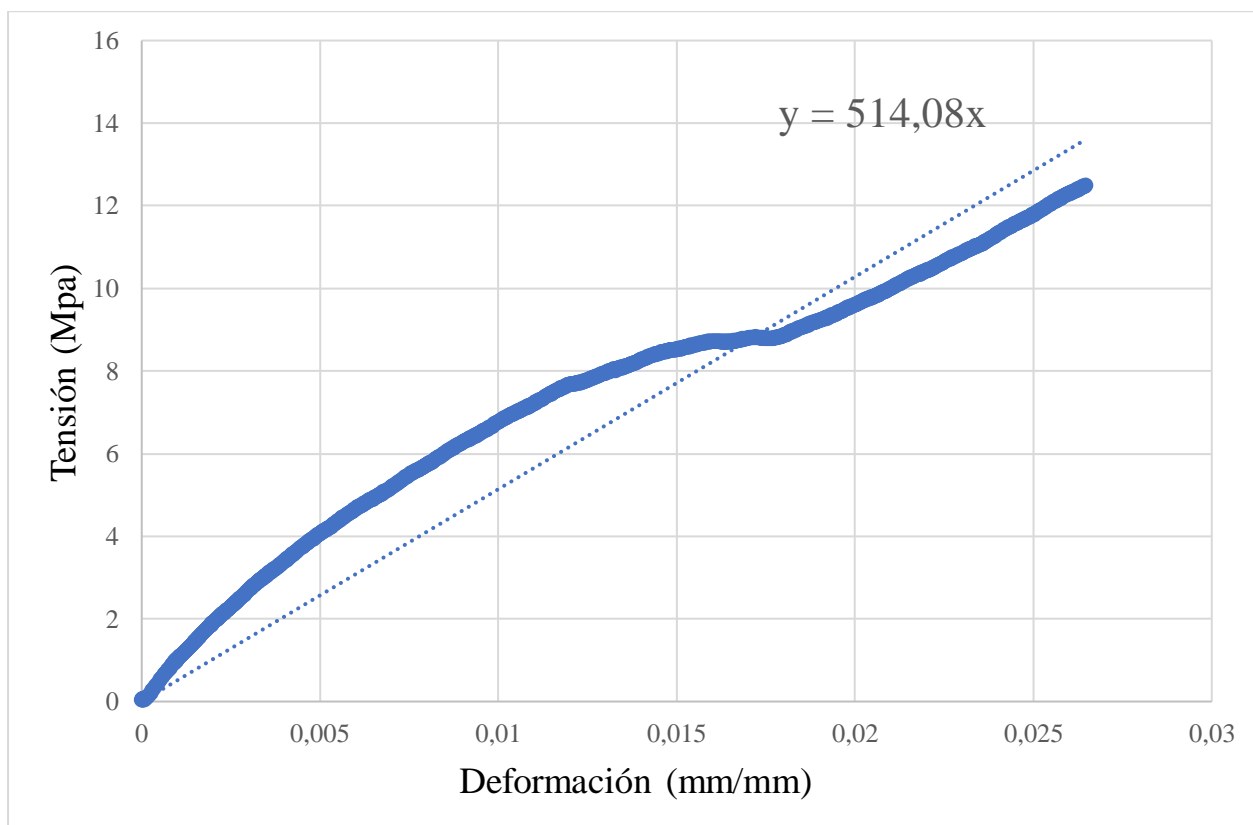


Figura 74

Módulo de elasticidad de probeta 1 con material compuesto

**Tabla 7**

Parámetros de ensayo de probeta 1 con material compuesto

Nombre visualizado	Valor	Unidad
Tensión de pico	19,713236	N/mm ²
Carga de pico	194,363	N
Deformación a la rotura	0,0479089	mm/mm
Módulo	514,0823083	N/mm ²
Anchura	3,13	mm
Grosor	3,15	mm

Nota. Motivo de finalización de ensayo: Rotura detectada.

Figura 75

Ejecución de ensayo de probeta 2 con material compuesto

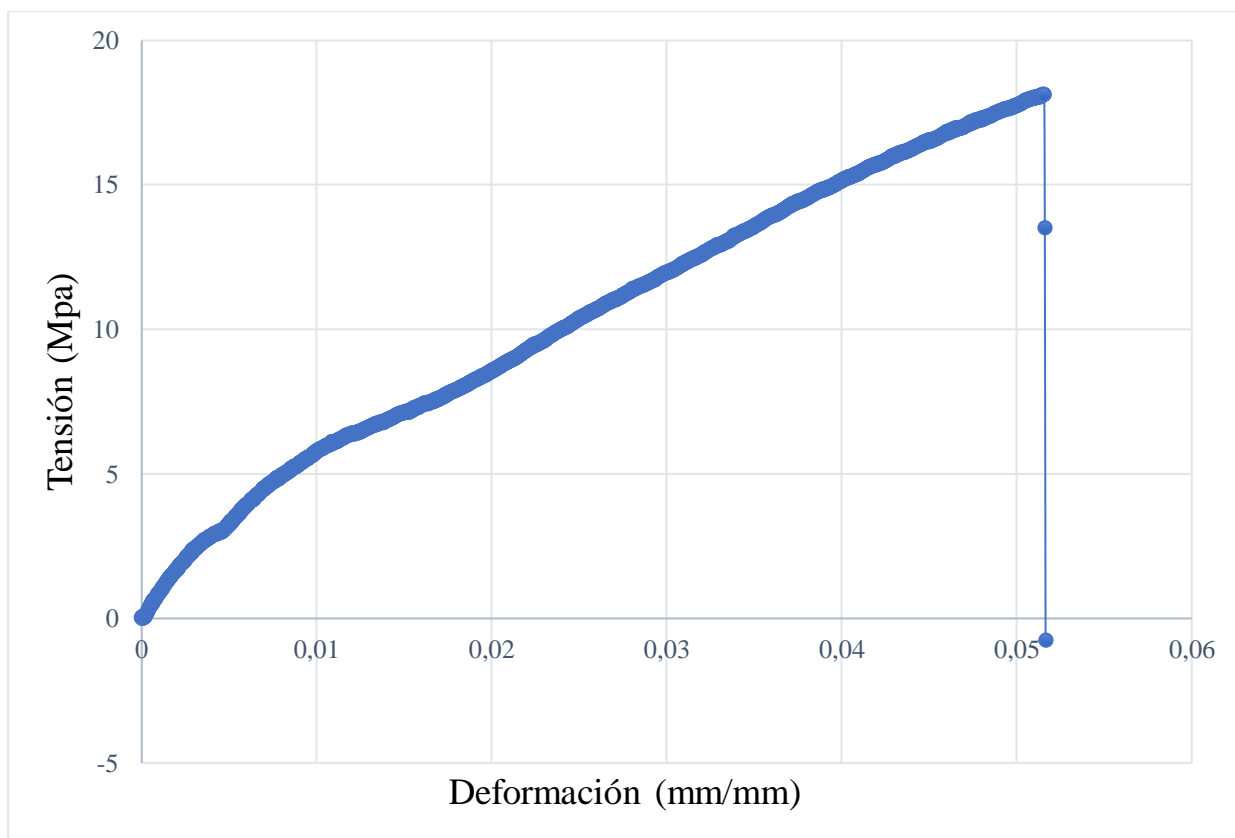
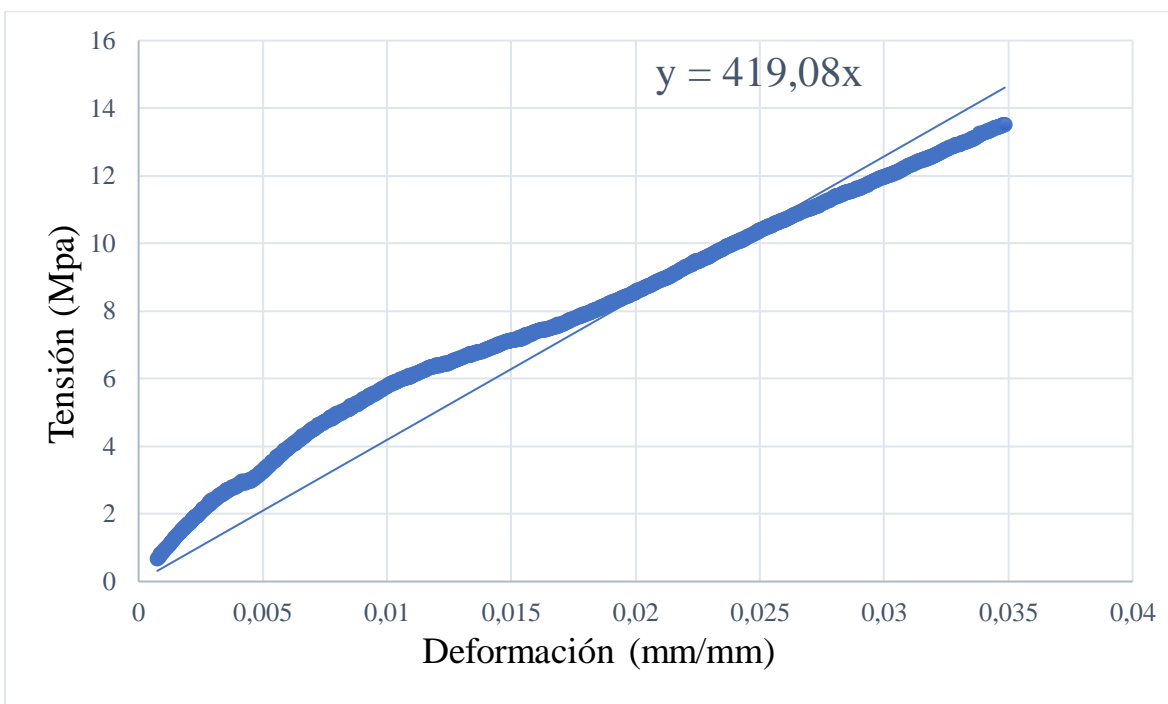


Figura 76

Módulo de elasticidad de probeta 2 con material compuesto

**Tabla 8**

Parámetros de ensayo de probeta 2 con material compuesto

Nombre visualizado	Valor	Unidad
Tensión de pico	18,132202	N/mm ²
Carga de pico	183,926	N
Deformación a la rotura	0,0518713	mm/mm
Módulo	419,0869503	N/mm ²
Anchura	3,21	mm
Grosor	3,16	mm

Nota. Motivo de finalización de ensayo: Rotura detectada.

Se halló también el área transversal de las 5 probetas, es decir el área de la superficie expuesta perpendicular a la dirección de carga, con los resultados obtenidos en la prueba utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Esfuerzo} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Area Transversal}}$$

- Probeta 1 (PLA): Área Transversal = $\frac{398,863N}{31,0261700 \frac{N}{mm^2}} = 12,8557 mm^2$
- Probeta 2 (PLA): Área Transversal = $\frac{415,438 N}{31,6220800 \frac{N}{mm^2}} = 13,1376 mm^2$
- Probeta 3 (PLA): Área Transversal = $\frac{257,869 N}{23,3566380 \frac{N}{mm^2}} = 11,0405 mm^2$
- Probeta 1 (Fique y PLA): Área Transversal = $\frac{194,363 N}{19,7132360 \frac{N}{mm^2}} = 9,8595 mm^2$
- Probeta 2 (Fique y PLA): Área Transversal = $\frac{183,926 N}{18,1322020 \frac{N}{mm^2}} = 10,1436 mm^2$

Se compararon las probetas de PLA puro y las del material compuesto con los resultados obtenidos en la prueba de tensión, lo cual ayudó a determinar si hubo una mejoría o una disminución en las propiedades mecánicas del filamento reforzado. Se logró obtener un porcentaje de aumento comparando el promedio del módulo elástico del PLA puro con el promedio del filamento reforzado con fibras de fique, como se puede ver a continuación.

$$\text{Promedio PLA} = \frac{271,728945 \frac{N}{mm^2} + 551,2678318 \frac{N}{mm^2} + 164,1548923 \frac{N}{mm^2}}{3} = 329,0505564 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Promedio material compuesto:} \frac{514,0823083 \frac{N}{mm^2} + 419,0869503 \frac{N}{mm^2}}{2} = 466,5846293 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Porcentaje de cambio} = \frac{\text{Promedio material compuesto} - \text{Promedio PLA}}{\text{Promedio PLA}} * 100 = \%$$

$$\text{Porcentaje de cambio} = \frac{466,5846293 \frac{N}{mm^2} - 329,0505564 \frac{N}{mm^2}}{329,0505564 \frac{N}{mm^2}} * 100 = 41,79 \%$$

Este cálculo muestra que el material compuesto con fibras de fique es un 41,79% más rígido que el PLA puro, lo que implica una mejora en el módulo elástico. Esto puede significar que el filamento compuesto es más resistente a la deformación cuando se aplica una fuerza, lo cual puede ser beneficioso en aplicaciones donde se busca mayor estabilidad estructural.

Sin embargo, cuando se realizó este mismo procedimiento para analizar otros parámetros como la tensión de pico y la deformación a la rotura, los resultados mostraron que las propiedades mecánicas no fueron tan favorables, obteniendo los siguientes resultados.

Tensión de pico:

$$\text{Promedio PLA} = \frac{31,02617 \frac{N}{mm^2} + 31,62208 \frac{N}{mm^2} + 23,356638 \frac{N}{mm^2}}{3} = 28,668296 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Promedio material compuesto} = \frac{19,713236 \frac{N}{mm^2} + 18,132202 \frac{N}{mm^2}}{2} = 18,922719 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{Porcentaje de cambio} = \frac{18,922719 \frac{N}{mm^2} - 28,668296 \frac{N}{mm^2}}{28,668296 \frac{N}{mm^2}} * 100 = - 33,99 \%$$

Esto significa que la tensión de pico disminuyó aproximadamente un 34% al añadir las fibras de fique al PLA. La disminución en este parámetro sugiere que el material compuesto con fique es más débil en términos de su capacidad para soportar fuerzas de tensión sin fracturarse. Esto podría deberse a problemas de adhesión entre la fibra y la matriz.

Deformación a la rotura:

$$\text{Promedio PLA} = \frac{0,1269362 \frac{mm}{mm} + 0,0589319 \frac{mm}{mm} + 0,1269064 \frac{mm}{mm}}{3} = 0.1049258 \frac{mm}{mm}$$

$$\text{Promedio material compuesto} = \frac{0,0479089 \frac{mm}{mm} + 0,0518713 \frac{mm}{mm}}{2} = 0.0498901 \frac{mm}{mm}$$

$$\text{Porcentaje de cambio} = \frac{0.0498901 \frac{mm}{mm} - 0.1049258 \frac{mm}{mm}}{0.1049258 \frac{mm}{mm}} * 100 = - 52,45 \%$$

Esto significa que el material compuesto es menos dúctil que el PLA puro, lo que podría ser un aspecto a considerar dependiendo de la aplicación deseada, ya que lo hace menos adecuado para aplicaciones donde se requiere una mayor flexibilidad.

En los materiales compuestos, es común que, al mejorar una propiedad como la rigidez, se comprometa otra como la resistencia a la rotura. Este equilibrio entre propiedades puede ser deseable o no, dependiendo de la aplicación específica del material. En este caso la adición de fique al PLA puede ser beneficiosa en aplicaciones donde se necesite mayor rigidez estructural, pero que no estén sometido a altas tensiones, como piezas estructurales que no estén sometidas a grandes esfuerzos o carcasas rígidas.

Conclusiones

Este proyecto de investigación tenía como objetivo principal fabricar filamentos para impresoras 3D, los cuales posteriormente fueron caracterizados. A lo largo del desarrollo del trabajo, se cumplieron los objetivos específicos planteados, lo que permitió evaluar la viabilidad y el rendimiento de este nuevo material compuesto, encontrando así, como principales hallazgos del trabajo que los filamentos mostraron una buena dispersión de las fibras en la matriz y que las probetas hechas con filamento del material compuesto mostraron un mayor módulo de elasticidad.

Las pruebas de tensión realizadas revelaron que las probetas hechas de PLA puro presentaron mejores propiedades mecánicas en términos de tensión del pico y deformación a la rotura lo que indica que es necesario mejorar la adhesión entre la matriz de PLA y las fibras de fique como refuerzo. Sin embargo, las probetas del material compuesto mostraron un módulo de elasticidad más alto, lo que sugiere que puede ser adecuado para aplicaciones que requieran una mayor rigidez estructural. Para futuras investigaciones se recomienda enfocarse en mejorar la adhesión entre los dos materiales mediante tratamientos superficiales que mejoren la compatibilidad entre los componentes y también explorar diferentes proporciones de PLA y fique para optimizar las propiedades mecánicas.

En conclusión, este proyecto de grado demostró que es viable utilizar PLA reforzado con fibras de fique para la fabricación de filamentos para impresoras 3D, destacando sus beneficios ambientales, la reducción de costos y potenciales aplicaciones en la industria de fabricación aditiva, como carcasas para celulares o chasis para drones, entre otras opciones.

Referencias

- Bolívar, G. (2019, octubre 20). *Hidróxido de sodio (NaOH): estructura, propiedades, usos, síntesis*. Lifeder. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/hidroxido-de-sodio/>
- Mazzanti, V., & Tozzi, G. (2016). The effect of infill density on tensile and flexural mechanical properties and on damage mechanisms in PLA prototypes. *Rapid Prototyping Journal*, 22(3), 424–433.
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Hinrichsen, G. (2000). Biofibers, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular Materials and Engineering*, 276(1), 1–24.
- Ondarse Álvarez, D. (2021, julio 15). *Ácido acético*. Recuperado de: <https://concepto.de/acido-acetico/#ixzz8SzmGwfEl>
- Roeder, C. W., & Eckel, E. C. (2006). *Handbook of inorganic compounds* (2.^a ed., p. 254). ChemTec Publishing.
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., SenthamaraiKannan, P., Senthil, S., & Pradeep, S. (2018). Characterization and properties of natural fiber polymer composites: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 172, 566–581.
- Sposob, G. (2023, noviembre 11). *Agua*. Recuperado de: <https://concepto.de/agua/#ixzz8T5D6PTfQ>
- Zhang, Y., Ma, L., & Yu, J. (2015). Manufacturing and characterization of continuous basalt fiber reinforced polylactic acid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 72, 84–93.

Apéndice

Apéndice A

Presupuesto

Resumen del Presupuesto							
Ítem	Rubro	UPB		Recursos propios		TOTAL	
		Especie	Efectivo	Especie	Efectivo		
1	Equipos y Software	\$ 7.477.778	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 7.477.778	
2	Infraestructura	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	
3	Materiales, Insumos y Documentación	\$ 1.072.000	\$ -	\$ -	\$ 43.000,00	\$ 1.115.000	
4	Servicios Tecnológicos y Pruebas	\$ 400.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 400.000	
5	Talento Humano	\$ 6.425.000	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 6.425.000	
6	Transporte	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000	
7	Otros	\$ 200.000	\$ -	\$ -	\$ 50.000,00	\$ 250.000	
TOTAL		\$ 15.574.778	\$ -	\$ -	\$ 1.593.000	\$ 17.167.778	

Equipos y Software							
Ítem	Nombre	Cantidad	Vigencia / vida útil (meses)	Tiempo de uso (meses)	Costo software / equipo	Costo uso / mes	Subtotal costo
1	Bascula	1	24	4	\$ 200.000	\$ 8.333	\$ 33.333
2	Celular	1	36	5	\$ 800.000	\$ 22.222	\$ 111.111
3	Computador	1	48	5	\$ 2.000.000	\$ 41.667	\$ 208.333
4	Extrusora	1	10	5	\$ 1.300.000	\$ 130.000	\$ 650.000
5	Horno	1	60	2	\$ 33.000.000	\$ 550.000	\$ 1.100.000
6	Impresora 3D	1	24	4	\$ 1.500.000	\$ 62.500	\$ 250.000
7	Máquina de Ensayos Universal	1	60	1	\$ 90.000.000	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
8	Microscopio	1	40	2	\$ 50.000.000	\$ 1.250.000	\$ 2.500.000
9	Microtome	1	48	2	\$ 15.000.000	\$ 312.500	\$ 625.000
10	Sputtering	1	12	2	\$ 3.000.000	\$ 250.000	\$ 500.000
TOTAL							\$ 7.477.778

Materiales, Insumos y Documentación						
Ítem	Nombre	Cantidad	Unidad	Costo	Subtotal Costo	
1	Ácido Acético	6	Litros	\$ 30.000	\$ 180.000	
2	Ácido Poliláctico	1	Carrete	\$ 150.000	\$ 150.000	
3	Agua	10	Litros	\$ 2.000	\$ 20.000	
4	Balde	1	Balde	\$ 5.000	\$ 5.000	
5	Bolsas Ziploc	1	Paquete	\$ 6.000	\$ 6.000	
6	Cal Viva	1	Bulto	\$ 30.000	\$ 30.000	
7	Calibrador	1	Calibrador	\$ 80.000	\$ 80.000	
8	Cinta	1	Cinta	\$ 16.000	\$ 16.000	
9	Cinta doble faz	1	Cinta	\$ 18.000	\$ 18.000	
10	Cuaderno	1	Cuaderno	\$ 2.000	\$ 2.000	
11	Cuchara	1	Cuchara	\$ 3.000	\$ 3.000	
12	Envases de 500 ml	6	Envases	\$ 18.000	\$ 108.000	
13	Envases Petri	4	Envases	\$ 52.000	\$ 208.000	
14	Fique	1	Arroba	\$ 33.000	\$ 33.000	
15	Hidróxido de Sodio (NaOH)	1	Tarro	\$ 140.000	\$ 140.000	
16	Mazo	1	Mazo	\$ 40.000	\$ 40.000	
17	Pala	1	Pala	\$ 35.000	\$ 35.000	
18	Pinzas de Laboratorio	1	Pinza	\$ 26.000	\$ 26.000	
19	Probeta	1	Probeta	\$ 10.000	\$ 10.000	
20	Tijeras	1	Tijera	\$ 5.000	\$ 5.000	
TOTAL					\$ 1.115.000	

Servicios Tecnológicos y Pruebas						
Ítem	Nombre	Cantidad	Detalle	Costo servicio	Subtotal costo	
1	Microscopio	1	Análisis de filamentos	\$ 200.000	\$	200.000
2	Prueba de tensión	1	Análisis de probetas	\$ 200.000	\$	200.000
TOTAL					\$	400.000

Talento Humano							
Ítem	Nombre: Cargo específico	Cantidad	Dedicación (h/sem)	Semanas	Total horas	Costo hora	Subtotal costo
1	Director y/o supervisor	1	2	22	44	\$ 43.750	\$ 1.925.000
2	Laboratorista	1	2	18	36	\$ 125.000	\$ 4.500.000
TOTAL							\$ 6.425.000