

Caracterización mecánica a tracción y fisicoquímica de hilos de fibra de fique y piña, en el  
marco del proyecto VIE-UIS 3954

Wilmar Becerra Gómez, Kevin Giraldo Ramos

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector

Ricardo Alfredo Cruz Hernandez

Ph.D. en Ingeniería Civil

Germán Adolfo Díaz Ramírez

Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

### **Agradecimientos**

Agradezco a todos los involucrados en el desarrollo de este proceso formativo, a la Universidad Industrial de Santander por brindar los espacios formativos y las herramientas en mi proceso profesional, a mis docentes y compañeros por el apoyo y motivación que me han brindado en todo este tiempo. Al director y codirectores de este proyecto, gracias por ser pacientes, por orientarme, por impulsarme en la formación académica investigativa, mil gracias. También, agradezco a mi familia y a las personas que son parte importante de la culminación de este proyecto, por su amor y comprensión y gracias a mi compañero de trabajo de grado por su esfuerzo y por apoyo en este trabajo de grado.

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	12
1. Metodología.....	14
1.1 Ensayos a tracción de hilos de fique y piña.....	15
1.1.1 Descripción de la materia prima.....	15
1.1.2 Moldes de silicona.....	16
1.1.3 Fabricación de las probetas de fibra de fique.....	17
1.1.4 Obtención de probetas de fibra de piña.....	20
1.1.5 Elaboración de las platinas.....	20
1.1.6 Ejecución de ensayos a tracción.....	21
1.1.7 Parámetros de ensayo.....	24
1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).....	25
1.3 Espectroscopía infrarroja (FTIR-ATR).....	27
1.4 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	28
2. Resultados.....	29
2.1 Ensayos a tracción de hilos de fibra de fique.....	29
2.1.1 Hilo de fique ensayado a velocidad baja (0.6 mm/min).....	29
2.1.2 Hilo de fique ensayado a velocidad media (9 mm/min).....	37
2.1.3 Hilo de fique ensayado a velocidad alta (90 mm/min).....	45
2.2 Efecto de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas de hilos de fique.....	52
2.3 Hilo de piña ensayado a velocidad (20 mm/min).....	56

2.3.1 Comparación MTS VS Deformímetro para hilo de piña velocidad (20 mm/min) .....	62
2.4 Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) .....	64
2.4.1 Morfología superficial de los hilos.....	64
2.4.1.1 Hilos de fique. ....	64
2.4.1.2 Hilos de piña. ....	65
2.4.2 Morfología superficial de las fibras.....	66
2.4.2.1 Fibra de fique. ....	66
2.4.2.2 Fibra de piña.....	68
2.4.3 Descripción de la superficie de falla .....	69
2.4.3.1 Fibra de fique. ....	69
2.4.3.2 Fibra de piña.....	72
2.5 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).....	74
2.6 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	76
2.6.1 Hilo de Fique.....	76
2.6.2 Hilo de Piña.....	78
3. Conclusiones .....	78
4. Recomendaciones.....	81
Referencias .....	82
Apéndices .....	86

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Ensayos realizados por tipo de material</i> .....	14
Tabla 2. <i>Parámetros de ensayo</i> .....	25
Tabla 3. <i>Número de micrografías tomadas por tipo de materia</i> .....	25
Tabla 4. <i>Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 0.6 mm/min</i> ...	31
Tabla 5. <i>Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 0.6 mm/min</i> .....	32
Tabla 6. <i>Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro a velocidad = 0.6 mm/min</i> 33	
Tabla 7. <i>Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 0.6 mm/min</i> .....	34
Tabla 8. <i>Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 0.6 mm/min</i> .....	35
Tabla 9. <i>Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 9 mm/min</i> .....	38
Tabla 10. <i>Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 9 mm/min</i> .....	39
Tabla 11. <i>Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro a velocidad = 9 mm/min</i> .41	
Tabla 12. <i>Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 9 mm/min</i> .....	42
Tabla 13. <i>Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 9 mm/min</i> .....	44
Tabla 14. <i>Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 90 mm/min</i> ..	46

Tabla 15. *Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 90 mm/min* .....47

Tabla 16. *Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro para velocidad = 90 mm/min* .....49

Tabla 17. *Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 90 mm/min* .....50

Tabla 18. *Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 90 mm/min*.....51

Tabla 19. *Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix para velocidad =20 mm/min* .....58

Tabla 20. *Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 20 mm/min* .....59

Tabla 21. *Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro para velocidad =20 mm/min* .....60

Tabla 22. *Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 20 mm/min* .....61

Tabla 23. *Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de piña para velocidad = 20 mm/min*.....62

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Carrete de hilo de fique crudo</i> .....	15
Figura 2. <i>Probetas de hilo de piña</i> .....	16
Figura 3. <i>Moldes de silicona</i> .....	17
Figura 4. <i>Probetas para ensayos de tracción</i> .....	18
Figura 5. <i>Preparación de las probetas: (a) ubicación de los moldes con longitud de 150 mm, (b) molde con hilos y fibra de vidrio, (c) molde completamente ensamblado, (d) corte de probetas.</i>	20
Figura 6. <i>Elaboración de platinas: (a) fabricación de platinas con impresora 3D, (b) platinas y probeta en MTS Bionix</i> .....	21
Figura 7. <i>Montaje ensayo a tracción</i> .....	22
Figura 8. <i>Montaje para micrografías SEM</i> .....	26
Figura 9. <i>Muestra de hilo de piña en cristal ATR</i> .....	28
Figura 10. <i>Analizador termogravimétrico TA-INSTRUMENT TGA 5500</i> .....	29
Figura 11. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix <math>\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-05} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	30
Figura 12. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformómetro <math>\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	33
Figura 13. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix <math>\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	38
Figura 14. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformómetro <math>\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	41
Figura 15. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix <math>\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	46
Figura 16. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformómetro <math>\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	49
Figura 17. <i>Deformación unitaria última con MTS Bionix en función de la velocidad de ensayo</i> .	53

Figura 18. <i>Deformación unitaria última con deformímetro en función de la velocidad de ensayo</i> .....	54
Figura 19. <i>Esfuerzo último en función de la velocidad de ensayo</i> .....	55
Figura 20. <i>Módulo de elasticidad con MTS Bionix en función de la velocidad de ensayo</i> .....	56
Figura 21. <i>Módulo de elasticidad con Deformímetro en función de la velocidad de ensayo</i> .....	56
Figura 22. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix <math>\dot{\epsilon} = 6.7E-03 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	57
Figura 23. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformímetro <math>\dot{\epsilon} = 6.7E-03 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	60
Figura 24. <i>Imágenes SEM de hilos de fique: (a) fique natural, (b) fique natural + NaOH, (c) fique natural + NaOH + OG</i> .....	65
Figura 25. <i>Imágenes SEM de hilos de piña</i> .....	66
Figura 26. <i>Imágenes SEM de fibras de referencia</i> .....	67
Figura 27. <i>Imágenes SEM de fibra de piña</i> .....	68
Figura 28. <i>Imágenes SEM de las fibras de referencia:</i> .....	69
Figura 29. <i>Imágenes SEM de las fibras de referencia</i> .....	70
Figura 30. <i>Imágenes SEM de las fibras de referencia</i> .....	71
Figura 31. <i>Imágenes SEM de las fibras de referencia</i> .....	72
Figura 32. <i>Imágenes SEM de las fibras de referencia</i> .....	73
Figura 33. <i>Espectro FTIR – ATR de la fibra de piña</i> .....	75
Figura 34. <i>Evaluación de TGA de hilos de fibras tratadas y no tratadas de fique</i> .....	77
Figura 35. <i>Evaluación de TGA de hilos de fibras de piña</i> .....	78

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. <i>Micrografías tomadas en el área superficial de las fibras naturales</i> .....	86
b. Velocidad alta.....	90

## Resumen

Título: Caracterización mecánica a tracción y fisicoquímica de hilos de fibra de fique y piña, en el marco del proyecto VIE-UIS 3954\*

**Autores:** Wilmar Becerra-Gómez, Kevin Giraldo-Ramos, José M. Benjumea-Royero, Ricardo Cruz-Hernández, y German Diaz-Ramírez \*\*4

**Palabras clave:** Fibras naturales, tasa de deformación, fique, piña, propiedades mecánicas, micrografías, termogravimetría, FTIR.

### Descripción

El uso de materiales renovables y biodegradables ha revolucionado y ha sido un factor importante en la construcción. Es por esto por lo que las fibras naturales, como las de fique y piña, han sido protagonistas mostrando propiedades mecánicas y físico químicas significativas en compuestos con otros materiales y en tratamientos específicos. Esta investigación tiene como objetivo identificar estas propiedades de los hilos de fibra de fique crudo, mediante ensayos experimentales tales como, ensayos a tracción, espectroscopia infrarroja, microscopia electrónica de barrido y análisis termogravimétrico. El estudio abarcó diversas etapas, desde la preparación de los especímenes, gestión de ensayos de laboratorio y hasta la realización de ensayos bajo tres tasas de deformación: una cuasi estática ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para simular deformaciones lentas y controladas, una tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) representativa de impactos vehiculares, y una tasa alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) asociada a efectos de terremotos o colisiones. Los resultados mostraron que el esfuerzo último osciló entre 96.5 MPa y 329.9 MPa, mientras que la deformación unitaria última osciló entre 2.22% y 5.22%. Los módulos de elasticidad estuvieron en un rango de 3.01 GPa a 10.31 GPa. El análisis mostró que, bajo tasas de deformación intermedias, los hilos de fique alcanzan propiedades mecánicas superiores, pero con datos muy impredecibles. En tasas altas se observa un rendimiento óptimo en sus propiedades mecánicas; sin embargo, el módulo de elasticidad no experimentó incrementos significativos, lo que sugiere que una mayor velocidad de deformación no necesariamente aumenta la rigidez del material. Por otro lado, las tasas bajas no generaron avances notables, lo que indica que en condiciones de carga lenta ofrece una respuesta a la resistencia menor. En las micrografías SEM tomadas, se pudo observar una mejoría en los planos de falla de las fibras tratadas, en cuanto a la superficie de estas, se logró notar una superficie más limpia y libre de impurezas. En los ensayos de espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) realizado a la fibra de piña natural, se identificaron los grupos funcionales, confirmando la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina, compuestos característicos de este tipo de fibra. En el análisis termogravimétrico se evidenció mayor estabilidad térmica en los materiales tratados, teniendo un material más puro y cristalino. Estos hallazgos son clave para impulsar el desarrollo de materiales compuestos sostenibles destinados a aplicaciones en la construcción.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero, Ph.D. Ingeniero Civil

### Abstract

**Title:** Tensile and physicochemical characterization of fique and pineapple fiber yarns, within the framework of the VIE-UIS 3954 project\*

**Authors:** Wilmar Becerra-Gómez, Kevin Giraldo-Ramos, José M. Benjumea-Royero, Ricardo Cruz-Hernández, y German Diaz-Ramírez\*\* 4

**Keywords:** Natural fibers, deformation rate, fique, pineapple, mechanical properties, micrographs, thermogravimetry, FTIR.

### Description

The use of renewable and biodegradable materials has revolutionized and has been an important factor in construction. This is why natural fibers, such as fique and pineapple, have been protagonists, showing significant mechanical and physical-chemical properties in compounds with other materials and in specific treatments. This research aims to identify these properties of raw fique fiber threads through experimental tests such as tensile tests, infrared spectroscopy, scanning electron microscopy and thermogravimetric analysis. The study covered several stages, from the preparation of the specimens, management of laboratory tests and even the performance of tests under three deformation rates: a quasi-static rate ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) to simulate slow and controlled deformations, an intermediate rate ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) representative of vehicle impacts, and a high rate ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) associated with the effects of earthquakes or collisions. The results showed that the ultimate stress ranged between 96.5 MPa and 329.9 MPa, while the ultimate unitary strain ranged between 2.22% and 5.22%. The elastic moduli ranged from 3.01 GPa to 10.31 GPa. The analysis showed that, under intermediate strain rates, the fique threads achieve superior mechanical properties, but with very unpredictable data. At high rates, optimal performance is observed in its mechanical properties; however, the elastic modulus did not experience significant increases, suggesting that a higher strain rate does not necessarily increase the rigidity of the material. On the other hand, low rates did not generate notable advances, indicating that under slow-load conditions it offers a lower response to resistance. In the SEM micrographs taken, an improvement could be observed in the failure planes of the treated fibers; as for their surface, a cleaner surface free of impurities was noted. In the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) tests performed on natural pineapple fiber, the functional groups were identified, confirming the presence of cellulose, hemicellulose and lignin, compounds characteristic of this type of fiber. In the thermogravimetric analysis, greater thermal stability was evident in the treated materials, having a purer and more crystalline material. These findings are key to promoting the development of sustainable composite materials for construction applications.

---

\* Thesis

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering. Supervisor: José Miguel Benjumea Royero, Ph.D., Civil Engineer

## Introducción

Ante la necesidad de buscar nuevas alternativas que disminuyan el impacto ambiental, las fibras naturales han generado un creciente interés como sustituto de metales y compuestos reforzados por fibras sintéticas. Este interés se debe principalmente a la demanda de materiales ligeros y a la reducción de la huella ambiental. Las fibras naturales ofrecen varias ventajas, como menor densidad, biodegradabilidad, amplia disponibilidad, buenas propiedades de amortiguación, menor desgaste abrasivo en los equipos y seguridad para la salud (por ejemplo, baja irritación de la piel), lo que las convierte en un material prometedor para la industria de la construcción (Li, y otros, 2020).

La escasez de los recursos y la preocupación por los problemas ambientales ha impulsado la utilización de materiales de origen biológico en diversas aplicaciones. Además, las estrictas regulaciones legislativas de varios países han llevado a muchas industrias a promover alternativas sostenibles provenientes de fuentes renovables para reemplazar los materiales tradicionales derivados de recursos no renovables. Debido a esto, la economía circular ha adquirido un protagonismo central en el diseño de procesos y productos. Esto ha dado lugar a la introducción de conceptos visionarios como la bioeconomía, la sociedad basada en recursos biológicos y la economía verde, los cuales han revolucionado la planificación de muchas empresas industriales (Väisänen, Lappalainen, & Tomppo, 2016).

Las fibras de fique, también conocidas como cabuya, destacan por sus propiedades, como estabilidad térmica, baja densidad y excelente desempeño mecánico, características que las convierten en candidatas ideales para actuar como refuerzo en compuestos naturales. Estas fibras, extraídas de las hojas, son moderadamente rígidas y presentan un alto contenido de celulosa (50-

70%), lignina (10-20%) y hemicelulosa (aproximadamente 30%) (Ramirez & Pettarin, 2024). Este recurso natural, originario de Colombia y otros países de Sudamérica, representa un patrimonio significativo para las industrias agrícolas y un motor clave para impulsar la bioeconomía.

Las fibras de piña, características por ser biodegradables, de bajo consumo de agua, tienen alto contenido de celulosa y posee propiedades mecánicas superiores a otras fibras naturales, la hace en una gran candidata para fabricar tejidos o en refuerzo estructural, ya sea como compuesto o como hilo. Esta fibra de piña, proveniente de la hoja de piña, tiene una densidad de masa lineal entre 1.39 y 7.07, en alargamiento a la rotura de 1.0 a 3.9%, 2.4 a 21.8 GPa en módulo de Young (Chaves, y otros, 2024).

El objetivo de este trabajo es desarrollar actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-UIS 3954 que aporten en la caracterización mecánica y fisicoquímica de hilos de fibras de fique (fabricados industrialmente) y de hoja piña (fabricados artesanalmente). Para ello, se realizaron a cabo diversos ensayos experimentales y de laboratorio que permitieron caracterizar las propiedades de estas fibras naturales. Los ensayos realizados incluyen pruebas de tracción a diferentes tasas de deformación, análisis termogravimétrico (TGA), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM). Este último se utilizó específicamente para analizar la morfología superficial y los mecanismos de falla de las fibras bajo tracción. Los resultados obtenidos contribuirán al desarrollo de materiales compuestos más eficientes y adecuados para una amplia gama de aplicaciones en ingeniería y construcción, promoviendo soluciones innovadoras, sostenibles y efectivas en estos sectores.

## 1. Metodología

Esta sección detalla los materiales y métodos empleados para alcanzar los objetivos del proyecto de investigación. La metodología comprende diferentes etapas (Tabla 1). Primero, se describe la preparación de las probetas de hilo de fibra de hoja de piña y fique, así como la selección de las muestras utilizadas para el estudio. Posteriormente, se establecen los procedimientos y factores clave para los ensayos de tracción realizados a estas fibras. Adicionalmente, se detalla el proceso de microscopía electrónica y el análisis de las micrografías obtenidas, con el fin de evaluar la morfología de los hilos. Además, se especifica el procedimiento seguido para la obtención de resultados y su análisis mediante espectroscopía infrarroja. Finalmente, se aborda el estudio de las propiedades térmicas de las fibras mediante el uso de técnicas de análisis termogravimétrico. Esta metodología proporciona un enfoque integral para la caracterización de las fibras naturales estudiadas, asegurando un análisis detallado de sus propiedades mecánicas, estructurales, químicas y térmicas.

**Tabla 1.**

*Ensayos realizados por tipo de material*

Ensayo	Fique		Piña	
	¿Realizado?	Sección	¿Realizado?	Sección
Tracción	SI	2.1.6.	SI	2.1.6.
FTIR	NO	-	SI	2.3.
SEM	SI	2.2.	SI	2.2.
TGA	SI	2.4.	SI	2.4.

## 1.1 Ensayos a tracción de hilos de fique y piña

### 1.1.1 Descripción de la materia prima

Las probetas fueron preparadas con hilos de fique, con una densidad lineal de 1050 m/kg (Figura 1), proporcionados por la empresa Coohilados de Fonce Ltda., ubicada en el municipio de San Gil, Santander. Se cortaron 60 hilos, cada uno con una longitud aproximada de 40 cm. Estos hilos fueron sometidos a un proceso minucioso de revisión y selección con el fin de garantizar que no se presentaran fibras rotas, nudos u otra anomalía que afectara la precisión de los resultados obtenidos en los ensayos. Por otro lado, los hilos de piña fueron adquiridos a través de la asociación Hecho en Lebrija, siendo extraídos de cultivos de piña del municipio de Lebrija, Santander (Figura 2).

#### Figura 1.

*Carrete de hilo de fique crudo*



**Figura 2.**

*Probetas de hilo de piña*

**1.1.2 Moldes de silicona**

En la Figura 3 se observa moldes de silicona, previamente diseñados y fabricados por medio de impresora 3D, estos cuentan con dimensiones de 20 cm de largo, 6.40 cm de ancho y 1.20 cm de alto. Además, cuentan con ranuras distribuidas a lo largo de su longitud, las cuales permiten asegurar los hilos de manera adecuada durante su proceso de fabricación.

**Figura 3.**

*Moldes de silicona*

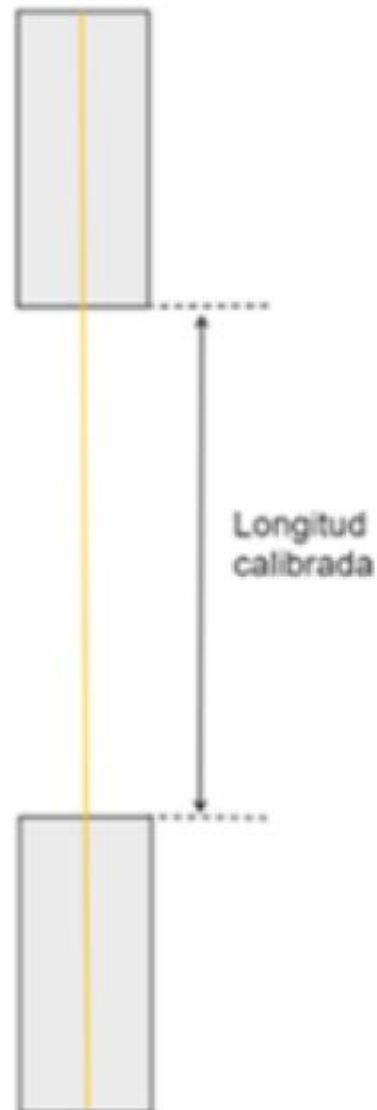
***1.1.3 Fabricación de las probetas de fibra de fique***

Se seleccionaron 60 hilos al azar tal y como se definieron en la sección 2.1.1. Con estos hilos, se realizarán las probetas para la longitud de calibre estudiada (150 mm).

En la Figura 4 se observa la adaptación empleada para la fabricación de las probetas, en la cual los extremos de la longitud libre calibrada se encuentran encapsulados en resina epóxica. El encapsulado ayudó a garantizar una correcta sujeción durante la ejecución de los ensayos mecánicos, además de disminuir el contacto directo entre la mordaza de la máquina y los hilos, acción que favorece al material al no presentarse en este ningún aplastamiento o daño (Álvarez-Rincón, Castellanos-Díaz, Benjumea- Royero, Germán, & Díaz-Ramírez, sf).

**Figura 4.**

*Probetas para ensayos de tracción*



*Nota:* (Álvarez-Rincón, Castellanos-Díaz, Benjumea- Royero, Germán, & Díaz-Ramírez, sf)

Para la fabricación de las probetas con hilos de fibra de fique crudo, se utilizaron moldes de silicona que se colocaron sobre una base de madera. Posteriormente, se marcaron las medidas necesarias para garantizar que la longitud de las probetas fuera de 150 mm (Figura 5-a).

Cuando los moldes de silicona estuvieron correctamente posicionados, se agregó una capa de fibra de vidrio en cada uno de ellos.

A continuación, se colocaron los hilos de fique, previamente cortados, en las ranuras de los moldes. Seguidamente, se aplicó silicona líquida en cada ranura para garantizar que los hilos permanecieran firmemente en su lugar. Adicional a esto, se incrustó a los extremos sobrantes de los hilos unos ganchos metálicos para su correcta sujeción (Figura 5-b).

A continuación, se preparó la resina epóxica según las indicaciones del proveedor. Una vez lista, se vertió una primera capa en cada uno de los moldes. Posteriormente, se agregó otra capa de fibra de vidrio, seguido de otra capa de resina epóxica (Figura 5-c).

Para garantizar que los extremos de las probetas no contuvieran burbujas de aire generadas durante el proceso de fabricación, se ejerció presión en las zonas afectadas, asegurando así la eliminación de vacíos dentro de las mismas.

Finalmente, se permitió que las probetas se secaran durante aproximadamente 24 horas antes de proceder al desmoldeo.

Una vez secas, se cortaron utilizando una sierra de cinta sinfín, puesto que en cada preparación se generaron 10 probetas de forma continua (Figura 5-d).

**Figura 5.**

*Preparación de las probetas: (a) ubicación de los moldes con longitud de 150 mm, (b) molde con hilos y fibra de vidrio, (c) molde completamente ensamblado, (d) corte de probetas*

**1.1.4 Obtención de probetas de fibra de piña**

Las probetas de fibra de piña fueron proporcionadas por otros estudiantes que forman parte del equipo investigador del proyecto VIE-UIS 3954. Se seleccionaron probetas representativas de acuerdo con las especificaciones indicadas por el laboratorio.

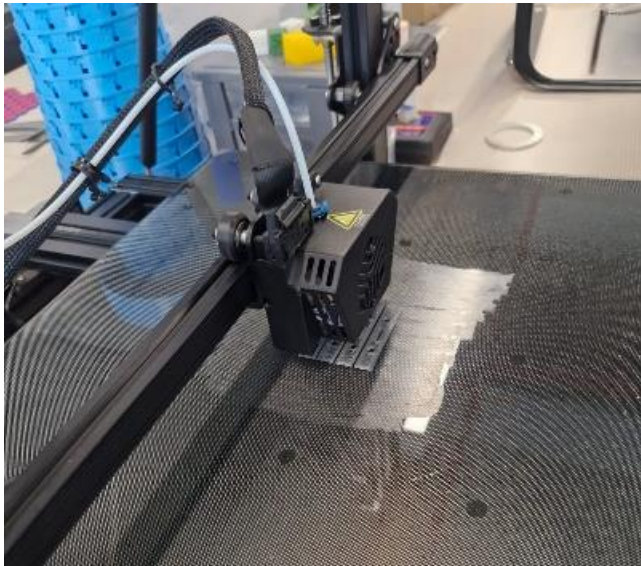
**1.1.5 Elaboración de las platinas**

Para realizar los ensayos, fue necesario fabricar cuatro platinas que se colocarían en pares a lo largo de la probeta y se conectarían al deformímetro (Figura 6-b). Debido al desgaste que estas platinas sufren en sus ranuras por el uso constante, se optó por fabricar nuevas platinas

específicamente para este proyecto. El diseño de las platinas fue realizado en el programa SolidWorks, y su fabricación se llevó a cabo mediante impresión 3D (Figura 6-a).

**Figura 6.**

*Elaboración de platinas: (a) fabricación de platinas con impresora 3D, (b) platinas y probeta en MTS Bionix*



(a)



(b)

**1.1.6 Ejecución de ensayos a tracción**

Los ensayos a tracción se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la UIS (EIM). Se utilizó la máquina de ensayo MTS Bionix Landmark 370 junto con el deformímetro MTS 634.12F-26, cumpliendo con los procedimientos establecidos por la norma ASTM C1557-20.

Los ensayos se llevaron a cabo mediante la siguiente metodología: en primer lugar, se aseguró un extremo de la probeta a la mordaza inferior de la maquina universal de ensayos. A continuación, se ajustó el otro extremo de la probeta a la mordaza superior, aplicando una fuerza

de pretensión de 3N. Posteriormente, se inició el ensayo de tracción, controlando la tasa de deformación según los parámetros especificados en la Tabla 2. Finalmente, el ensayo se detuvo una vez que se observó la fractura de la probeta (Figura 7).

Los datos proporcionados por la MTS fueron la fuerza axial aplicada al hilo en unidades de Newtons (N) y el desplazamiento del cabezal ( $\Delta L$ ) en milímetros, siendo estos valores datos de entrada para determinar las propiedades mecánicas. La fuerza axial se mantuvo constante para los datos proporcionados por el deformímetro, lo que cambió fueron los valores de desplazamiento registrados por este, considerando que este abarcaba una longitud de 25 mm del hilo.

**Figura 7.**

*Montaje ensayo a tracción*



Para los ensayos a tracción tanto de hilos de fique y piña, se presentan y detallan los resultados obtenidos en el laboratorio de ensayos mecánicos de la EIM. Durante este proceso, se analizaron los datos registrados de desplazamiento, tiempo y fuerza axial, para posteriormente calcular la deformación unitaria y los esfuerzos, permitiendo así construir la curva de esfuerzo-deformación unitaria.

Para la determinación de las propiedades mecánicas de los hilos de fique e hilos de piña, el esfuerzo ( $\sigma$ ), se utilizó la ecuación (1), que depende de la fuerza axial (P) y del área transversal (A) del hilo de fibra de fique y la de piña. El área del hilo de fique fue obtenida del estudio desarrollado por Nicolas Diaz (Diaz, 2024), del proyecto VIE-UIS 3954, y la del hilo de piña fue obtenida por Tania Álvarez y Jhoan Castellanos (Álvarez, 2024). El valor promedio del área transversal para el hilo de fique crudo es de  $0.81 \text{ mm}^2$  y para el hilo de piña crudo es de  $0.675 \text{ mm}^2$ . Por otro lado, la deformación unitaria promedio ( $\varepsilon$ ) se obtiene dividiendo el desplazamiento axial entre la longitud inicial ( $L_0 = 150 \text{ mm}$  en el caso del hilo de fique y  $L_0 = 50 \text{ mm}$  en el caso del hilo de piña), como se observa en la ecuación (2).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

A partir de la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria, se determinó el módulo de elasticidad ( $E_{0-80\%}$ ) considerando la zona elástico-lineal. La pendiente de los datos comprendidos entre el 0% y 80% del esfuerzo máximo ( $\Delta\sigma_{0-80\%}$ ) y deformaciones unitarias ( $\Delta\varepsilon_{0-80\%}$ ), se tomó como base para realizar este cálculo como se observa en la ecuación (3).

Este mismo proceso se hizo para hallar el módulo de elasticidad ( $E_{20-80\%}$ ), con la ecuación (4) se pudo determinar estos valores.

$$E_{0-80} = \frac{(\Delta\sigma_{0-80})}{(\Delta\varepsilon_{0-80})} \quad (3)$$

$$E_{20-80} = \frac{(\Delta\sigma_{20-80})}{(\Delta\varepsilon_{20-80})} \quad (4)$$

Estos intervalos fueron elegidos con la finalidad de analizar el comportamiento del material en diferentes fases del ensayo. El módulo entre 0-80% del esfuerzo máximo permite evaluar la respuesta elástica, por otro lado, el rango 20-80% da una idea de la región lineal del comportamiento esfuerzo-deformación, sin incluir la zona inicial, lo cual es indispensable para una aproximación real del módulo de elasticidad.

### ***1.1.7 Parámetros de ensayo***

La tasa de deformación unitaria ( $\dot{\varepsilon}$ ) o *strain rate* en inglés, definida como la variación de la deformación por unidad de tiempo ( $\dot{\varepsilon} = \Delta\varepsilon/\Delta t$ ), es una variable fundamental que influye significativamente en el comportamiento mecánico de los materiales. En este estudio, se analizará el efecto de diferentes tasas de deformación sobre las propiedades de las fibras. Se seleccionaron tres tasas de deformación con el fin de analizar el comportamiento de las fibras en diferentes condiciones a las que puede ser sometida, en el caso de los hilos de fique:  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  y  $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ , en los hilos de piña se utilizó la tasa de deformación:  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  que representan condiciones de carga lenta, intermedia y rápida, respectivamente. La condición de carga lenta representa deformaciones graduales, en condiciones de carga intermedia, representa impactos externos que puede sufrir una estructura, y en condiciones de carga rápida, representa casos extremos como sismos o terremotos. A continuación, en la Tabla 2 se muestran los parámetros que se utilizaron en cada ensayo.

**Tabla 2.**

*Parámetros de ensayo.*

	<b>Fique</b>		<b>Piña</b>	
<b>Número de probetas</b>	20	20	20	20
$\dot{\epsilon}$ (e/s) (s <sup>-1</sup> )	6.7x10 <sup>-05</sup>	0.001	0.01	6.7x10 <sup>-05</sup>
<b>Velocidad de deformación (mm/min)</b>	0.6	9	90	20
<b>Frecuencia de muestreo de datos (datos/s)</b>	0.75	11.25	113.78	25

**1.2 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)**

Para el procesamiento de imágenes digitales mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés Scanning Electron Microscope), se capturaron micrografías de dos tipos, para la superficie del material al igual que para la zona de falla como se observa en la Tabla 3, esto para hilos y filamentos de fique crudo, fique mercerizado, fique mercerizado más oxido de grafeno y para hilos y filamentos de piña crudo. Esto fue realizado en el laboratorio de Nanociencia y Nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Bucaramanga, utilizando un microscopio electrónico de barrido marca TESCAN, modelo MIRA 3 FEG-SEM.

**Tabla 3.**

*Número de micrografías tomadas por tipo de materia*

<b>Tipo de muestra</b>	<b>Número de micrografías tomadas</b>			
	<b>Área superficial</b>		<b>Zona de falla</b>	
	<b>Hilo</b>	<b>Filamento</b>	<b>Hilo</b>	<b>Filamento</b>
Fique Natural	2	3	0	9
Fique Natural + NaOH	3	3	0	9
Fique Natural + NaOH + OG	6	6	9	0
Hilo de piña	2	4	0	9

Las muestras fueron cortadas y ajustadas para adaptarse a la platina del microscopio. Posteriormente, se montaron sobre un soporte de aluminio utilizando un adhesivo de carbono de doble cara de la marca Pelco. Dado que las fibras presentaban conductividad deficiente o nula, se recubrieron con una capa ultrafina de oro (Au), como se observa en la Figura 8, lo que permitió mejorar la calidad de las imágenes al reducir las cargas electrostáticas en la superficie de las muestras. Las imágenes se capturaron a diferentes niveles de aumento, empleando un modo de alta resolución con un voltaje de 30 kV y un detector de electrones retro dispersados, hasta lograr el mejor enfoque (Anukwah & Gadzekpo, 2024).

El objetivo principal del estudio fue analizar la morfología externa y los puntos de falla de las fibras sometidas previamente a ensayos de tracción entre aquellas que pudieron ser mejor enfocadas y visualizadas.

**Figura 8.**

*Montaje para micrografías SEM*



### **1.3 Espectroscopía infrarroja (FTIR-ATR)**

En esta fase se gestionó los ensayos de espectroscopía infrarroja, comenzando con el contacto del laboratorio de espectroscopía atómica y molecular de la sede Parque Tecnológico de Guatiguará de la UIS. Este contacto permitió coordinar los tiempos y los requisitos de entrega y resultados de los especímenes a ensayar.

El ensayo denominado (FTIR\_ATR, Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflectancia Total Atenuada), tiene como objetivo principal caracterizar la muestra y obtener el espectro de transmitancia en función del número de onda. Las muestras consisten en hilos de fibra de piña crudo, proporcionados por otros estudiantes que forman parte del proyecto VIE-UIS 3954.

Se seleccionó probetas representativas y se entregaron de acuerdo con las especificaciones indicadas por el laboratorio.

Se empleó el análisis FTIR-ATR para detectar los grupos funcionales químicos característicos en la fibra. Se tomó una porción de la muestra y se depositó sobre el cristal ATR, sin tratamiento previo, como se observa en la Figura 9.

Se utilizó un espectrofotómetro iS50 FT-IR Nicolet. Thermo Scientific. Los espectros se obtuvieron realizando 64 escaneos por muestra, con una resolución de 4 cm en el rango de 4000 – 400cm utilizando un software llamado OMNIC.

**Figura 9.**

*Muestra de hilo de piña en cristal ATR*

**1.4 Análisis Termogravimétrico (TGA)**

Este estudio se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM E1131 - 20 (Test method for compositional analysis by thermogravimetry ASTM International., s.f.), con el propósito de analizar el comportamiento de degradación térmica de hilos de fibra de fique y piña. Para ello, se empleó un analizador termogravimétrico TA-INSTRUMENT (Figura 10), modelo Discovery 5500. Las mediciones se realizaron con muestras cuyo peso osciló entre 3 y 9 mg. Los ensayos siguieron un programa de temperatura que abarcó desde la temperatura ambiente hasta 550 °C, aplicando una rampa de calentamiento de 5 °C/min en una atmosfera de nitrógeno de 50 ml/min. Estos parámetros permitieron evaluar la estabilidad térmica de los materiales y su comportamiento frente a la degradación térmica bajo condiciones controladas.

**Figura 10.**

*Analizador termogravimétrico TA-INSTRUMENT TGA 5500*



*Nota.* (TGA 5500, 2016)

## 2. Resultados

### 2.1 Ensayos a tracción de hilos de fibra de fique

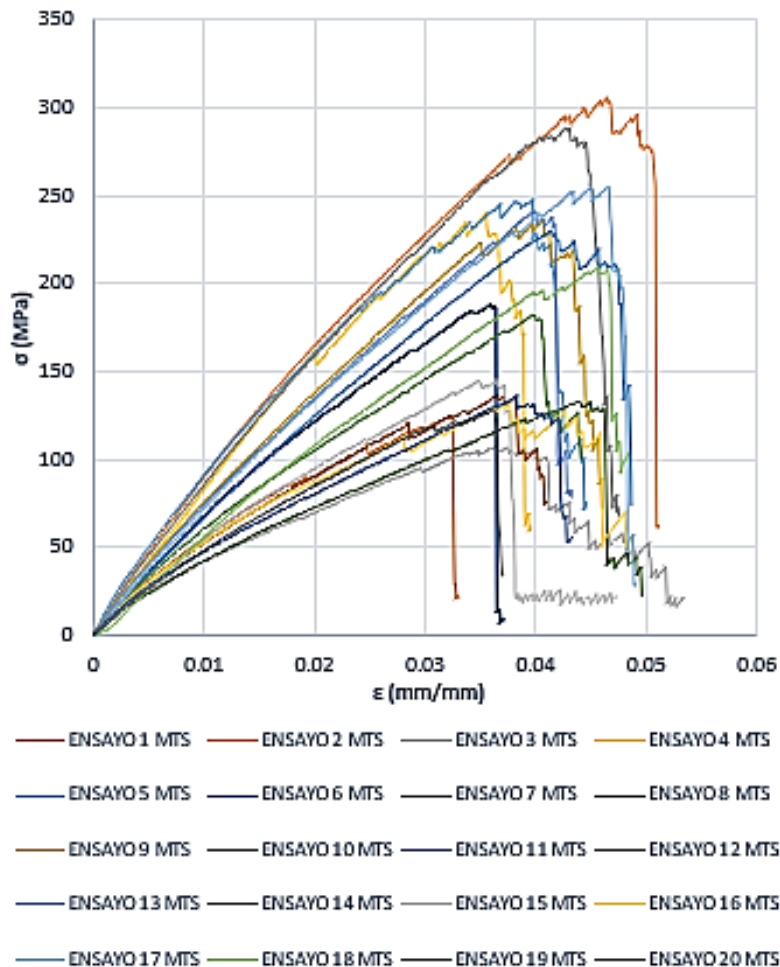
#### 2.1.1 Hilo de fique ensayado a velocidad baja (0.6 mm/min)

En las Tablas 4 y 5 y en la Fig. 11 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . En la Tabla 5 se muestra en la primera columna el promedio ( $\bar{x}$ ), el valor máximo (MAX), el valor mínimo (MIN), la desviación estándar ( $\delta$ ) y el coeficiente de variación (CV). El esfuerzo último promedio dio de  $\sigma_{\max} = 197.7 \text{ MPa}$  con una  $\delta = 64.2 \text{ MPa}$ , esto indica que la dispersión de los datos es alta, ya que esta supera el 10% del valor del promedio siendo estadísticamente elevado, esto puede deberse a factores inherentes al proceso de ensayo, como a la fabricación del hilo o a las impurezas que esté presente. Por otro lado, la deformación unitaria última en promedio es de  $\epsilon_u = 3.99\%$ , con un  $\text{CV} = 10.36\%$ , lo que indica una baja dispersión de los datos suministrados por la maquina MTS Bionix.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 11, se determinó el módulo de elasticidad ( $E_{0-80\%}$ ) en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 5.18 GPa con una  $\delta = 1.47$  GPa y un  $CV = 28.29\%$ , lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango aceptable. Así mismo se tiene el módulo de elasticidad ( $E_{20-80\%}$ ) en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 4.79 GPa con una  $\delta = 1.43$  GPa y un  $CV = 29.86\%$ .

**Figura 11.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-05} s^{-1}$*



**Tabla 4.**

*Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 0.6 mm/min*

Probeta	MTS Bionix			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	124.5	3.24	4.04	3.51
<b>2</b>	305.7	4.65	7.13	6.57
<b>3</b>	107.3	3.64	3.01	2.74
<b>4</b>	239.6	3.55	7.36	6.89
<b>5</b>	247.0	3.97	6.87	6.21
<b>6</b>	188.1	3.59	5.55	5.10
<b>7</b>	288.6	4.27	7.20	6.79
<b>8</b>	136.7	3.66	3.98	3.60
<b>9</b>	235.7	4.07	6.27	5.98
<b>10</b>	291.2	4.68	6.49	6.15
<b>11</b>	229.7	4.14	5.77	5.45
<b>12</b>	133.1	4.38	3.05	2.78
<b>13</b>	241.1	4.00	6.13	5.81
<b>14</b>	182.8	3.99	4.61	4.24
<b>15</b>	144.8	3.65	4.26	3.83
<b>16</b>	130.8	3.76	3.60	3.06
<b>17</b>	255.0	4.50	6.02	5.65
<b>18</b>	209.2	4.57	5.00	4.65
<b>19</b>	135.7	3.83	3.47	3.17
<b>20</b>	128.2	3.62	3.85	3.55

**Tabla 5.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 0.6 mm/min*

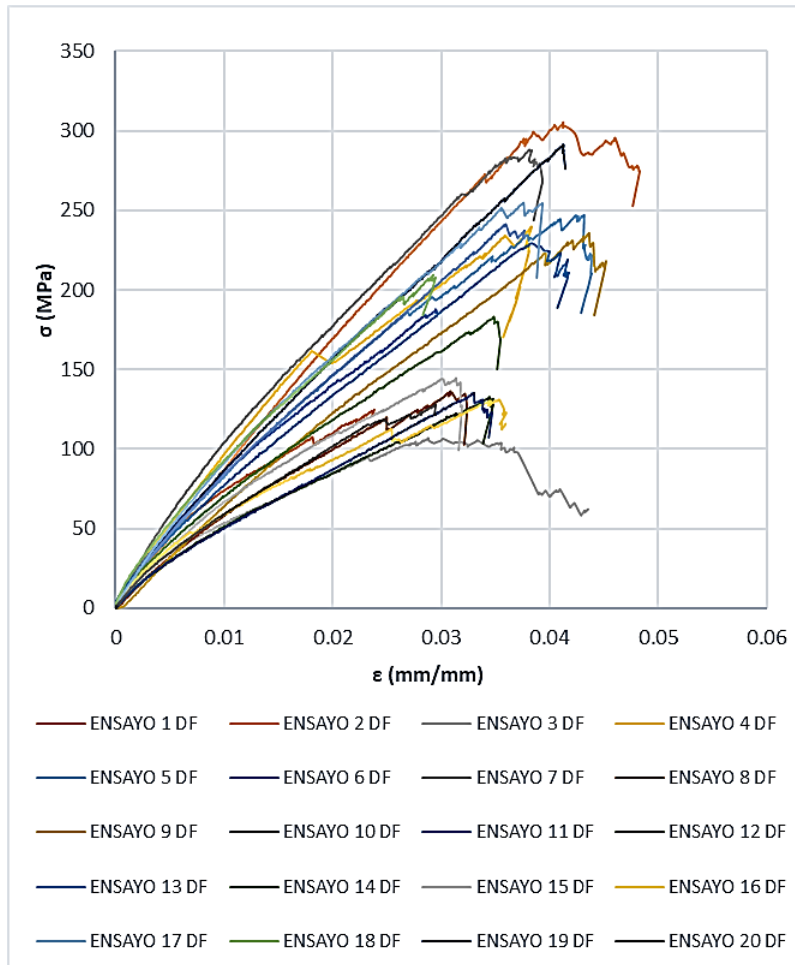
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
$\overline{[O_2]}$	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	197.7	3.99	5.18	4.79
<b>MAX</b>	305.7	4.68	7.36	6.89
<b>MIN</b>	107.3	3.24	3.01	2.74
$\delta$	64.2	0.41	1.47	1.43
<b>CV</b>	32.5	10.36	28.29	29.86

En las Tablas 6 y 7 y en la Fig. 12 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , basados en datos suministrados por el deformímetro. En la tabla 7 se presenta el valor promedio de  $\sigma_{max}$ , el cual coincide con los resultados obtenidos por la MTS Bionix. Esto se debe a que la fuerza axial aplicada a las probetas fue la misma. La diferencia estuvo presente en la metodología empleada para la toma de datos de deformación. Por otro lado, la  $\epsilon_u$  dio un valor promedio de 3.49%, con un CV = 15.35%, lo que indica una dispersión baja de los datos suministrados por el deformímetro. Al igual que los resultados con MTS Bionix estas deformaciones son consistentes de un ensayo a otro.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 12, se determinó  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 5.69 GPa con una  $\delta = 1.37 \text{ GPa}$  y un CV = 24.12%, lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango aceptable. Así mismo se tiene el  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 5.17 GPa con una  $\delta = 1.34 \text{ GPa}$  y un CV = 25.81%, estos valores de módulos de elasticidad en comparación con los tomados con MTS Bionix presentaron valores superiores, pero con una dispersión similar.

**Figura 12.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformímetro  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 6.**

*Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro a velocidad = 0.6 mm/min*

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	124.5	2.39	5.25	4.40
<b>2</b>	305.7	4.13	7.98	7.66
<b>3</b>	107.3	2.88	3.67	3.24

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
4	239.6	3.84	6.51	5.54
5	247.0	4.31	6.08	5.49
6	188.1	2.95	6.33	5.68
7	288.6	3.81	7.87	7.22
8	136.7	3.09	4.55	4.10
9	235.7	4.36	5.59	5.25
10	291.2	4.12	6.96	6.59
11	229.7	3.83	5.88	5.50
12	133.1	3.44	3.70	3.34
13	241.1	3.60	6.57	6.12
14	182.8	3.49	5.19	4.74
15	144.8	3.14	4.88	4.26
16	130.8	3.53	3.82	3.25
17	255.0	3.76	7.05	6.46
18	209.2	2.93	7.22	6.56
19	135.7	3.31	3.94	3.70
20	128.2	2.94	4.71	4.34

**Tabla 7.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 0.6 mm/min*

	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	197.7	3.49	5.69	5.17
<b>MAX</b>	305.7	4.36	7.98	7.66
<b>MIN</b>	107.3	2.39	3.67	3.24

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\delta$	64.2	0.54	1.37	1.34
<b>CV</b>	32.5	15.35	24.12	25.81

Los resultados de la comparación de  $\epsilon_u$  (%),  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$  medidos con el cabezal de la MTS Bionix y el Deformímetro para los hilos de fique ensayados a velocidad baja se presentan en la Tabla 8. En esta se puede ver que hay un intervalo de diferencia para la deformación unitaria, y los módulos  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$  de 6.52% a 55.68%, 1.85% a 30.76% y 0.89% a 29.06%, respectivamente. Con esto se puede notar que existe un mayor rango de diferencias entre las deformaciones unitarias.

En promedio, tanto la deformación unitaria y los módulos de elasticidad tienen una diferencia moderada, es decir, son diferencias menores al 20%, pero cabe recalcar que, al analizar individualmente, se presentan unas que superan este porcentaje ampliamente. Por esto, si se observa individualmente los ensayos, es notable que la probeta 18 tiene una diferencia de  $\epsilon_u$  de 55.68%,  $E_{0-80\%}$  de 30.76% y  $E_{20-80\%}$  de 29.06%, estas diferencias son considerables, dado que son diferencias inusuales para el análisis entre la utilización de dos medidores de deformación.

**Tabla 8.**

*Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 0.6 mm/min*

Probeta	Diferencia	Diferencia E (%)	
	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
<b>1</b>	35.61	23.17	20.19
<b>2</b>	12.49	10.60	14.23
<b>3</b>	26.19	17.98	15.51

<b>Probeta</b>	<b>Diferencia</b> $\epsilon_u$ (%)	<b>Diferencia E (%)</b>	
		$E_{0.80\%}$	$E_{20.80\%}$
<b>4</b>	7.42	13.09	24.37
<b>5</b>	7.91	12.93	13.27
<b>6</b>	21.53	12.36	10.19
<b>7</b>	12.04	8.62	5.93
<b>8</b>	18.44	12.54	12.12
<b>9</b>	6.65	12.22	13.86
<b>10</b>	13.60	6.82	6.66
<b>11</b>	8.00	1.85	0.89
<b>12</b>	27.25	17.54	16.70
<b>13</b>	11.34	6.65	5.13
<b>14</b>	14.44	11.17	10.48
<b>15</b>	16.33	12.66	10.08
<b>16</b>	6.52	5.91	5.87
<b>17</b>	19.85	14.65	12.64
<b>18</b>	55.68	30.76	29.06
<b>19</b>	15.80	12.07	14.25
<b>20</b>	23.08	18.22	18.15
$\bar{x}$	18.01	13.09	12.98
<b>MAX</b>	55.68	30.76	29.06
<b>MIN</b>	6.52	1.85	0.89
$\delta$	11.81	6.40	6.74
<b>CV</b>	65.6	48.9	51.9

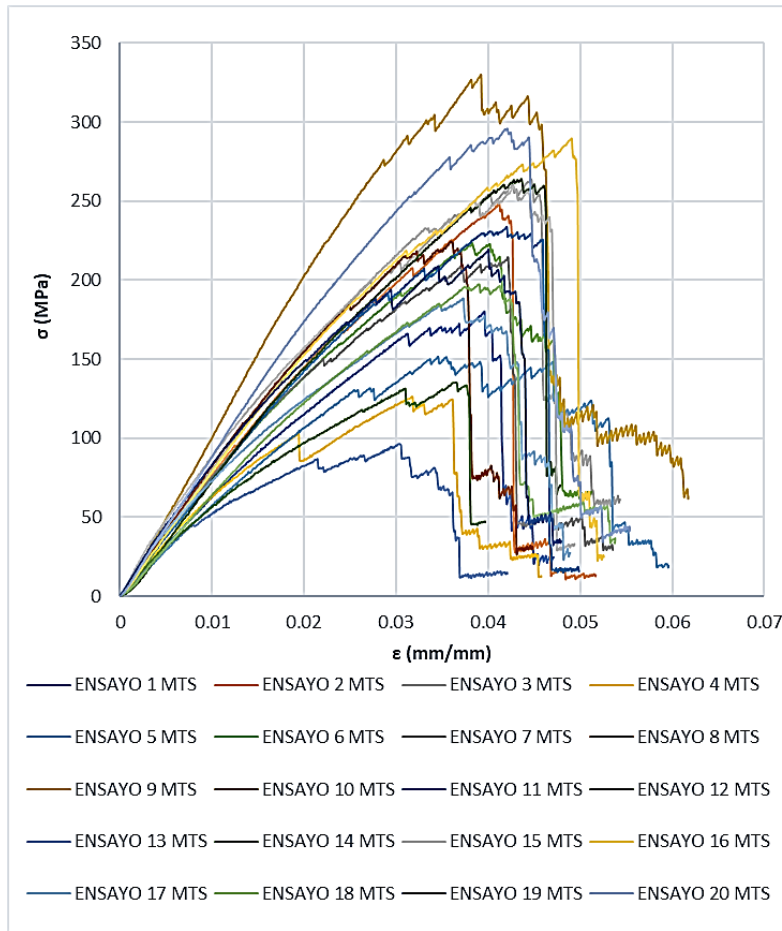
### ***2.1.2 Hilo de fique ensayado a velocidad media (9 mm/min)***

En las Tablas 9 y 10 y en la Fig. 13 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$ . El  $\sigma_{\max}$  promedio dio 213.1 MPa con una  $\delta$  aproximada de 63.7 MPa. Esto indica una variabilidad de los datos alta, esto proporciona una idea que el material muestra una resistencia promedio notable, pero que hay una variabilidad entre las muestras considerable, puede deberse a factores del tratamiento de hilos crudos de fique. En cuanto a la  $\epsilon_u$ , esta tiene un valor promedio de 3.88%, con un  $CV = 13.89\%$ . Este coeficiente de variación indica una baja dispersión de datos, lo que refleja una consistencia en la capacidad del hilo de fique para deformarse antes de fallar. Comparando con los resultados de las probetas de velocidad baja, en promedio las de velocidad media alcanzas un esfuerzo mayor, pero con un valor de deformación unitaria ultima ligeramente bajo.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 13, se determinó el  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 6.02 GPa con una  $\delta$  aproximada de 1.42 GPa y un  $CV = 23.55\%$ , lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango aceptable. Así mismo tenemos el  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio un valor de 5.44 GPa con una  $\delta = 1.48 \text{ GPa}$  y un  $CV = 27.29\%$ . Además, se concluye que a velocidades intermedias el material es más rígido y presenta una menor dispersión en los datos en comparación con los resultados obtenidos para los de velocidad baja.

**Figura 13.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 9.**

*Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 9 mm/min*

Probeta	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	180.2	3.96	5.25	4.84
<b>2</b>	248.3	4.12	6.46	5.94
<b>3</b>	263.8	4.47	6.66	6.03
<b>4</b>	126.3	3.17	4.01	2.92

Probeta	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
5	151.6	3.46	4.97	4.58
6	223.5	3.82	6.33	5.80
7	214.5	4.22	5.73	5.02
8	224.4	3.60	7.17	6.60
9	329.9	3.92	9.65	9.21
10	120.9	2.55	5.03	4.48
11	233.8	4.20	6.33	5.82
12	264.0	4.36	6.72	6.22
13	96.5	3.04	3.42	2.69
14	135.2	3.65	4.19	3.71
15	259.1	4.28	6.76	6.16
16	289.6	4.91	6.54	5.89
17	188.5	3.72	5.33	4.74
18	197.4	3.90	5.67	5.23
19	219.4	4.00	6.16	5.35
20	295.8	4.21	8.04	7.57

**Tabla 10.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 9 mm/min*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	213.1	3.88	6.02	5.44
<b>MAX</b>	329.9	4.91	9.65	9.21
<b>MIN</b>	96.5	2.55	3.42	2.69
$\delta$	63.7	0.54	1.42	1.48

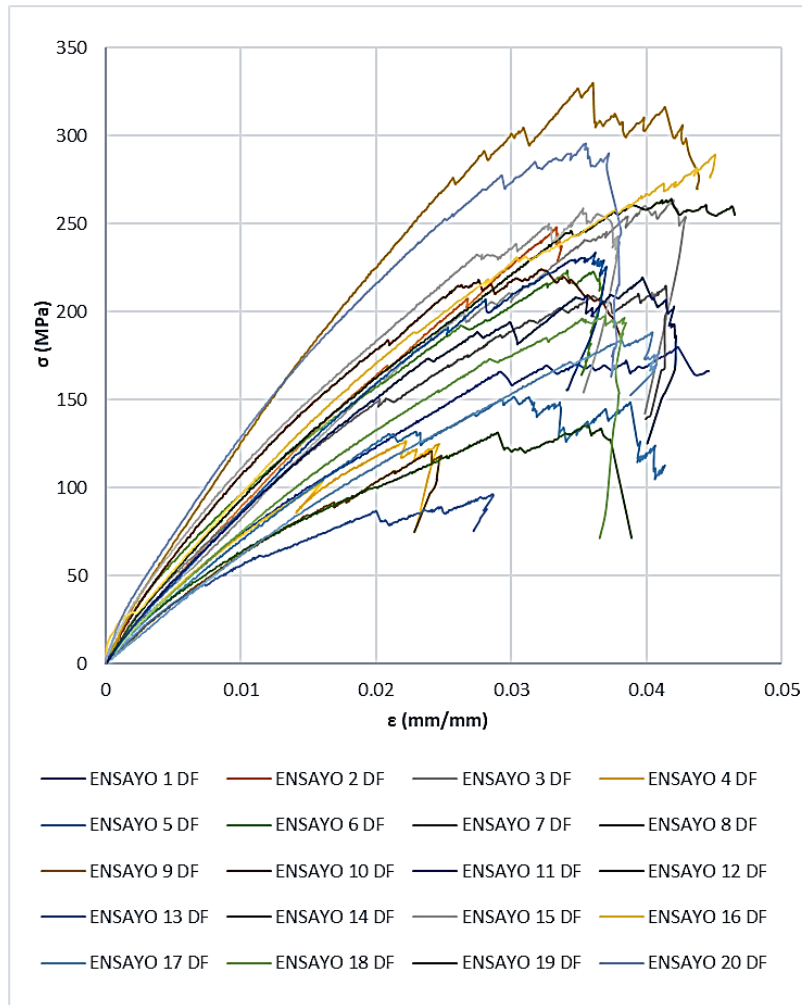
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>CV</b>	29.9	13.89	23.55	27.29

En las Tablas 11 y 12 y en la Fig. 14 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$ , basados en datos suministrados por el deformímetro. La Tabla 12 muestra la  $\epsilon_u = 3.57\%$ , con un  $CV = 17.03\%$ , lo que indica una dispersión baja de los datos suministrados por el deformímetro, comparando los valores tomados con la MTS Bionix, se evidencia una deformación unitaria ultima inferior con una dispersión superior, pero que entra dentro de un rango adecuado.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 14, se determinó el  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 6.56 GPa con una  $\delta$  aproximada de 1.66 GPa y un  $CV = 25.28\%$ , lo que significa que tiene una dispersión algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango tolerable para estos tipos de ensayos experimentales. Así mismo se obtiene  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 5.88 GPa con una  $\delta = 1.61 \text{ GPa}$  y un  $CV = 27.34\%$ . Estos valores de módulos de elasticidad en comparación con los tomados con MTS Bionix dieron elevados, además la variabilidad se mantuvo comparable.

**Figura 14.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformímetro  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 11.**

*Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro a velocidad = 9 mm/min*

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	180.2	4.23	5.40	4.86
<b>2</b>	248.3	3.33	7.60	7.09
<b>3</b>	263.8	4.20	6.74	6.13

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
4	126.3	2.22	5.84	4.98
5	151.6	3.02	5.86	5.39
6	223.5	3.41	6.93	6.15
7	214.5	4.14	5.86	5.06
8	224.4	3.22	8.18	7.30
9	329.9	3.60	10.31	9.61
10	120.9	2.41	5.03	4.47
11	233.8	3.62	7.24	6.72
12	264.0	4.19	7.14	6.48
13	96.5	2.86	3.59	2.82
14	135.2	3.56	4.22	3.65
15	259.1	3.53	7.91	7.09
16	289.6	4.51	6.85	6.07
17	188.5	4.04	4.92	4.48
18	197.4	3.69	5.99	5.49
19	219.4	3.97	6.07	5.17
20	295.8	3.55	9.53	8.58

**Tabla 12.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 9 mm/min*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	213.1	3.57	6.56	5.88
<b>MAX</b>	329.9	4.51	10.31	9.61
<b>MIN</b>	96.5	2.22	3.59	2.82

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b><math>\delta</math></b>	63.7	0.61	1.66	1.61
<b>CV</b>	29.9	17.03	25.28	27.34

Los resultados de la comparación de  $\epsilon_u$  (%),  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$  medidos con el cabezal de la MTS Bionix y el Deformímetro para los hilos de fique ensayados a velocidad media se presentan en la Tabla 13. En esta se evidencia unos rangos de diferencia de 0.76% a 42.91%, 0% a 31.25% y 0.11% a 41.33%, para  $\epsilon_u$ ,  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$ , respectivamente. Estos rangos tienen valores de diferencias atípicos, como los de la probeta 4, que supera el 40%.

En promedio tanto la deformación unitaria y los módulos de elasticidad, tienen una variabilidad muy aceptable, pero con unas diferencias inusuales. Por otro lado, si se observa individualmente los ensayos, vemos que la probeta 4 tiene una diferencia de  $\epsilon_u$  de 42.91%,  $E_{0-80\%}$  de 31.25% y  $E_{20-80\%}$  de 41.33%, estas diferencias son poco aceptables. Para esta sería adecuado volver a tomar otros resultados, ya que presenta un comportamiento anormal en comparación a los demás ensayos. Además, las probetas 2, 15 y 20 presentan diferencias altas, pero dentro de un rango aceptable. Por otro lado, si se compara los resultados con los de tasa de deformación baja, es notable que los de tasa de deformación intermedia son más consistentes, es decir, las diferencias de lecturas son en promedio inferiores, lo que permite concluir que son valores asertivos.

**Tabla 13.**

*Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 9 mm/min*

<b>Probeta</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Diferencia E (%)</b>	
	$\epsilon_u$ (%)	E <sub>0-80%</sub>	E <sub>20-80%</sub>
<b>1</b>	6.37	2.78	0.37
<b>2</b>	23.58	14.96	16.25
<b>3</b>	6.30	1.29	1.73
<b>4</b>	42.91	31.25	41.33
<b>5</b>	14.54	15.11	14.91
<b>6</b>	12.13	8.53	5.72
<b>7</b>	1.79	2.17	0.81
<b>8</b>	11.72	12.34	9.51
<b>9</b>	8.93	6.43	4.20
<b>10</b>	5.85	0.00	0.11
<b>11</b>	16.07	12.45	13.38
<b>12</b>	4.16	5.82	4.01
<b>13</b>	6.16	4.76	4.40
<b>14</b>	2.44	0.62	1.53
<b>15</b>	21.02	14.51	13.21
<b>16</b>	8.86	4.55	3.00
<b>17</b>	7.75	8.27	5.92
<b>18</b>	5.63	5.34	4.84
<b>19</b>	0.76	1.58	3.50
<b>20</b>	18.52	15.67	11.82
$\bar{x}$	11.27	8.42	8.03
<b>MAX</b>	42.91	31.25	41.33

Probeta	Diferencia	Diferencia E (%)	
	$\epsilon_u$ (%)	E <sub>0-80%</sub>	E <sub>20-80%</sub>
MIN	0.76	0.00	0.11
$\delta$	9.80	7.54	9.35
CV	86.9	89.5	116.5

### 2.1.3 Hilo de fique ensayado a velocidad alta (90 mm/min)

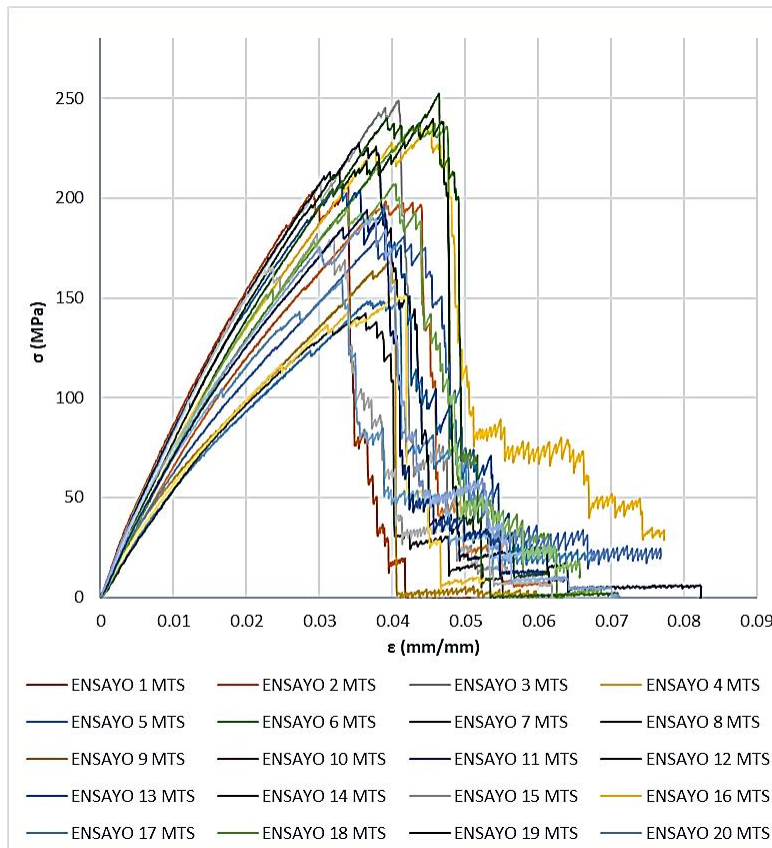
En las Tablas 14 y 15 y en la Fig. 15 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ . En la tabla 15 se presenta el valor promedio de  $\sigma_{\max} = 198.7 \text{ MPa}$  con una  $\delta = 34.3 \text{ MPa}$ . Esto indica una variabilidad de los datos moderada, esto proporciona una idea que el material muestra una resistencia promedio notable, pero que hay una variabilidad significativa entre las muestras, pero que entraría en un rango tolerable. En cuanto a la  $\epsilon_u$ , esta tiene un valor promedio de 3.86%, con un  $CV = 11.94\%$ . Este coeficiente de variación indica una baja dispersión de datos, lo que refleja una consistencia en la capacidad del hilo de fique para deformarse antes de fallar. Comparado con los resultados de las probetas de velocidad baja y media, en promedio las de velocidad media alcanzan un esfuerzo mayor. Además, a medida que aumenta la tasa de deformación, la deformación unitaria última va disminuyendo, esto nos indica que a mayor sea la velocidad con la que la probeta reciba la carga, la deformación es menor, esto puede significar que hay un menor intervalo de tiempo para que la totalidad de los hilos de fique se puedan acomodar para que todos soporten la carga al mismo tiempo.

Estos datos sugieren que, en la tasa de deformación intermedia se obtuvo mejor respuesta mecánica del material, este incremento no es tan significativo como los observados en las tasas de deformación baja y alta. Este hallazgo es importante, ya que indica que existe un margen en las propiedades mecánicas. Los coeficientes de dispersión no son similares a los encontrados en las

muestras sometidas a velocidades bajas y medias, lo que implica que el comportamiento mecánico del fique crudo tiende a ser impredecible en un rango intermedio bajo de velocidades.

**Figura 15.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 14.**

*Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix a velocidad = 90 mm/min*

Probeta	MTS Bionix			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	207.8	3.39	7.02	6.48
<b>2</b>	198.5	3.91	5.38	4.90
<b>3</b>	249.0	4.09	6.49	5.89

Probeta	MTS Bionix			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
4	237.4	4.54	5.86	5.39
5	148.6	3.70	4.15	3.71
6	237.8	4.37	5.67	5.21
7	227.8	3.54	6.94	6.41
8	142.3	3.63	4.39	3.96
9	168.3	3.96	4.20	3.80
10	191.0	3.55	5.87	5.30
11	208.8	3.31	6.65	6.06
12	239.7	4.55	6.21	5.53
13	180.8	4.16	4.65	4.20
14	252.5	4.64	6.23	5.76
15	182.1	2.97	7.16	6.69
16	151.3	4.16	4.09	3.63
17	159.1	3.31	5.12	4.48
18	207.1	4.04	5.86	5.24
19	194.2	3.65	5.66	5.13
20	190.1	3.74	5.55	5.05

**Tabla 15.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 90 mm/min*

	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	198.7	3.86	5.66	5.14
<b>MAX</b>	252.5	4.64	7.16	6.69
<b>MIN</b>	142.3	2.97	4.09	3.63

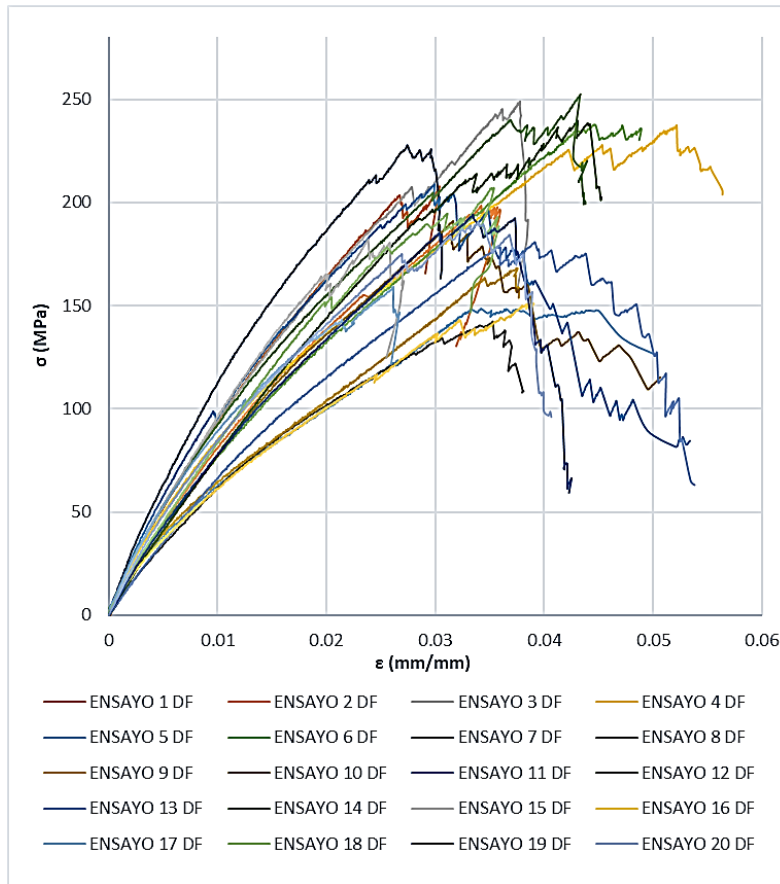
$\bar{\sigma}$	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$ (GPa)	$E_{20-80\%}$ (GPa)
$\delta$	34.3	0.46	0.97	0.94
<b>CV</b>	17.3	11.94	17.23	18.27

En las Tablas 16 y 17 y en la Fig. 16 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$ , basados en datos suministrados por el deformímetro. La tabla 17 muestra la  $\epsilon_u$  promedio de 3.56%, con un CV = 19.04%, lo que indica una dispersión intermedia-baja de los datos suministrados por el deformímetro, comparando los valores tomados por la MTS Bionix, se evidencia una deformación unitaria ultima inferior con una dispersión elevada, pero que entra dentro de un rango aceptable.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 16, se determinó el módulo  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 6.08 GPa con una desviación estándar aproximada de 1.30 GPa y un CV = 21.41%, lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango aceptable. Así mismo tenemos el módulo  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 5.43 GPa con una  $\delta$  aproximada de 1.21 GPa y un CV = 22.33%, estos valores de módulos de elasticidad y coeficientes de dispersión, en comparación con los tomados con MTS Bionix dieron más altos. Esto significa que, a pesar de tener mejor respuesta mecánica con la lectura del deformímetro, son más exactos los valores obtenidos con la maquina MTS Bionix.

**Figura 16.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformímetro  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 16.**

*Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro para velocidad = 90 mm/min*

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	207.8	3.04	7.54	6.93
<b>2</b>	198.5	3.42	6.17	5.46
<b>3</b>	249.0	3.78	6.91	6.17
<b>4</b>	237.4	5.22	5.05	4.37
<b>5</b>	148.6	3.42	4.30	3.77

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
6	237.8	4.46	5.43	4.90
7	227.8	2.74	8.88	7.98
8	142.3	3.53	4.43	3.87
9	168.3	3.74	4.40	3.96
10	191.0	3.16	6.33	5.72
11	208.8	2.99	7.42	6.56
12	239.7	4.30	6.05	5.41
13	180.8	3.92	5.00	4.47
14	252.5	4.33	6.27	5.57
15	182.1	2.38	8.06	7.49
16	151.3	3.90	4.09	3.65
17	159.1	2.62	6.50	5.57
18	207.1	3.54	6.54	5.84
19	194.2	3.35	6.05	5.48
20	190.1	3.40	6.19	5.52

**Tabla 17.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 90 mm/min*

	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80}$	$E_{20-80}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	198.7	3.56	6.08	5.43
<b>MAX</b>	252.5	5.22	8.88	7.98
<b>MIN</b>	142.3	2.38	4.09	3.65
$\delta$	34.3	0.68	1.30	1.21
<b>CV</b>	17.3	19.14	21.41	22.33

Los resultados de la comparación de  $\epsilon_u$  (%),  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$  medidos con el cabezal de la MTS Bionix y el Deformímetro para los hilos de fique ensayados a velocidad alta se presentan en la Tabla 18. En esta se evidencia unos rangos de diferencia de 2.00% a 29.06%, 0% a 21.86% y 0.47% a 23.23%, para  $\epsilon_u$ ,  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$ , respectivamente. Estos rangos son valores de diferencias tolerables, no superan el 30% de diferencia.

En promedio tanto la deformación unitaria y los módulos de elasticidad, tienen una variabilidad aproximadamente parecida, y con diferencias aceptables. Además, las probetas 7, 15 y 17 presentan diferencias moderadas, pero dentro de un rango aceptable, menos del 30%. Por otro lado, si comparamos los resultados con los de tasa de deformación baja y media, podemos notar que los de tasa de deformación alta son más consistentes, es decir, las diferencias de lecturas son en promedio bajas, lo que permite concluir que a medida que aumenta la tasa de deformación, la diferencias entre MTS Bionix y deformímetro disminuye, lo que indica que hay menos dispersión de datos entre estos.

**Tabla 18.**

*Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de fique para velocidad = 90 mm/min*

Probeta	Diferencia	Diferencia E (%)	
	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
1	11.76	6.96	6.49
2	14.24	12.80	10.34
3	8.08	6.13	4.63
4	13.06	15.92	23.23
5	8.15	3.44	1.62
6	2.00	4.46	6.24

<b>Probeta</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Diferencia E (%)</b>	
	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
<b>7</b>	29.06	21.86	19.66
<b>8</b>	3.01	1.06	2.48
<b>9</b>	5.73	4.64	4.12
<b>10</b>	12.07	7.36	7.37
<b>11</b>	10.51	10.37	7.69
<b>12</b>	5.88	2.59	2.24
<b>13</b>	6.25	7.02	5.98
<b>14</b>	7.03	0.75	3.38
<b>15</b>	24.54	11.13	10.59
<b>16</b>	6.84	0.00	0.47
<b>17</b>	26.70	21.18	19.61
<b>18</b>	14.38	10.38	10.40
<b>19</b>	9.14	6.56	6.35
<b>20</b>	10.05	10.34	8.52
$\bar{x}$	11.42	8.25	8.07
<b>MAX</b>	29.06	21.86	23.23
<b>MIN</b>	2.00	0.00	0.47
$\delta$	7.45	6.17	6.25
<b>CV</b>	65.2	74.8	77.5

## 2.2 Efecto de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas de hilos de fique

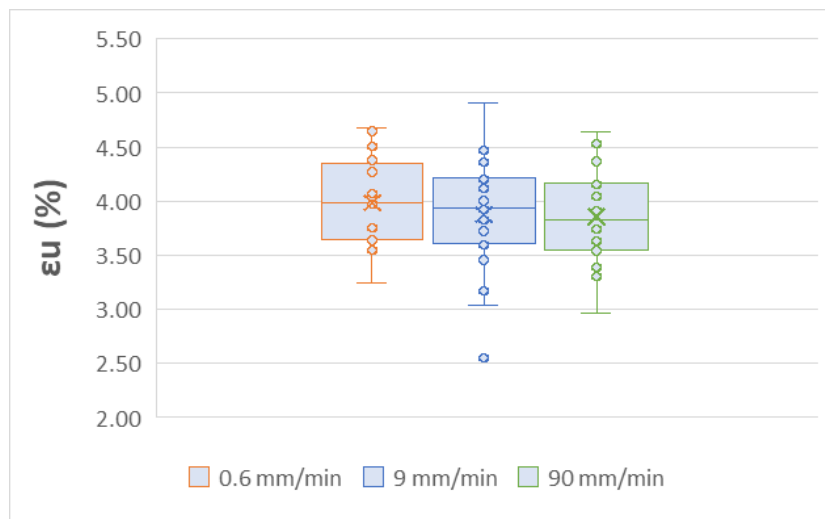
Para el análisis del efecto de las tasas de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos de fique natural, se utilizaron diagramas de caja y bigotes como recurso visual, estos diagramas permiten ver de forma directa la media aritmética, los cuartiles y los valores de cada una de las probetas, pudiendo así tener como referencia la dispersión y la tendencia central de los

datos. A continuación, se presentan los diagramas y análisis para la deformación unitaria ultima, esfuerzo ultimo y módulos de elasticidad.

En la Figura 17 se observa que la deformación unitaria última se encuentra entre el 2.55% y el 4.91% para las tres tasas de deformación, valores extremos presentes en las probetas de velocidad media, lo que proporciona una idea de dispersión de esta. Se evidencia una ligera disminución de esta propiedad a medida que se incrementa la tasa de deformación, esto indica que, a velocidades de carga rápidas, las fibras no logran acomodarse a tiempo para recibir una carga uniforme, provocando deformaciones menores. Además, se puede concluir que hay una dispersión alta de los datos en la tasa de deformación baja, pero a pesar de esto, muestra un comportamiento consistente y predecible. Aunque la deformación unitaria ultima de la tasa de deformación baja no muestra un aumento considerable en comparación con la tasa intermedia, esta última presenta los valores atípicos más significativos.

**Figura 17.**

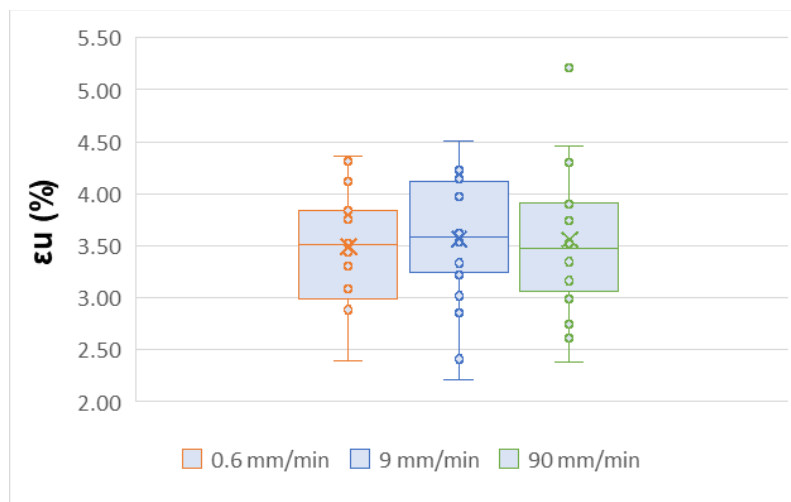
*Deformación unitaria última con MTS Bionix en función de la velocidad de ensayo*



La Figura 18 muestra que la deformación unitaria última se sitúa entre el 2.22% y el 5.22% para las tres tasas de deformación, registrando valores máximos en las velocidades de alta e intermedia. Se demuestra que no existe un patrón establecido similar a los resultados obtenidos con MTS Bionix, dado que, teóricamente, la tasa de deformación baja debería tener la mayor deformación unitaria en promedio; sin embargo, este valor se considera en la tasa intermedia. No obstante, se nota que los promedios son similares y que hay una mayor variabilidad en tasas de alto y medio, mostrando valores menos uniformes y atípicos, lo que facilita una explicación al problema propuesto.

### Figura 18.

*Deformación unitaria última con deformómetro en función de la velocidad de ensayo*

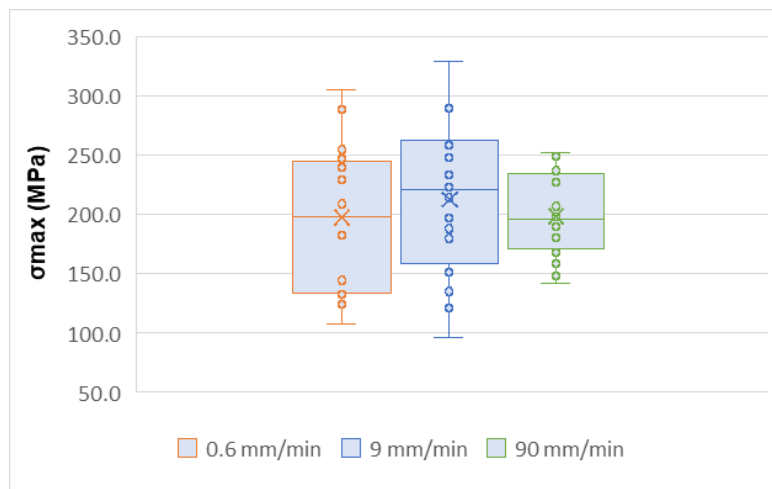


En la Figura 19 se observa que el esfuerzo ultimo no tiene un patrón definido. Este es mayor en la tasa de deformación intermedia, lo que indica que la dispersión en los datos afectó la uniformidad de los resultados, ya que, en teoría, se debería presentar un mayor esfuerzo en la tasa de deformación baja, esto debido a que las fibras disponen de más tiempo para acomodarse y distribuir carga de manera uniforme. Este parámetro se encuentra en un rango promedio que va de 96.5 MPa a 329.9 MPa para las tres velocidades, con valores extremos registrados en la velocidad

intermedia, además, se puede notar que las tasas de deformación baja e intermedia presentan una alta dispersión en sus datos, siendo la intermedia la que contiene los resultados más atípicos. Por otro lado, la tasa de deformación alta es la más consistente en términos de sus datos promedio de esfuerzo último.

### Figura 19.

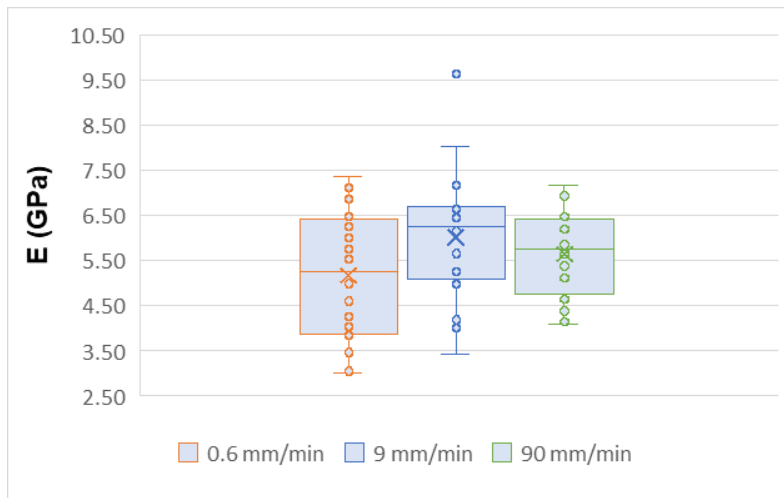
*Esfuerzo último en función de la velocidad de ensayo*



Las Figuras 20 y 21 muestran los resultados de los módulos de elasticidad calculados utilizando la información registrada por la MTS Bionix y el deformímetro. Dichos valores varían entre 3.01 GPa a 9.65 GPa, y entre 3.59 GPa a 10.31 GPa, respectivamente. La mayor parte de los valores máximos se registran en la velocidad media, lo que ofrece una visión de la elevada variabilidad entre los datos. No obstante, la tasa de deformación intermedia presenta un valor de módulo más elevado en comparación con las otras tasas de deformación, pese a que esta incluye los valores más irregulares. Estas conductas pueden estar relacionadas con las características viscoelásticas del hilo en bruto, ya sea por las impurezas que contiene, el proceso de producción o la fricción que se produce entre los filamentos.

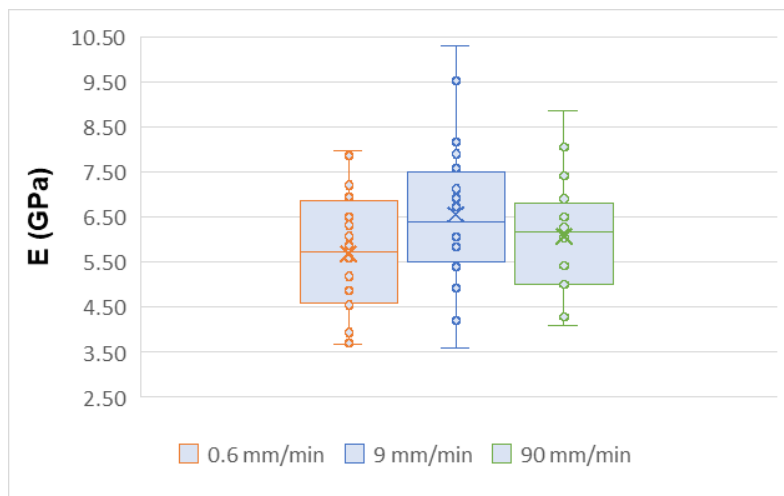
**Figura 20.**

*Módulo de elasticidad con MTS Bionix en función de la velocidad de ensayo*



**Figura 21.**

*Módulo de elasticidad con Deformímetro en función de la velocidad de ensayo*



**2.3 Hilo de piña ensayado a velocidad (20 mm/min)**

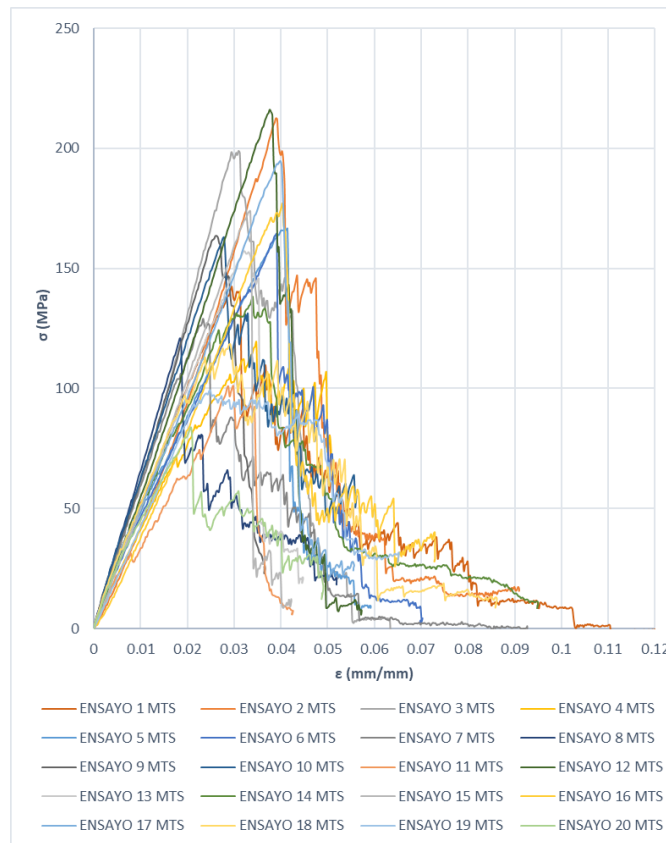
En las Tablas 19 y 20 y en la Fig. 22 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . En la tabla 18 se muestra el esfuerzo ultimo promedio de 152.1 MPa con una  $\delta$  de 38.1 MPa. Esto indica una variabilidad de los datos media, es decir, que hay una variabilidad entre las muestras, pero que entraría en un rango aceptable. En cuanto a

la deformación unitaria ultima, esta tiene un valor promedio de 3.16%, con un CV = 21.36%. Este coeficiente de variación indica una dispersión significativa de datos, pero tolerable, lo que refleja consistencia en la capacidad del hilo de piña para deformarse antes de fallar.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 22, se determinó el módulo  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 4.94 GPa con una  $\delta$  aproximada de 0.97 GPa y un CV = 19.56%, lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango aceptable. Así mismo se tiene el módulo  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 4.95 GPa con una  $\delta$  aproximada de 1.07 GPa y un CV = 21.65%. Además, se concluye estos módulos son aproximadamente iguales, tanto en promedio como en sus coeficientes de dispersión.

**Figura 22.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con MTS Bionix  $\dot{\epsilon} = 6.7E-03 s^{-1}$*



**Tabla 19.***Propiedades a tensión basados en datos con MTS Bionix para velocidad =20 mm/min*

<b>Probeta</b>	<b>MTS Bionix</b>			
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	142,4	2,95	4,83	4,82
<b>2</b>	212,6	3,89	5,31	5,69
<b>3</b>	199,0	3,09	6,63	6,97
<b>4</b>	119,4	3,47	3,61	3,41
<b>5</b>	166,6	4,14	4,12	4,00
<b>6</b>	164,5	3,91	4,18	4,10
<b>7</b>	129,1	2,34	5,78	5,67
<b>8</b>	121,0	1,84	6,47	6,45
<b>9</b>	163,6	2,62	6,22	6,35
<b>10</b>	163,0	2,78	5,89	5,79
<b>11</b>	101,1	2,98	3,08	2,99
<b>12</b>	216,2	3,76	5,80	5,95
<b>13</b>	157,2	3,20	4,91	4,98
<b>14</b>	138,2	3,40	4,40	4,21
<b>15</b>	174,0	3,34	5,28	5,40
<b>16</b>	177,0	4,03	4,56	4,78
<b>17</b>	194,7	3,99	4,75	4,81
<b>18</b>	118,5	2,92	4,62	4,43
<b>19</b>	99,3	2,49	4,33	4,38
<b>20</b>	83,8	2,08	4,02	3,73

**Tabla 20.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con MTS Bionix para velocidad = 20 mm/min*

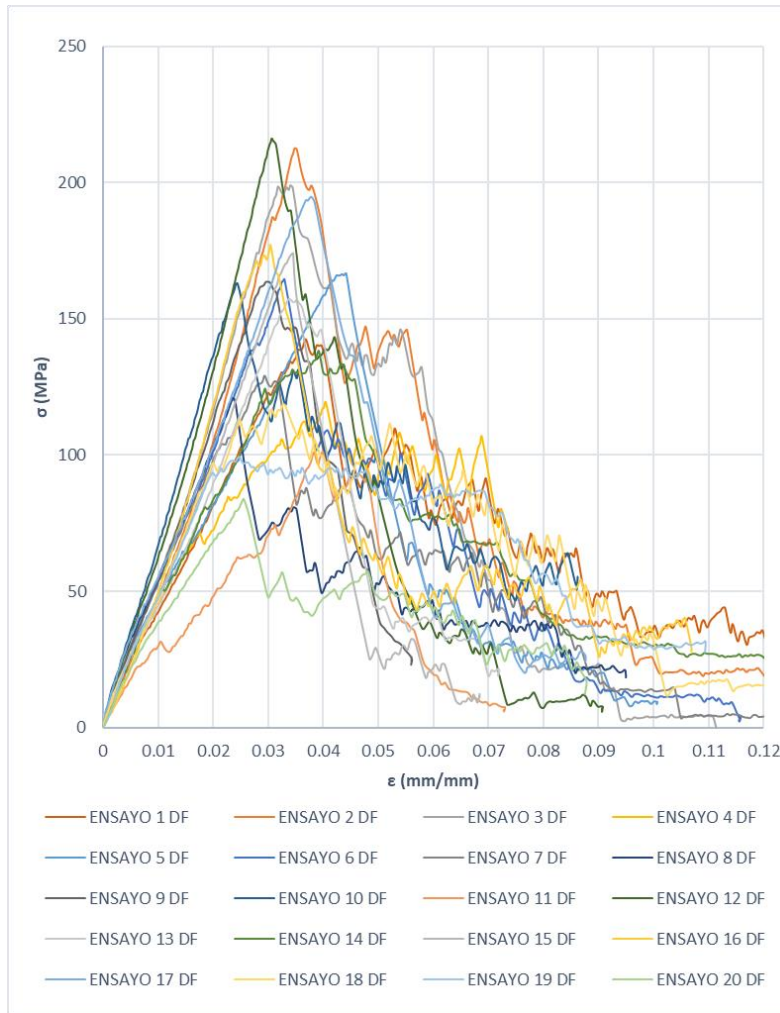
	$\sigma_{\max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	152,1	3,16	4,94	4,95
<b>MAX</b>	216,2	4,14	6,63	6,97
<b>MIN</b>	83,8	1,84	3,08	2,99
$\delta$	38,1	0,68	0,97	1,07
<b>CV</b>	25,0	21,36	19,56	21,65

En las Tablas 21 y 22 y en la Fig. 23 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , basados en datos suministrados por el deformímetro. La Tabla 22 se presenta el valor promedio de  $\sigma_{\max}$ , el cual coincide con los resultados obtenidos por la MTS Bionix. Esto se debe a que la fuerza axial aplicada a las probetas fue la misma. La diferencia estuvo presente en la metodología empleada para la toma de datos de deformación. Por otro lado, la  $\epsilon_u$  dio un valor promedio de 3.30%, con un coeficiente de variación de  $CV = 17.49\%$ , comparando los valores tomados por la MTS Bionix, se evidencia una deformación unitaria última inferior con una dispersión superior, pero que entra dentro de un rango aceptable.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación unitaria mostradas en la Figura 23, se determinó  $E_{0-80\%}$  en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 4.75 GPa con una  $\delta$  aproximada de 1.20 GPa y un  $CV = 25.29\%$ , lo que significa que tiene una variabilidad algo significativa, pero que se mantiene dentro de un rango adecuado. Así mismo tenemos  $E_{20-80\%}$  en la zona lineal, este parámetro dio como promedio un valor de 4.81 GPa con una  $\delta = 1.40 \text{ GPa}$  y un  $CV = 29.11\%$ , estos valores de módulos de elasticidad son muy parecidos a los obtenidos por la MTS Bionix, pero los coeficientes de dispersión de los tomados con el deformímetro dieron altos. Esto significa que se obtuvo una mejor lectura con la MTS Bionix.

**Figura 23.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria con deformímetro  $\dot{\epsilon} = 6.7E^{-03} s^{-1}$*



**Tabla 21.**

*Propiedades a tensión basados en datos con deformímetro para velocidad =20 mm/min*

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$ (GPa)	$E_{20-80\%}$ (GPa)
<b>1</b>	142,4	3,69	3,91	3,97
<b>2</b>	212,6	3,48	5,75	6,25
<b>3</b>	199,0	3,40	6,02	6,48

Probeta	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
4	119,4	4,05	3,14	2,80
5	166,6	4,42	3,71	3,61
6	164,5	3,30	4,94	4,94
7	129,1	2,93	4,73	4,43
8	121,0	2,36	4,84	4,66
9	163,6	3,00	5,53	5,71
10	163,0	2,44	6,72	6,86
11	101,1	3,99	2,17	2,13
12	216,2	3,06	6,70	7,09
13	157,2	3,37	4,46	4,71
14	138,2	3,92	3,92	3,78
15	174,0	3,45	4,91	5,10
16	177,0	3,04	6,25	6,81
17	194,7	3,79	5,00	5,09
18	118,5	3,30	4,46	4,40
19	99,3	2,48	4,61	4,45
20	83,8	2,56	3,26	3,03

**Tabla 22.**

*Medidas de tendencia central y dispersión con deformímetro para velocidad = 20 mm/min*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80}$	$E_{20-80}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	152,1	3,30	4,75	4,81
<b>MAX</b>	216,2	4,42	6,72	7,09
<b>MIN</b>	83,8	2,36	2,17	2,13

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	$E_{0-80}$	$E_{20-80}$
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\delta$	38,1	0,58	1,20	1,40
CV	25,0	17,49	25,29	29,11

**2.3.1 Comparación MTS VS Deformímetro para hilo de piña velocidad (20 mm/min)**

Los resultados de la comparación de  $\epsilon_u$  (%),  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$  medidos con el cabezal de la MTS Bionix y el Deformímetro para los hilos de piña ensayados a velocidad 20 mm/min se presentan en la Tabla 23. En esta se evidencia unos rangos de diferencia de 0.49% a 32.55%, 3.61% a 41.77% y 0.86% a 40.51%, para  $\epsilon_u$ ,  $E_{0-80\%}$  y  $E_{20-80\%}$ , respectivamente. Estos rangos son valores de diferencias poco tolerables, ya que superan el 30% de diferencia. En promedio tanto la deformación unitaria y los módulos de elasticidad presentan diferencias aceptables, pero individualmente existen diferencias como las de las probetas 8 y 11 que presentan variabilidad mayor al 30% lo que la hace que los resultados de ambas mediciones, tanto con la MTS Bionix y el Deformímetro, no sean consistentes, es decir, no se tenga claridad de cuál puede ser la medida más acertada.

**Tabla 23.**

*Comparativa de resultados de MTS Bionix VS Deformímetro de hilo de piña para velocidad = 20 mm/min*

Probeta	Diferencia	Diferencia E (%)	
	$\epsilon_u$ (%)	$E_{0-80\%}$	$E_{20-80\%}$
1	20.03	23.33	21.50
2	11.88	7.73	8.86
3	9.04	10.03	7.57
4	14.15	15.02	21.85
5	6.28	11.11	10.89

<b>Probeta</b>	<b>Diferencia</b>	<b>Diferencia E (%)</b>	
	$\varepsilon_u$ (%)	E <sub>0-80%</sub>	E <sub>20-80%</sub>
<b>6</b>	18.66	15.48	17.08
<b>7</b>	20.38	22.22	28.01
<b>8</b>	21.84	33.81	38.36
<b>9</b>	12.47	12.47	11.24
<b>10</b>	13.99	12.45	15.54
<b>11</b>	25.36	41.77	40.51
<b>12</b>	22.77	13.53	16.10
<b>13</b>	4.89	10.21	5.74
<b>14</b>	13.35	12.15	11.39
<b>15</b>	3.13	7.55	5.84
<b>16</b>	32.55	27.05	29.83
<b>17</b>	5.30	4.98	5.54
<b>18</b>	11.60	3.61	0.86
<b>19</b>	0.49	5.99	1.48
<b>20</b>	18.70	23.11	22.91
$\bar{x}$	14.34	15.68	16.05
<b>MAX</b>	32.55	41.77	40.51
<b>MIN</b>	0.49	3.61	0.86
$\delta$	8.23	10.00	11.47
<b>CV</b>	57.4	63.8	71.4

## 2.4 Resultados de la Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

### 2.4.1 Morfología superficial de los hilos

**2.4.1.1 Hilos de fique.** En las micrografías SEM obtenidas (Fig. 24), se permite visualizar la morfología y los cambios estructurales que se presentan en cada uno de los hilos como consecuencia de los tratamientos químicos aplicados a estos. En la Figura 24-a, correspondiente al hilo de fique en estado natural, se observa una forma cilíndrica bien definida, compacta y homogénea, con fibras bien alineadas y unidas. Algunas regiones pueden parecer expuestas; esta condición pudo haberse desarrollado debido al modo de extracción o separación de la fibra del tejido vegetal. Por otro lado, las partículas adheridas denotan que el hilo se encuentra en una condición sin tratamiento, por lo que conserva restos de la matriz natural.

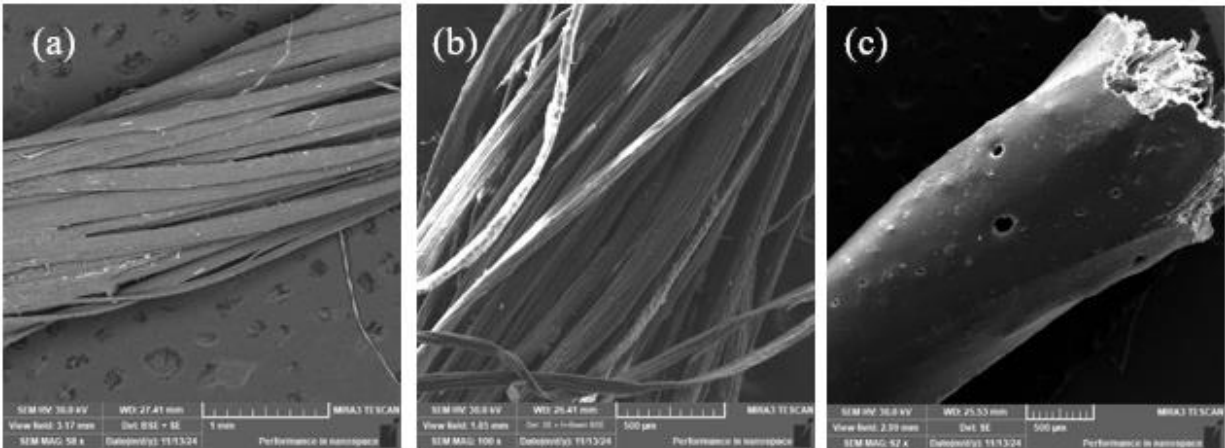
La superficie del hilo natural + Hidróxido de Sodio (NaOH) muestra un claro cambio en las superficies de las fibras provocado por el tratamiento con NaOH, por lo tanto, esto genera una superficie más lisa con fibras de diferente textura (Fig. 24-b), lo que indica una disminución porcentual de los componentes no celulósicos como la lignina, la hemicelulosa y ceras. Por otra parte, se evidencian líneas longitudinales paralelas; esto indica que hay una exposición de las fibras de celulosa después del tratamiento químico y, por lo tanto, denota que su estructura ha cambiado.

En el hilo natural + NaOH + Óxido de Grafeno (OG) se observan cambios de forma a lo largo de su longitud, como se muestra en la Figura 24-c. El hilo exhibe una capa de OG con dispersión no uniforme y menor brillo; esto indica un patrón de deposición que es poco homogéneo en comparación con tratamientos anteriores. Además, se distribuyen perforaciones distintivas en la superficie del hilo, mostrando una combinación entre la capa de óxido de grafeno y la superficie natural del hilo de fique. Por otra parte, el extremo de la fibra presenta un defecto estructural de

forma irregular como resultado de realizar una prueba de tracción previo a la captura de las imágenes SEM.

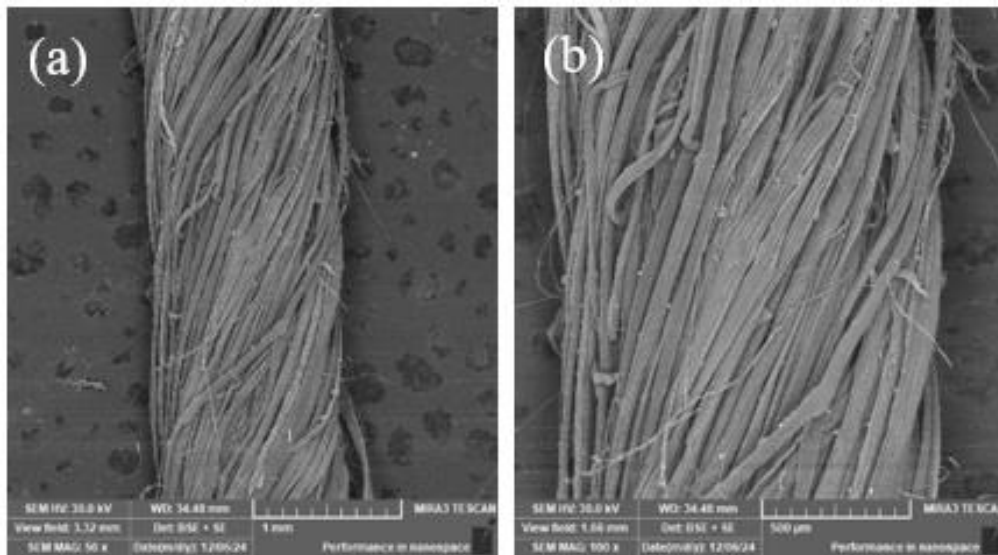
**Figura 24.**

*Imágenes SEM de hilos de fique: (a) fique natural, (b) fique natural + NaOH, (c) fique natural + NaOH + OG*



**2.4.1.2 Hilos de piña.** En las micrografías SEM obtenidas (Fig. 25), se permite visualizar la morfología y la estructura externa que se presenta en el hilo de piña en su estado natural. En la figura 25-a, capturada con un aumento 50x, las fibras de piña presentaron una morfología alargada y delgada, manteniendo una estructura constante tras su extracción. Al ampliar la micrografía con un aumento de 100x (Fig. 25-b), se logra apreciar diferentes texturas en la superficie del hilo, mostrando una estructura rugosa y desigual que consiste en fibras muy agrupadas.

Asimismo, se observa algunos residuos adheridos en la superficie que pueden estar relacionados con compuestos naturales no celulósicos. Estos residuos son comunes en la superficie de este tipo de fibras, se requiere de tratamientos adicionales para eliminarlos y desfibrar la fibra (Chaves, y otros, 2024).

**Figura 25.***Imágenes SEM de hilos de piña*

*Nota:* (a) aumento x50, (b) aumento x100

**2.4.2 Morfología superficial de las fibras**

**2.4.2.1 Fibra de fique.** En las micrografías SEM mostradas en la Figura 26, la capa superficial de la microfibrilla natural de fique (Fig. 26-a) presenta una forma cilíndrica, es rugosa, con numerosas irregularidades superficiales que pueden atribuirse a la presencia de compuestos no celulósicos que están presentes de manera natural en las fibras, como la lignina, la hemicelulosa y la cera. Hay zonas que parecen fracturadas o expuestas; esto podría ser consecuencia del método de separación de las fibras del tejido vegetal, por otro lado, las partículas adheridas reflejan la naturaleza sin tratar de la fibra, que conserva restos de la matriz natural del fique.

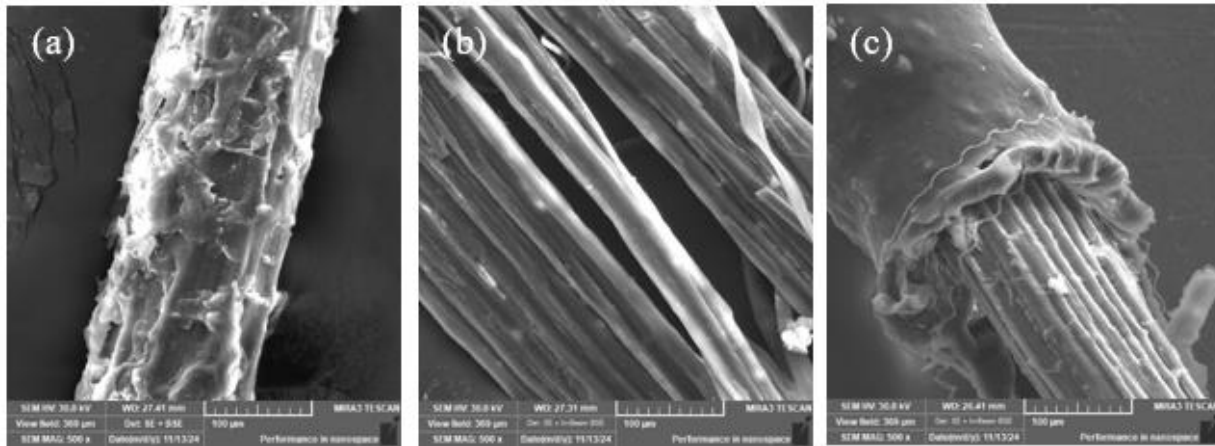
En la superficie de la microfibrilla natural de fique mercerizada (NaOH) se puede ver una mejora en comparación con la microfibrilla de fique en su estado natural ya que, al poner la fibra a un tratamiento de solución alcalina con NaOH, tiene una superficie más lisa, libre de impurezas y de materiales externos no celulósicos como la lignina, la hemicelulosa y la cera, tal como se ve

en Figura 26-b. Por otra parte la microfibrilla muestra líneas longitudinales paralelas lo que demuestra exposición de microfibrillas de celulosa tras tratamiento químico.

En la superficie de la microfibrilla natural de fique mercerizado recubierta con óxido de grafeno, se aprecia la exposición de microfibrillas alineadas longitudinalmente, resultados del tratamiento químico (Fig. 26-c). La superficie presenta un recubrimiento irregular y rugoso, característico del óxido de grafeno, con zonas fracturadas y deslaminadas que evidencian una distribución no homogénea. Se identifican partículas dispersas y acumulaciones en los bordes de la fibra, posiblemente residuos del recubrimiento. El paso de la capa superficial y el núcleo fibroso muestra adherencia parcial del recubrimiento, con bordes dispares y fragmentaciones, lo que sugiere tensiones internas e inconsistencias en el proceso de depósito.

### Figura 26.

*Imágenes SEM de fibras de referencia*

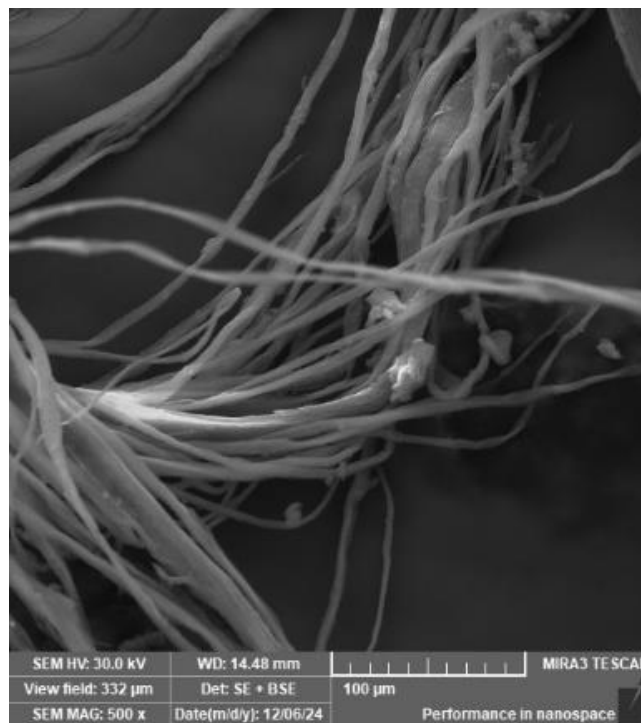


*Nota:* (a) fique natural, (b) fique natural + NaOH, (c) fique natural + NaOH + OG

**2.4.2.2 Fibra de piña.** En la micrografía SEM mostradas en la Figura 27, se observa una estructura muy fibrosa, con múltiples microfibrillas parcialmente separadas. Además, se puede evidenciar que la superficie tiene una textura rugosa y desigual, con pequeñas microfibras que se desprenden. Esto quiere decir que no es una estructura tan compacta ni pareja, lo que podría hacer que sea más débil mecánicamente. Es claro ver impurezas o partes de otros materiales pegados a la microfibra, algo que viene de su origen natural, lo mismo que los elementos no celulósicos en su estructura.

**Figura 27.**

*Imágenes SEM de fibra de piña*

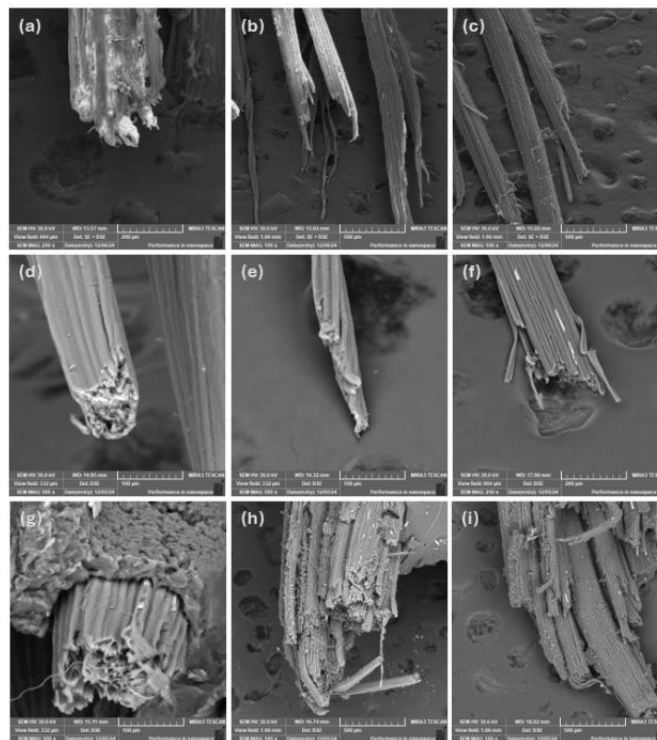


**2.4.3 Descripción de la superficie de falla**

**2.4.3.1 Fibra de fique.** Se tomaron micrografías SEM de la superficie de falla en cada uno de los materiales utilizando el procedimiento descrito en la metodología. Para el análisis de las fibras de fique previamente ensayadas a tracción, se observan aspectos diferentes en cada una de las superficies en función de las condiciones de ensayo y los tratamientos aplicados, tal y como se observa en la Figura 28.

**Figura 28.**

*Imágenes SEM de las fibras de referencia:*

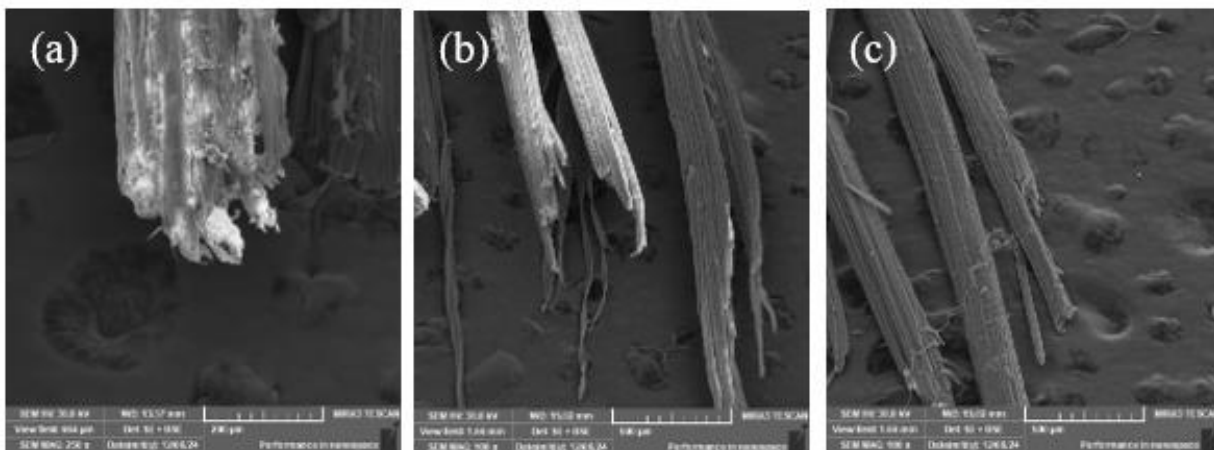


*Nota:* (a) fique natural velocidad baja, (b) fique natural velocidad media, (c) fique natural velocidad alta, (d) fique mercerizado velocidad baja, (e) fique mercerizado velocidad media, (f) fique mercerizado velocidad alta, (g) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad baja, (h) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad media, (g) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad alta

Se observa en las fibras de fique natural previamente ensayadas a tracción bajo las condiciones de velocidad baja, media y alta, puntos de falla característicos. A velocidad baja, la rotura de la microfibrilla es irregular, dejando en evidencia fibrillas desordenadas y sin un punto de falla claro (Fig. 29-a), esto muestra que la estructura interna es más débil. A velocidad media, se nota una mejora en contraste con la velocidad baja, ya que las microfibrillas presentan mejor alineación y roturas más claras (Fig. 29-b), lo que sugiere mayor resistencia antes de la falla. En cambio, en el caso de la velocidad alta, indica un comportamiento más frágil debido al aumento de velocidad, ya que la rotura se torna por partes en su eje longitudinal (Fig. 29-c).

### Figura 29.

*Imágenes SEM de las fibras de referencia*



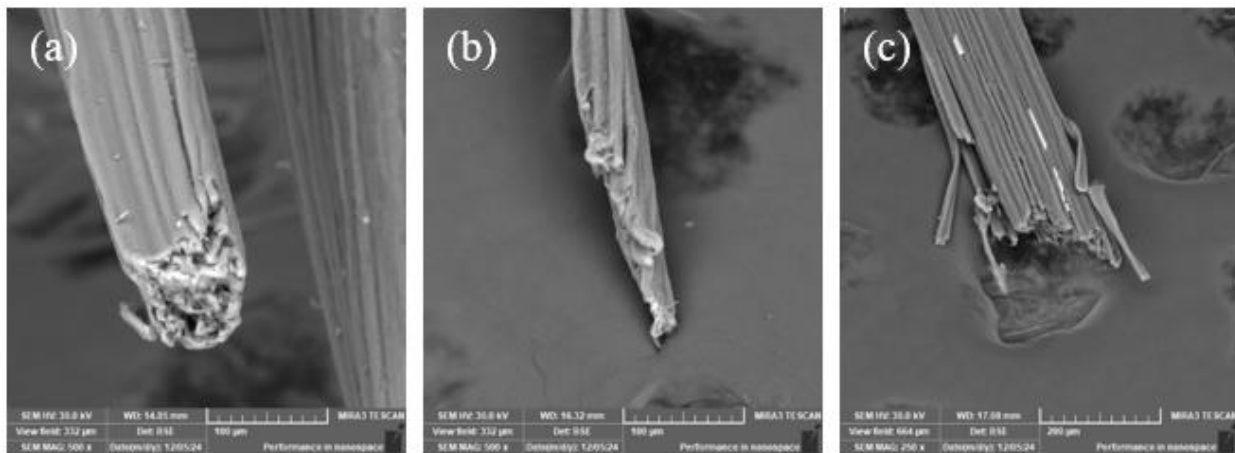
*Nota:* (a) fique natural velocidad baja, (b) fique natural velocidad media, (c) fique natural velocidad alta.

Para las fibras de fique natural sometidas a tratamiento de mercerización con NaOH y previamente ensayadas a tracción bajo condiciones de velocidad baja, media y alta, se logra observar una mejora notable en comparación del fique natural sin tratamientos. A velocidad baja, se puede observar en la zona de falla que la superficie es irregular, la fractura presenta un área compacta con desprendimientos menores y se evidencia la rotura de múltiples fibrillas en la

microfibra (Fig. 30-a), esto quiere decir que el proceso de falla se da de manera progresiva. Por otra parte, a velocidad media, se puede observar una fractura más limpia y uniforme, con menor número de fibrillas sueltas entre sí (Fig. 30-b), lo que sugiere una mejor transferencia de carga entre las microfibras. Por último, a velocidad alta, se puede evidenciar que la fractura fue más abrupta, ya que hay un mayor número de fibrillas expuestas (Fig. 30-c), lo que refleja un colapso repentino de la estructura interna del material.

### Figura 30.

*Imágenes SEM de las fibras de referencia*



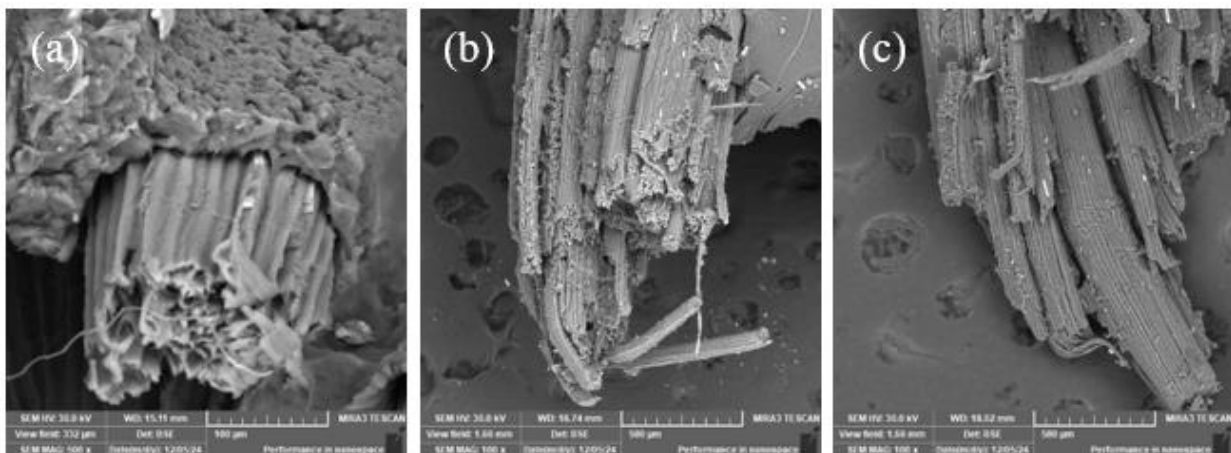
*Nota:* (a) fique mercerizado velocidad baja, (b) fique mercerizado velocidad media, (c) fique mercerizado velocidad alta

Por último, las fibras de fique natural sometidas a tratamientos de mercerización más recubrimiento de OG y previamente ensayadas a tracción bajo condiciones de velocidad baja, media y alta. Se evidencia una mejoría en comparación al fique natural mercerizado y fique natural sin tratamientos. A velocidad baja, la zona de falla evidencia un área de más compacta, la fractura se ve relativamente más uniforme y con fibrillas fuertemente unidas y reforzadas por los tratamientos a los que fue sometida la fibra (Fig. 31-a). Por otra parte, a velocidad media, la morfología de la fractura es más irregular, se puede observar mayor exposición de microfibras,

también, se puede ver algunos desprendimientos en el recubrimiento de óxido de grafeno (Fig. 31-b), lo que podría indicar que en esta condición del ensayo a tracción el material comienza a perder cohesión y a presentar una transición en el mecanismo de falla. Por último, a velocidad alta, se observa una fractura más irregular y desordenada (Fig. 31-c), ya que se ve mayor separación entre las microfibras, a parte, aparentemente la fibra tuvo un comportamiento más frágil, con menor cohesión del recubrimiento, lo que podría asociarse con baja capacidad de disipación de energía en el material debido a la velocidad de carga elevada (Sena Neto, Araujo, Souza, Mattoso, & Marconcini, 2013).

### Figura 31.

*Imágenes SEM de las fibras de referencia*



*Nota:*(a) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad baja, (b) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad media, (c) fique mercerizado más oxido de grafeno velocidad alta

**2.4.3.2 Fibra de piña.** Se tomaron micrografías SEM (Fig. 32) de la superficie de falla de la fibra de piña previamente ensayadas a tracción utilizando el procedimiento descrito en la metodología. Para el análisis de estas microfibras, se puede observar aspectos diferentes en cada una de las superficies.

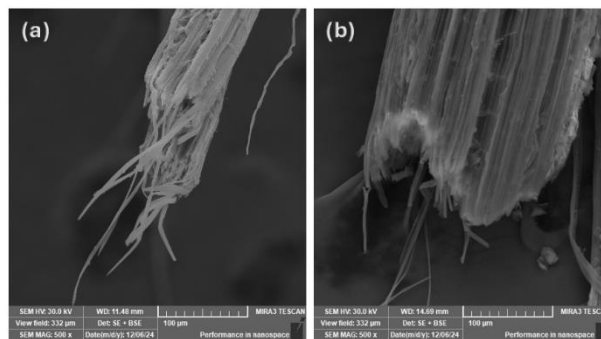
En la Figura 32-a, la fractura muestra una estructura fibrilada, donde es evidente el desprendimiento de las fibrillas individuales; esto podría indicar un proceso de falla progresivo, donde las fibrillas se separan antes de la rotura total. Por otra parte, la superficie de la fractura, indica una mayor deformación previo a la rotura, esto podría estar relacionado con la capacidad de absorción de energía antes de fallar.

Por otro lado, en la Figura 32-b, la superficie de la fractura presenta menos fibrilación y una superficie más compacta y cohesiva. También, se puede observar una disminución significativa en la cantidad de fibrillas sueltas o separadas y la superficie de rotura se ve más uniforme en comparación con la Figura 32-a; esto podría indicar que la transferencia de carga en la microfibra sea más eficiente, lo que permite que la estructura soporte mayor esfuerzo antes de fallar.

En general, si se compara ambas imágenes, se puede observar que las microfibras de piña tienen respuestas mecánicas diferentes, esto podría estar relacionado con la composición interna que tenga del material, la orientación de las fibrillas o la forma en que el esfuerzo se distribuye durante el ensayo de tracción.

### Figura 32.

*Imágenes SEM de las fibras de referencia*



*Nota:* (a), (b) filamento de fibra de piña

## 2.5 Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Las fibras de hojas de piña al igual que todas las fibras de origen natural son multicelulares y lignocelulósicas, constituidas por celulosa, hemicelulosa, lignina y en menor proporción por otros constituyentes amorfos. Las microfibrillas de celulosa se encuentran envueltas en una matriz polimérica amorfa, formada básicamente por hemicelulosa y lignina, esta última, es el único polímero aromático compuesto por una estructura siringilo (S), estructura guaiacilo (G) y estructura p – hidroxifelino (H) (Benjumea Royero).

La Figura 33 muestra el espectro FTIR–ATR de microfibras de piña sin tratamientos previos. Este espectro exhibe las ondas de absorción distintivas asociadas con las fracciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, lo que indica su presencia dentro de las fibras.

Las ondas de absorción presentes en los espectros se asignaron de la siguiente forma: El pico de transmitancia inicial, observado en los números de onda  $3334\text{ cm}^{-1}$  y  $3286\text{ cm}^{-1}$ , se atribuye a la vibración de estiramiento de O–H (grupos hidroxilo), lo que indica la presencia de celulosa. El pico de transmitancia posterior en los números de onda  $2920\text{ cm}^{-1}$ ,  $2901\text{ cm}^{-1}$  y  $2851\text{ cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento simétrico, asimétrico y la vibración de los grupos  $\text{CH}_2$ , lo que indica la presencia de hemicelulosa (Tengsuthiwat, Rangappa, & Siengchin, 2024).

El siguiente pico de transmitancia observado en el número de onda  $1731\text{ cm}^{-1}$  se atribuye a vibraciones en el enlace C–O, lo que indica presencia de hemicelulosa. Los siguientes picos de transmitancia observados en los números de onda  $1634\text{ cm}^{-1}$  y  $1603\text{ cm}^{-1}$ , son indicativos de la vibración de estiramiento de los enlaces C–O y C–C, lo que significa la presencia de hemicelulosa y lignina, respectivamente (Tengsuthiwat, Rangappa, & Siengchin, 2024).

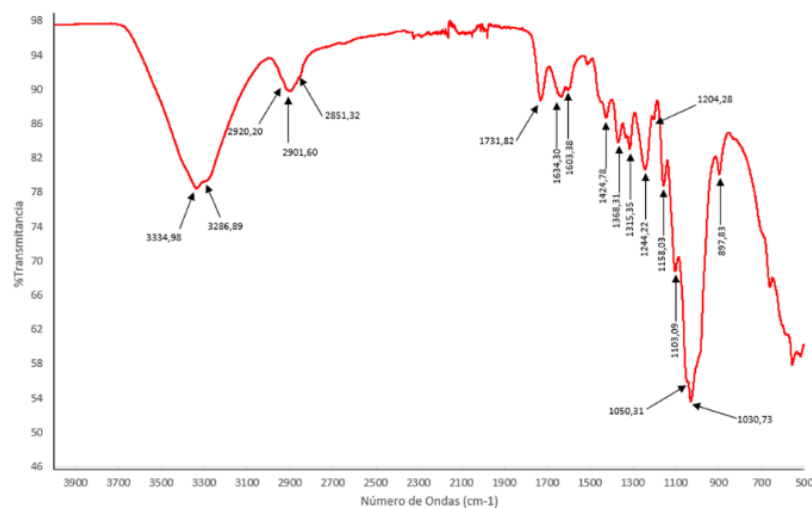
Otro pico de intensidad observado en el número de onda  $1453\text{ cm}^{-1}$  y  $1424\text{ cm}^{-1}$  corresponde a las vibraciones de los grupos metilo (CH). Los picos de transmitancia en los

números de onda  $1244\text{ cm}^{-1}$  y  $1204\text{ cm}^{-1}$ , se atribuyeron a vibraciones en enlaces C–O, lo que indica presencia de hemicelulosa (Tengsuthiwat, Rangappa, & Siengchin, 2024).

Los picos de transmitancia en los números de onda  $1158\text{ cm}^{-1}$ ,  $1103\text{ cm}^{-1}$  y  $1050\text{ cm}^{-1}$  corresponden a las vibraciones de los grupos metilo (CH) y vibraciones de flexión de C–O–C, lo que indica la presencia de hemicelulosa y lignina. Los picos de transmitancia finales en los números de onda  $1030\text{ cm}^{-1}$  corresponden a vibraciones de estiramiento y flexión de enlaces C–O. Estos picos se atribuyeron nuevamente a la presencia de constituyentes amorfos como hemicelulosa y lignina presentes en la fibra (Tengsuthiwat, Rangappa, & Siengchin, 2024).

### Figura 33.

*Espectro FTIR – ATR de la fibra de piña*



La celulosa es un polímero carbohidrato complejo que se caracteriza por sus largas cadenas de moléculas de glucosa unidas entre sí a través de enlaces glucosídicos beta-1,4. Desempeña un papel fundamental al conferir resistencia, rigidez y estabilidad a la estructura de la fibra. Si bien la celulosa es resistente a la hidrólisis, puede degradarse cuando se expone a ciertos tratamientos químicos (Gañán, y otros). Las hemicelulosas, por otro lado, son polisacáridos de bajo peso molecular que a menudo forman estructuras desordenadas, amorfas, ramificadas o no lineales.

Estos polisacáridos están compuestos de unidades de glucosa, ácido glucurónico, manosa, arabinosa y xilosa. La lignina es una red polimérica amorfa y reticulada compuesta por una variedad de unidades de fenilpropano sustituidas con hidroxilo y metoxi, unidas por varios tipos de enlaces. Su composición química varía según su fuente. La lignina es menos polar que la celulosa. Cumple funciones dentro y entre las fibras para mejorar la resistencia de la pared, regular la permeabilidad y facilitar el flujo de agua. Debido a la estabilidad de los anillos aromáticos en la lignina, es resistente a la descomposición en condiciones anaeróbicas y se descompone lentamente en ambientes aeróbicos, lo que la hace generalmente resistente a la degradación microbiana (Gañán, y otros, 2013).

## **2.6 Análisis Termogravimétrico (TGA)**

### **2.6.1 Hilo de Fique**

El análisis termogravimétrico (TGA) de las fibras de fique evaluó la pérdida de masa en función del incremento de temperatura. La Figura 34 presenta la evolución de la pérdida de peso con una rampa de calentamiento de 5 °C/min. Se observa patrones de descomposición similares entre las fibras no tratada y las tratadas, caracterizándose por una única etapa de pérdida de masa que inicia entre 260.14 °C y 297.41 °C, y finaliza en un rango de 330 a 385 °C.

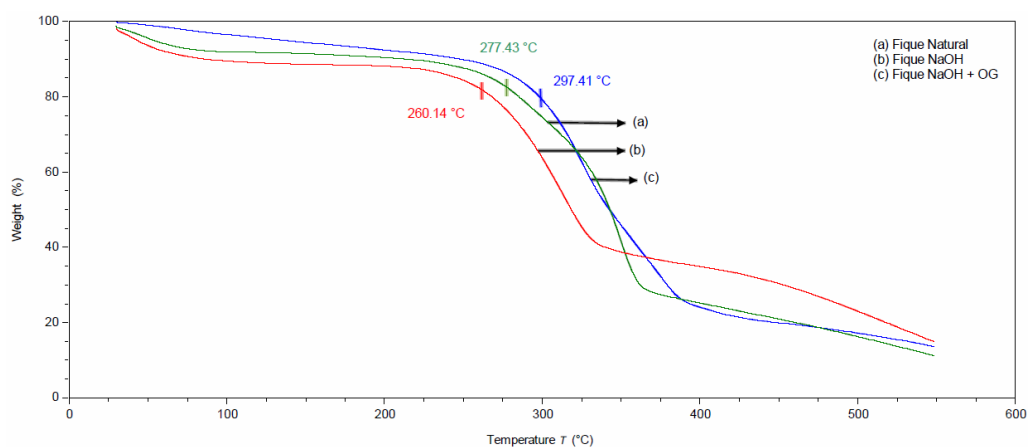
Las fibras de fique que se tratan con NaOH empiezan a descomponerse a 260.14 °C. Esta temperatura es más baja que la de las fibras sin tratamiento, ya que estas últimas empiezan a descomponerse a 277.43 °C. En teoría, las fibras tratadas con NaOH deben aumentar su temperatura de degradación por causa de los tratamientos alcalinos en este material. Generalmente, el tratamiento alcalino ayuda a mejorar la estabilidad térmica porque elimina impurezas y partes no celulósicas como la hemicelulosa, lignina y sílice, lo que trae como resultado temperaturas de

degradación más altas [13]. Por lo tanto, se deduce que las fibras tratadas con NaOH tienen inestabilidad térmica en su forma por causa de la conservación de la muestra.

Por otro lado, las fibras tratadas con NaOH más Oxido de Grafeno (OG) presentan una temperatura de degradación máxima de 385 °C, la cual describe que, a pesar de ser un material natural y biodegradable, el fique con este tratamiento alcanza resistencias térmicas muy superiores, ideales para situaciones de extrema exposición en aplicaciones de refuerzo. Esto muestra que posee una mayor resistencia térmica antes de su descomposición, lo que sugiere mejoras estructurales y químicas, así como la eliminación de componentes térmicamente inestables. Este tratamiento deja una fibra más limpia con más contenido de celulosa cristalina, mejorando su estabilidad térmica al degradar la región de celulosa amorfa y aumentar la cristalinidad (Mundhe & Kandasubramanian, 2024). Por lo tanto, las fibras sin tratar presentan una descomposición a temperaturas bajas, debido a la presencia de componentes no celulósicos o cristalinos, como impurezas o componentes amorfos.

### Figura 34.

*Evaluación de TGA de hilos de fibras tratadas y no tratadas de fique*

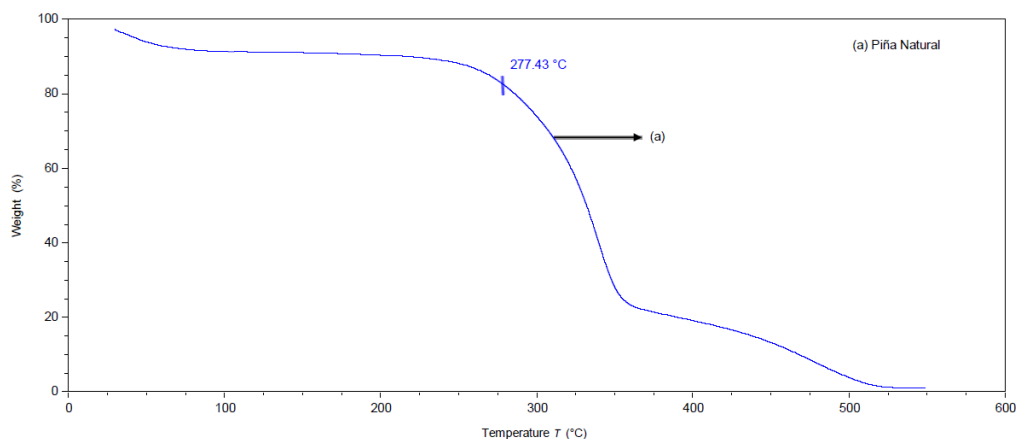


### 2.6.2 Hilo de Piña

El análisis termogravimétrico (TGA) de las fibras de piña evaluó la pérdida de masa en función del incremento de temperatura. La Figura 35 presenta la evolución de la pérdida de peso con una rampa de calentamiento de 5 °C/min. Estas fibras de piña natural empiezan a descomponerse a 277.43 °C, al igual que las fibras de fique natural, ya que ambas son fibras crudas, es decir, fibras que no tienen ningún tipo de tratamiento, por lo que presentan una estructura con componentes no celulósicos e impurezas. A pesar de que son dos materiales distintos, su degradación es similar. Por otro lado, estas fibras no tratadas presentan una temperatura de degradación máxima de 355 °C aproximadamente, inferior a la de fique natural (Fig. 34), teniendo una menor estabilidad térmica.

#### Figura 35.

*Evaluación de TGA de hilos de fibras de piña*



### 3. Conclusiones

Para la caracterización mecánica mediante ensayos a tracción de hilos de fique crudo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Se obtuvo los resultados tanto con la maquina MTS como con el deformímetro, los esfuerzos últimos, que son iguales para ambas oscilan entre 96.5 MPa y 329.9 MPa, los resultados de la deformación unitaria ultima, módulo de elasticidad 0-80% y módulo de elasticidad 20-80% con la MTS oscilan entre 2.55% y 4.91%, 3.01 GPa y 9.65 GPa, 2.69 GPa y 9.21 GPa, respectivamente. Por otro lado, los resultados con el deformímetro oscilan entre 2.22% y 5.22% para deformación unitaria última, 3.67 GPa y 10.31 GPa para módulo de elasticidad 0-80% y finalmente 2.82 GPa y 9.61 GPa para módulo de elasticidad 20-80%.

2. En el análisis de las propiedades mecánicas de hilos de fique crudos, se evaluaron el esfuerzo último, la deformación unitaria última y el módulo de elasticidad. Para ello, se comparó el efecto de tres tasas de deformación utilizando diagramas de cajas y bigotes. Los resultados obtenidos muestran que la deformación unitaria última disminuye a medida que aumenta la tasa de deformación. Esto sugiere que los hilos de fique crudos soportan menores deformaciones antes de fallar cuando son sometidos a velocidades de deformación más altas. Además, las mediciones realizadas con el deformímetro presentan una mayor dispersión en la tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), superando ligeramente a las obtenidas en la tasa baja ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Este comportamiento indica una mayor variabilidad en la respuesta del material ante deformaciones medias. El esfuerzo último sigue una tendencia similar. En la tasa intermedia se observa una mayor dispersión, lo que evidencia un comportamiento más fluctuante en este rango. Por otro lado, en la tasa más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), aunque el esfuerzo es menor, la dispersión de los datos es significativamente reducida.

3. En cuanto al módulo de elasticidad, los resultados obtenidos sugieren que este es mayor en la tasa de deformación intermedia, sin embargo, la dispersión alcanza su punto más alto en esta tasa, todo lo contrario, en la tasa más alta, ya que la variabilidad disminuye considerablemente.

Cabe resaltar que el módulo de elasticidad es menor en la tasa de deformación más baja. No obstante, el valor promedio del módulo no presenta un aumento significativo entre las tasas intermedias y altas, esto quiere decir que si se aumenta la velocidad de deformación no necesariamente mejora la rigidez del material. Generalmente, la tasa de deformación intermedia ofrece un mejor desempeño en términos de resistencia y rigidez, pero exhibe un comportamiento más impredecible y los valores más atípicos. La tasa más alta presenta una rigidez similar con la tasa de deformación intermedia, lo que nos permite concluir que no hay una mayor variación en la rigidez si se aumenta la velocidad de deformación. De igual manera, esta tasa tiene un comportamiento consistente y predecible, en comparación a la tasa intermedia. Por último, la tasa de deformación baja muestra una rigidez menor, lo que sugiere que en condiciones de carga lenta ofrece una menor resistencia a la deformación.

4. En los ensayos a tracción de hilos de fique crudo, se presentó un comportamiento al momento de tomar lecturas de las deformaciones con el deformímetro, ya que el hilo tenía una longitud de 150 mm, y el deformímetro solo abarcaba la longitud de 25 mm, si este fallaba fuera de este rango, se evidenció que después del esfuerzo último o máximo, este se deslizaba, lo que se podía observar en las curvas esfuerzo-deformación unitaria, por eso se graficó en estas curvas el comportamiento hasta un poco después del esfuerzo ultimo.

Para los ensayos de microscopia electrónica de barrido se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Los mecanismos de falla de las fibras de fique y piña varían dependiendo de la velocidad de tracción. Las fracturas a velocidades bajas son más irregulares, con fibras separadas y desorganizadas, lo que indica una acumulación gradual de daño antes de la falla total. A

velocidades altas, las fracturas tienden a ser más limpias y abruptas, indicando un comportamiento más frágil debido a la menor capacidad de redistribuir esfuerzos antes de romperse.

2. Se nota que las fibras mercerizadas y las revestidas con óxido de grafeno muestran una cohesión estructural superior en el lugar de falla, además, optimizan la distribución de los esfuerzos y potencian la resistencia frente al desplome estructural. Estos procedimientos potencian de manera notable la transferencia de cargas y la resistencia mecánica de las fibras, dado que ayudan a incrementar la adhesión entre las microfibrillas, reduciendo la dispersión de las fibras únicas y creando fracturas más compactas y ordenadas.

El análisis espectroscópico permitió identificar la presencia de celulosa, hemicelulosa y lignina en los hilos de fibra de piña, lo que confirma su naturaleza lignocelulósica.

En los ensayos de TGA se comparó la variación de masa en función del aumento de temperatura para las fibras de fique y piña, tanto tratadas como no tratadas. Se observa que las fibras tratadas con NaOH + OG mostró una estabilidad térmica significativamente superior en comparación con las fibras no tratadas de fique y piña. Esto permite concluir que, mediante estos tratamientos, se obtiene un material con una estructura física y química más estable, resultando en fibras más puras, cristalinas y libres de impurezas, con una estabilidad térmica alta.

#### **4. Recomendaciones**

Para los valores de los resultados a tracción de las propiedades mecánicas, que no se encuentran dentro de los rangos de aceptabilidad, es recomendable hacer una revisión minuciosa de las causas de estas diferencias y de los valores atípicos presentes.

### Referencias

- Álvarez, T. (2024). *Efecto de la longitud en las propiedades mecánicas a tracción de hilos formados por fibras extraídas de la hoja de piña de Lebrija, Santander*. Obtenido de Universidad Industrial de Santander: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/44586>
- Álvarez-Rincón, Y., Castellanos-Díaz, T., Benjumea- Royero, J., Germán, J., & Díaz-Ramírez, A. (sf). *Efecto de la longitud en las propiedades mecánicas a tracción de hilos formados por fibras extraídas de la hoja de piña de lebrija, santander length effect of on tensile mechanical properties of yarns formed by fibers extracted from pineapple leaf of lebr.*
- Anukwah, G., & Gadzekpo, V. (2024). *Production of natural cellulose-based microfibrres, from oil palm mesocarp fibres and pineapple leaf wastes, as porous supports for further applications.* . Obtenido de Heliyon;10(18): 10.1016/j.heliyon.2024.e37701
- ASTM, "D2256/D2256M Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method."* Accessed: Sep. 14, 2024. [Online]. Available: [https://www.astm.org/d2256\\_d2256m-21.html](https://www.astm.org/d2256_d2256m-21.html)
- Benjumea Royero, J. (s.f.). 2024. Universidad industrial de santander.
- Chaves, D., Araújo, J., Gomes, C., Gonçalves, S., Fanguero, R., & Ferreira, D. (2024). *Extraction, characterization and properties evaluation of pineapple leaf fibers from azores pineapple.* . Heliyon, 10(4), e26698.
- Díaz, N. (2024). *Desarrollo de actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-3954 para determinar el índice de cristalinidad y el área de la sección transversal*

*de hilos de fique crudos y tratados*. Obtenido de Universidad Industrial de Santander: <https://noesis.uis.edu.co/items/4d93e18b-0cd5-445d-b018-c4bdec7d95e3>

Gañán, P., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo-Osorio, A., Cock, J., Osorio, M., & et.al. (2013). *Celulosa: Un polímero de siempre con mucho futuro*. PCER\_M\_Tesis\_2013\_Mayra\_Chim\_Kantún.

Li, M., Pu, Y., Thomas, V. Y., Ozcan, S., Deng, Y., & et.al. (2020). *Recent advancements of plant-based natural fiber-reinforced composites and their applications*. . Obtenido de Composites Part B: Engineering, 200: 10.1016/j.compositesb.2020.108254

Mundhe, A., & Kandasubramanian, B. (2024). *Advancements in natural fiber composites: Innovative chemical surface treatments, characterizatón techniques, environmental sustainability, and wide-ranging applications*. Obtenido de Hybrid Advances, 7, 100282: 10.1016/j.hybadv.2024.100282

Ramirez, C. A., & Pettarin, V. (2024). *Fracture toughness and overall characterization of PLA based biocomposites with natural fibers: A comparative study*. . Obtenido de Polymer, 307, 127309: 10.1016/j.polymer.2024.127309

Rico-Meza ME, Benjumea-Royero JM, Cruz-Hernández R, et al. (sf). *Caracterización mecánica a tracción de los hilos de fibra de fique con longitud L=50 mm bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954* mechanical tensile characterization of fique fiber threads with a length L=50 mm under different deformation rates within the framework of the VIE-UIS 3954 project. . .

*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.  
*doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.101*

Sena Neto, A., Araujo, M., Souza, F., Mattoso, L., & Marconcini, J. (2013).

*Characterization and comparative evaluation of thermal, structural, chemical, mechanical and morphological properties of six pineapple leaf fiber varieties for use in composites.* Obtenido de *Industrial Crops and Products*.;43:529. :  
10.1016/j.indcrop.2012.08.001

Tengsuthiwat, J., Rangappa, S., & Siengchin, S. (2024). *Characterization of novel natural*

*cellulose fiber from ficus macrocarpa bark for lightweight structural composite application and its effect on chemical treatment.* . Obtenido de *Heliyon*. 10(9):  
10.1016/j.heliyon.2024.e3044

Test method for compositional analysis by thermogravimetry ASTM International. (s.f.).

Obtenido de 10.1520/e1131-20

TGA 5500. (2016). *TA Instruments - Materials Science Solutions.* . Obtenido de

<https://www.tainstruments.com/tga-5500/>

*Väisänen, T. H., Lappalainen, R., & Tomppo, L. (2016).* Utilization of agricultural and forest

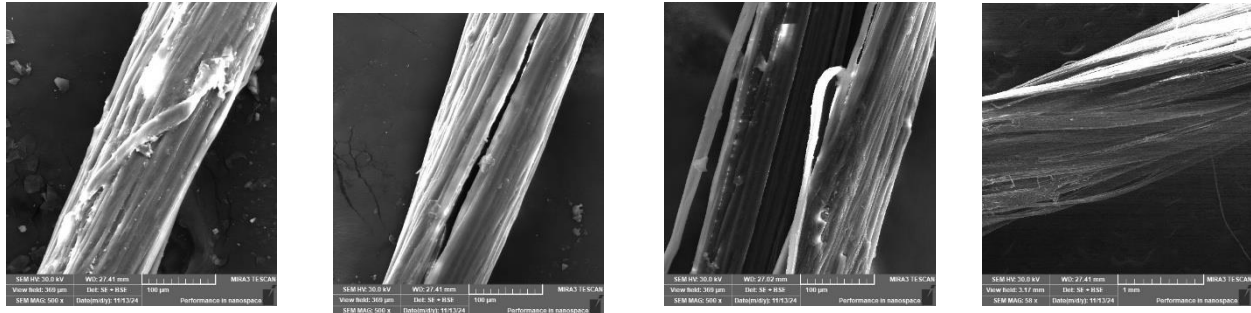
industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. .  
*Obtenido de Waste Management*, 54, 62–73. : 10.1016/j.wasman.2016.04.037



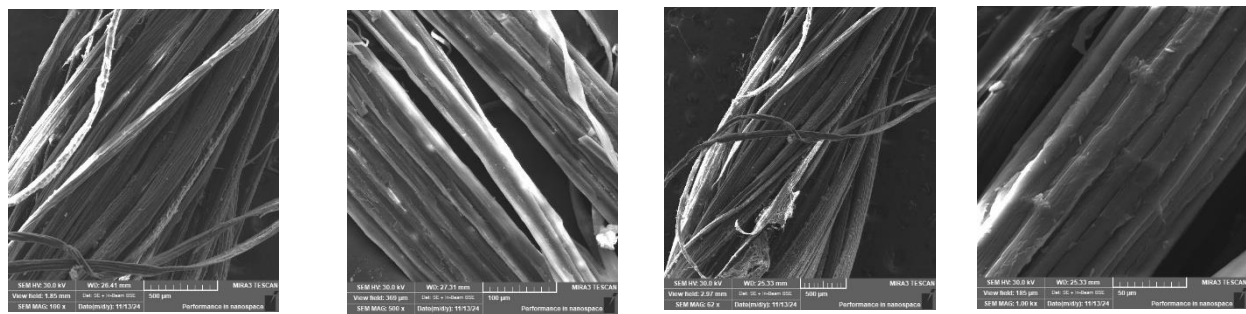
Apéndices

Apéndice A. Micrografías tomadas en el área superficial de las fibras naturales.

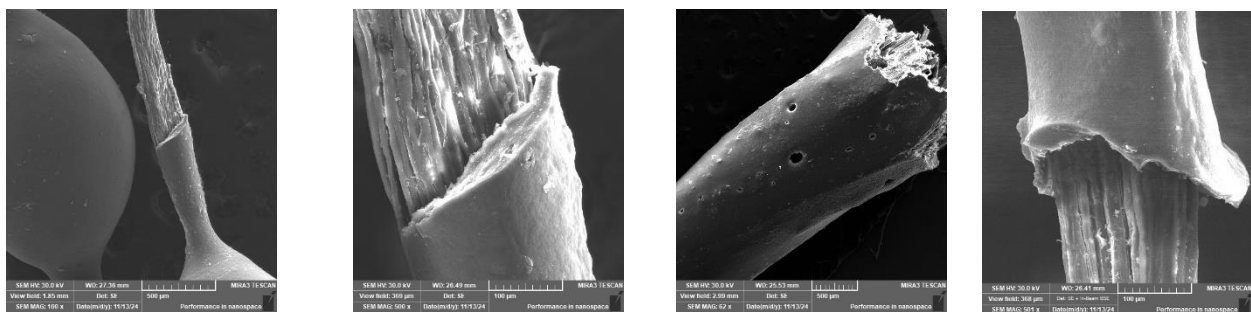
1. Figue Natural

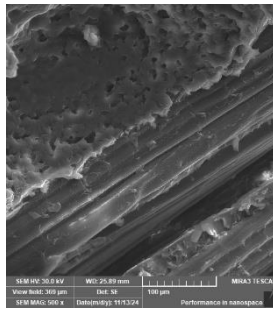
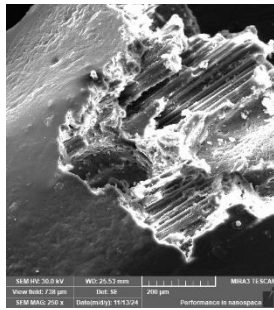
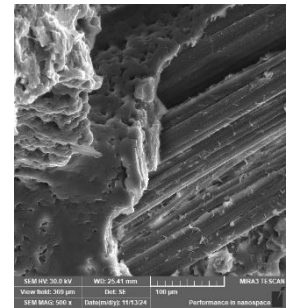
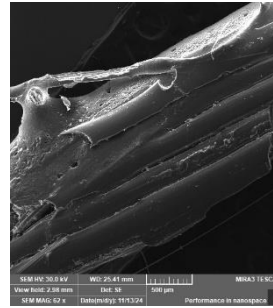
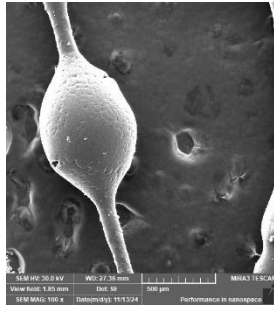


2. Figue Natural + NaOH

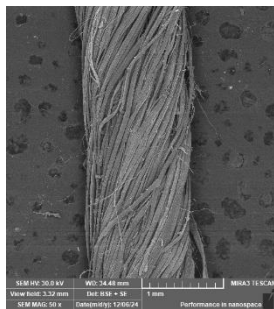
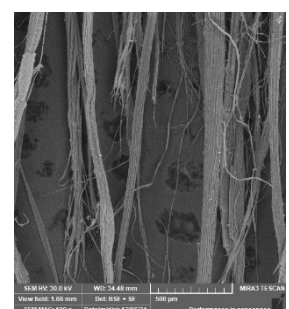
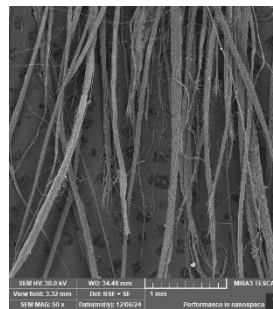
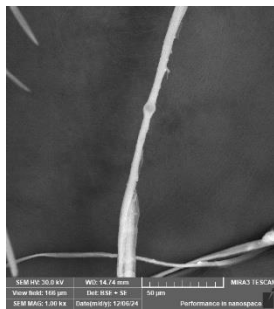


3. Figue Natural + NaOH + OG





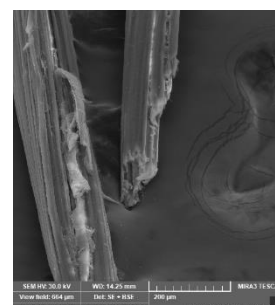
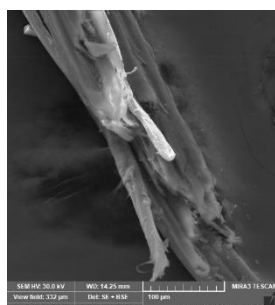
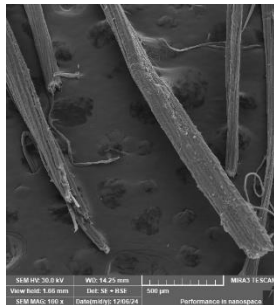
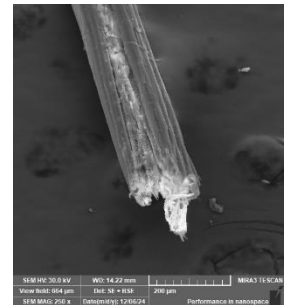
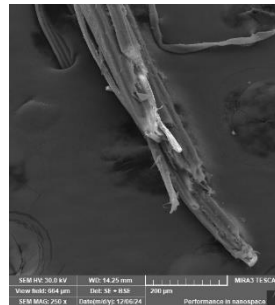
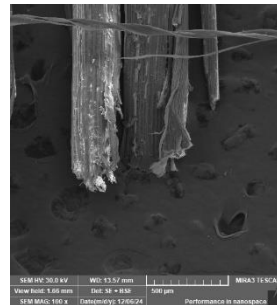
#### 4. Piña



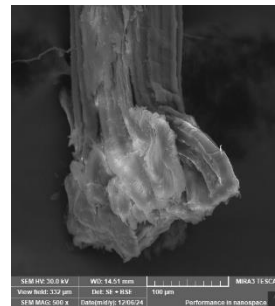
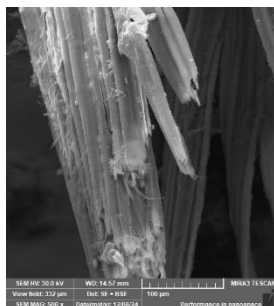
*Micrográficas tomadas en la zona de falla.*

1. Fique Natural.

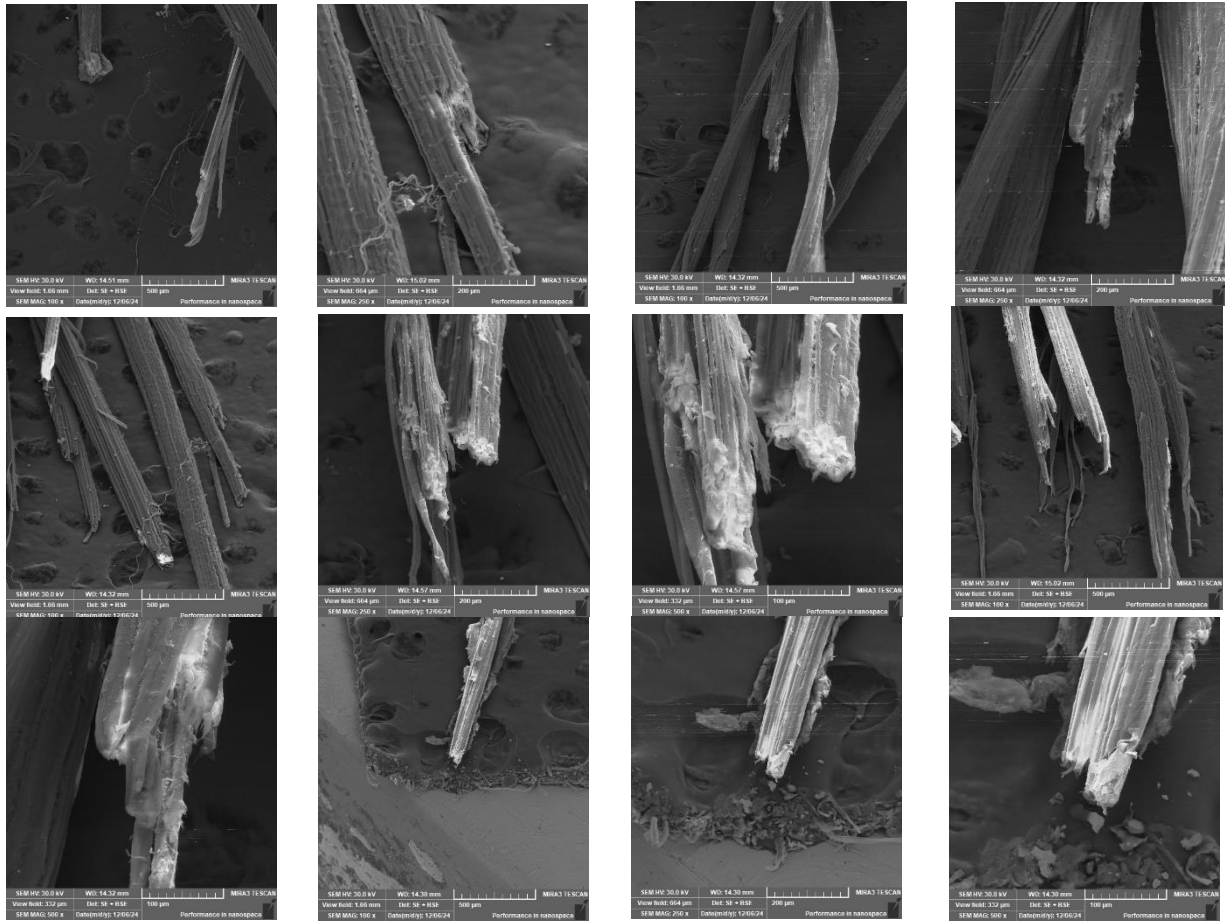
a. Velocidad baja.



b. Velocidad media.

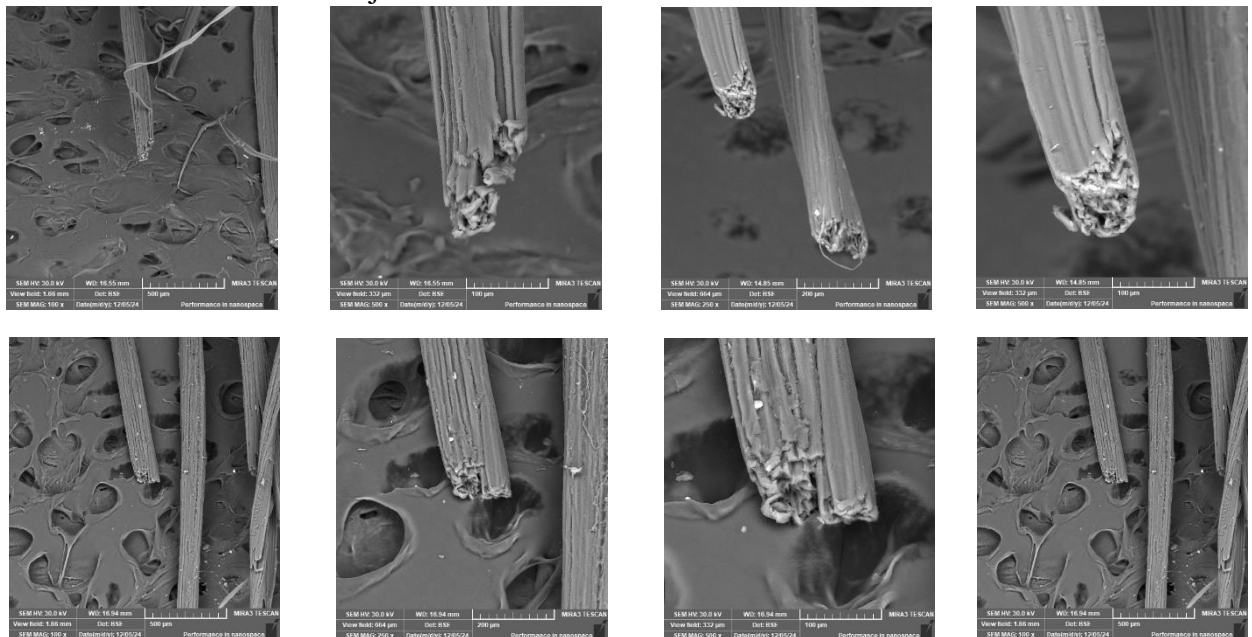


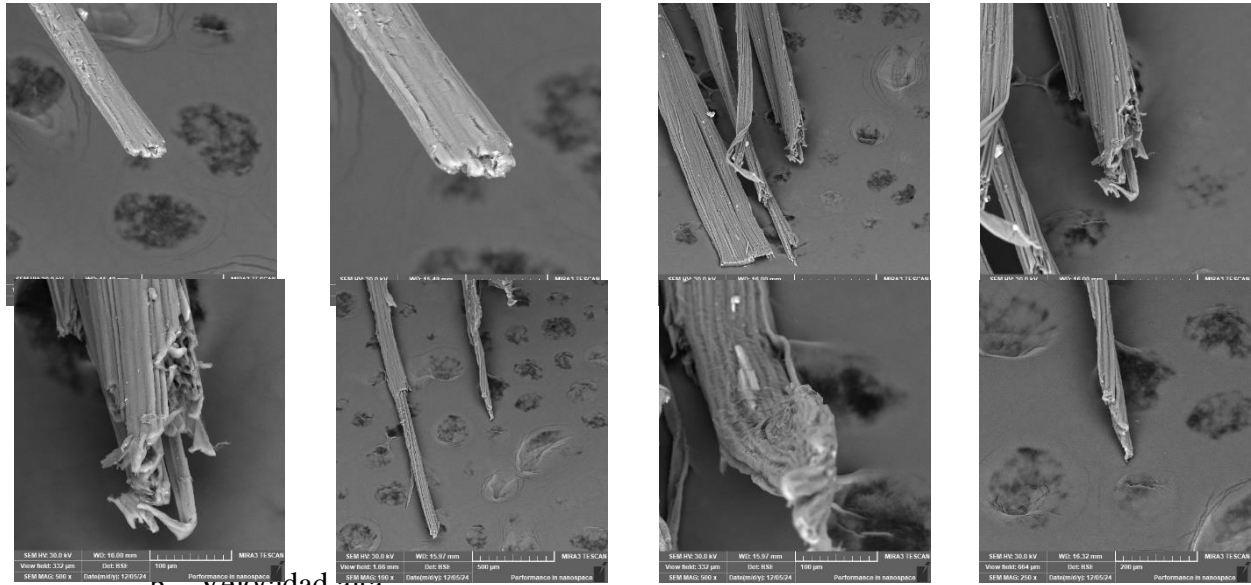
c. Velocidad alta.



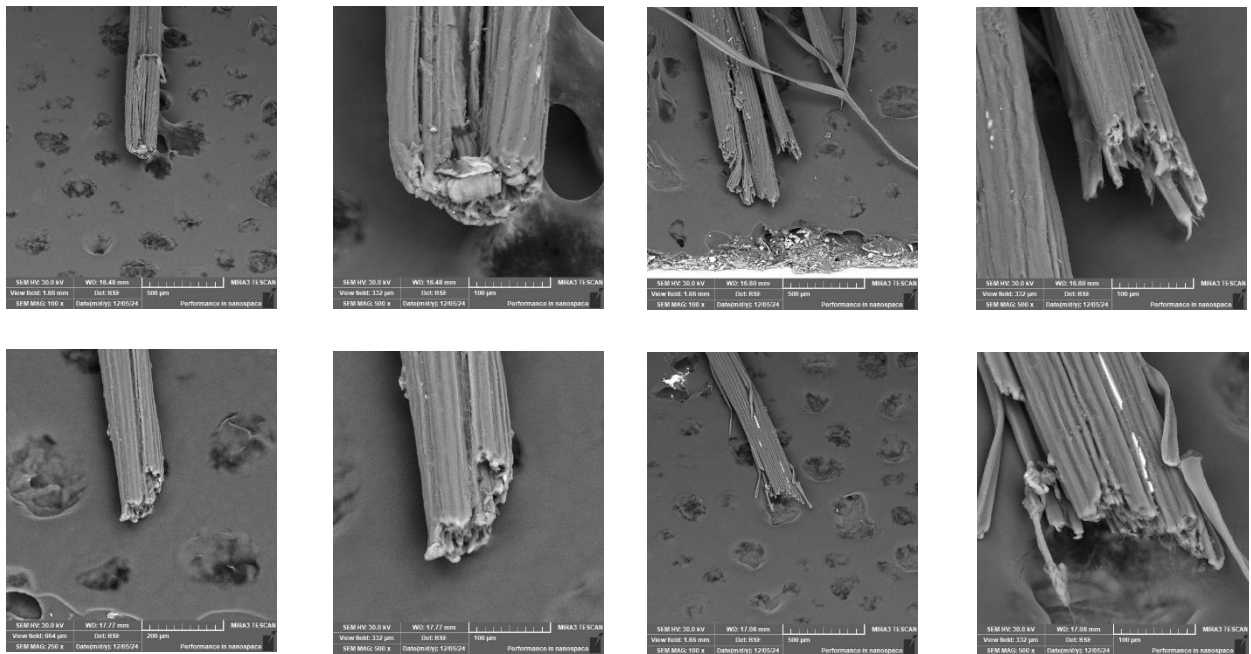
2. Figue natural + NaOH

a. Velocidad baja.



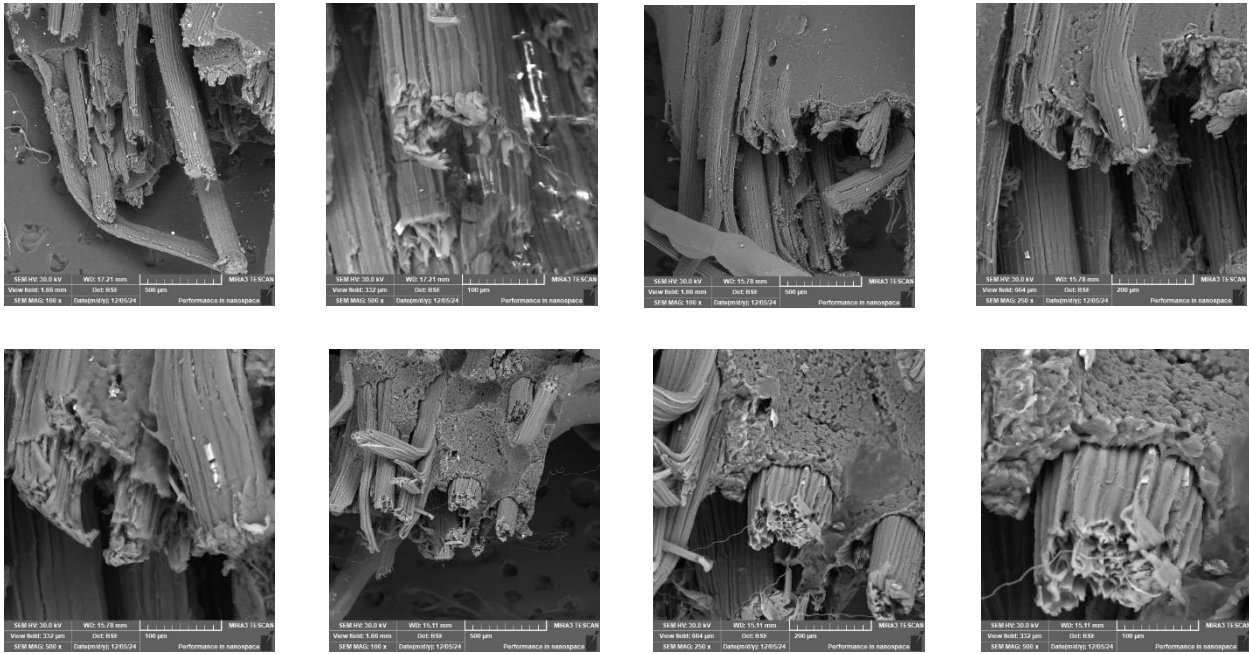


b. velocidad alta

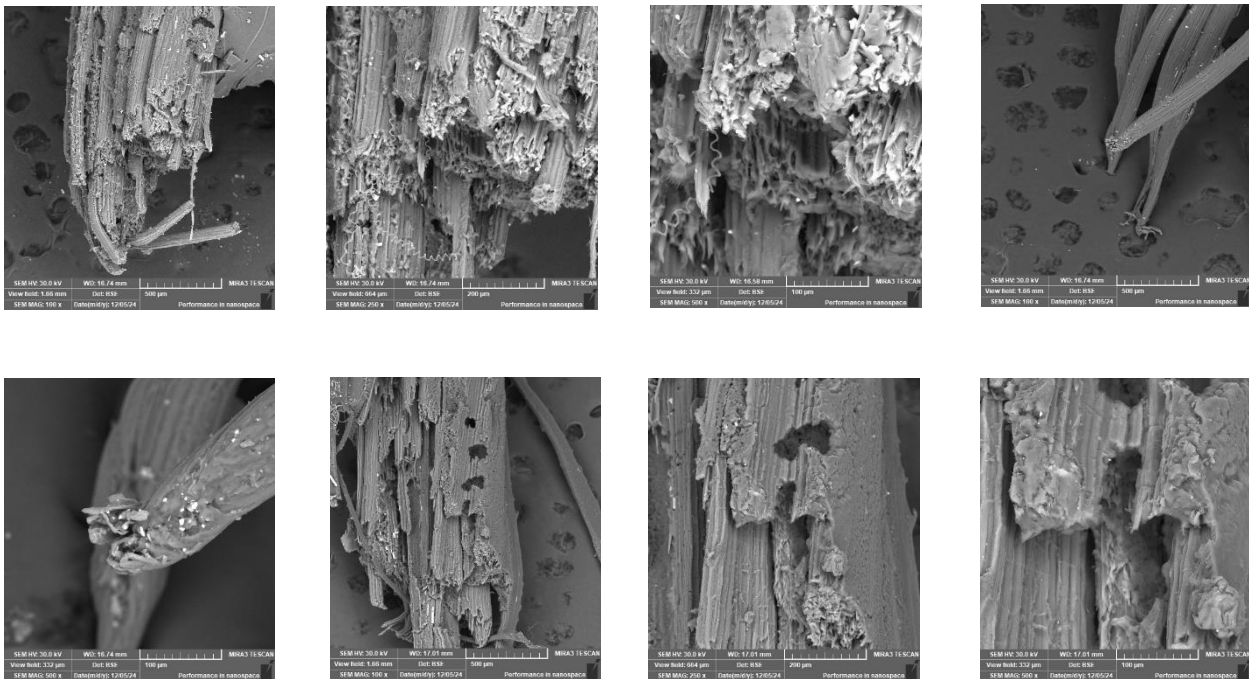


3. Figue natural + NaOH + OG

a. Velocidad baja



b. Velocidad media



*c. Velocidad alta*

