

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

María Elvira Rico Meza

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ph.D. en Ingeniería Civil

Codirector

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Germán Adolfo Díaz Ramírez

Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*Dedico este trabajo a todas las personas que han contribuido a mi crecimiento personal y académico.*

*A mis padres, Wilson Rico y Leticia Meza, por ser un pilar fundamental en mi vida. Su esfuerzo, amor, confianza y enseñanzas me han permitido afrontar cada desafío con determinación.*

*A mi tía Gloria Meza, por su cariño incondicional, apoyo y compañía constante.*

*A mis abuelos Luis Alberto, María del Socorro, Ulpiano y Elvira, cuyo amor y legado siguen guiándome en cada paso.*

*A mis compañeras incondicionales, Miny, Maya y Nena, por su compañía, por ser mi refugio y mi lugar seguro.*

*A mi familia, amigos y personas especiales que me dejó esta etapa, por su apoyo y enseñanzas.*

*Finalmente, me dedico este trabajo a mí misma, María Elvira Rico Meza, por mi esfuerzo, perseverancia y por descubrir que la felicidad está en cada paso del camino.*

### **Agradecimientos**

*Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por darme el espacio y las herramientas para formarme profesionalmente, a mis profesores y compañeros por inspirarme y hacerme amar mi carrera. A los directores y codirectores de este proyecto, gracias por su apoyo, orientación, por exigirme e impulsarme a dar lo mejor de mí.*

*A mi familia, por su apoyo y cariño, a las personas importantes que hicieron este camino más significativo y alegre. Finalmente, me agradezco por el esfuerzo y la perseverancia en cada etapa de este proceso, y agradezco a Dios por iluminarme y guiarme siempre.*

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General .....	17
1.2 Objetivos Específicos .....	17
2. Marco Teórico .....	18
2.1 Fibras Naturales.....	18
2.2 Fique.....	18
2.3 Tasas de Deformación.....	20
2.4 Espectroscopia Infrarroja FTIR-ATR MIR .....	20
3. Metodología .....	21
3.1 Materia Prima .....	22
3.2 Preparación de las Probetas .....	23
3.3 Elaboración de Platinas.....	23
4. Ejecución de Ensayos a Tracción Hilos de Fique .....	24
5. Resultados Ensayos a Tracción Hilos de Fique .....	26
5.1 Resultados de Tracción a Velocidad Alta (30 mm/min).....	27
5.1.1 Comparación resultados MTS Bionix vs. Deformímetro para la velocidad alta .....	33
5.2 Resultados de tracción a velocidad media (3.0 mm/min).....	36
5.2.1 Comparación MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media.....	43
5.3 Resultados de tracción a velocidad baja (0.2 mm/min).....	45

5.3.1 Comparación MTS Bionix VS Deformímetro Velocidad Baja.....	51
6. Análisis Ensayos a Tracción Hilos de Fique.....	53
7. Espectroscopia Infrarroja (FITR-ATR).....	58
7.1 Tratamientos Aplicados a la Fibra de Fique .....	59
7.2 Parámetros de Trabajo y Ensayo .....	60
7.3 Resultados ensayo FTIR-ATR-MIR .....	61
8. Conclusiones .....	66
9. Recomendaciones.....	68
Referencias .....	69

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Parámetros de ensayo</i> .....	25
Tabla 2. <i>Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	28
Tabla 3. <i>Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	30
Tabla 4. <i>Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	32
Tabla 5. <i>Medidas de tendencia central con medidas de deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	33
Tabla 6. <i>Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	34
Tabla 7. <i>Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	35
Tabla 8. <i>Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	37
Tabla 9. <i>Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	38
Tabla 10. <i>Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	41
Tabla 11. <i>Medidas de tendencia central con medidas de deformímetro velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	41
Tabla 12. <i>Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	43
Tabla 13. <i>Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media (3.0 mm/min)</i> .....	44

Tabla 14. <i>Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .....	46
Tabla 15. <i>Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .....	47
Tabla 16. <i>Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .....	49
Tabla 17. <i>Medidas de tendencia central con medidas por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .....	50
Tabla 18. <i>Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .	51
Tabla 19. <i>Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min)</i> .....	52

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Fique</i> .....	18
Figura 2. <i>Componentes del fique</i> .....	19
Figura 3. <i>Propiedades mecánicas del fique</i> .....	20
Figura 4. <i>Proceso espectroscopia</i> .....	21
Figura 5. <i>Fibra de fique crudo</i> .....	22
Figura 6. <i>(a) Molde completamente ensamblado de especímenes de hilos de fique crudo y (b) corte de probetas con ayuda de cierra cinta sin fin</i> .....	23
Figura 7. <i>(a) Fabricación de platinas usando impresora 3D, (b) Platinas y probeta en MTS Bionix</i> .....	24
Figura 8. <i>Montaje experimental: (a) Ensamble de probeta en MTS Bionix y deformímetro MTS ref. 634.12F, (b) Detalle montaje</i> .....	25
Figura 9. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria última medida por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	27
Figura 10. <i>Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	28
Figura 11. <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria medida por deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	31
Figura 12. <i>Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad alta (30 mm/min)</i> .....	31
Figura 13. <i>Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix</i>	

*velocidad media (3.0 mm/min)* ..... 36

Figura 14. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix*

*velocidad media (3.0 mm/min)*..... 37

Figura 15. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro*

*velocidad media (3.0 mm/min)*..... 40

Figura 16. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro*

*velocidad media (3.0 mm/min)*..... 40

Figura 17. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix*

*velocidad baja (0.2 mm/min)* ..... 45

Figura 18. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix*

*velocidad baja (0.2 mm/min)* ..... 45

Figura 19. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro*

*velocidad baja (0.2 mm/min)* ..... 48

Figura 20. *Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro*

*velocidad baja (0.2 mm/min)*..... 49

Figura 21. *Variación de  $\epsilon_u$ -MTS con la velocidad de deformación a tracción*..... 54

Figura 22. *Variación de  $\epsilon_u$ -DF con la velocidad de deformación a tracción*..... 54

Figura 23. *Variación de  $\sigma$  con la velocidad de deformación a tracción* ..... 55

Figura 24. *Variación de  $E_{0-80\%}$ -MTS con la velocidad de deformación a tracción*..... 56

Figura 25. *Variación de  $E_{0-80\%}$ -DF con la velocidad de deformación a tracción* ..... 56

Figura 26. *Variación de  $E_{20-80\%}$  - MTS con la velocidad de deformación a tracción*..... 57

Figura 27. *Variación de  $E_{20-80\%}$  - DF con la velocidad de deformación a tracción* ..... 57

Figura 28. *Fijación fotográfica del embalaje y rotulación de muestras, Fique (Natural), Fique*

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TRACCIÓN DE HILOS DE FIBRA DE FIQUE	10
<i>NaOH (Hidróxido de sodio), Fique GO (Óxido de grafeno)</i> .....	59
Figura 29. <i>Parámetros de trabajo</i> .....	60
Figura 30. <i>Muestra de FiqueGO en cristal ATR</i> .....	61
Figura 31. <i>Componentes, grupos funcionales y número de onda (cm<sup>-1</sup>) del fique</i> .....	62
Figura 32. <i>Gráfica %Transmitancia vs. número de onda (cm<sup>-1</sup>)</i> .....	62
Figura 33. <i>Gráfica detallada celulosa</i> .....	63
Figura 34. <i>Gráfica detallada hemicelulosa</i> .....	64
Figura 35. <i>Gráfica detallada lignina</i> .....	65

## Glosario

**Propiedades mecánicas:** son las características de un material que describen su comportamiento y capacidad frente a cargas externas.

**Fibras naturales:** son fibras obtenidas por medio de fuentes vegetales, animales o minerales, estas fibras se pueden usar para aplicaciones industriales debido a sus propiedades mecánicas, ya que son materiales renovables y sostenibles.

**Fique:** la fucarea andina (fique) es una fibra de origen natural ampliamente cultivada en Colombia, esta fibra debido a sus propiedades mecánicas se usa para realización de geotextiles, embalajes, refuerzos de elementos no estructurales, entre otros.

**Esfuerzo:** se define como la fuerza por unidad de area de un material al ser sometido a cargas externas. Se puede presentar esfuerzo a tracción, compression y cizalla y se expresa en pascales.

**Deformación unitaria:** es el cambio de longitud de un material respecto a su longitud original como respuesta a la aplicación de carga.

**Modulo de elasticidad:** se expresa como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en la zona lineal-elastica del material y la unidad de medida es en pascales.

**Tracción:** esfuerzo en el cual se aplican fuerzas que actuan en sentido opuesto y tienden a estirar el material.

**Velocidad de deformación:** relaciona el cambio de deforamación de un material respecto al tiempo, puede simular diversas cargas dinámicas ajustando su magnitud.

**Resistencia a tracción:** es el esfuerzo máximo a tracción que puede soportar un material antes de fallar y su unidad de medida son los pascales.

**Mercerización:** es un tratamiento químico aplicado a tejidos planos o hilados como las fibras

naturales, usando una solución como hidróxido de sodio (NaOH) con el fin de mejorar las propiedades del material y proteger sus componentes.

**Oxido de grafeno (OG):** compuesto derivado del grafeno que se obtiene por la oxidación química del grafito y se puede usar como recubrimiento de materiales.

**Espectroscopia infrarroja:** se realiza mediante la absorción de radiación infrarroja en compuestos orgánicos como los hilos de fique con el fin de identificar sus grupos funcionales basándose en la vibración molecular de los enlaces químicos.

**Grupos funcionales:** son patrones de átomos que muestran las propiedades y reactividad de una molécula en específico, en el caso del fique sus componentes principales son celulosa, hemicelulosa y lignina que responden a los grupos funcionales hidroxilos, carbonilos y grupos O-H y C-H.

## Resumen

**Título:** 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\*

**Autora:** María Elvira Rico Meza\*\*

**Palabras clave:** Sostenibilidad, propiedades mecánicas, hilos, fique natural, hidróxido de sodio, óxido de grafeno, espectroscopia infrarroja, grupos funcionales, velocidad de deformación.

### Descripción

En el contexto de la sostenibilidad, la industria de la construcción enfrenta el desafío de desarrollar materiales que combinen propiedades mecánicas óptimas y funcionalidad. Bajo esta perspectiva, la fibra de fique se posiciona como un material orgánico renovable con alto potencial estructural. Este estudio analizó dicho potencial, enfocándose en su comportamiento mecánico y químico mediante ensayos de tracción a diferentes velocidades de deformación y espectroscopia infrarroja FTIR-ATR-MIR, evaluando cómo las fuerzas externas y los tratamientos químicos influyen en sus propiedades. Inicialmente se realizaron los ensayos de tracción en hilos de 50 mm de longitud a tres velocidades de deformación: alta (30 mm/min), media (3 mm/min) y baja (0.2 mm/min), empleando la máquina MTS Bionix y un deformímetro de contacto para registrar la deformación. Los resultados mostraron que, al disminuir la velocidad, el esfuerzo máximo disminuyó (256.6-220.2 MPa), acompañado de una reducción en la deformación unitaria última de 6.3-4.4 %. El módulo de elasticidad se mantuvo relativamente estable con la variación la velocidad, pero no con el método de medición empleado (4.7-5.1 GPa para la MTS Bionix y de 5.89-6.55 GPa para el deformímetro). Las mediciones con el deformímetro mostraron un mejor ajuste de datos y precisión gracias a su contacto directo con los hilos de fique. El análisis químico mediante espectroscopía FTIR-ATR-MIR permitió identificar los grupos funcionales clave de los componentes principales del fique (celulosa, hemicelulosa y lignina) y evaluar el impacto de los tratamientos químicos, se ensayaron tres muestras: fique natural, fique mercerizado con hidróxido de sodio (NaOH) y fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno. El recubrimiento con óxido de grafeno mejoró significativamente las propiedades del fique, protegiendo los grupos funcionales frente a agentes externos y potenciando la presencia de los componentes. En contraste, el tratamiento con NaOH degradó parcialmente la celulosa y la lignina, afectando su visibilidad en el ensayo. El fique natural mostró una baja presencia de estos componentes, lo que subraya la necesidad de un manejo adecuado para preservar sus propiedades en estado natural.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Ph.D. en Ingeniería Civil. Codirector: Germán Adolfo Díaz Ramírez, Ph.D. en Ingeniería de Materiales. José Miguel Benjumea Royero, Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

### Abstract

**Title:** 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\*

**Author(s):** Maria Elvira Rico Meza\*\*

**Keywords:** Sustainability, mechanical properties, fibers, natural fique, sodium hydroxide, graphene oxide, infrared spectroscopy, functional groups, strain rate.\*\*

### Description

In the context of sustainability, the construction industry faces the challenge of developing materials that combine optimal mechanical properties and functionality. In this perspective, fique fiber is positioned as a renewable organic material with high structural potential. This study analyzed this potential, focusing on its mechanical and chemical behavior by means of tensile tests at different strain rates and FTIR-ATR-MIR infrared spectroscopy, evaluating how external forces and chemical treatments influence its properties. Initially, tensile tests were performed on 50 mm long yarns at three strain rates: high (30 mm/min), medium (3 mm/min) and low (0.2 mm/min), using the MTS Bionix machine and a contact deformation meter to record the strain. The results showed that, as the speed decreased, the maximum stress decreased (256.6-220.2 MPa), accompanied by a reduction in the ultimate unit strain of 6.3-4.4 %. The modulus of elasticity remained relatively stable with varying speed, but not with the measurement method employed (4.7-5.1 GPa for the Bionix MTS and 5.89-6.55 GPa for the deformimeter). Measurements with the deformimeter showed a better data fit and accuracy due to its direct contact with the fique yarns. Chemical analysis by FTIR-ATR-MIR spectroscopy identified the key functional groups of the main components of fique (cellulose, hemicellulose and lignin) and evaluated the impact of chemical treatments. Three samples were tested: natural fique, fique mercerized with sodium hydroxide (NaOH) and fique mercerized and coated with graphene oxide. The coating with graphene oxide significantly improved the properties of the fique, protecting the functional groups against external agents and enhancing the presence of the components. In contrast, treatment with NaOH partially degraded cellulose and lignin, affecting their visibility in the test. Natural fique showed a low presence of these components, which underscores the need for proper handling to preserve its properties in its natural state.

---

\* Thesis

\*\* Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Ph.D. in Civil Engineering. Co-director: Germán Adolfo Díaz Ramírez, Ph.D. in Materials Engineering. José Miguel Benjumea Royero, Ph.D. in Civil and Environmental Engineering

## Introducción

Con el objetivo de promover prácticas más sostenibles, la industria de la construcción busca materiales ecológicos e innovadores que proporcionen propiedades mecánicas óptimas. Entre estos, las fibras naturales, como el fique, han ganado relevancia debido a ser un material renovable, de fácil obtención y con un proceso de fabricación poco agresivo con el medio ambiente. La fibra de fique, compuesta principalmente por celulosa (57%), hemicelulosa (29 %) y lignina (13 %) (Ortiz & Picón, 2021), destaca por su resistencia a factores atmosféricos, estabilidad y versatilidad en aplicaciones como geotextiles, paneles de construcción, embalajes y, más recientemente, refuerzos de concreto en elementos no estructurales, mobiliario y otras piezas correspondientes a construcción que estén sometidas a cargas livianas (Gómez & Cordoba, 2022), (Kerni, Singh, & Patnaik, 2020), (Herrera, 2020).

Este estudio, desarrollado en el marco del proyecto VIE- UIS 3954, tiene como objetivo principal caracterizar la respuesta mecánica a tracción de hilos de fique de 50 mm de longitud bajo distintas tasas de deformación. Para ello, se prepararon especímenes de hilos de fique crudo destinados a ensayos de tracción estandarizados dentro de la norma ASTM C1557-20 (Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2020), aplicando tres tasas de deformación: alta (30 mm/min), media (3 mm/min) y baja (0.2 mm/min). Se emplearon dos sistemas de registro de datos: la máquina universal de ensayos MTS Bionix, responsable de aplicar la fuerza axial, y el deformímetro MTS 634.12F-26, para medir de manera precisa las deformaciones locales. Los datos obtenidos permitieron calcular propiedades mecánicas clave como el esfuerzo máximo, la deformación unitaria última y el módulo de elasticidad, proporcionando una comprensión integral del comportamiento mecánico del fique natural.

Adicionalmente, se realizó un análisis químico mediante espectroscopia FTIR-ATR-MIR para identificar los cambios en los grupos funcionales de los principales componentes del fique (celulosa, hemicelulosa y lignina) como resultado de los tratamientos químicos, incluyendo mercerización con hidróxido de sodio (NaOH) y fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno. Este análisis permitió evaluar las interacciones químicas y los cambios estructurales asociados, destacando cómo el recubrimiento con óxido de grafeno mejoró la presencia de los compuestos, mientras que la mercerización con NaOH degradó parcialmente componentes clave como la hemicelulosa y la lignina.

El artículo está organizado en las siguientes secciones: la sección 2 describe la metodología empleada; la sección 3 detalla los parámetros de trabajo, ejecución de ensayos y tratamiento de datos, las secciones 4 y 5 presentan los resultados y análisis de los ensayos a tracción; y la sección 6 expone los resultados del análisis químico mediante FTIR-ATR-MIR. Finalmente, la sección 7 ofrece las conclusiones del trabajo realizado.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Desarrollar actividades experimentales en el marco del proyecto VIE-UIS 3954 con el fin de caracterizar la respuesta mecánica a tracción de los hilos de fique con longitud de prueba  $L=50$  mm bajo distintas tasas de deformación.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Preparar especímenes de hilos de fique crudo destinados a los ensayos de tracción estandarizados.

Ejecutar ensayos a tracción de las muestras seleccionadas aplicando diferentes tasas de deformación.

Identificar los cambios en los grupos funcionales de los componentes principales de las fibras de fique como resultado de la mercerización.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Fibras Naturales

Las fibras naturales provienen de diferentes tipos de plantas como hojas, semillas o pasto, de la corteza de la planta se extraen como fibras de fique o yute, lino y algodón, también se pueden extraer de la planta como es el caso de las hojas de plátano y la piña, los componentes fundamentales de las fibras naturales son la celulosa, hemicelulosa y lignina, el componente principal es la celulosa y la cantidad varía dependiendo de la planta, otra características de las fibras naturales es que son hidrófilas (Venkateshwar Reddy, et al. 2021).

#### Figura 1.

*Fique*



*Nota:* Ortiz, (2021).

### 2.2 Fique

*Furcraea macrophylla*, yute, cabuya o fique, son los nombres que lleva esta planta tropical que se puede cultivar en departamentos como Cauca, Nariño, Santander, Antioquia y la Guajira ya que se prefiere suelos secos y crece bien en climas cafeteros, su largo es de 1.5 a 2 [m] y su ancho de 8 a 14 [cm] y dependiendo la calidad del suelo el contenido de fibra varía entre 4,5 y 8% (Minagricultura 2022).

El fique está compuesto principalmente por fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz

de lignina, el porcentaje de la celulosa varía entre un 54-74%, el segundo componente en mayor cantidad es la hemicelulosa que es un conjunto de polisacáridos presente en las capas de la pared celular de las plantas, esta se encarga de formar una matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa, a continuación se muestra una tabla con los componentes de la fibra de fique y el porcentaje en su composición.

**Figura 2.**

*Componentes del fique*

Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Impurezas (%)	Cenizas (%)	Referencias
73,80	10,50	11,30	1,90	0,70	CADEFIQUE <sup>21</sup>
68,36	16,70	7,23	--	0,74	MUÑOZ <sup>22</sup>
63,00	17,50	14,50	5,00	--	LUNA <sup>23</sup>
70,00	--	10,09	--	0,58	TORO <sup>24</sup>
61,20	--	14,00	--	--	HERNÁNDEZ <sup>25</sup>
73,80	10,50	11,30	4,40	--	SANKAR <sup>26</sup>
62,70	17,65	12,00	--	2,60	BOHÓRQUEZ <sup>27</sup>
57,0 ± 3,0	29,0 ± 5,0	13,0 ± 2,0	--	--	GÓMEZ <sup>28</sup>
53,00	26,00	21,00	--	--	HERRERA <sup>29</sup>

*Nota:* (Ortiz & Picón, 2021).

La eficacia de las fibras de fique está directamente relacionada con la celulosa y su cristalinidad, las fibrillas de celulosa están alineadas lo cual genera rigidez y una excelente resistencia a tracción y flexión, es decir, a mayor contenido de celulosa, mayor resistencia. La resistencia también depende de la orientación de las fibras, si las fibras están orientadas en forma de espiral son más dúctiles, pero si están en paralelo respecto al eje serán más rígidas.

En cuanto a las propiedades mecánicas de la fibra de fique, esta tiene un módulo de elasticidad bastante bajo respecto al acero, pero la resistencia máxima oscila entre 43-780 MPa, a

continuación, se pueden ver una tabla donde se registra el módulo de elasticidad, deformación unitaria última y resistencia máxima según diversos autores (Ortiz Forero. et al, 2021).

**Figura 3.**

*Propiedades mecánicas del fique*

Módulo de elasticidad (GPa)	Deformación unitaria última (%)	Resistencia máxima (MPa)	Referencia
9,4 – 22,0	--	511 – 635	SUÁREZ <sup>50</sup>
8,2 – 9,1	9,8	43 – 571	MUÑOZ <sup>51</sup>
9,2	--	324	TORO <sup>52</sup>
--	7,7 ± 2,9	197 ± 65	SANKAR <sup>53</sup>
5,5 – 25,5	5,7	200 – 625	BOHÓRQUEZ <sup>54</sup>
5,7 ± 1,8	--	197 ± 65	GÓMEZ <sup>55</sup>
24,06 ± 6,64	--	424,27 ± 138,40	HERRERA <sup>56</sup>
5,44 ± 0,45	--	336,12 ± 27,90	MUÑOZ <sup>57</sup>
25,5	5,7	625	BARROS <sup>58</sup>
22,06	--	780	GONZÁLEZ <sup>59</sup>
8,01 ± 1,47	--	237 ± 51	OLIVEIRA <sup>60</sup>
8,2 – 9,1	9,8	132,4	HIDALGO <sup>61</sup>

### 2.3 Tasas de Deformación

La tasa de deformación es la cantidad de deformación de un material en una cantidad de tiempo, la tasa de deformación varía dependiendo del estado en el que se encuentre el material, tasas de deformación bajas como  $0.1\ s^{-1}$  que se aplican para el estado de fluencia de los materiales, las tasas de deformación altas  $>0.1\ s^{-1}$  se aplica a materiales con alta resistencia de impacto (Khieng, 2021).

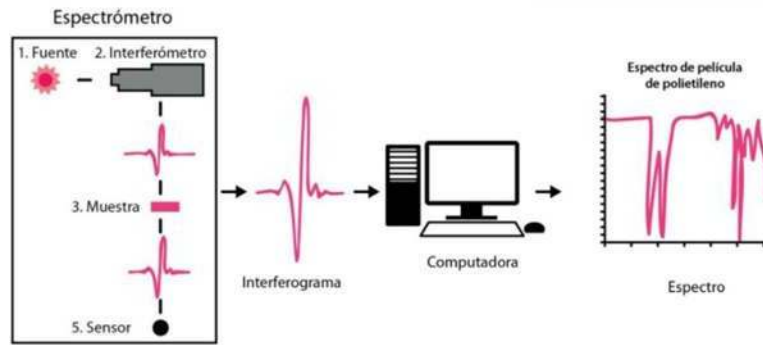
### 2.4 Espectroscopia Infrarroja FTIR-ATR MIR

La espectroscopia infrarroja es una técnica de espectroscopia molecular que permite obtener información estructural de la materia prima de estudio. En esta técnica se usa un haz de luz infrarroja que incide sobre la muestra y provoca frecuencias, en este estudio algunos factores que inciden son la geometría molecular, las masas atómicas y el acoplamiento vibracional. La cantidad de luz absorbida es registrada en un rango de longitud de onda de interés que en la mayoría

de casos es de  $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ . A continuación, se puede ver el proceso realizado en el ensayo de espectroscopia infrarroja.

**Figura 4.**

*Proceso espectroscopia*



*Nota:* (Velandia, 2017).

El ensayo de espectroscopia infrarroja tiene como resultado un interferograma, el cual es una representación de intensidad en función del tiempo que haciendo uno de la transformada de Fourier se convierte en un diagrama que representa la intensidad en función de la frecuencia. Esta técnica tiene gran aplicación ya que permite realizar ensayos sin importar el estado de la muestra ya sea líquido, sólidos o gaseoso.

A este ensayo se le pueden añadir accesorios con el fin de un resultado más específico, uno de los más usados es el ATR que significa reflexión total atenuada, en este caso un haz de luz infrarroja es reflejada internamente por medio de espejos e incide en un cristal, el cristal está en contacto con la muestra, este accesorio permite lectura de muestras con mínima o sin preparación de la muestra, este accesorio es ideal para muestras sólidas y líquidas (Velandia, 2017).

**3. Metodología**

### 3.1 Materia Prima

Como materia prima se utilizó hilo de fique crudo con una densidad lineal de 1050 m/kg, suministrado por la empresa Cohilados del Fonce. Se seleccionaron 60 hilos de fique, libres de anomalías, para garantizar ensayos precisos.

#### Figura 5.

*Fibra de fique crudo*



### 3.2 Preparación de las Probetas

#### Figura 6.

(a) Molde completamente ensamblado de especímenes de hilos de fique crudo y (b) corte de probetas con ayuda de sierra cinta sin fin.



(a)



(b)

Se emplearon moldes de silicona de 20 cm × 6.4 cm × 1.2 cm, con ranuras distribuidas cada 1 cm para fijar los hilos de fique uniformemente. En los moldes se colocó una capa de fibra de vidrio, seguida de los hilos de fique y alternando capas de fibra de vidrio y resina epóxica (1:1, 30 ml de catalizador y resina). El aire atrapado se eliminó aplicando presión (Figura 2a). Las probetas se secaron por 24 horas antes de ser desmoldadas y cortadas individualmente (Figura 2b).

### 3.3 Elaboración de Platinas

Para este proyecto, se fabricaron platinas las cuales permiten la conexión precisa del deformímetro durante los ensayos de tracción. Estas se diseñaron en el software SolidWorks y se obtuvieron mediante impresión 3D (Figura 3a). Las platinas, se instalaron en pares a lo largo de cada probeta (Figura 3b).

**Figura 7.**

*(a) Fabricación de platinas usando impresora 3D, (b) Platinas y probeta en MTS Bionix.*



(a)



(b)

#### **4. Ejecución de Ensayos a Tracción Hilos de Fique**

Los ensayos de tracción se realizaron conforme a la norma ASTM C1557-20 (Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2020) en el Laboratorio de Ensayos Mecánicos en la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander. Utilizando la máquina MTS Bionix y el deformímetro MTS 634.12F- 26.

Las pruebas incluyeron la preparación, montaje, ensayos preliminares y definitivos de probetas individuales de hilos de fique crudo (Figura 4a).

Las probetas se aseguraron en la máquina por medio de la mordaza, aplicando una pretensión de 3 N. Las platinas del deformímetro se instalaron con una separación de 2.5 cm (Figura 4b). Cada probeta se sometió a tracción hasta el fallo a tres velocidades de desplazamiento (30, 3.0, 0.2 mm/min), registrando datos con frecuencias determinadas (Tabla 1). Se realizaron 20 ensayos por velocidad.

**Figura 8.**

*Montaje experimental: (a) Ensamble de probeta en MTS Bionix y deformímetro MTS ref. 634.12F, (b) Detalle montaje*



(a)



(b)

El efecto de la velocidad de deformación en los hilos de fique se ensayó a tres velocidades: alta, intermedia y baja, con el fin de evaluar la respuesta del material frente a distintos escenarios a los que puede ser sometido, teniendo en cuenta la gran cantidad de usos que se le pueden dar. Estas condiciones simulan escenarios dinámicos desde pequeños impactos hasta fuerzas sísmicas, permitiendo analizar el comportamiento mecánico de los hilos y su aplicabilidad en distintas áreas. Los parámetros de ensayo se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Parámetros de ensayo*

<b>Número de probetas</b>	20	20	20
<b>Tasa de deformación (<math>s^{-1}</math>)</b>	0.000067	0.001	0.01
<b>Velocidad de deformación (mm/min)</b>	0.2	3.0	30
<b>Frecuencia de muestreo de datos (datos/min)</b>	1.2503	18.789	186.18

## 5. Resultados Ensayos a Tracción Hilos de Fique

Los ensayos aportaron datos de fuerza axial aplicada (N), tiempo de ensayo (s) y desplazamiento relativo (mm), registrados por la máquina MTS Bionix y el deformímetro MTS 634.12F-26.

Con estos datos, se calcularon las propiedades mecánicas de los hilos de fique crudo. La deformación unitaria última (Ecuación 1) se determinó como el cociente entre el desplazamiento y la longitud original de la probeta (50 mm para la MTS Bionix y 25 mm para el deformímetro, según la separación entre platinas). El esfuerzo (Ecuación 2) se estimó dividiendo la fuerza axial entre el área transversal de la fibra, establecida en 0.81 mm<sup>2</sup> (Diaz, 2022).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\sigma = \frac{P}{\Delta} \quad \text{Ecuación 2}$$

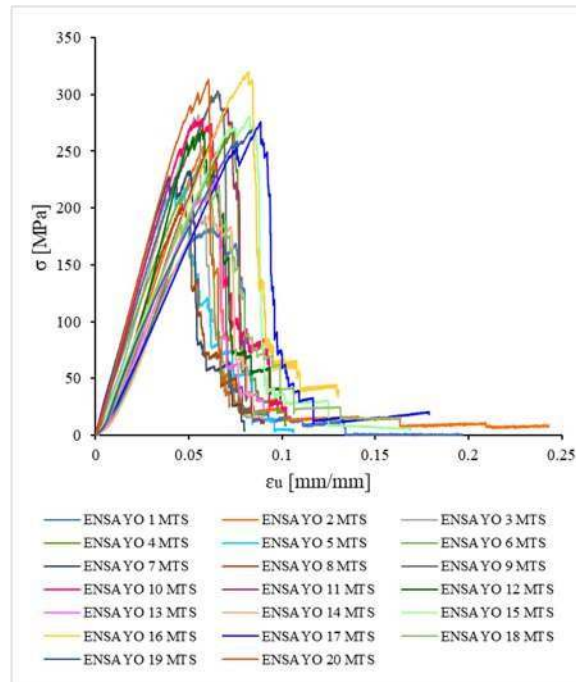
El módulo de elasticidad se calculó a partir de gráficas esfuerzo-deformación unitaria última, considerando dos rangos: 0-80% y 20-80% del esfuerzo máximo. La pendiente obtenida mediante regresión lineal definió el módulo de elasticidad, cuya precisión se evaluó por medio del coeficiente de correlación (R<sup>2</sup>).

Este análisis se realizó para cada probeta, presentando los resultados en tablas y gráficas según la velocidad de deformación aplicada, lo que permitió caracterizar el comportamiento mecánico de los hilos de fique crudo bajo diversas condiciones de carga.

### 5.1 Resultados de Tracción a Velocidad Alta (30 mm/min)

**Figura 9.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria última medida por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min).*

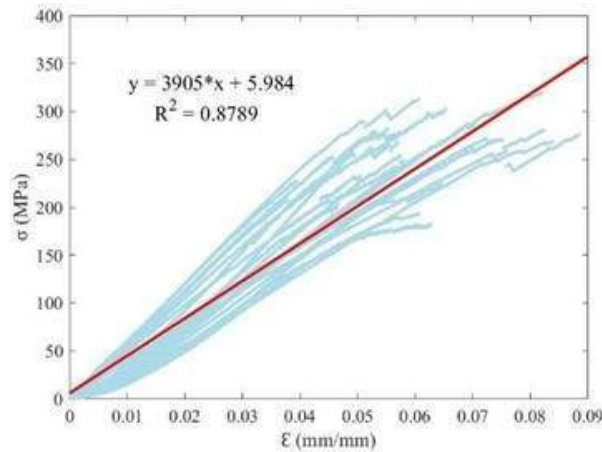


La Figura 5 presenta la curva esfuerzo-deformación de los 20 ensayos ejecutados a velocidad alta, con esfuerzos máximos entre 183 y 320 MPa (Tabla 3), que se consideran aptos dentro del rango reportado en literatura consultada (43-571 MPa) (Gómez & Cordoba, 2022). La Figura 6 muestra un módulo de elasticidad de 3.91 GPa, calculado mediante regresión lineal en el software MATLAB, con un coeficiente de correlación de 0.8789, que refleja un buen ajuste de datos.

El comportamiento observado sugiere una respuesta mecánica confiable del fique a 30 mm/min. Sin embargo, la dispersión de los esfuerzos máximos indica la necesidad de mejorar la uniformidad del material para aplicaciones más exigentes.

**Figura 10.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min).*



A continuación, se presenta una tabla resumen (Tabla 2) con los datos obtenidos en los 20 ensayos, que incluye el esfuerzo máximo ( $\sigma_{max}$ ), deformación unitaria última ( $\epsilon_u$ ) y el módulo de elasticidad (E) para los dos intervalos usados (0-80% y 20-80% del esfuerzo máximo).

El intervalo 0-80% refleja la conducta general del material, mientras que el rango 20-80% muestra la región lineal y más estable de la curva, importante para determinar el módulo de elasticidad. Este análisis caracteriza con precisión el comportamiento del fique bajo diferentes condiciones de carga.

**Tabla 2.**

*Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min).*

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	E 0-80% (GPa)	E 20-80% (GPa)
1	183.0	6.3	3.70	4.12
2	256.1	6.1	4.77	5.10

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
3	281.9	5.5	5.50	5.92
4	270.8	7.4	4.19	4.62
5	218.8	4.2	5.84	5.97
6	242.7	5.7	4.70	4.62
7	232.8	5.1	5.94	5.96
8	203.6	4.7	4.71	5.16
9	303.1	6.5	5.23	5.14
10	278.7	5.7	5.69	5.73
11	288.3	7.0	4.43	4.76
12	268.3	5.7	5.32	6.22
13	224.9	6.5	4.13	4.34
14	193.4	6.1	3.73	4.30
15	280.7	8.2	3.96	3.83
16	319.9	8.2	4.37	4.53
17	276.0	8.9	3.60	3.72
18	227.5	6.0	4.35	4.54
19	268.8	6.0	3.71	3.53
20	313.2	6.1	6.16	6.10

Con los datos de las propiedades mecánicas, se realizó un análisis estadístico que consta de: Los valores extremos, el promedio ( $\bar{x}$ ), la desviación estándar (s) y el coeficiente de variación (CV). Los valores extremos definen los límites de módulo de elasticidad, esfuerzo máximo y deformación, mientras que el promedio y el CV evalúan el comportamiento y la variabilidad del material (Tabla 3).

**Tabla 3.**

*Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad alta (30 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	256.6	6.3	4.70	4.91
<b>MAX</b>	319.9	8.9	6.16	6.22
<b>MIN</b>	183.0	4.2	3.60	3.53
<b>s</b>	39.2	1.2	0.82	0.84
<b>CV</b>	15.3	18.7	17.5	17.2

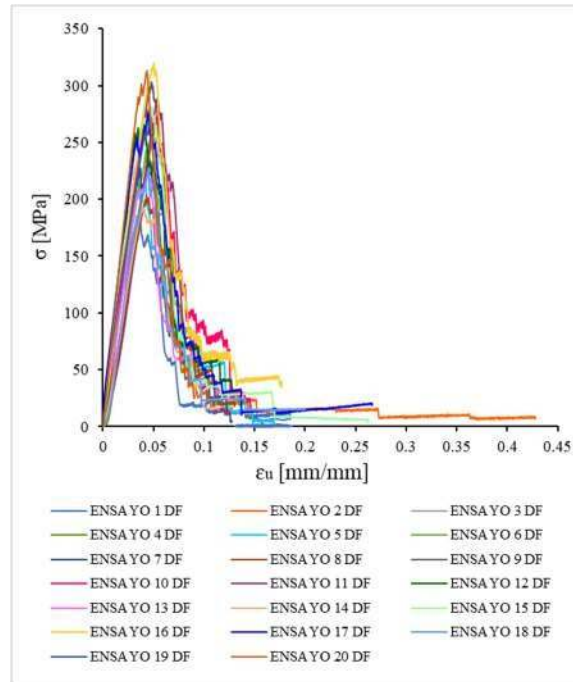
Según la Tabla 3, el esfuerzo máximo promedio registrado fue de 256.6 MPa, con una desviación estándar de 39.2 MPa. El coeficiente de variación (CV) de 15.3% se encuentra cerca del rango aceptable consultado en literatura científica (10-15%) (Bowman, 2001), indicando una buena consistencia en los datos pese a cierta variabilidad atribuida a la fabricación de las probetas y el montaje del ensayo.

La deformación unitaria última promedio fue de 6.3%, con una desviación estándar de 1.2 y un CV de 18.7%, lo que refleja una variabilidad aceptable teniendo en cuenta la cantidad de datos. El módulo de elasticidad promedio, mostrado en la Tabla 3, fue de 4.70 GPa (0-80%) y de 4.91 GPa (20-80%), con desviaciones estándar de 0.82 y 0.84, respectivamente. Ambos intervalos presentan un CV del 17%, lo que indica baja dispersión y estabilidad en los resultados.

Como se detalla en la sección 3, los datos fueron registrados tanto con la máquina MTS Bionix como con el deformímetro de contacto; este último empleando una longitud inicial de 25 mm, longitud correspondiente a la separación entre platinas.

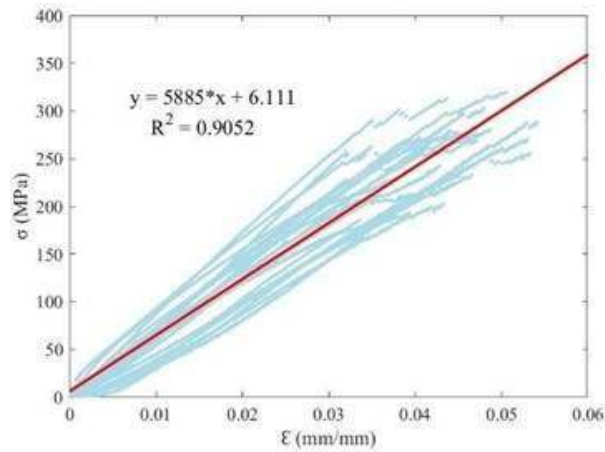
**Figura 11.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria medida por deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*



**Figura 12.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*



**Tabla 4.**

*Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*

Ensayo	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
1	183.0	3.5	5.73	5.52
2	256.1	5.3	5.36	5.57
3	281.9	4.7	6.75	6.87
4	270.8	5.3	5.99	6.23
5	218.8	3.4	7.42	7.38
6	242.7	4.3	6.17	5.99
7	232.8	4.7	7.33	7.74
8	203.6	4.3	5.11	5.52
9	303.1	4.8	7.12	7.14
10	278.7	4.8	7.12	7.19
11	288.3	5.4	5.64	6.40
12	268.3	4.0	8.42	8.84
13	224.9	4.5	5.97	5.97
14	193.4	3.9	5.34	5.88
15	280.7	4.9	6.76	6.25
16	319.9	5.1	7.07	6.86
17	276.0	4.5	7.28	4.88
18	227.5	4.5	6.23	6.49
19	268.8	4.7	6.34	5.87
20	313.2	4.4	8.59	8.39

**Tabla 5.**

*Medidas de tendencia central con medidas de deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	256.6	4.6	6.59	6.55
<b>MAX</b>	319.9	5.4	8.59	8.84
<b>MIN</b>	183.0	3.4	5.11	4.88
<b>s</b>	39.2	0.5	0.97	1.01
<b>CV</b>	15.3	11.9	14.7	15.4

En base a la Tabla 5, la deformación unitaria última promedio medida con el deformímetro fue de 4.6%, un 23% menor que con la MTS Bionix, que se puede atribuir al contacto directo con los hilos lo que mejora la precisión de las medidas registradas.

El módulo de elasticidad promedio con el deformímetro fue de 6.59 GPa (0-80%) y 6.55 GPa (20-80%),

superiores a los valores de la MTS Bionix (Tabla 4). Las desviaciones estándar fueron bajas (0.5 para deformación unitaria última y aproximadamente 1 para el módulo de elasticidad), con un coeficiente de variación cercano al 15%, indicando alta consistencia. Las Figuras 7 y 8 muestran efectivamente menos dispersión, reflejando cómo las condiciones de medición afectan el registro del comportamiento mecánico del fique.

### **5.1.1 Comparación resultados MTS Bionix vs. Deformímetro para la velocidad alta**

La implementación de dos sistemas de registro de datos (MTS Bionix y deformímetro) permitió comparar resultados e identificar diferencias bajo las mismas condiciones de ensayo.

Se analizaron los 20 ensayos evaluando el módulo de elasticidad en los rangos de 0-80% y

20-80% del esfuerzo máximo, así como la deformación unitaria última, utilizando el deformímetro como valor de referencia. También se calcularon medidas de tendencia central para verificar el ajuste y la consistencia de los datos.

**Tabla 6.**

*Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*

Ensayo	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
1	35.5	25.4	77.1
2	11.0	8.4	15.1
3	18.5	13.8	17.3
4	30.0	25.9	39.2
5	21.3	19.1	22.3
6	23.9	22.9	32.1
7	19.0	23.0	8.5
8	8.0	6.5	7.9
9	26.5	28.1	36.3
10	20.1	20.3	19.0
11	21.5	25.6	30.0
12	36.8	29.6	41.0
13	30.8	27.3	45.1
14	30.2	26.9	54.1
15	41.4	38.8	69.0
16	38.2	34.0	62.2
17	50.6	23.7	96.9

Ensayo	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
18	30.2	30.0	33.0
19	41.4	39.9	28.3
20	28.3	27.4	38.7

**Tabla 7.**

*Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad alta (30 mm/min).*

	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
$\bar{x}$	28.2	24.8	38.7
MAX	50.6	39.9	96.9
MIN	8.0	6.5	7.9
s	10.7	8.5	23.4
CV	37.9	34.2	60.6

La Tabla 7 muestra que la diferencia promedio en el módulo de elasticidad entre los rangos 0-80% y 20-80% es similar, con valores de 28.2 y 24.8, respectivamente. Aunque la desviación estándar es aceptable (10.7), el coeficiente de variación (37.9) refleja una alta variabilidad, influenciada por los valores extremos.

Teniendo en cuenta la Tabla 7, la deformación unitaria última promedio es del 38.7%, con extremos de 7.9% y 96.9%. Esto genera una desviación estándar elevada (23.4) y un coeficiente

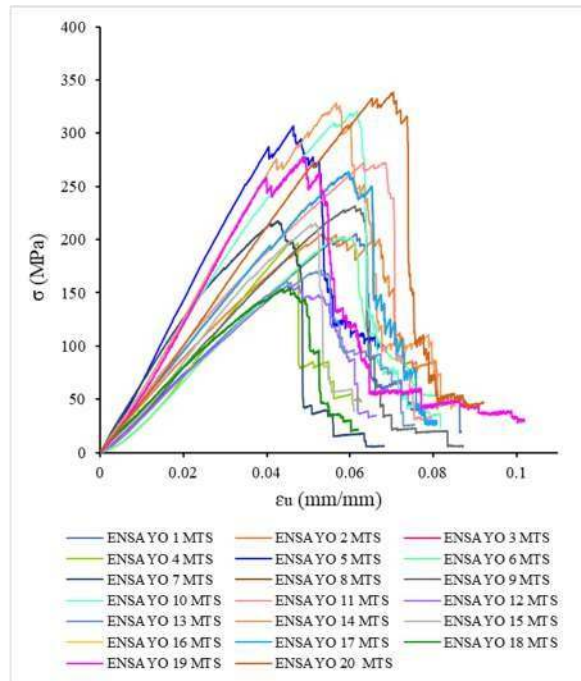
de variación del 60.6%, evidenciando alta dispersión en los datos. Esta variabilidad podría deberse a la menor longitud inicial del deformímetro (25 mm) y su mayor sensibilidad al captar desplazamientos localizados mediante las platinas.

**5.2 Resultados de tracción a velocidad media (3.0 mm/min)**

A una velocidad de 3.0 mm/min, se ensayaron 20 probetas con una frecuencia de 18.789 datos por segundo. La MTS Bionix mostró mayor dispersión en la zona lineal-elástica (Figura 9) en comparación a alta velocidad (Figura 5), atribuida al mayor tiempo de ensayo, que permitió el reacomodo de los hilos y aumentó la variabilidad en los resultados.

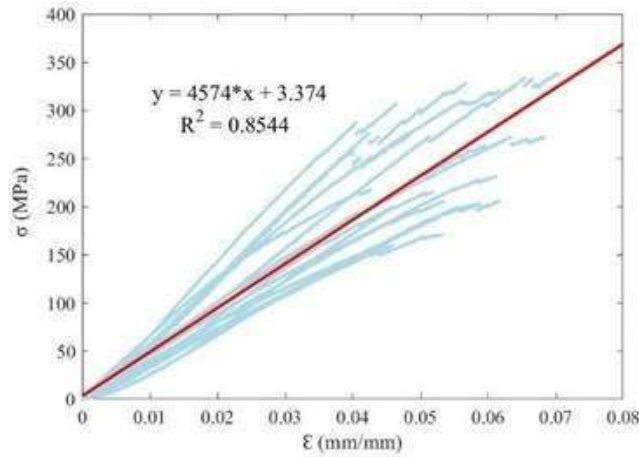
**Figura 13.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min).*



**Figura 14.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min).*



La Figura 10 generada mediante MATLAB muestra el comportamiento de las probetas hasta alcanzar el esfuerzo máximo, con un coeficiente de correlación de 0.8544 que indica un buen ajuste de datos. El módulo de elasticidad resultado de la regresión lineal fue de 4.57 GPa, en concordancia con los valores reportados en la Tabla 9, lo que confirma la consistencia y confiabilidad de los datos.

**Tabla 8.**

*Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min).*

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
1	205.5	6.2	3.68	3.63
2	205.4	5.3	4.13	4.04
3	263.8	6.0	4.70	4.68

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
4	198.2	4.6	4.58	5.16
5	306.9	4.6	7.44	7.53
6	202.8	5.9	3.91	3.99
7	217.8	4.3	5.84	5.68
8	155.0	4.6	3.82	3.76
9	231.6	6.1	4.21	4.21
10	320.7	6.2	6.06	5.88
11	272.3	6.8	4.57	4.40
12	159.8	4.6	3.73	3.68
13	171.1	5.3	3.83	3.70
14	328.3	5.7	6.68	6.87
15	215.4	5.2	4.70	4.93
16	277.9	4.9	6.70	7.11
17	263.8	6.0	4.70	4.68
18	155.0	4.6	3.82	3.76
19	277.9	4.9	6.69	7.10
20	338.2	7.0	5.39	5.52

**Tabla 9.**

*Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad media (3.0 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80% (GPa)	E 20-80% (GPa)
	(MPa)	(%)		
$\bar{x}$	238.4	5.4	4.96	5.01
<b>MAX</b>	338.2	7.1	7.44	7.53
<b>MIN</b>	155.0	4.3	3.68	3.63

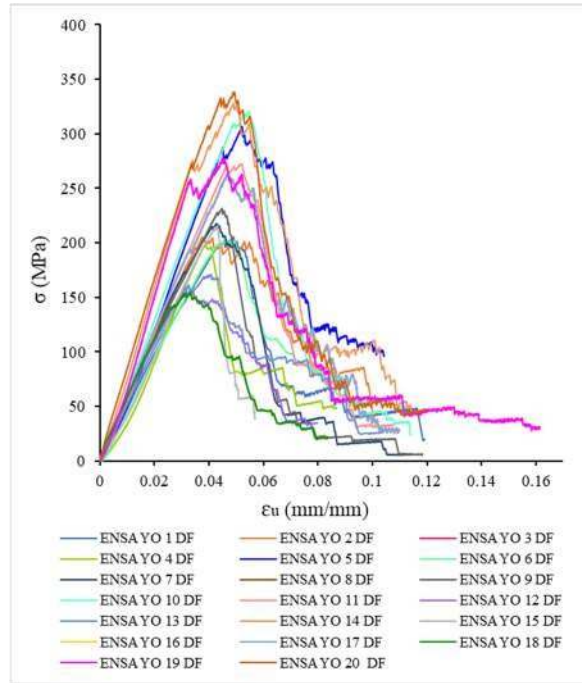
	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon_u$ (%)	E 0-80% (GPa)	E 20-80% (GPa)
<b>s</b>	58.8	0.8	1.20	1.29
<b>CV</b>	24.7	15.0	24.1	25.8

Según la Tabla 9, el esfuerzo último a 3.0 mm/min es comparable al de la velocidad alta, con una diferencia mínima de 18 MPa. Sin embargo, presenta una desviación estándar y un coeficiente de variación (CV) un 35% mayores que los obtenidos a 30 mm/min, lo que indica mayor variabilidad en los datos. La deformación unitaria promedio fue de 5.4%, un 15% menor que a velocidad alta, con una desviación estándar de 0.8 y un CV del 15%, reflejando un buen ajuste en los resultados.

El módulo de elasticidad promedio fue de 4.96 GPa (0- 80%) y 5.01 GPa (20-80%), valores estables respecto a la velocidad alta. Sin embargo, se observó un aumento en la desviación estándar (1.2-1.29) y el coeficiente de variación (24.1-25.8), indicando una mayor dispersión, posiblemente atribuida a la menor velocidad de ensayo, que favorece una mayor disipación de energía y respuestas más variables en los hilos de fique.

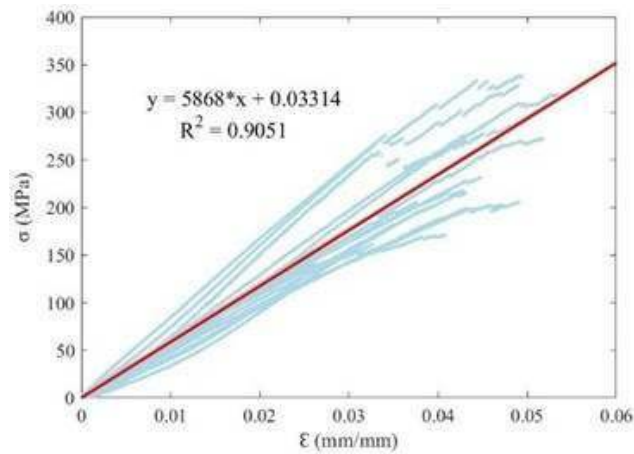
**Figura 15.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*



**Figura 16.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*



**Tabla 10.**

*Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(Gpa)	(Gpa)
$\bar{x}$	238.4	4.4	6.11	6.20
<b>MAX</b>	338.2	5.5	8.25	8.61
<b>MIN</b>	155.0	3.1	4.79	4.60
<b>s</b>	58.8	0.7	1.15	1.27
<b>CV</b>	24.7	14.9	18.8	20.4

**Tabla 11.**

*Medidas de tendencia central con medidas de deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*

Ensayo	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>1</b>	205.5	4.9	4.79	4.60
<b>2</b>	205.4	3.8	5.73	5.84
<b>3</b>	263.8	4.7	5.77	5.66
<b>4</b>	198.2	3.8	5.36	6.18
<b>5</b>	306.9	5.2	6.70	7.04
<b>6</b>	202.8	4.7	4.98	4.93
<b>7</b>	217.8	4.3	5.76	5.61
<b>8</b>	155.0	3.3	5.44	5.38
<b>9</b>	231.6	4.5	5.44	5.27
<b>10</b>	320.7	5.5	6.63	6.62
<b>11</b>	272.3	5.2	6.10	6.10
<b>12</b>	159.8	3.1	5.20	5.08

Ensayo	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
<b>13</b>	171.1	4.1	5.14	5.11
<b>14</b>	328.3	4.9	8.25	8.44
<b>15</b>	215.4	4.3	5.38	5.89
<b>16</b>	277.9	4.5	8.18	8.61
<b>17</b>	263.8	4.7	5.77	5.67
<b>18</b>	155.0	3.3	5.45	5.38
<b>19</b>	277.9	4.5	8.17	8.61
<b>20</b>	338.2	4.9	8.04	7.94

La Figura 11 muestra que, a velocidad media, las curvas obtenidas con el deformímetro son más consistentes que las registradas con la MTS Bionix, evidenciando mayor homogeneidad en las mediciones. Según la Tabla 11, la deformación unitaria última promedio medida con el deformímetro fue de 4.4%, un 20% menor que con la MTS Bionix (5.4%). La desviación estándar fue de 0.7 y el coeficiente de variación de 14.9%, reflejando alta precisión en los datos.

En cuanto al módulo de elasticidad, el deformímetro reportó promedios de 6.11 GPa (0-80%) y 6.20 GPa (20-80%) en la tabla 11 y 5.87 GPa en la Figura 12. Aunque la desviación estándar fue baja (1.15-1.27), el coeficiente de variación (18.8-20.4) señala una dispersión moderada. Esta variabilidad puede atribuirse a la complejidad intrínseca del material y condiciones experimentales, resaltando cómo los métodos de medición influyen en los resultados obtenidos.

**5.2.1 Comparación MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media**

**Tabla 12.**

*Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*

Ensayo	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
1	23.3	21.0	25.6
2	28.0	30.9	41.9
3	18.4	17.4	26.9
4	14.5	16.5	19.8
5	11.0	7.0	11.0
6	21.6	19.0	24.9
7	1.4	1.3	0.3
8	29.8	30.2	37.1
9	22.6	20.2	36.6
10	8.6	11.2	13.0
11	25.0	27.8	32.0
12	28.1	27.6	46.4
13	25.6	27.5	30.2
14	19.1	18.5	15.9
15	12.5	16.3	20.2
16	18.0	17.5	8.1
17	18.5	17.4	26.9
18	29.8	30.2	37.1
19	18.1	17.6	8.1
20	32.9	30.5	42.6

**Tabla 13.**

*Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad media (3.0 mm/min).*

	<b>E</b>		<b><math>\epsilon_u</math></b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
	<b>diferencia</b>	<b>diferencia</b>	<b>diferencia</b>
	<b>0-80%</b>	<b>20-80%</b>	
$\bar{x}$	20.3	20.3	25.2
<b>MAX</b>	32.9	30.9	46.4
<b>MIN</b>	1.4	1.3	0.3
<b>s</b>	8.0	8.1	13.0
<b>CV</b>	39.3	40.2	51.6

A velocidad media, las mediciones entre la MTS Bionix y el deformímetro muestran valores promedio del 20% (Tablas 12 y 13). La desviación estándar, entre 8 y 13, indica un buen ajuste en general, pero los coeficientes de variación con valores entre 30%, y 50%, reflejan una alta dispersión. La mayor variabilidad se observa en la deformación unitaria última, con una diferencia promedio del 20%, influida por valores extremos, como se señaló en la sección 4.2.

5.3 Resultados de tracción a velocidad baja (0.2 mm/min)

Figura 17.

Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min).

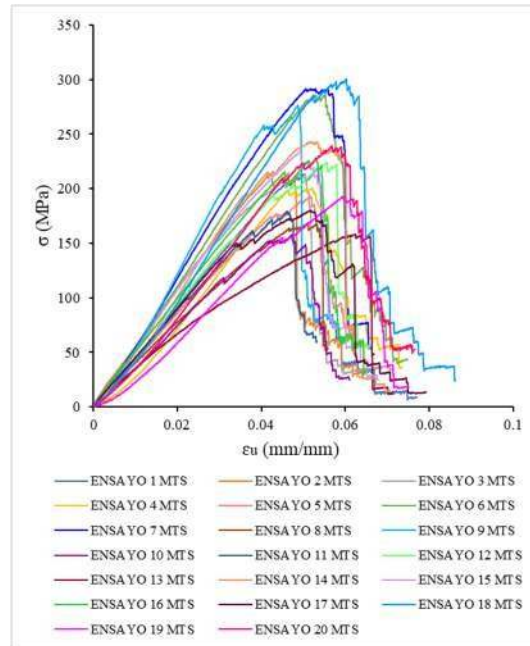
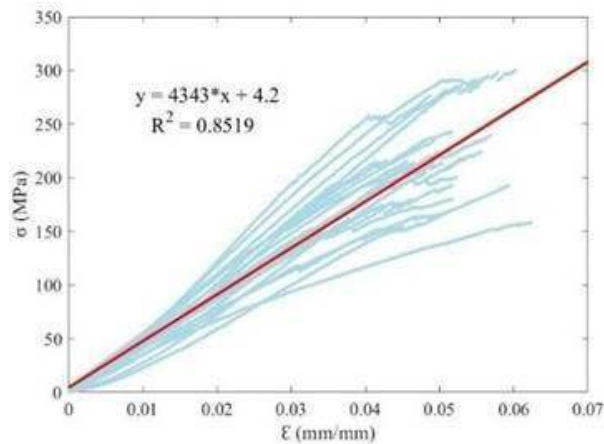


Figura 18.

Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min).



A una velocidad baja de 0.2 mm/min, con una frecuencia de registro de 1.2503 datos/segundo, los ensayos presentan mayor duración y dispersión moderada en la zona lineal-elástica (Figura 1) en comparación a las velocidades anteriores. En la Figura 14, el coeficiente de correlación ( $R^2$ ) de 0.8519 indica que los datos mantienen una dispersión aceptable. El módulo de elasticidad obtenido fue de 4.34 GPa, en conformidad con los valores reportados en la Tabla 14 (4.80-4.88 GPa), conservando un margen de diferencia de 10% similar a los casos anteriores.

**Tabla 14.**

*Propiedades mecánicas medidas por MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min).*

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
1	218.5	5.3	4.71	4.68
2	214.5	4.6	5.01	5.21
3	213.8	4.9	5.12	4.92
4	200.6	5.2	4.49	4.96
5	193.3	5.2	4.19	4.19
6	286.2	5.5	5.78	5.91
7	292.7	5.6	6.20	6.35
8	169.0	5.1	3.67	3.56
9	276.6	4.9	6.67	7.06
10	158.1	4.7	3.78	3.86
11	179.3	4.6	4.34	4.28
12	224.4	5.6	4.76	4.66
13	158.4	6.2	2.82	2.64
14	243.3	5.2	5.70	5.95
15	234.5	4.9	5.27	5.12

Ensayo	MTS Bionix			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
16	227.7	5.3	4.82	4.82
17	180.1	5.2	4.47	4.48
18	300.8	6.0	5.66	6.03
19	192.8	5.9	3.69	3.88
20	239.6	5.7	4.77	5.10

**Tabla 15.**

*Medidas de tendencia central con medidas de MTS Bionix velocidad baja (0.2 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	220.2	5.3	4.80	4.88
MAX	300.8	6.2	6.67	7.06
MIN	158.1	4.6	2.82	2.64
s	43.5	0.5	0.93	1.04
CV	19.8	8.6	19.5	21.3

Según la Tabla 15, el esfuerzo máximo se mantiene estable en las tres velocidades evaluadas, con una diferencia de 18 MPa entre cada velocidad. La desviación estándar (43.5) y el coeficiente de variación (19.8) disminuyen en comparación con la velocidad media, aunque son ligeramente superiores a los valores obtenidos a velocidad alta, reflejando un ajuste moderado y un comportamiento consistente del material frente a cambios de velocidad.

La deformación unitaria última presentó un promedio de 5.3%, con una desviación estándar de 0.5 y un coeficiente de variación de 8.6, lo que evidencia un ajuste satisfactorio de los datos ya que se encuentra por debajo del 15% (Bowman, 2001). Aunque los ensayos muestran cierta

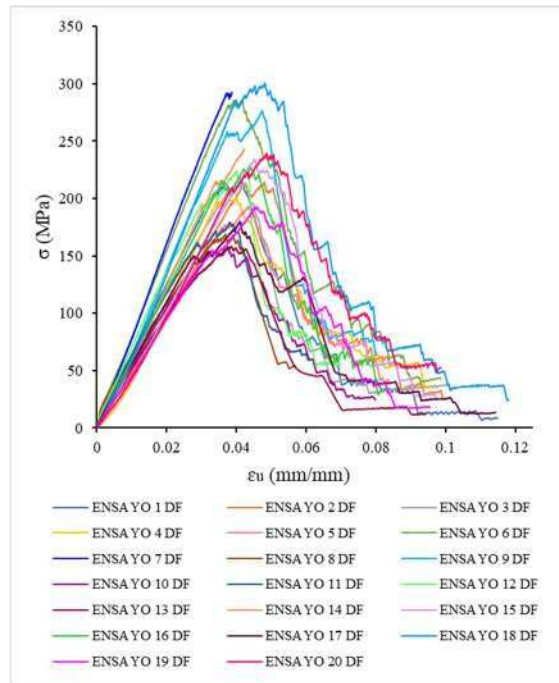
dispersión gráfica, la ausencia de valores extremos distantes mejora la consistencia y la confiabilidad de las medidas de tendencia central.

El módulo de elasticidad presentó mayor variabilidad que la deformación unitaria última, con coeficientes de variación entre 19.5% y 21.3%. Si bien estos valores superan el límite recomendado son aceptables debido al alto volumen de datos y a las condiciones experimentales, indicando una variabilidad aceptable.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con el deformímetro a baja velocidad, bajo las mismas condiciones experimentales descritas.

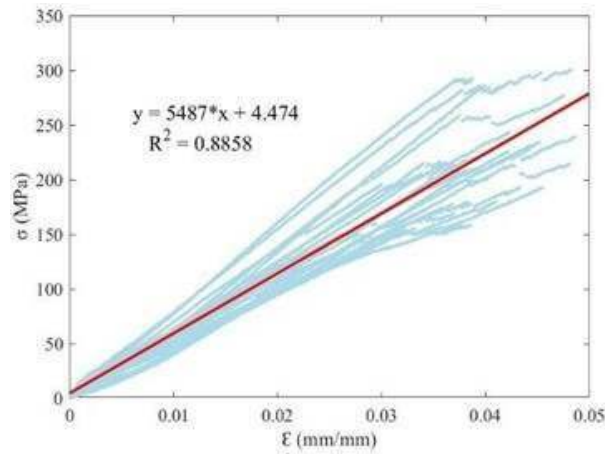
**Figura 19.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*



**Figura 20.**

*Curva esfuerzo máxima-deformación unitaria máxima medida por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*



**Tabla 16.**

*Propiedades mecánicas medidas por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*

Ensayo	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
1	218.5	4.1	6.17	6.08
2	214.5	4.8	5.22	5.20
3	213.8	4.1	5.62	5.45
4	200.6	4.0	5.92	6.63
5	193.3	4.3	4.90	4.93
6	286.2	4.2	7.54	7.58
7	292.7	3.9	8.02	8.19
8	169.0	3.7	4.81	4.57
9	276.6	4.7	7.18	7.25
10	158.1	3.8	4.79	4.72

Ensayo	Deformímetro			
	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
11	179.3	3.8	5.68	5.46
12	224.4	4.0	6.51	6.39
13	158.4	3.9	4.71	4.52
14	243.3	4.2	6.59	6.71
15	234.5	4.5	5.48	5.65
16	227.7	4.4	5.95	6.00
17	180.1	4.1	5.39	5.40
18	300.8	4.8	7.27	7.74
19	192.8	4.5	4.67	4.68
20	239.6	4.9	5.44	5.87

**Tabla 17.**

*Medidas de tendencia central con medidas por deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*

	$\sigma_{max}$	$\epsilon_u$	E 0-80%	E 20-80%
	(MPa)	(%)	(GPa)	(GPa)
$\bar{x}$	220.2	4.2	5.89	5.95
<b>MAX</b>	300.8	4.9	8.02	8.19
<b>MIN</b>	158.1	3.7	4.67	4.52
<b>s</b>	43.5	0.4	1.01	1.11
<b>CV</b>	19.8	8.8	17.1	18.6

El comportamiento observado en las secciones 4.1 y 4.2 se mantiene en este caso. El deformímetro muestra un mejor ajuste visual y numérico de los datos, como se observa en la Figura 15 y se confirma en la Tabla 17.

En la Tabla 18, la deformación unitaria última promedio fue de 4.2%, un 20% menor que la registrada con la MTS Bionix. Las medidas de tendencia central son favorables, con una desviación estándar de 0.4 y un coeficiente de variación de 8.8, lo que evidencia alta consistencia en los datos.

El módulo de elasticidad promedio fue de 5.89 GPa (0- 80%) y 5.95 GPa (20-80%), con desviaciones estándar de 1.01 y 1.11, y coeficientes de variación de 17.7% y 18.6%. Estos valores indican un buen ajuste, respaldado por la observación de que los máximos y mínimos no superan una diferencia de 25% respecto al promedio.

La Figura 16, que presenta un módulo de elasticidad de 5.49 GPa calculado mediante regresión lineal en MATLAB, confirma que este método es confiable y se ajusta a los datos manuales reportados en las tablas, demostrando la consistencia del análisis realizado.

**5.3.1 Comparación MTS Bionix VS Deformímetro Velocidad Baja**

**Tabla 18.**

*Comparativa resultados MTS Bionix VS Deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*

Ensayo	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
1	23.7	23.1	30.6
2	3.9	0.1	3.3
3	8.8	9.6	20.4
4	24.2	25.3	30.0
5	14.4	15.1	19.1
6	23.4	22.1	32.4
7	22.8	22.5	44.3
8	23.7	22.2	38.7

Ensayo	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
9	7.1	2.6	2.7
10	21.0	18.4	25.6
11	23.6	21.5	20.7
12	26.9	27.1	38.7
13	40.1	41.7	61.6
14	13.5	11.3	22.0
15	3.8	9.4	8.9
16	18.9	19.5	20.2
17	17.1	17.0	26.1
18	22.2	22.1	24.9
19	21.0	17.0	30.5
20	12.3	13.1	16.8

**Tabla 19.**

*Medidas de tendencia central comparativa MTS Bionix VS Deformímetro velocidad baja (0.2 mm/min).*

	E		$\epsilon_u$
	%	%	%
	diferencia 0-80%	diferencia 20-80%	diferencia
$\bar{x}$	18.6	18.0	25.9
<b>MAX</b>	40.1	41.7	61.6
<b>MIN</b>	3.8	0.1	2.7
<b>s</b>	8.7	9.1	13.8

	<b>E</b>		<b><math>\epsilon_u</math></b>
	%	%	%
	<b>diferencia</b>	<b>diferencia</b>	<b>diferencia</b>
	<b>0-80%</b>	<b>20-80%</b>	
<b>CV</b>	46.9	50.7	53.3

Según la Tabla 19, a baja velocidad se observa una dispersión promedio mejor en comparación con las velocidades anteriores, con valores entre 18% y 25%. Sin embargo, la presencia de valores máximos distantes afecta el coeficiente de variación, que alcanza aproximadamente el 50% tanto para la deformación unitaria última como para los módulos de elasticidad. A pesar de ello, la desviación estándar muestra un buen comportamiento, indicando cierta estabilidad en los datos. En términos generales, el comportamiento es similar al observado a velocidad media y alta.

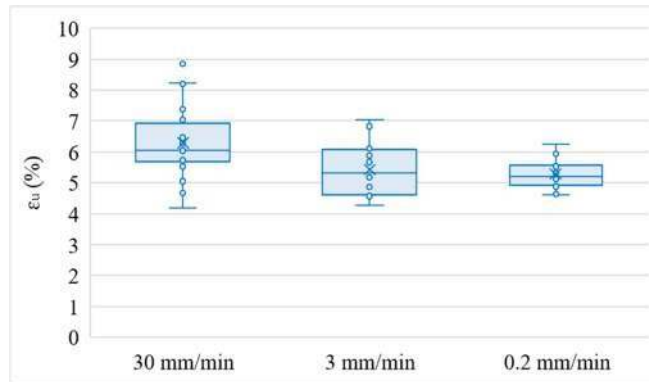
Las Figuras 21 y 23 muestran un buen ajuste general, aunque algunas desviaciones significativas son visibles, especialmente en la primera figura mencionada. No obstante, la baja desviación estándar sugiere que, el ajuste sigue siendo consistente, lo que ratifica lo indicado en las Tablas 18 y 19.

## 6. Análisis Ensayos a Tracción Hilos de Fique

Finalizado el análisis de cada velocidad, se realizó un análisis general mediante gráficos boxplot para la deformación unitaria última, el esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad 0-80% y 20-80%. Este permitió comparar la dispersión y las medidas de tendencia central entre el deformímetro y la MTS Bionix, evaluando la consistencia de los resultados.

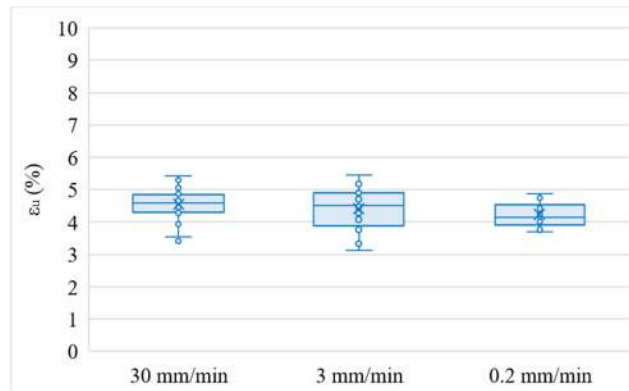
**Figura 21.**

*Variación de  $\epsilon_u$ -MTS con la velocidad de deformación a tracción.*



**Figura 22.**

*Variación de  $\epsilon_u$ -DF con la velocidad de deformación a tracción.*



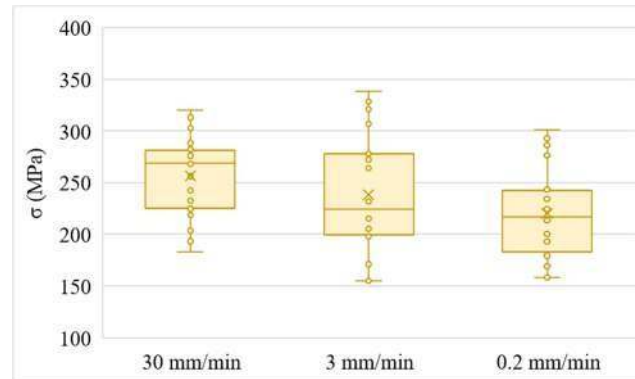
En el caso de la MTS Bionix (Figura 19), a 30 mm/min se observa mayor dispersión y presencia de valores atípicos, reflejando una mayor variabilidad en los datos. A velocidades más bajas (3 mm/min y 0.2 mm/min), la dispersión disminuye, indicando un comportamiento más uniforme en las probetas, la velocidad baja es la que presenta un mejor ajuste con poca dispersión de datos.

Adicionalmente, la Figura 23, muestra que el deformímetro presenta menor dispersión en todas las velocidades evaluadas. Aunque a 30 mm/min se evidencia una leve dispersión, los valores son más homogéneos en comparación con la MTS. A 3 mm/min y 0.2 mm/min, el deformímetro

destaca por registrar datos más consistentes y sin valores atípicos significativos, lo que refleja su alta sensibilidad y precisión.

**Figura 23.**

*Variación de  $\sigma$  con la velocidad de deformación a tracción.*



La Figura 24 muestra la variación del esfuerzo máximo en las tres velocidades evaluadas. En contraste con la deformación unitaria última, en el esfuerzo se observa un mejor ajuste y mayor consistencia a 30 mm/min, en comparación con las velocidades más bajas donde se evidencia una mayor dispersión con los valores concentrados alrededor de la mediana y algunos puntos atípicos en los extremos.

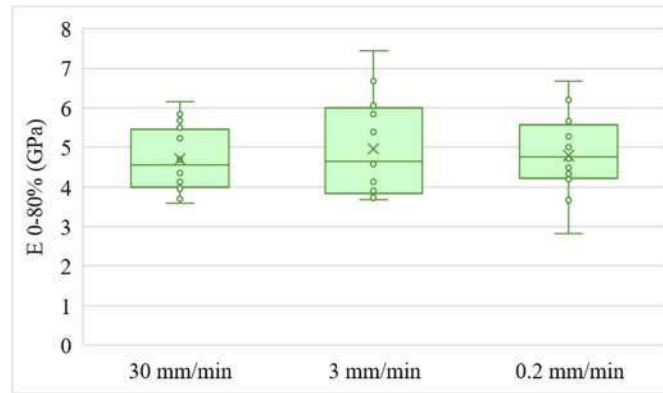
A 3 mm/min, la dispersión aumenta significativamente con valores extremos más pronunciados a comparación de la velocidad alta. Esto sugiere que la velocidad media introduce mayor variabilidad en los resultados.

A 0.2 mm/min, se evidencia una mayor consistencia en los datos. Sin embargo, la mediana se encuentra en un rango inferior, lo que indica que los valores de esfuerzo máximo son menores a esta velocidad.

En general, la velocidad afecta tanto la dispersión como los valores extremos del esfuerzo, con mayor estabilidad en las velocidades alta y baja, y una mayor variabilidad en la velocidad media confirmando lo mencionado en la sección 4.

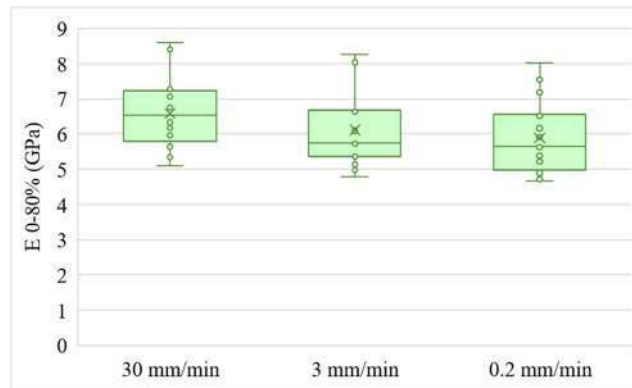
**Figura 24.**

*Variación de  $E_{0-80\%}$  -MTS con la velocidad de deformación a tracción.*



**Figura 25.**

*Variación de  $E_{0-80\%}$  -DF con la velocidad de deformación a tracción.*



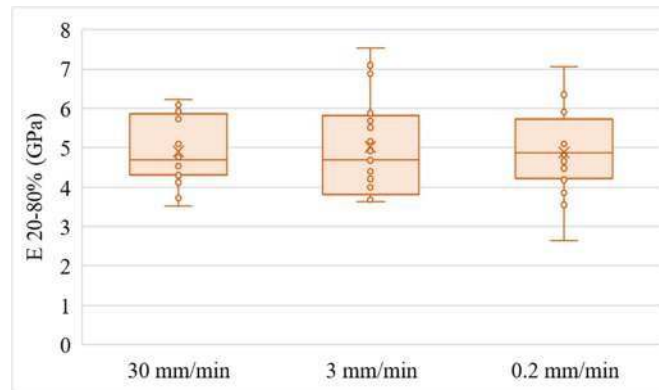
Las Figuras 26 y 27 muestran diferencias significativas entre los resultados obtenidos con la MTS Bionix y el deformímetro para el módulo de elasticidad (0-80%). En general, el deformímetro presenta mayor consistencia y menor dispersión en todas las velocidades evaluadas. A 30 mm/min, ambos sistemas presentan valores extremos alejados, pero en general un buen ajuste de datos, sin embargo, los datos del deformímetro son más uniformes.

A 3 mm/min, la MTS muestra la mayor dispersión, mientras que el deformímetro mantiene un ajuste más estable. A 0.2 mm/min, ambos sistemas registran menor variabilidad, aunque con extremos distantes, el deformímetro sigue destacando por su precisión.

Estos resultados indican que el deformímetro es más confiable para medir el módulo de elasticidad, especialmente en velocidades intermedias y bajas.

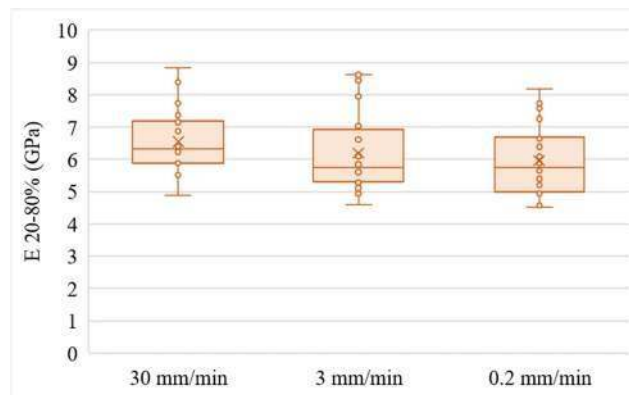
**Figura 26.**

*Variación de  $E_{20-80\%}$  - MTS con la velocidad de deformación a tracción.*



**Figura 27.**

*Variación de  $E_{20-80\%}$  - DF con la velocidad de deformación a tracción.*



Al comparar las gráficas del módulo de elasticidad (20- 80%) para la MTS (Figura 22) y el deformímetro (Figura 23), se observa que el deformímetro presenta una distribución más homogénea en todas las velocidades. A 30 mm/min y 0.2 mm/min, ambos equipos muestran resultados consistentes, aunque la MTS registra mayor dispersión y valores extremos. A 3 mm/min, la variabilidad es más pronunciada en la MTS, mientras que el deformímetro mantiene un ajuste más uniforme al igual que en E (0-80%).

Teniendo en cuenta lo presentado en las secciones 4 y 5, se puede afirmar que el mejor ajuste de datos de los hilos de fique se observa a baja velocidad. Sin embargo, es importante considerar que la velocidad alta es la más representativa en el uso real del producto, ya que es la condición a la que probablemente estará expuesto en la industria de la construcción.

En este sentido, aunque el comportamiento del material presenta una dispersión moderada, sus propiedades mecánicas resultan satisfactorias. A alta velocidad, se alcanzan los valores de esfuerzo máximo, deformación unitaria última y módulo de elasticidad con mayor valor, lo que se traduce en un material con mejor resistencia a la tracción y buena capacidad de elongación

## **7. Espectroscopia Infrarroja (FITR-ATR)**

La fibra de fique, un material natural y renovable conocido por sus excelentes propiedades mecánicas y su fácil obtención, ha sido ampliamente estudiado en aplicaciones industriales, como refuerzo en materiales de construcción como matrices cementicias. Para mejorar su desempeño y optimizar su interacción se han implementado diversos tratamientos químicos y físicos que buscan potenciar sus propiedades mecánicas.

En este contexto, la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada en la región del infrarrojo medio (FTIR-ATR-MIR) es una herramienta muy útil para analizar los efectos de estos tratamientos. Esta técnica no destructiva permite identificar cambios en la composición química de los hilos de fique, evaluando la presencia y modificaciones en los grupos funcionales.

En este estudio se comparan tres muestras: fique natural, fique mercerizado con hidróxido de sodio y fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno, con el fin de comprender cómo

estos tratamientos afectan los grupos funcionales y por ende los componentes del fique, además de explorar su potencial en el desarrollo de materiales compuestos más eficientes y amigables con el medio ambiente.

### 7.1 Tratamientos Aplicados a la Fibra de Fique

El *Furcraea andina* (fique), originario de los Andes, es cultivado principalmente en Colombia, Ecuador y Venezuela. Su fibra, obtenida tras la separación y limpieza de la corteza de las hojas, es valorada por su resistencia y sostenibilidad, siendo utilizada en productos como materiales de construcción (Ortiz & Picón, 2021).

Para realizar los tratamientos, las fibras se sumergen en una solución al 2% de hidróxido de sodio (NaOH). Este proceso dura 20 minutos con agitación uniforme, seguida de neutralización con agua desionizada y secado a 45 °C por 16 horas.

Adicionalmente, las fibras se recubren con óxido de grafeno sintetizado mediante el método de Hummers. El recubrimiento, aplicado en dos capas con thinner para poliuretanos, incrementa la adherencia posicionando al fique como un material óptimo para aplicaciones sostenibles en elementos no estructurales (Sandoval, 2024).

#### Figura 28.

*Fijación fotográfica del embalaje y rotulación de muestras, Fique (Natural), Fique NaOH (Hidróxido de sodio), Fique GO (Óxido de grafeno).*



*Nota:* Laboratorio de espectroscopia.

Cabe resaltar que todas las muestras fueron suministradas por terceros para la ejecución del ensayo FTIR-ATR- MIR (Figura 28).

**7.2 Parámetros de Trabajo y Ensayo**

El ensayo de Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier con Reflexión Total Atenuada en el Rango del Infrarrojo Medio (FTIR-ATR-MIR) emplea un haz de radiación infrarroja (IR) que atraviesa un cristal transparente con un alto índice de refracción, bajo el cual se coloca la muestra. El haz se refleja internamente en el cristal, permitiendo que la muestra absorba radiación en frecuencias específicas. Para garantizar una absorción eficiente, es esencial asegurar un contacto óptimo entre la muestra y el cristal (Contreras, Trujillo, Arias, & et. al, 2010).

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio de espectroscopía (203) de la Universidad Industrial de Santander–Sede Guatiguará, siguiendo parámetros establecidos y utilizando equipos especializados para garantizar la precisión de los resultados y correcta ejecución de los ensayos (Figura 29).

**Figura 29.**

*Parámetros de trabajo.*

<b>Equipo</b>	is50 FT-IR Nicolet. Thermo Scientific
<b>Rango de Adquisición</b>	4000-400cm <sup>-1</sup>
<b>Número de Scans</b>	64
<b>Resolución</b>	4
<b>Velocidad Óptica</b>	0.4747 cm/s
<b>Modo</b>	Transmitancia
<b>Apertura</b>	100
<b>Software</b>	OMNIC

*Nota:* Laboratorio de espectroscopia.

**Figura 30.**

*Muestra de FiqueGO en cristal ATR.*



La Figura 30 presenta el montaje experimental para los tres tipos de muestra estudiados (Fique natural, fique mercerizado con NaOH y fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno). Los datos obtenidos incluyen el número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ) y porcentaje de transmitancia, que reflejan la cantidad de radiación infrarroja que atraviesa las muestras. Los picos descendentes en el espectro están asociados a la absorción de radiación lo que significa la presencia de grupos funcionales específicos en la muestra.

Aunque el gráfico de número de onda vs. transmitancia permite un análisis preliminar, la identificación precisa de los grupos funcionales se realizó mediante la base de datos WILEY, conforme lo indica el informe del laboratorio de espectroscopía (Cepeda, 2024).

### **7.3 Resultados ensayo FTIR-ATR-MIR**

Para caracterizar los componentes del fique, se utilizó espectroscopía infrarroja (IR), una técnica que identifica grupos funcionales a partir de la absorción de energía por los enlaces químicos de la muestra. Esta absorción genera variaciones en el momento dipolar de los enlaces, produciendo señales asociadas a frecuencias de vibración características. Estas frecuencias, expresadas en números de onda, permiten identificar de manera precisa los grupos funcionales presentes en la muestra (Toledo, 2025).

Los grupos funcionales presentes en el fique fueron relacionados con sus respectivos números de onda, facilitando su identificación a través de las frecuencias de vibración características. Los datos, obtenidos de la literatura consultada, se resumen en la Tabla 19, donde se destacan las principales bandas de absorción y los grupos funcionales asociados.

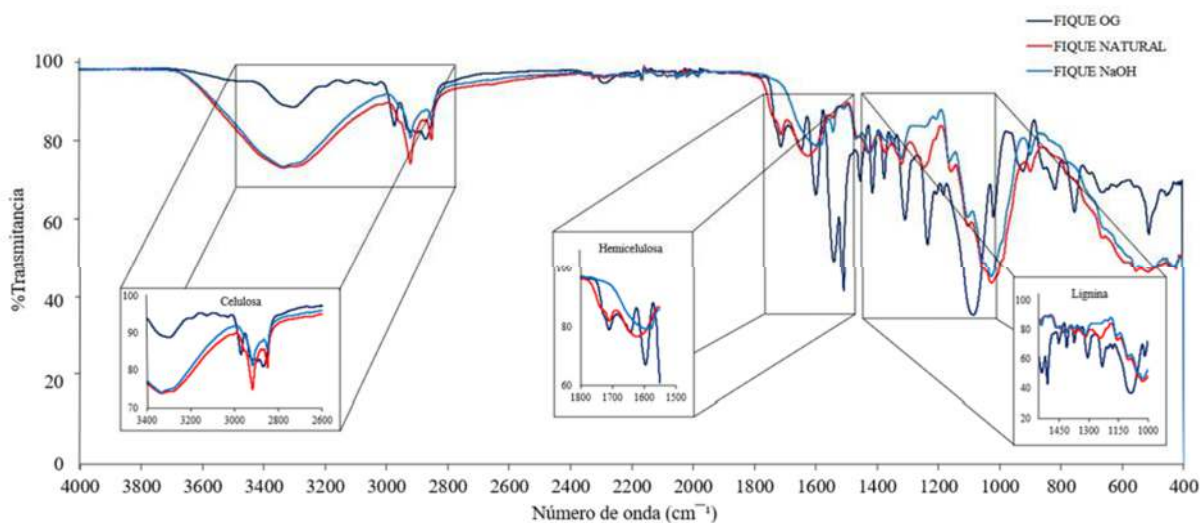
**Figura 31.**

*Componentes, grupos funcionales y número de onda (cm<sup>-1</sup>) del fique.*

REF	Celulosa OH, C-H, C-O		Hemicelulosa C=O		Lignina C=C, CH3		
[6]	3400	2800	1600		1500	1800	
[7]	3334	2919	1644	1729	1503	1595	1242
[8]			1690	1760	1500	1600	

**Figura 32.**

*Gráfica %Transmitancia vs. número de onda (cm<sup>-1</sup>).*



La Figura 32 presenta la gráfica de %Transmitancia vs. Número de onda, obtenida mediante FTIR-ATR-MIR, destacando subplots de cada componente (Celulosa, hemicelulosa y lignina) que permiten identificar con precisión las señales espectrales según los valores definidos en la tabla 19.

La relación entre la transmitancia y la intensidad de los picos permite identificar la

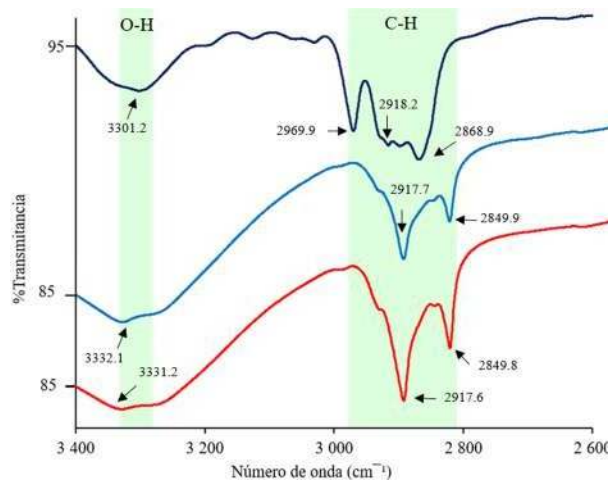
influencia de los tratamientos aplicados en las propiedades químicas del fique. Una menor transmitancia y picos más pronunciados indican una mayor intensidad de los grupos funcionales. Este análisis subraya la importancia de cada componente en el comportamiento mecánico y químico del fique.

Las Figuras 33, 34 y 35 presenta los espectros de los principales componentes del fique; las bandas verdes en el gráfico indican los rangos específicos donde se encuentran estos grupos funcionales, señalados en la parte superior de cada región. Cada línea del espectro corresponde a un tratamiento químico aplicado: fique natural, fique mercerizado con NaOH y fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno, utilizando el código de colores establecido en la Figura 26.

Los picos más pronunciados de cada muestra están marcados con su respectivo número de onda, permitiendo identificar la intensidad y presencia de los grupos funcionales en función del tratamiento.

**Figura 33.**

*Gráfica detallada celulosa.*



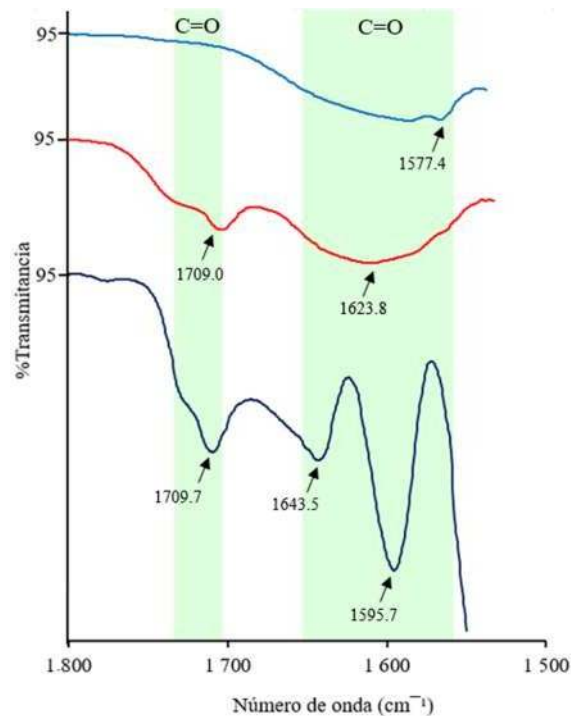
La Figura 33 muestra el espectro de la celulosa, resaltando los grupos funcionales hidroxilo (O-H) y carbono-hidrógeno (C-H) en sus rangos característicos. Las señales más destacadas incluyen  $3301.2\text{ cm}^{-1}$ ,  $3332.1\text{ cm}^{-1}$  y  $3331.2\text{ cm}^{-1}$  (O-H), y  $2918.2\text{ cm}^{-1}$ ,  $2917.7\text{ cm}^{-1}$  y  $2917.6$

$\text{cm}^{-1}$  (C-H). Los grupos O-H presentan alta intensidad debido a su capacidad para formar enlaces de hidrógeno, esenciales para las propiedades mecánicas de los hilos de fique, mientras que los grupos C-H refuerzan la estructura básica de la celulosa.

En las muestras, el fique natural y el mercerizado con NaOH evidenciaron mayores intensidades, con un 85 % de transmitancia, indicando una alta concentración de celulosa. En contraste, el fique mercerizado y recubierto con óxido de grafeno (OG) mostró una disminución en la intensidad de los picos, atribuida a las interacciones químicas entre los grupos funcionales del óxido de grafeno (-COOH y -OH) y los hidroxilos de la celulosa, generando nuevos enlaces que atenúan las señales espectrales (Rodríguez & Ayala, 2023).

**Figura 34.**

*Gráfica detallada hemicelulosa.*



La Figura 34 muestra la zona espectral de la hemicelulosa, caracterizada por el grupo funcional carbonilo (C=O), que interactúa con la celulosa y la lignina, los principales

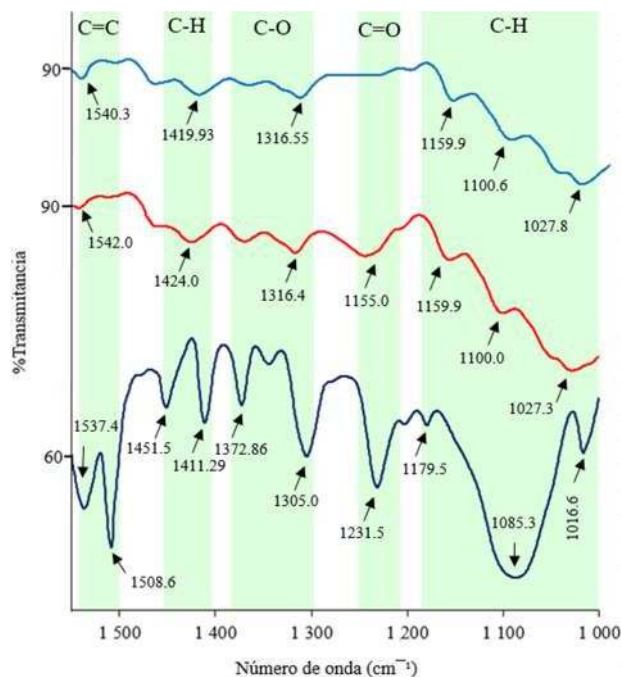
constituyentes del fique.

En el fique natural y el mercerizado con NaOH, no se observan picos sobresalientes, lo que sugiere una baja presencia de hemicelulosa. En el fique natural, esto podría atribuirse a impurezas que dificultan su detección espectroscópica, mientras que el tratamiento con NaOH degrada parcialmente la hemicelulosa, reduciendo su intensidad en el espectro.

Por el contrario, el fique recubierto con óxido de grafeno muestra picos más pronunciados, indicando una mayor conservación de hemicelulosa. Esto se debe a que el recubrimiento estabiliza las interacciones químicas, resaltando los grupos funcionales y protegiendo este componente frente a la degradación causada por el tratamiento alcalino.

**Figura 35.**

*Gráfica detallada lignina.*



La Figura 35 presenta el espectro de la lignina, destacando los grupos funcionales C=C, C-H, C-O y C=O, esenciales para la estructura de la fibra de fique. Los enlaces C=C aportan rigidez, los enlaces C-H estabilidad estructural, los enlaces C-O interconectan moléculas clave, y los grupos

C=O facilitan interacciones químicas con otros componentes como la hemicelulosa. Las señales más intensas se observan en  $1508.6\text{ cm}^{-1}$  (C=C) y  $1085.3\text{ cm}^{-1}$  (C-H) (Camargo, 2022).

El fique recubierto con óxido de grafeno presenta mayor intensidad espectral, atribuida a la estabilización de sus grupos funcionales gracias al recubrimiento, que protege la lignina de la degradación por factores externos como el agua. Por el contrario, el tratamiento con NaOH degrada parcialmente la lignina al romper sus enlaces, mientras que, en el fique natural, las impurezas y la manipulación contaminan el material y limitan la visibilidad espectral de este componente.

Estos resultados evidencian que el recubrimiento con óxido de grafeno preserva y resalta los grupos funcionales de la lignina, mientras que los tratamientos alcalinos y las impurezas afectan negativamente su estabilidad y visibilidad de los grupos funcionales.

El recubrimiento con óxido de grafeno optimiza la presencia de los componentes principales del fique, lo que sugiere mejora en las propiedades mecánicas en comparación con el fique natural y el tratado con NaOH, cuyos comportamientos son similares. Esto se refleja en las curvas FTIR-ATR-MIR, donde las diferencias entre estos últimos son mínimas.

## 8. Conclusiones

El presente artículo tuvo como objetivo profundizar en el análisis del comportamiento mecánico y estructural de la fibra de fique, enfocándose en su caracterización para evaluar cómo los factores externos y los tratamientos químicos influyen en sus propiedades. Además, se buscó proporcionar herramientas que aporten a futuros estudios orientados a potenciar el uso del fique en el campo de la ingeniería civil. A partir de los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

Los ensayos de tracción evidenciaron que la velocidad de deformación afecta directamente

las propiedades mecánicas de los hilos fique natural. A mayor velocidad, aumenta el esfuerzo máximo con valores de 220.1 MPa en velocidad baja y 256.6 MPa en velocidad alta; la deformación unitaria última y el módulo de elasticidad se mantuvieron relativamente estables con pequeñas disminuciones desde velocidad alta a baja con valores de 6.3-5.3 % (MTS Bionix), 4.6-4.2 % (Deformímetro) y 4.7-5.1 GPa (MTS Bionix), 5.88-6.55 GPa (Deformímetro) respectivamente.

El deformímetro mostró mayor precisión en la medición de deformaciones locales, especialmente a velocidades bajas e intermedias, debido a su contacto directo con los hilos. Esto lo posiciona como una herramienta más confiable para estudios de comportamiento mecánico detallado.

Al comparar las tres velocidades de deformación, se concluye que los hilos de fique natural presentan un mejor desempeño a velocidades medias y bajas. A estas velocidades, la deformación unitaria última disminuye lo que indica que el fique se vuelve más rígido. El mejor desempeño general se observó a velocidad baja ya que se registra una menor dispersión en los datos, lo que sugiere un mejor ajuste y mayor confiabilidad en el comportamiento del material.

El análisis químico mediante FTIR-ATR-MIR confirmó que el recubrimiento con óxido de grafeno mejora significativamente las propiedades del fique, preservando sus componentes principales (celulosa, hemicelulosa y lignina) y aumentando la resistencia estructural. Por el contrario, el tratamiento con NaOH degradó estos componentes, afectando negativamente la estructura de los hilos de fique.

El fique natural mostró un comportamiento similar al tratado con NaOH, evidenciando una alta susceptibilidad a factores externos. Esto subraya la necesidad de un manejo adecuado para mantener sus propiedades en estado natural.

## **9. Recomendaciones**

Se recomienda profundizar en el análisis de las causas que generan los valores atípicos identificados en los ensayos de tracción. Es fundamental realizar una evaluación más exhaustiva para minimizar su aparición, ya que, si bien dichos valores pueden atribuirse a la variabilidad inherente del material en su comportamiento mecánico, también pueden originarse en factores externos al ensayo. La presencia de estos valores impacta directamente las medidas de tendencia central, las cuales son fundamentales para la interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

### Referencias

- Barajas, Y.; Pinzón, M.; Gutierrez, N.; et.al, (2019). Nanocomposite rGO@TiO<sub>2</sub> Supported on Fique Fibers for Photocatalytic Degradation of Dyes, *Journal of Physics*, Series: 1247, pp. 1-7, doi: 10.1088/1742- 6596/1247/1/012028
- Bowman, S. (2001). *Common Use of the CV: A Statistical Aberration in Crop Performance Trials*”, *The Journal Of Cotton*, vol. 5, pp. 137-141. Obtenido de <http://journal.cotton.org>.
- Camargo, M. (2022). *Caracterización morfológica de la fibra de fique (Furcraea andina) para uso en obras de bioingeniería* . Tunja: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás.
- Camargo, M. (2022). *Caracterización morfológica de la fibra de fique (Furcraea andina) para uso en obras de bioingeniería*, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás-Tunja,
- Cepeda, R. (2024). *Informe registro de datos ftir-atr solicitud de servicio cotización No. 0410*, . Bucaramanga: Laboratorio de espectroscopia.
- Contreras, H., Trujillo, H., Arias, G., & et. al. (2010). *Espectroscopia atr-ftir de celulosa: aspecto instrumental y tratamiento matemático de espectros*, *e-Gnosis*, vol. 8, Art. 9, pp. 1-13,. <https://www.redalyc.org/pdf/730/73013006008.pdf>
- Diaz, N. (2022). 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, . *Artículo revista, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander*.
- Diaz, S. (2024). *Caracterización mecánica a tracción de los hilos de fibra de fique mercerizados con L=250 mm bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954*”,

Artículo revista, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.

Gómez, S., & Cordoba, E. (2022). *Composite materials reinforced with fique fibers –a review*”,  
 Rev UIS Ing, vol. 21, n.º 1, pp. 163-178:  
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingeneria>

Herrera, J. (2020). *Desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo, Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales*. Universidad Industrial de Santander.

Kerni, L., Singh, S., & Patnaik, A. (2020). *A review on natural fiber reinforced composites*”,  
*Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 1616-1621.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.851>

Laverde, L. (2023). *Respuesta a Compresión del Concreto Simple Reforzado Externamente con Mallas de Fibra de Fique*, Tesis maestría, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.

Meléndez, L.; Lache, A. (2010). *Predicción del análisis sara de crudos colombianos aplicando espectroscopia ftir-atr y métodos quimiometricos*, Tesis pregrado, Escuela de Química, Universidad Industrial de Santander

Ortiz, M., & Picón, L. (2021). *Revisión bibliográfica de las características mecánicas a tensión de un material compuesto con tejido de fibra de fique como refuerzo en elementos de concreto a compresión*. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.

Rodríguez, A., & Ayala, P. (2023). *Interacciones de nanoestructuras sobre óxido de grafeno, Mundo nano*, vol 16, n.º 31, pp. 13-31.  
<https://doi.org/10.22201/ceich.24485691e.2023.31.69765>

Sandoval, C. (2024). *Caracterización mecánica a tracción de los hilos de fibra de fique con L=250*

mm mercerizados y modificados superficialmente con óxido de grafeno bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954. *Artículo Revista, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Industrial de Santander.*

*Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers.* (2020). ASTM C1557-20,.

Toledo, M. (2025). *Reflectancia total atenuada (ATR): Tecnología de muestreo de ATR para aplicaciones de FTIR,*  
[https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1\\_AutoChem\\_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html](https://www.mt.com/es/es/home/applications/L1_AutoChem_Applications/ftir-spectroscopy/attenuated-total-reflectance-atr.html)