

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

Silvia Nathalia Diaz Barrera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph. D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector 1

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ph. D. en Ingeniería Civil

Codirector 2

German Adolfo Diaz Ramírez

Ph. D. en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a las personas que han sido fundamentales en este camino

A mi madre, por ser la base de todo, por su amor incondicional y su esfuerzo constante, gracias por enseñarme el valor del trabajo, la perseverancia y por estar siempre a mi lado, impulsándome a seguir adelante

A mi amor, quien ha sido mi compañero incondicional durante estos cinco años de carrera, gracias por tu paciencia, comprensión y por ser un pilar en mi vida

Finalmente, a mis profesores, quienes hicieron de este trayecto una experiencia enriquecedora y motivadora. A ustedes, mi sincera gratitud por su dedicación y por inspirarme en cada clase

### **Agradecimientos**

Agradezco al Grupo de Investigación INME de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por su respaldo constante, que hizo posible avanzar en cada etapa de este trabajo.

Al grupo de investigación VIE-UIS 3954, y en especial al profesor José Miguel Benjumea, quien no solo fundó este grupo, sino que fue pieza clave en el desarrollo de esta investigación. Su orientación y experiencia aportaron un valor incalculable a cada fase del proyecto.

A mis codirectores, quienes brindaron un apoyo sólido y multidimensional, ofreciendo sus conocimientos y contribuciones esenciales para enriquecer este trabajo desde distintas perspectivas.

También agradezco al Laboratorio LEAM de la UIS, que facilitó sus instalaciones para el avance de actividades importantes de esta investigación.

Finalmente, mi gratitud se extiende a la empresa Coohilados del Fonce, que proporcionó la materia prima fundamental para cumplir con los objetivos de esta investigación, siendo su apoyo esencial para el logro de los resultados obtenidos.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	13
1. Objetivos .....	16
1.1 Objetivo General .....	16
1.2 Objetivos Específicos.....	16
2. Marco Teórico.....	17
2.1 Fibras De Fique.....	17
2.2 Alcalinización de las Fibras de Fique .....	18
2.3 Efecto de la Tasa de Deformación en las propiedades mecánicas de las Fibras Vegetales a Tensión .....	21
3. Metodología .....	23
3.1 Tratamiento de las Fibras .....	23
3.1.1 Manejo de residuos .....	26
3.2 Metodología del proceso constructivo de las probetas .....	26
3.2.1 Moldes de Caucho de Silicona.....	26
3.2.2 Metodología constructiva de las probetas.....	27
4. Ejecución de ensayos a Tracción de Hilos de Fique Alcalinizados de L= 250 mm .	30
4.1 Parámetros de ensayo.....	32
5. Análisis de los resultados de los ensayos mecánicos.....	33
5.1 Efecto de Tasa de Deformación en los parámetros mecánicos a tracción de los hilos de Fique Mercerizados .....	44
6. Conclusiones .....	48

7.	Recomendaciones .....	49
8.	Referencias Bibliográficas .....	50

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> <i>Datos iniciales para ensayos a tracción.</i> .....	33
<b>Tabla 2.</b> <i>Propiedades a tensión de la tasa de deformación <math>\varepsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	36
<b>Tabla 3.</b> <i>Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para <math>\varepsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	36
<b>Tabla 4.</b> <i>Propiedades a tensión de la tasa de deformación <math>\varepsilon = 0.001 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	39
<b>Tabla 5.</b> <i>Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para <math>\varepsilon = 0.001 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	39
<b>Tabla 6.</b> <i>Propiedades a tensión de la tasa de deformación <math>\varepsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	42
<b>Tabla 7.</b> <i>Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para <math>\varepsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	42

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> <i>Planta de fique</i> .....	17
<b>Figura 2.</b> <i>Fibra sin tratar</i> .....	20
<b>Figura 3.</b> <i>Fibra tratada</i> .....	20
<b>Figura 4.</b> <i>Relación entre la tensión de tracción y la tasa de deformación con diferentes longitudes de calibre.</i> .....	21
<b>Figura 5.</b> <i>Relación entre la carga de tracción máxima y la tasa de deformación con diferentes longitudes.</i> .....	22
<b>Figura 6.</b> <i>Carrete de hilo Nm=1050 m/kg</i> .....	23
<b>Figura 7.</b> <i>Proceso de mercerización</i> .....	25
<b>Figura 8.</b> <i>Secado y almacenado de los hilos mercerizados</i> .....	25
<b>Figura 9.</b> <i>Molde 3D utilizado para crear el molde de caucho siliconado.</i> .....	27
<b>Figura 10.</b> <i>Longitud libre de hilo por probeta.</i> .....	27
<b>Figura 11.</b> <i>Preparación de probetas:</i> .....	29
<b>Figura 12.</b> <i>Máquina MTS.</i> .....	31
<b>Figura 13.</b> <i>Montaje experimental.</i> .....	32
<b>Figura 14.</b> <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria <math>\varepsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	35
<b>Figura 15.</b> <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria <math>\varepsilon = 0.001 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	38
<b>Figura 16.</b> <i>Curva esfuerzo-deformación unitaria <math>\varepsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}</math></i> .....	41
<b>Figura 17.</b> <i>Deformación unitaria última en función de la tasa de velocidad de deformación.</i> ...	44
<b>Figura 18.</b> <i>Esfuerzo último en función de la tasa de deformación.</i> .....	45
<b>Figura 19.</b> <i>Módulo de elasticidad en función de la tasa de deformación.</i> .....	46

**Figura 20.** *Energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último en función de la tasa de deformación..... 47*

## Glosario

**Caracterización de Materiales:** se refiere al conjunto de técnicas y métodos utilizados para analizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de un material. La caracterización es esencial para comprender el comportamiento de un material bajo diferentes condiciones y para determinar su idoneidad para aplicaciones específicas.

**Fibras Naturales:** son materiales fibrosos que se obtienen de fuentes vegetales, animales o minerales. Se caracterizan por ser biodegradables y renovables, lo que las convierte en una alternativa sostenible para diversas aplicaciones industriales, incluyendo la fabricación de textiles y materiales compuestos.

**Fique:** es una fibra natural obtenida de la planta *Furcraea spp.*, que se cultiva principalmente en Colombia y otros países de América Latina. El fique se usa en la elaboración de productos como cuerdas, sacos y tapetes, y ha ganado interés en investigaciones por su potencial en aplicaciones sostenibles.

**Mercerización:** es un proceso químico aplicado a fibras naturales, como el algodón, que consiste en tratar la fibra con una solución de hidróxido de sodio (NaOH). Este proceso mejora propiedades como el brillo, la resistencia a la tracción y la afinidad por tintes.

**Módulo de Elasticidad:** conocido como módulo de Young, es una medida de la rigidez de un material. Describe la relación entre la tensión (fuerza aplicada por unidad de área) y la deformación (cambio de la longitud) en la región elástica de la curva esfuerzo-deformación.

**Resistencia a Tensión:** es la capacidad de un material para soportar fuerzas que tienden a estirarlo sin romperse. Se mide como la tensión máxima que un material puede soportar antes de fallar y se expresa en unidades de presión, como megapascales (MPa) o libras por pulgadas cuadrada (psi).

**Tasa de Deformación:** es una medida de la velocidad a la que se deforma un material bajo la acción de una carga. Se expresa como el cambio de longitud por unidad de tiempo (por ejemplo,  $s^{-1}$ ) y es un factor importante en la evaluación de las propiedades mecánicas de materiales en ensayos de tracción.

## Resumen

**Título:** 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\*

**Autora:** Silvia Nathalia Diaz Barrera\*\*

**Palabras clave:** Fibras naturales, Fique, Mercerización, Tasa de deformación, Caracterización de materiales, Resistencia a tensión, Módulo de elasticidad.

**Descripción:** La construcción sostenible ha evolucionado hacia la incorporación de materiales renovables y biodegradables. La fibra de fique se ha destacado en este contexto, mostrando mejoras considerables en sus propiedades mecánicas al ser combinada con otros materiales y sometida a tratamientos específicos. Investigaciones recientes han enfatizado la importancia de comprender cómo diferentes tasas de deformación afectan las propiedades mecánicas de las fibras naturales, incluyendo la fibra de fique. Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos de fibra de fique tratados mediante mercerización, a través de ensayos a tracción. Para ello, se realizaron diversas actividades, desde la preparación de los especímenes de hilos de fique, la mercerización de los mismos, hasta la ejecución de los ensayos a diversas tasas de deformación: una cuasi estática ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para simular una deformación lenta y controlada, una tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) simulando impactos vehiculares y una tasa alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) que representa efectos generados por terremotos o colisiones. La ejecución de los ensayos a tracción se llevó a cabo siguiendo el protocolo descrito en la norma ASTM C1557-20. Los resultados mostraron que el esfuerzo último varió entre 90.5 MPa y 319.8 MPa, con una deformación última entre 3.01% y el 5.20%. Los módulos de elasticidad oscilaron entre 2.75 GPa y 7.59 GPa, y la energía de deformación estuvo en un rango de 1.86 MPa y 7.94 MPa. El análisis reveló que, bajo tasas de deformación intermedias, los hilos de fique mercerizados presentan una respuesta óptima con relación a sus propiedades mecánicas. A tasas de deformación altas, se evidenciaron mejoras en las propiedades mecánicas; sin embargo, el módulo de elasticidad no presentó aumentos significativos, lo que indica que una mayor velocidad de deformación no incrementa necesariamente la rigidez del material. Por otro lado, las tasas bajas no generaron avances importantes y mostraron mayor dispersión en los resultados. Estos hallazgos son fundamentales para avanzar en el desarrollo de materiales compuestos sostenibles para aplicaciones en la construcción.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental. Codirector 1: Ricardo Alfredo Cruz Hernández- Ph.D. en Ingeniería Civil. Codirector 2: German Adolfo Diaz Ramírez. Ph.D. en Ingeniería de Materiales.

### Abstract

**Title:** Mechanical characterization in tension of mercerized fique fiber threads with L=250 mm under different strain rates within the VIE-UIS 3954 project\*

**Author:** Silvia Nathalia Diaz Barrera\*\*

**Keywords:** Natural fibers, fique, Mercerization, Strain rate, Material characterization, Tensile strength, Elastic modulus.

**Description:** Sustainable construction has evolved towards the incorporation of renewable and biodegradable materials. Fique fiber has emerged in this context, showing significant improvements in its mechanical properties when combined with other materials and subjected to specific treatments. Recent research has highlighted the importance of understanding how different strain rates affect the mechanical properties of natural fibers, including fique fiber. This study aims to evaluate the impact of strain rate on the mechanical properties of mercerized fique fiber threads through tensile testing. Various activities were carried out, from the preparation of the fique fiber thread specimens, their mercerization, to the execution of tensile tests at different strain rates: a quasi-static rate ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) to simulate slow and controlled deformation, an intermediate rate ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) simulating vehicular impacts, and a high rate ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) representing effects caused by earthquakes or collisions. The tensile tests were conducted following the protocol described in the ASTM C1557-20 standard. The results showed that ultimate stress varied between 90.5 MPa and 319.8 MPa, with ultimate strain ranging between 3.01% and 5.20%. The elastic modulus ranged between 2.75 GPa and 7.59 GPa, and the strain energy was in a range of 1.86 MPa to 7.94 MPa. The analysis revealed that under intermediate strain rates, mercerized fique threads exhibit an optimal response in terms of their mechanical properties. At high strain rates, improvements in mechanical properties were observed; however, the elastic modulus did not show significant increases, indicating that a higher strain rate does not necessarily enhance the material's stiffness. On the other hand, low strain rates did not produce significant improvements and showed greater dispersion in the results. These findings are essential for advancing the development of sustainable composite materials for construction applications.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero, Ph.D. in Civil and Environmental Engineering. Co-director 1: Ricardo Alfredo Cruz Hernández, Ph.D. in Civil Engineering. Co-director 2: German Adolfo Diaz Ramírez, Ph.D. in Materials Engineering.

## Introducción

La innovación en la construcción sostenible se ha convertido en una necesidad imperativa en los proyectos de infraestructura civil. Este enfoque implica la búsqueda e integración de materiales renovables y biodegradables, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental. En este contexto, diversos estudios han explorado el potencial de las fibras naturales, como las obtenidas de la planta de fique, que ofrecen propiedades mecánicas y estructurales favorables para aplicaciones en diferentes industrias. Estas fibras se caracterizan por su resistencia, ligereza y biodegradabilidad, lo que las convierte en una alternativa atractiva frente a los materiales sintéticos. Un ejemplo de ello es el estudio de Gómez Hoyos et al. (2012) en el que se investigó el efecto del tiempo y la aplicación de carga de tracción durante el tratamiento alcalino sobre las composición, estructura y propiedades mecánicas de las fibras de fique. Los resultados revelaron que las fibras tratadas durante 24 horas con una solución de NaOH al 5% bajo una tensión de 1 N aumentaron su módulo de elasticidad y resistencia a la tracción más que las tratadas sin tensión, pero con una desviación estándar mayor. Además, las fibras tratadas durante 4 horas con solución de NaOH al 5% bajo una tensión de 1 N lograron una mejora en las propiedades mecánicas con baja dispersión, aumentando su modulo en un 36% y su resistencia a la tracción en un 56% en comparación con las fibras no tratadas.

En conclusión, los tratamientos alcalinos bajo tensión optimizan el comportamiento mecánico de las fibras de fique, lo que puede ser beneficioso, ya que estas fibras podrían convertirse en un agente de refuerzo alternativo para matrices poliméricas, entre otras aplicaciones.

El hidróxido de sodio es un compuesto altamente alcalino que tiene la capacidad de penetrar y modificar la estructura de la celulosa que compone la fibra de fique. Entre otros beneficios, este tratamiento reduce la capacidad de la fibra para absorber agua, lo cual es favorable para sus propiedades mecánicas a tracción. En el estudio de Castro et al. (2007) se evaluaron las condiciones óptimas de mercerización para lograr una mejora de las propiedades mecánicas con un menor impacto ambiental. Se realizaron tratamientos alcalinos utilizando diferentes tiempos de exposición (10, 30, 60, 90, 120 y 300 min) y diversas concentraciones de NaOH (2.5%, 3.7% y 5.0%), junto con condiciones de secado a 25°C durante 72 horas y a 100°C en horno durante 20 horas. Los resultados mostraron que el comportamiento a tracción mejoró significativamente bajo estas condiciones, siendo el tratamiento con una concentración de NaOH del 5% y un tiempo de exposición de 30 minutos el que ofreció la mejor combinación de resistencia mecánica y proceso de tratamiento. Además, se reportó que la utilización de soluciones de hidróxido de sodio superiores al 10% puede ocasionar serios inconvenientes en su vertimiento, al requerir una costosa inversión en neutralización y disposición final.

En el caso de las fibras vegetales, como las de fique, la tasa de deformación es un parámetro crítico en la caracterización mecánica. Esta tasa define la velocidad con la cual una fibra responde ante la aplicación de una carga, afectando directamente sus propiedades mecánicas. En el estudio de Biswajit Mohapatra & Sasmita Kar, (2021) se demostró que diferentes tasas de deformación y longitudes de fibra generan comportamientos mecánicos divergentes. Al comparar las fibras de seda y sisal, se observó que la seda, con una longitud de 50 mm y una tasa de deformación media de 1 mm/min, mostró la mayor resistencia a tracción. En contraste, el sisal, sometido a una tasa de

deformación alta ( $5 \times 10^{-4}$  1/s) en fibras de la misma longitud (50 mm), exhibió una menor resistencia a la tracción, debido a su incapacidad para soportar cargas rápidas.

Estos hallazgos son aplicables a las fibras de fique, destacando la importancia de considerar cuidadosamente la tasa de deformación al caracterizar sus propiedades mecánicas. Con el objetivo de obtener información sobre el efecto de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos de fibra de fique de 250 mm de longitud, que fueron sometidos a un tratamiento previo de mercerización y a ensayos de tracción, se propuso este proyecto de grado en la modalidad de pasantía de investigación. Las actividades desarrolladas incluyeron la preparación de muestras de hilos de fique tratadas con hidróxido de sodio (NaOH), la realización de ensayos de tracción sobre las muestras previamente tratadas y el análisis de los datos obtenidos de dichos ensayos. Todo esto contribuyó al proyecto de investigación VIE-UIS 3954.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Desarrollar actividades experimentales en el marco del proyecto de investigación VIE-UIS 3954 que permitan caracterizar la respuesta mecánica a tracción de hilos de fique mercerizados de longitud de prueba  $L=250$  mm bajo diferentes tasas de deformación.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Preparar muestras de hilos de fique tratados con hidróxido de sodio (NaOH) designados para la realización de los ensayos a tracción estandarizados.
- Ejecutar ensayos de tracción a las muestras tratadas con hidróxido de sodio (NaOH), implementando diferentes tasas de deformación.
- Contribuir al tratamiento de datos de los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de la fibra de fique mercerizada.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Fibras De Fique

El fique es una fibra lignocelulósica (*Furcraea*) que tiene su origen en la América tropical, está presente en países como Colombia, Ecuador, Costa Rica y Brasil. Como se observa en la Figura 1, la planta de fique se caracteriza por un tallo erecto con una altura promedio de 2 a 7 metros y ancho promedio de 10 a 20 cm. El tronco está formado por alrededor de 75 a 100 hojas de 1 a 3 metros de largo; son carnosas, puntiagudas, bien dentadas y espinosas de color verde (Bastidas et al., 2022).

#### **Figura 1.**

*Planta de fique.*



*Nota.* Planta de Fique, Tomada de MATAMBA, (2021).

La fibra del fique se extrae de las hojas de la planta mediante un proceso que implica el cortado, desfibrado, lavado y secado. En esta etapa final, se estima que solamente del 4% al 5% de la masa de la planta será fibra seca. La fibra seca adquiere características como el color claro (blanco), rigidez, dureza y una alta resistencia, siendo estos atributos importantes en su comercialización en diferentes industrias.

Actualmente, esta fibra ha pasado de ser utilizada en la fabricación de embalajes y cordeles a convertirse en un material innovador en el sector de la construcción. Además de sus ventajas económicas debido a que su producción es sencilla y de amplia disponibilidad, la fibra de fique responde a la creciente demanda y la necesidad de implementar prácticas vinculadas a la construcción ecológica (Maria A.Navacerrada et al., 2014). Otros investigadores respaldan la capacidad de la fibra de fique para reemplazar materiales como la fibra de vidrio. En múltiples ensayos de laboratorio Giovanni Crasby Britton Orozco et al. (2017) evaluaron la resistencia de diversas probetas compuestas por mezclas de fique y polímeros, las cuales fueron sometidas a pruebas de resistencia axial y flexional tras un proceso de alcalinización para eliminar impurezas. Los investigadores destacaron que, además de exhibir buenas propiedades mecánicas, la producción de fibra de fique requiere menos de la mitad del impacto energético necesario en comparación con la fibra de vidrio.

## **2.2 Alcalinización de las Fibras de Fique**

El fique se compone principalmente de tres biopolímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es el componente que proporciona resistencia y estabilidad a las paredes celulares de la planta. Este glucano lineal consta de unidades de celobiosa conectadas por enlaces glicosídicos, formando una cadena larga, recta y plana, con resistencias teóricas de alrededor de 10 GPa (Maria A.Navacerrada et al., 2014).

Las microfibrillas de celulosa son las principales contribuyentes a la resistencia a la tracción de las fibras naturales. El ángulo de espiral (la inclinación entre las fibrillas y el eje de la

fibra) se caracteriza por una disposición helicoidal. Esta estructura en espiral es beneficiosa en términos de resistencia y flexibilidad, y afecta directamente las propiedades mecánicas de las fibras naturales debido al comportamiento anisotrópico de la celulosa (Maria A.Navacerrada et al., 2014).

Varios estudios han revelado que cuando las microfibrillas de celulosa se orientan en función al eje de tensión, las propiedades mecánicas de las fibras aumentan. Con esta premisa, se ha propuesto realizar un tratamiento a las microfibrillas de celulosa mediante compuestos alcalinos. El objetivo es reorganizar las microfibrillas en la dirección de la aplicación de la tensión, disminuir el ángulo de la espiral y aumentar la orientación molecular. Esto favorece la capacidad de carga de las fibras, puesto que distribuirá las cargas de manera más uniforme y desarrollará una mejor resistencia en la fibra (Maria A.Navacerrada et al., 2014).

El hidróxido de sodio es un compuesto altamente alcalino que, como se mencionó anteriormente, penetra y modifica la estructura de la celulosa durante la mercerización. Esto genera, entre otros beneficios, la disminución de la capacidad de la fibra para absorber el agua. Autores como Castro et al., (2007) han estudiado la necesidad de definir las condiciones de aplicación para tratamientos alcalinos, buscando un equilibrio a bajas concentraciones de hidróxido de sodio donde se obtenga un buen comportamiento mecánico. En el estudio, se apoyaron en parámetros como la concentración de la solución, el tiempo de exposición y el tipo de secado. Trabajaron con un 5% NaOH y soluciones alcalinas (w/w) de 2.5%, 3.7% y 5.0%.

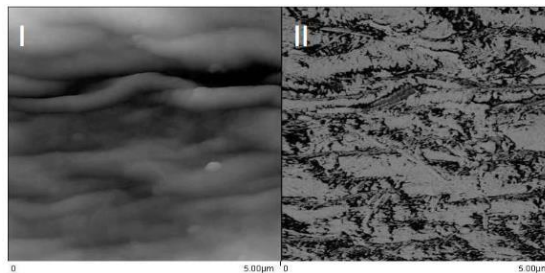
Los resultados mostraron que la fibra tratada con una concentración del 5% de NaOH durante 4 horas bajo una tensión de 1 Newton lograba mejorar las propiedades mecánicas

aumentando un 36% su módulo de elasticidad y un 56% su resistencia a la tracción en comparación con la fibra no tratada.

En las figuras 2 y 3 se muestran micrografías por AFM donde se observan las fibras de fique tratadas y sin tratar. Inicialmente en la fibra sin tratar se podían observar los componentes no celulósicos de la fibra brindando una sensación de matriz continua mientras que, en la fibra tratada, tiene lugar una remoción parcial de componentes no celulósicos como ligninas, hemicelulosas y pectinas lo cual mejora las propiedades mecánicas y reduce la absorción de humedad de la fibra.

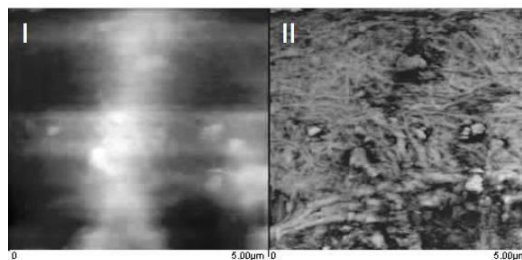
### Figura 2.

*Fibra sin tratar.*



### Figura 3.

*Fibra tratada.*



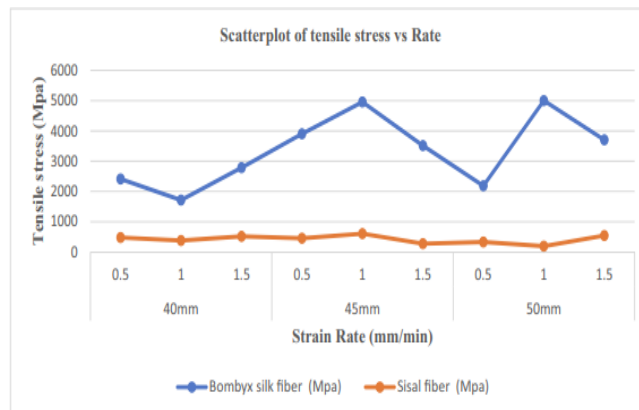
*Nota.* Tomada de Castro et al., (2007)

### 2.3 Efecto de la Tasa de Deformación en las propiedades mecánicas de las Fibras Vegetales a Tensión

La tasa de deformación influye en el comportamiento mecánico de fibras vegetales, definiendo su respuesta frente a distintos niveles de tensión. Varios investigadores han enfocado sus estudios en determinar el efecto de la tasa de deformación sobre la resistencia a la tracción de estas fibras. Por ejemplo Mohapatra & Kar, (2019) analizaron fibras de sisal y seda utilizando muestras con diferentes longitudes (40, 45 y 50 mm) y variadas velocidades de deformación (0.05, 1 y 1.5 mm/min) para evaluar su resistencia en distintos niveles de deformación. Estas velocidades se traducen en tasa de deformación unitaria ( $\dot{\epsilon}$ ) de  $2.08 \times 10^{-5}$ ,  $3.70 \times 10^{-4}$  y  $5 \times 10^{-4}$  1/s. Sus hallazgos revelaron que, al modificar la longitud de la muestra, la resistencia a tracción de una sola fibra de seda aumentaba cuando se mantenía una tasa de deformación constante. Además, observaron que a medida que la tasa de deformación aumentaba, la carga máxima disminuía progresivamente para una longitud de calibre específica. Esto evidencia una fuerte dependencia de la velocidad de deformación para alcanzar una mayor resistencia a la tracción en estas fibras.

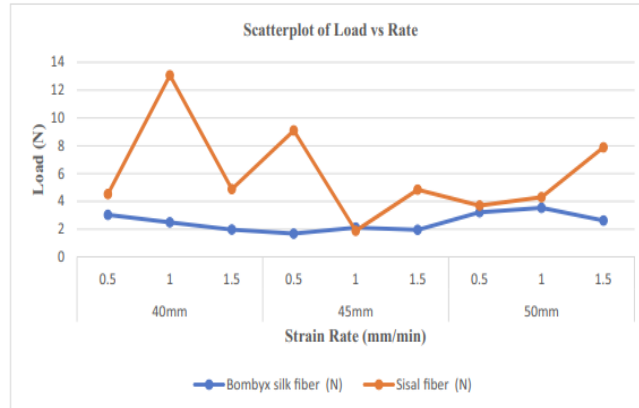
#### Figura 4.

*Relación entre la tensión de tracción y la tasa de deformación con diferentes longitudes de calibre.*



**Figura 5.**

*Relación entre la carga de tracción máxima y la tasa de deformación con diferentes longitudes.*



*Nota.* Tomado de Mohapatra & Kar, (2019)

El efecto de la tasa de deformación en matrices compuestas por polímeros y fibras naturales ha sido objeto de amplia investigación, como se abordó en el estudio de Nishida et al. (2020). En este trabajo se examinaron los efectos de diferentes velocidades de deformación en fibras de ramio (ortiga blanca) incorporadas en una matriz de PLA-PBAT (Ácido poliláctico, Poli (Butilén Adipato-Co-Tereftalato)).

Se desarrollaron matrices reforzadas con fibras de ramio que fueron tratadas previamente con soluciones al 5% y 20% de NaOH, además de fibras no tratadas. La selección del ramio se debió a las limitaciones mecánicas inherentes de los polímeros por sí mismos: el PLA exhibe fragilidad y baja resistencia al impacto, mientras que el PBAT se considera dúctil, pero presenta una resistencia reducida. La adición de fibras se plantea como un método efectivo para mejorar la resistencia del material compuesto.

Los resultados del estudio indicaron que la introducción de fibras en esta mezcla de polímeros aumentó la tensión máxima de los compuestos. Asimismo, se observó que la adición de fibra no tuvo un impacto significativo en el alargamiento hasta la rotura. Respecto a la tasa de deformación, se constató que un aumento en ésta conllevó a un incremento tanto en la tensión máxima como en el alargamiento hasta la rotura del compuesto. Finalmente, se concluyó que, específicamente para las fibras tratadas con NaOH al 20% en peso, se evidenció un aumento significativo en el alargamiento de rotura destacando así la influencia de dicho tratamiento en las propiedades mecánicas del material compuesto.

### 3. Metodología

#### 3.1 Tratamiento de las Fibras

Gracias a una donación de la empresa Coohilados del Fonce, se obtuvo un carrete de hilo de fibra de fique con una densidad de  $Nm=1050$  m/kg (Figura 6), el cual se utilizó como materia prima para el proceso de mercerización. Los hilos fueron sometidos a una rigurosa selección para garantizar la máxima calidad, eliminando cualquier mota o nudo presente.

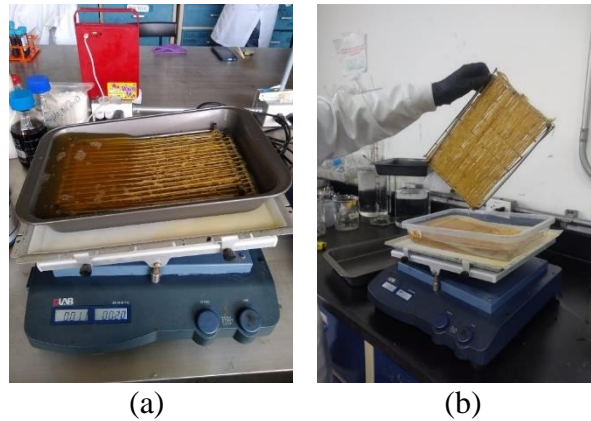
#### Figura 6.

*Carrete de hilo  $Nm=1050$  m/kg*



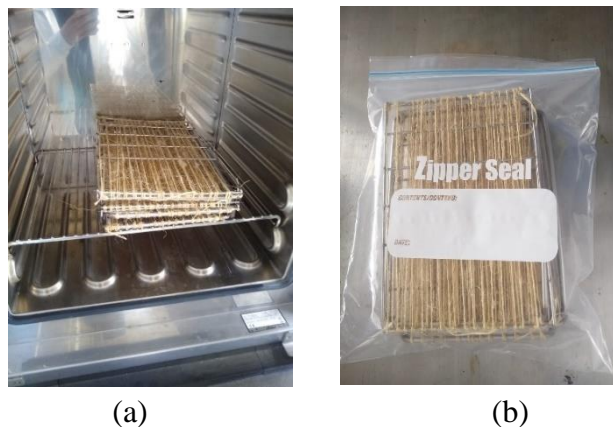
Las fibras se colocaron en un marco de acero inoxidable y se amarraron en ambos extremos para mantener una tensión uniforme antes de la mercerización. Esta configuración permitió una aplicación homogénea del tratamiento alcalino, asegurando una impregnación efectiva de todos los hilos y conservando la integridad del hilado. Además, se utilizaron bandejas de acero inoxidable para alojar los marcos con la solución de hidróxido de sodio, maximizando el contacto durante el proceso de mercerización.

El tratamiento con NaOH se llevó a cabo sumergiendo las fibras en una solución de hidróxido de sodio al 2.00% p/v, es decir, 20 gramos de NaOH por litro de agua ionizada. Esta bandeja con la solución se colocó en una plataforma oscilante, donde se mezclaron homogéneamente durante 20 minutos para completar el proceso de mercerización (Fig.7.a). Una vez transcurrido el tiempo necesario, se retiró el agua alcalina y se neutralizaron los hilos con agua ionizada. Para ello, se colocó nuevamente la bandeja con los hilos en la plataforma oscilante durante 20 minutos adicionales para asegurar una eliminación completa del exceso de hidróxido de sodio y cualquier residuo alcalino que pudiera afectar la calidad final del producto (Fig. 7.b). Este paso fue crucial para garantizar la neutralización efectiva y preservar las propiedades deseadas de los hilos.

**Figura 7.***Proceso de mercerización*

*Nota.* (a) mercerización de los hilos en plataforma oscilante y (b) neutralización de los hilos mercerizados.

Finalmente, los marcos con los hilos mercerizados se llevaron al horno, donde se secaron a una temperatura constante de 45°C durante 16 horas (Fig. 8.a). Al retirar los hilos del horno, se almacenaron inmediatamente en bolsas Ziploc para mantener una humedad óptima (Fig. 8.b).

**Figura 8.***Secado y almacenado de los hilos mercerizados*

*Nota.* (a) y almacenamiento de las fibras mercerizadas (b).

### ***3.1.1 Manejo de residuos***

En el manejo de los residuos de la solución de hidróxido de sodio, se implementaron las metodologías de disposición segura especificadas por el laboratorio LEAM, dada la alta concentración utilizada en el proceso de mercerización. El procedimiento consistió en transferir aproximadamente 1 litro del residuo de NaOH a un recipiente previamente acondicionado, empleando un embudo de vidrio para asegurar una transferencia controlada y segura. Durante esta operación, se utilizaron equipos de protección personal (EPP) adecuados, incluidos guantes y gafas de seguridad.

El recipiente fue etiquetado correctamente con la identificación de la solución y almacenado en el área designada dentro del laboratorio, en espera de su disposición final junto con otros residuos químicos.

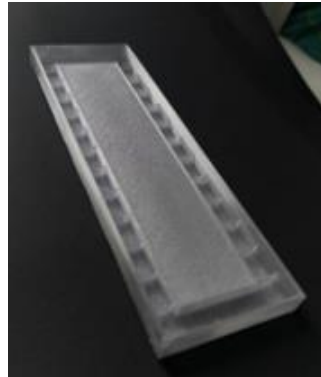
## **3.2 Metodología del proceso constructivo de las probetas**

### ***3.2.1 Moldes de Caucho de Silicona***

Para la fabricación de las probetas en resina, primero se imprimió un molde 3D con dimensiones 200 mm de largo, 640 mm de ancho y 12 mm de alto (Fig.9). Este molde 3D se utilizó para crear un molde de caucho siliconado, el cual se obtuvo mediante la mezcla de caucho de silicona con catalizador en una proporción del 4% de su peso, la mezcla se vertió en el molde 3D y se dejó curar durante 24 horas. Este molde de caucho tuvo como objetivo permitir la producción de 10 probetas con dimensiones de 40 x 15 x 4 mm.

**Figura 9.**

*Molde 3D utilizado para crear el molde de caucho siliconado.*



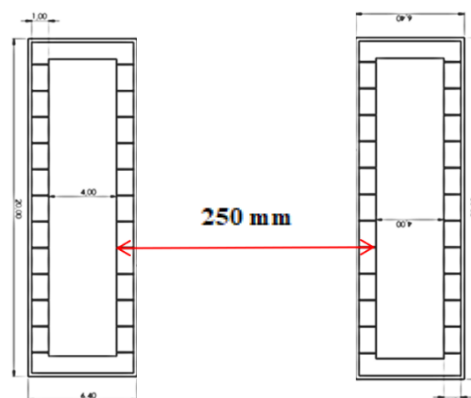
### 3.2.2 Metodología constructiva de las probetas

La metodología constructiva para las probetas de hilos de fique mercerizados se desarrolló de la siguiente manera:

- i. Se separaron los dos moldes de caucho de manera que se conservara la longitud libre de 250 mm en cada probeta. Esta medida se toma desde el borde interno de cada molde 3D como se observa en la Figura 10.

**Figura 10.**

*Longitud libre de hilo por probeta.*



- ii. Se añadió una capa de fibra de vidrio para aumentar la resistencia de las probetas y reducir el consumo de resina epóxica.
- iii. Los hilos se introdujeron en cada una de las 10 ranuras del molde y se fijaron con grapas para evitar desplazamientos y mantener la longitud deseada (Fig.11.a).
- iv. Parcialmente, se sellaron las ranuras con silicona caliente para prevenir la filtración de resina, lo que podría alterar las propiedades de la fibra (Fig.11.b).
- v. Se añadió una capa adicional de fibra de vidrio para fortalecer aún más las probetas.
- vi. Se preparó la resina epóxica utilizando 30 ml de resina y 30 ml de catalizador para la producción de 10 probetas. La mezcla se homogeneizó y se vertió en el molde, asegurándose de saturar completamente cada sección, eliminar las burbujas de aire y retirar el exceso de resina como se muestra en la Figura 11 (c). Los moldes curaron durante aproximadamente 12 horas.
- vii. Pasado ese tiempo, se pueden desmoldar y proceder al corte. Este se realiza con una sierra eléctrica, garantizando que las probetas tengan un ancho de 15 mm (Fig. 11.d).
- viii. Finalmente, este procedimiento se repitió seis veces para obtener un total de 60 probetas. Cada probeta se almacenó individualmente en bolsas Ziploc para preservar su integridad y mantener su nivel de humedad, asegurando así su preparación óptima para los ensayos de

tracción.

**Figura 11.**

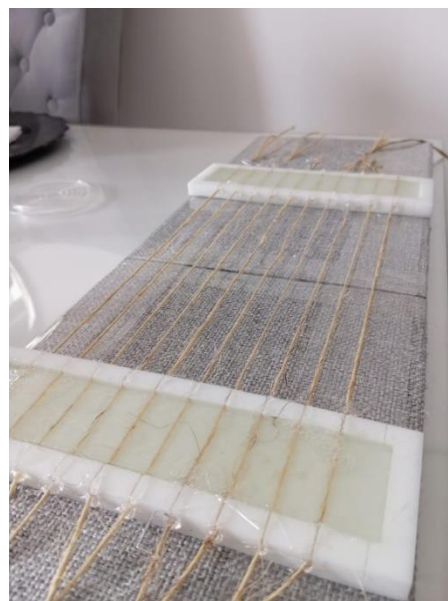
*Preparación de probetas:*



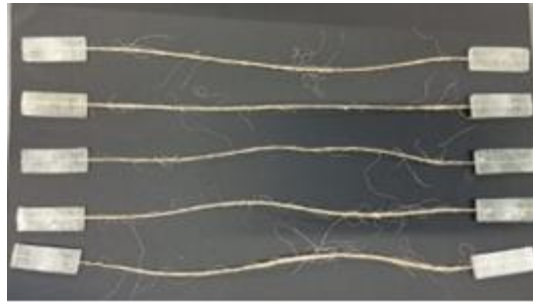
(a)



(b)



(c)



(d)

*Nota.* (a) representa los pasos i a iii, (b) y (c) representan el paso iv, v y vi, (d) representa el paso vii.

#### 4. Ejecución de ensayos a Tracción de Hilos de Fique Alcalinizados de L= 250 mm

Para la ejecución del ensayo a tracción, se siguió el protocolo descrito en la norma ASTM C1557-20 (Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, (2020), "Método de Ensayo Estándar para Resistencia a la Tracción y Módulo de Young de Fibras". Este método cubre la preparación, montaje y ensayo de fibras individuales para determinar la resistencia a la tracción y el módulo de Young a temperatura ambiente.

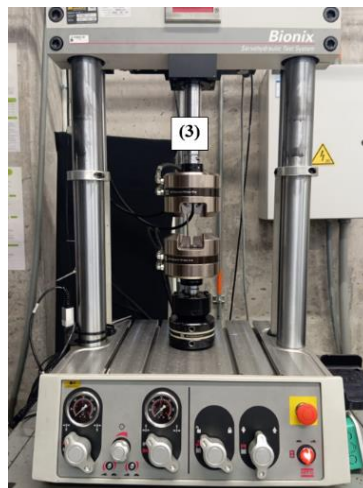
Según la norma ASTM C1557-20, el análisis de la resistencia de las fibras debe realizarse de la siguiente manera: se selecciona una de las probetas elaboradas con hilo, en este caso mercerizado, la cual se monta en una máquina de ensayo y se somete a un esfuerzo hasta su rotura, manteniendo una velocidad constante de desplazamiento de la cruceta. Para que un resultado se considere válido, la rotura de la fibra no debe ocurrir en la región de sujeción. La resistencia a la tracción se calcula a partir de la relación entre la fuerza máxima y el área de la sección transversal en el punto de fractura o en sus proximidades. Además, el módulo de Young se determina a partir

de la región lineal de la curva de esfuerzo-deformación unitaria de tracción (Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2020).

El ensayo se realizó utilizando la máquina universal de ensayos Landmark MTS SilentFlo 515 Hydraulic Power Unit de la Escuela de Ingeniería Mecánica (EIM), como se muestra en la Figura 12.

**Figura 12.**

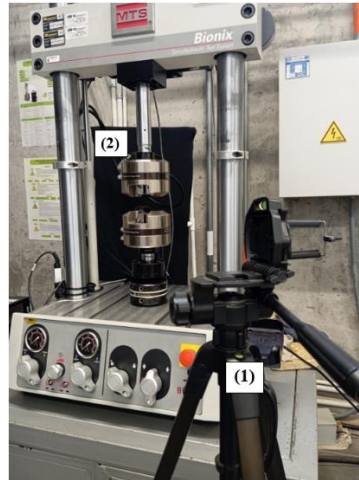
*Máquina MTS.*



Para el montaje experimental, se utilizó un trípode que permitió grabar cada ensayo (ver Fig. 13.1) y se colocó un telón negro de fondo para facilitar la grabación del momento de rotura de las fibras (ver Fig. 13.2).

**Figura 13.**

*Montaje experimental.*



*Nota.* vista del montaje (1) trípode (2) telar

#### **4.1 Parámetros de ensayo**

Los materiales pueden exhibir comportamientos diferentes bajo distintas tasas de deformación, por lo que es indispensable predecir su rendimiento bajo tasas de deformación relevantes. Por esta razón, se estudiaron tres tasas típicas para varios tipos de carga: una tasa de deformación lenta ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), que corresponde a un régimen cuasi-estático; una tasa de deformación intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), similar a la de un impacto de vehículo; y una tasa de deformación rápida ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), que se asemeja a las condiciones de terremotos y choques inducidos. Este análisis detallado es fundamental para optimizar el material según su uso específico, confirmar la validez de modelos teóricos y simulaciones, y asegurar la confiabilidad y durabilidad del material a lo largo del tiempo. En última instancia, este enfoque integral ayuda a

prevenir fallas catastróficas, mejorando la seguridad y la eficiencia bajo diversas condiciones de carga.

**Tabla 1.**

*Datos iniciales para ensayos a tracción.*

<b>Número de probetas</b>	20	20	20
<b>Tasa de deformación</b> $\dot{\epsilon}(e/s)(s^{-1})$	0.000067	0.001	0.01
<b>Velocidad de deformación</b> <b>correspondiente (<i>mm/min</i>)</b>	1.0	15	150
<b>Frecuencia de datos</b> <b>(<i>Datos/seg</i>)</b>	1.26	18.75	187.5

## 5. Análisis de los resultados de los ensayos mecánicos

A continuación, se describen y detallan los resultados de los ensayos realizados en el laboratorio de ensayos mecánicos de la EIM. En este proceso, se analizaron los datos obtenidos de desplazamiento y fuerza axial para calcular los valores de deformación unitaria y esfuerzo, con el fin de construir la curva esfuerzo-deformación correspondiente para cada tasa de deformación.

Para el cálculo de los esfuerzos ( $\sigma$ ), se utilizó la ecuación (1), que requiere el área de la sección transversal de los hilos de fibra de fique mercerizado. Esta área fue obtenida del estudio

desarrollado por Diaz, (2024) en el marco del proyecto VIE-UIS 3954. El área promedio de la sección transversal del hilo mercerizado fue de 0.736 mm<sup>2</sup>. La deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) se obtiene dividiendo el desplazamiento axial en la longitud inicial (2).

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

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

A partir de los datos de esfuerzo y deformación unitaria, se determinó el módulo de elasticidad ( $E_{0-80}$ ) en el rango correspondiente a la zona elasto-lineal. Este módulo se calculó obteniendo la pendiente de los datos comprendidos entre el 0% y el 80% del esfuerzo máximo ( $\Delta\sigma_{0-80}$ ) y las deformaciones unitarias ( $\Delta\varepsilon_{0-80}$ ) de acuerdo con la ecuación (3).

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

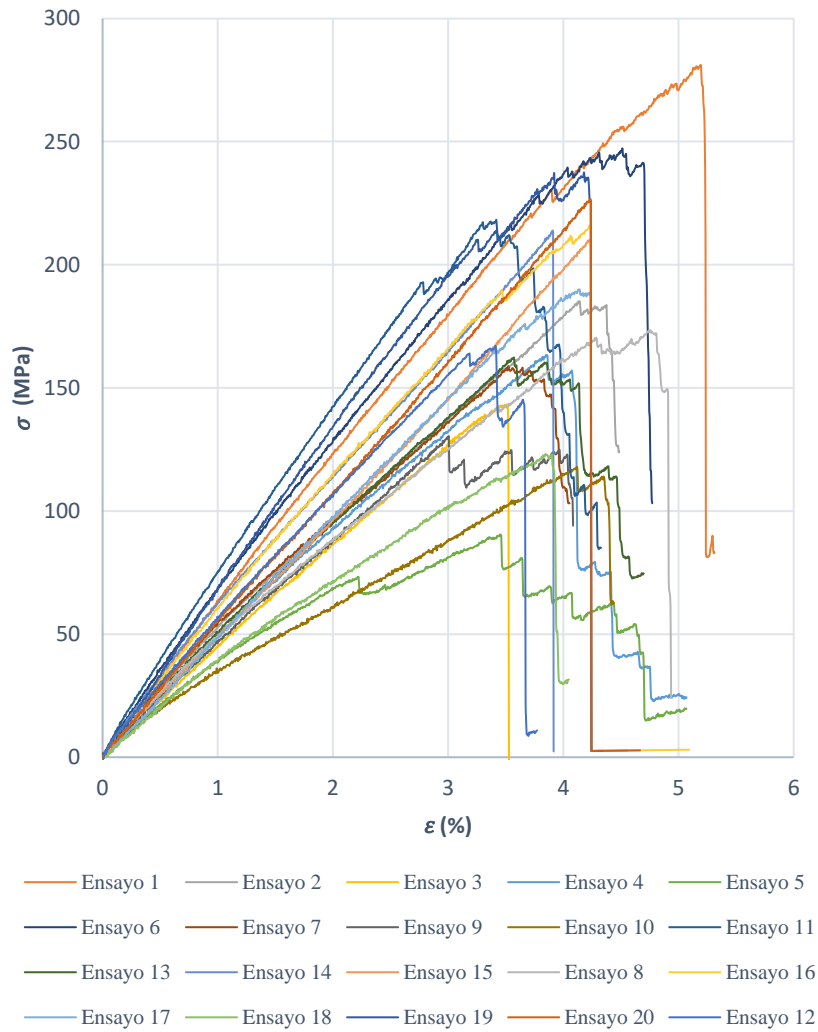
Además, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último, utilizando el método del trapecio. Este método proporciona una forma sencilla de calcular las áreas de los trapecios formados por pares consecutivos de puntos hasta el esfuerzo máximo. Finalmente, se suman estas áreas para obtener la energía de deformación ( $U_r$ ).

$$\text{Área}_i = \left(\frac{1}{2}\right) (\sigma_i + \sigma_{i+1})(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i) \quad (4)$$

A continuación, se muestra las curvas esfuerzo-deformación y tablas resumen de los resultados obtenidos para cada tasa de deformación:

**Figura 14.**

*Curva esfuerzo-deformación unitaria  $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ s}^{-1}$*



**Tabla 2.**

*Propiedades a tensión de la tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ s}^{-1}$*

Propiedades a tensión para $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ S}^{-1}$				
Ensayos	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	5.20	281.11	5.88	7.94
2	4.14	185.21	4.34	4.03
3	3.51	143.38	4.17	2.66
4	3.85	163.39	4.30	3.37
5	3.45	90.48	3.34	1.86
6	4.51	247.19	6.03	6.28
7	3.53	158.79	4.31	2.98
8	4.76	173.37	3.90	4.72
9	3.01	130.38	4.25	2.02
10	4.12	117.95	2.75	2.57
11	3.42	218.27	6.79	4.10
12	3.41	167.06	5.06	3.10
13	3.57	162.33	4.47	3.03
14	3.91	213.90	5.33	4.33
15	4.23	210.12	4.78	4.38
16	4.24	216.12	5.45	4.98
17	4.14	189.97	4.87	4.13
18	3.85	123.15	3.29	2.58
19	4.18	237.51	6.52	5.60
20	4.23	226.77	5.29	4.83

**Tabla 3.**

Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para  $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ s}^{-1}$

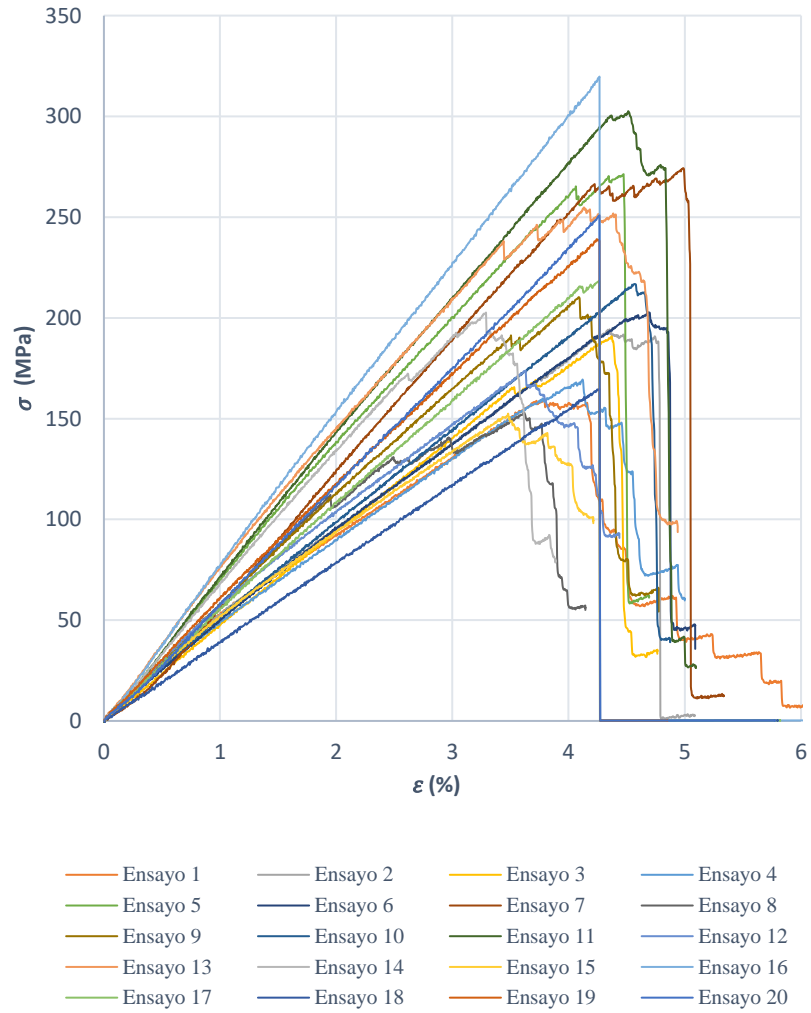
	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
$\bar{X}$	3.96	182.82	4.75	3.97
$\delta^2$	0.27	2377.56	1.13	2.28
$\delta$	0.52	48.76	1.06	1.51
<b>Cv</b>	13.2%	26.7%	22.4%	38.0%

*Nota.* media  $\bar{X}$ , varianza  $\delta^2$ , desviación estándar  $\delta$ , y coeficiente de variación Cv

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . El esfuerzo último promedio fue de 182.82 MPa con una desviación aproximada de 48.76 MPa. Esta dispersión relativamente alta puede deberse a la variabilidad del hilo o factores inherentes al proceso de ensayo. En cuanto a la deformación última, se obtuvo un promedio de 3.96% con un coeficiente de variación de 13.2%, lo cual indica una baja dispersión de los datos, mostrando que las deformaciones alcanzadas son relativamente consistentes entre los diferentes ensayos. A partir de las curvas de esfuerzo-deformación mostradas en la Figura 9, se determinó el módulo de elasticidad en la zona elástico-lineal de cada curva, el promedio de este parámetro fue de 4.75 GPa con una desviación estándar aproximada de 1.06 GPa y un  $Cv = 22.4\%$ , lo que sugiere una variabilidad media en la respuesta elástica del material, aunque se mantiene dentro de un rango aceptable. Finalmente, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo máximo para cada curva, obteniendo un valor promedio de energía de 3.97 MPa con una desviación estándar de 1.51 MPa. Esta magnitud, relacionada con la capacidad de absorción de energía del material antes de la falla, muestra una dispersión moderada.

**Figura 15.**

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



**Tabla 4.**

*Propiedades a tensión de la tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$*

<b>Propiedades a tensión para <math>\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ S}^{-1}</math></b>				
Ensayos	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	3.79	159.61	4.07	3.28
2	4.35	194.40	4.37	4.44
3	4.37	190.92	4.68	4.40
4	4.12	169.46	4.17	3.75
5	4.47	271.37	6.65	6.65
6	4.68	202.80	4.46	5.07
7	4.99	274.30	6.57	7.55
8	3.62	153.11	5.77	3.29
9	4.09	210.28	5.42	4.59
10	4.56	216.81	4.71	5.07
11	4.51	302.63	6.97	7.13
12	3.63	173.83	4.73	3.38
13	4.13	254.83	6.88	5.93
14	3.29	202.68	6.68	3.56
15	3.48	152.51	4.33	2.84
16	4.27	319.77	7.59	6.91
17	4.26	218.41	5.23	4.86
18	4.27	164.65	3.91	3.55
19	4.24	239.10	5.70	5.23
20	4.27	250.90	5.89	5.31

**Tabla 5.**

*Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para  $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$*

	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
$\bar{X}$	4.17	216.12	5.44	4.84
$\delta^2$	0.18	2485.90	1.29	1.98
$\delta$	0.42	49.86	1.14	1.41
<b>Cv</b>	10.2%	23.1%	20.9%	29.1%

*Nota.* media  $\bar{X}$ , varianza  $\delta^2$ , desviación estándar  $\delta$ , y coeficiente de variación Cv.

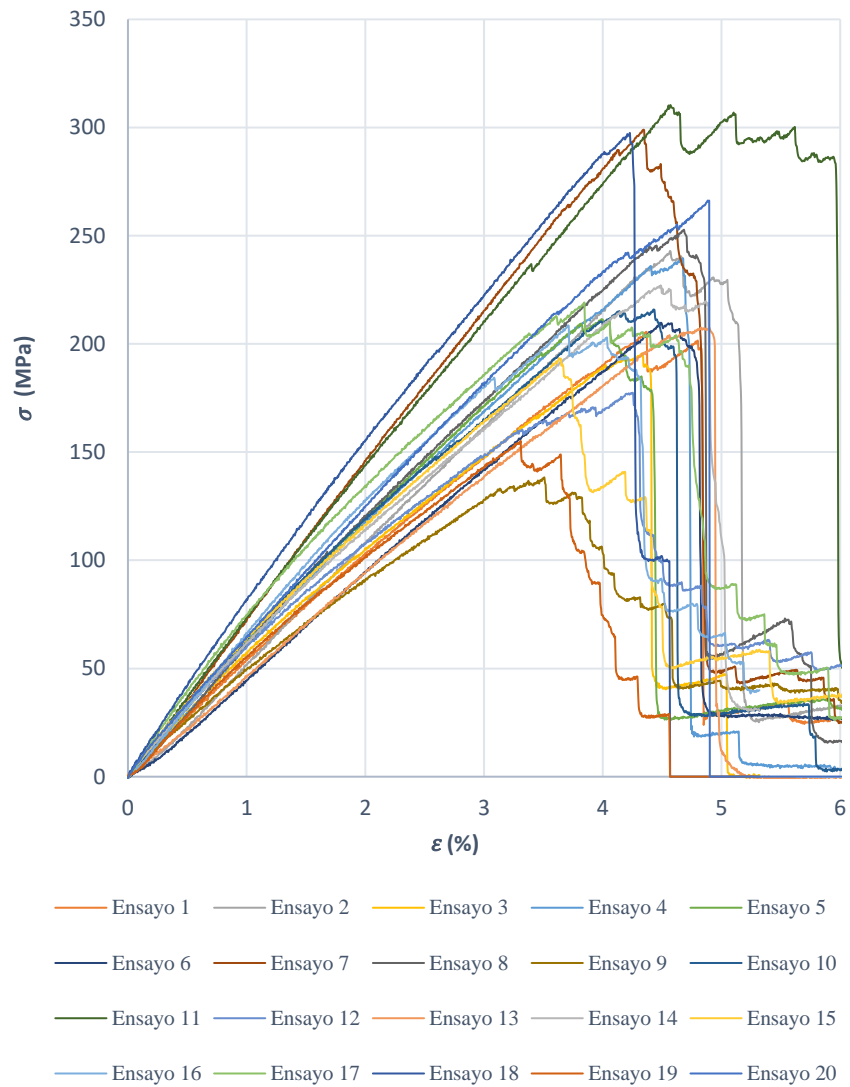
En la Tabla 4 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación de  $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . El esfuerzo último promedio fue de 216.12 MPa con una desviación aproximada de 49.86 MPa, lo que sugiere una moderada variabilidad en la resistencia del fique mercerizado a una tasa de deformación intermedia. Este nivel de dispersión indica que, aunque el material muestra una resistencia promedio considerable, existe variabilidad notable entre las muestras, probablemente influenciada por factores como el proceso de mercerización de los hilos. En cuanto a la deformación última, esta alcanza un promedio de 4.17%, con una desviación estándar que se traduce en un coeficiente de variación de 10.2%. Este coeficiente de variación indica una baja dispersión en los valores de deformación última respecto al promedio, lo que refleja una consistencia en la capacidad del fique mercerizado para deformarse antes de fallar. Además, observando los resultados obtenidos con la tasa de deformación más baja, se concluye que a velocidades intermedias se alcanzan mayores deformaciones con una menor dispersión en los datos.

A partir de las curvas de esfuerzo-deformación mostradas en la Figura 15, se determinó el módulo de elasticidad, cuyo promedio fue de 5.44 GPa con una desviación estándar de 1.14 GPa y un  $C_v=20.9\%$ , lo que sugiere una variabilidad en la respuesta elástica del material, aunque se encuentra dentro de un rango aceptable. Además, se concluye que a velocidades de deformación media el material es más rígido y presenta una menor dispersión en los datos en comparación con los resultados obtenidos para la tasa de deformación baja. Finalmente, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo máximo para cada curva, obteniendo un valor promedio de energía de 4.84 MPa con una desviación estándar de 1.41 MPa y un coeficiente de variación de 29.1%. Esta magnitud, que refleja la capacidad de absorción de energía del material

antes de la falla, sugiere que los hilos mercerizados tienen una capacidad moderada de absorción de energía.

**Figura 16.**

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



**Tabla 6.**

*Propiedades a tensión de la tasa de deformación  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$*

<b>Propiedades a tensión para <math>\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ S}^{-1}</math></b>				
Ensayos	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	4.37	205.6	4.76	4.74
2	4.57	243.0	5.49	5.58
3	4.34	195.8	4.66	2.00
4	4.67	239.5	5.50	6.11
5	3.99	211.5	5.49	4.61
6	4.49	209.8	4.83	4.72
7	4.34	299.0	7.20	6.75
8	4.68	252.8	5.71	6.34
9	3.51	138.3	4.19	2.74
10	4.43	215.9	5.42	5.46
11	4.57	310.4	6.99	7.33
12	4.25	177.4	4.77	4.51
13	4.90	207.6	4.67	5.47
14	4.49	227.0	5.22	5.50
15	3.63	193.4	5.29	3.78
16	3.71	208.6	6.07	4.21
17	3.85	219.2	6.00	4.78
18	4.23	297.4	7.30	6.74
19	3.31	155.1	4.68	2.76
20	4.90	266.3	5.97	7.11

**Tabla 7.**

*Medidas de tendencia central y dispersión de las propiedades obtenidas para  $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$*

	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
$\bar{X}$	4.26	223.68	5.51	5.06
$\delta^2$	0.21	2052.27	0.77	2.20
$\delta$	0.45	45.30	0.88	1.48
<b>Cv</b>	10.7%	20.3%	15.9%	29.3%

*Nota.* media  $\bar{X}$ , varianza  $\delta^2$ , desviación estándar  $\delta$ , y coeficiente de variación Cv

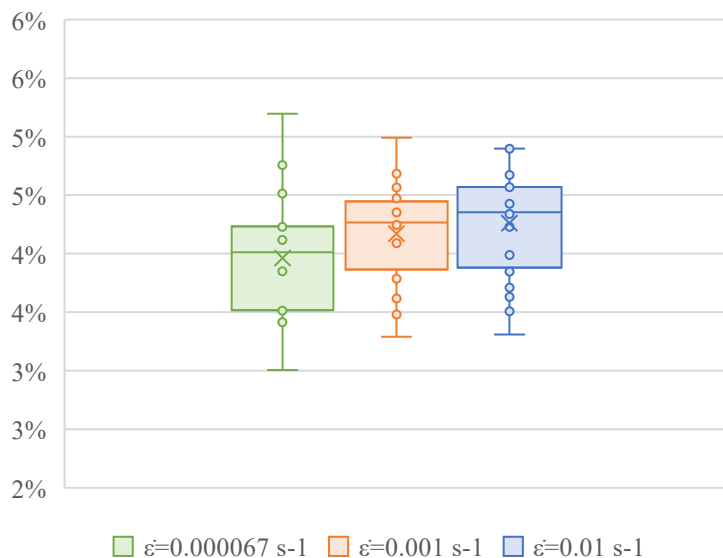
En la Tabla 6 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados con una tasa de deformación de  $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . El esfuerzo último promedio fue de 223.68 MPa con una desviación aproximada de 45.30 MPa, a deformación última obtuvo un promedio de 4.26% con un coeficiente de variación de 10.7%. A partir de las curvas de esfuerzo-deformación mostradas en la Figura 16, se determinó el módulo de elasticidad, el promedio de este parámetro fue de 5.51 GPa con una desviación estándar de 0.88 GPa y un  $C_v=15.9\%$ . Por último, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo máximo para cada curva, obteniendo un valor promedio de energía de 5.06 MPa con una desviación estándar de 1.48 MPa. Estos resultados sugieren que, aunque un aumento en la velocidad de deformación puede mejorar las propiedades mecánicas del material, este incremento no es tan significativo como el observado entre las tasas de deformación más bajas y las intermedias. Este hallazgo es importante, ya que indica que hay un umbral en la tasa de deformación a partir del cual el beneficio en las propiedades mecánicas se vuelve marginal. Los coeficientes de dispersión son medianamente similares a los encontrados en las muestras sometidas a velocidades medias, lo que implica que el comportamiento mecánico del fique mercerizado tiende a ser predecible en un rango intermedio de velocidades. Sin embargo, el hecho de que un aumento considerable en la tasa de deformación no produzca un impacto significativo en las propiedades mecánicas, sugiere que el material puede no ser capaz de adaptarse de manera uniforme a cargas dinámicas altas.

### 5.1 Efecto de Tasa de Deformación en los parámetros mecánicos a tracción de los hilos de Fique Mercerizados

Para analizar las propiedades mecánicas de los hilos de fique mercerizados a diferentes tasas de deformación, se utilizaron diagramas de caja y bigotes como herramienta visual. Estos diagramas permiten observar de forma clara la media, los cuartiles y los valores atípicos, facilitando la comprensión de la dispersión y la tendencia central de los datos. Esta representación gráfica es útil para identificar patrones en la variabilidad y posibles anomalías en las muestras analizadas.

#### Figura 17.

*Deformación unitaria última en función de la tasa de velocidad de deformación.*

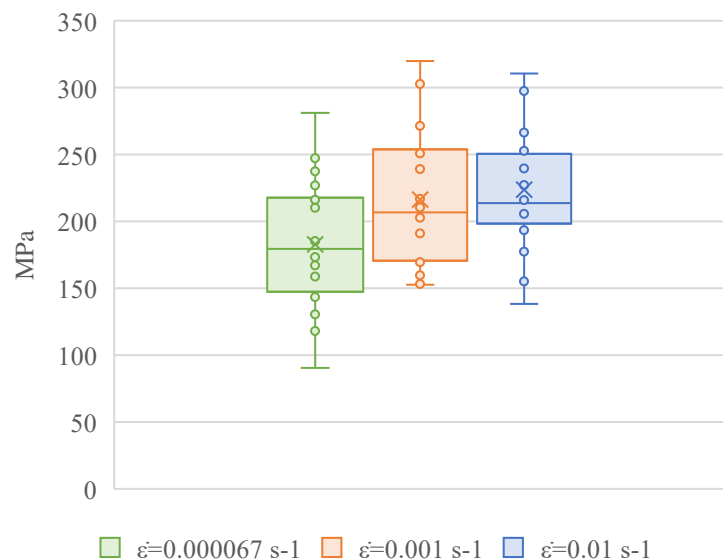


En la Figura 17, se observa que la deformación última permanece entre el 4.0% - 4.5% para las tres tasas de deformación, aunque se evidencia un ligero aumento de esta propiedad a medida que incrementa la tasa de deformación. Además, se puede concluir que hay una dispersión relativamente alta de los datos, especialmente en las tasas de deformación bajas e intermedias,

donde se presentan los valores atípicos más significativos. Por último, se observa que, en la tasa de deformación más alta, los hilos mostraron un comportamiento más consistente y predecible, aunque la deformación unitaria no muestra un aumento considerable en comparación con la tasa intermedia.

### Figura 18.

*Esfuerzo último en función de la tasa de deformación.*

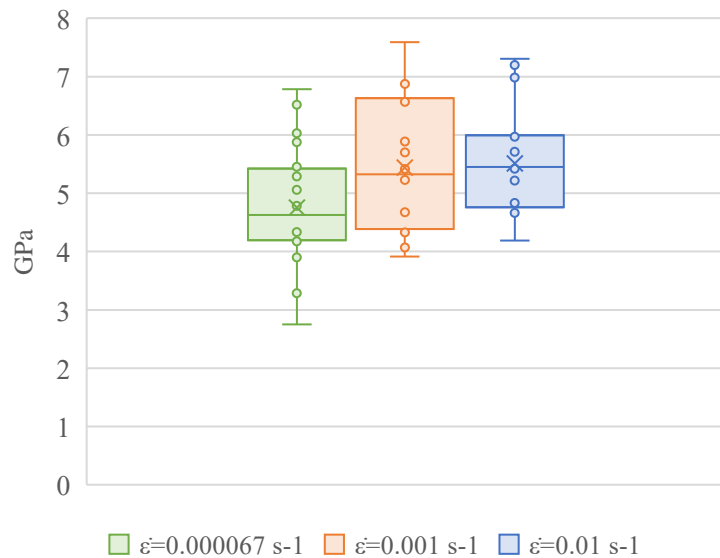


En la Figura 18, se observa que el esfuerzo aumenta a medida que se incrementa la tasa de deformación, en un rango promedio que va de 150 MPa a 250 MPa. Sin embargo, el incremento del esfuerzo en la tasa de deformación más alta no es tan representativo como el observado entre la tasa baja e intermedia. Además, se puede notar que las tres tasas de deformación presentan una dispersión media en sus datos, siendo especialmente significativos los datos atípicos en la tasa de deformación más baja. Por otro lado, aunque la tasa de deformación más alta muestra algunos

valores atípicos, también es la más consistente en términos de sus datos promedio de esfuerzo último.

### Figura 19.

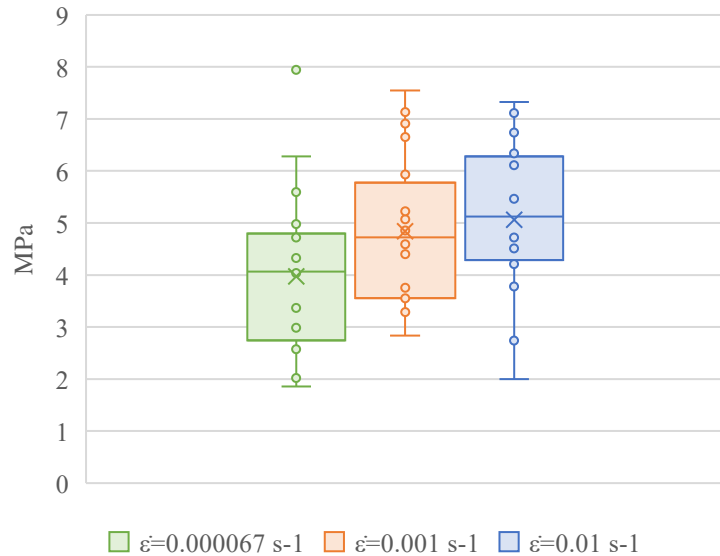
*Módulo de elasticidad en función de la tasa de deformación.*



En la Figura 19, se observa que el promedio del módulo de elasticidad para las diferentes tasas de deformación se encuentra entre 4.0 GPa y 6.0 GPa, con un incremento significativo entre la tasa de deformación baja e intermedia. Sin embargo, la tasa de deformación alta muestra un valor de módulo similar al de la tasa de deformación intermedia. Este comportamiento puede explicarse por las propiedades viscoelásticas que presenta el hilo mercerizado; al aplicar una carga a velocidades tan altas el hilo no tiene tiempo suficiente para relajarse, lo cual puede limitar la capacidad del material para adaptarse a las tensiones afectando la rigidez de las muestras.

**Figura 20.**

*Energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último en función de la tasa de deformación.*



En la Figura 20, se observa un aumento en los valores promedio de energía absorbida a medida que aumentan las tasas de deformación. Sin embargo, el incremento entre la energía obtenida para las tasas de deformación intermedias y altas no es significativo, situándose el rango de valores promedio entre 4.0 MPa y 5.0 MPa. Además, se aprecia una alta dispersión de los datos en las tasas bajas y altas, lo que sugiere que, en las tasas intermedias, se optimiza la absorción de energía. Esto indica que los hilos mercerizados tienen una mayor capacidad para absorber energía bajo condiciones de carga moderadas.

## 6. Conclusiones

En la caracterización mecánica de los hilos de fique mercerizados sometidos a ensayos a tracción en la máquina MTS, los datos obtenidos muestran que el esfuerzo último, la deformación última, el módulo de elasticidad y la energía de deformación oscilan entre 90.5 MPa y 319.8 MPa, 3.01% y 5.20%, 2.75 GPa y 7.59 GPa, y 1.86 MPa y 7.94 MPa, respectivamente.

Dado que en los diagramas de caja y bigotes se mostró el comportamiento de las tres tasas de deformación para las diferentes propiedades estudiadas, se observa lo siguiente:

La deformación unitaria última aumenta con la tasa de deformación, lo que indica que los hilos de fique mercerizados soportan mayores esfuerzos antes de fallar. Sin embargo, se observa mayor dispersión en la tasa más baja, reflejando variabilidad en la respuesta a deformaciones lentas. El esfuerzo último incrementa significativamente con la tasa de deformación, con mayor dispersión en las tasas intermedias, lo que sugiere un comportamiento más variable en este rango. En las tasas más altas, aunque el aumento en esfuerzo es menor, la dispersión disminuye. El módulo de elasticidad también aumenta con la tasa de deformación, aunque la dispersión es mayor en la tasa intermedia y menor en la más alta. A pesar de esto, el valor promedio del módulo no muestra un incremento significativo entre las tasas intermedia y alta, lo que sugiere que aumentar la velocidad de deformación no siempre contribuye a un aumento en la rigidez del material. Por último, la energía de deformación por unidad de volumen también aumenta con la tasa de deformación, aunque se observan valores atípicos en la tasa más alta, indicando una mayor variabilidad debido a la sensibilidad del material bajo condiciones extremas.

En el análisis de las tres tasas de deformación seleccionadas, se compararon las propiedades mecánicas de los hilos de fique mercerizados, como el esfuerzo último, el módulo de elasticidad y la energía de deformación por unidad de volumen. Los resultados muestran que la tasa de deformación intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) ofrece un mejor desempeño en términos de resistencia, rigidez y capacidad de absorción de energía, con una dispersión de datos moderada y pocos valores atípicos, lo que sugiere una respuesta confiable ante impactos vehiculares. La tasa más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), aunque también presenta una mejora en las propiedades mecánicas, exhibe un comportamiento más impredecible y menos significativo en comparación con la tasa intermedia. Por otro lado, la tasa cuasi-estática ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) muestra menor resistencia y capacidad de absorción de energía, lo que indica que el fique mercerizado es más susceptible a deformarse sin alcanzar esfuerzos elevados en condiciones de carga lenta, limitando su efectividad en aplicaciones de mayor exigencia.

## 7. Recomendaciones

La presencia de valores atípicos en los resultados de las propiedades mecánicas para cada tasa de deformación indica la necesidad de implementar una revisión más detallada de las causas de estas diferencias y de mejorar el proceso de mercerización del hilo.

## 8. Referencias Bibliográficas

- Bastidas, K. G., Pereira, M. F. R., Sierra, C. A., & Zea, H. R. (2022). Study and characterization of the lignocellulosic Fique (*Furcraea Andina* spp.) fiber. *Cellulose*, 29(4), 2187–2198. <https://doi.org/10.1007/S10570-021-04377-6/FIGURES/8>
- Biswajit Mohapatra, & Sasmita Kar. (2021). A comparative study on tensile strength of silk and sisal fibre by regression modelling | Signed in. 41, 455–460. <https://www-scopus-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85103793835&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=e526e04cf7d9be55c2d986a8c65ddff6&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28A+comparative+study+on+tensile+strength+of+silk+and+sisal+fibre+by+regression+modelling%29&sl=102&sessionSearchId=e526e04cf7d9be55c2d986a8c65ddff6>
- Castro, C., Palencia, A., Gutiérrez, I., Vargas, G., & Gañán, P. (2007). Determination of optimal alkaline treatment conditions for fique fiber bundles as reinforcement of composites materials | Determinación de condiciones óptimas para el tratamiento alcalino de fibras de fique empleadas como reforzantes de materiales compues. *Revista Tecnica de La Facultad de Ingenieria Universidad Del Zulia*, 30(2), 136–142. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0254-07702007000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=en](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0254-07702007000200004&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- Diaz, 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* [Universidad Industrial de Santander]. <https://noesis.uis.edu.co/items/4d93e18b-0cd5-445d-b018-c4bdec7d95e3>

- Giovani Crasby Britton Orozco, Andrés Felipe García, Laura Marcela Martínez, Nataly Neira, & Sandra Milena Vargas Pineda. (n.d.). *Fibra de fique reemplazaría la de vidrio*. Retrieved November 18, 2023, from <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/fibra-de-fique-reemplazaria-la-de-vidrio>
- Gómez Hoyos, C., Alvarez, V. A., Rojo, P. G., & Vázquez, A. (2012). Fique fibers: Enhancement of the tensile strength of alkali treated fibers during tensile load application. *Fibers and Polymers*, *13*(5), 632–640. <https://doi.org/10.1007/S12221-012-0632-8/METRICS>
- Maria A.Navacerrada, Cesar Diaz, & Patricia Fernandez. (2014). Characterization of Material Based on Short Natural Fique Fibers. *BIORESOURCES*, *9*(2), 3480–3496.
- MATAMBA. (n.d.). *MATAMBA ARTESANAL*.
- Mohapatra, B., & Kar, S. (2019). A comparative study on tensile strength of silk and sisal fibre by regression modelling. *Materials Today: Proceedings*, *41*, 455–460. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.249>
- Nishida, M., Deng, F., Ito, H., & Fukuda, N. (2020). Effects of deformation rate on tensile properties of ramie fiber/PLA/PBAT composites. *ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials*. <https://www-scopus-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/record/display.uri?eid=2-s2.0-85084162322&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&sid=5a3c69eb567fc31c1678afd8ad9ddd2d&sot=b&sdt=b&s=TITLE-ABS-KEY%28Effects+of+deformation+rate+on+tensile+properties+of+ramie+fiber%2FPPLA%2FPBAT+composites%29&sl=99&sessionSearchId=5a3c69eb567fc31c1678afd8ad9ddd2d>

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

<https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM%7CC1557-20%7Cen-US>