

Caracterización mecánica a tracción de hilos de fibra de fique con longitud  $L=250$  mm bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954

Laura Stefani González Pire

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil

Director

José Miguel Benjumea Royero

Ph. D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Codirector 1

German Adolfo Diaz Ramírez

Ph. D. en Ingeniería de Materiales

Codirector 1

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ph. D. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a mi familia, quienes, con su amor incondicional, apoyo y paciencia me han dado la fuerza para llegar hasta aquí. A mis padres, Oscar y Adriana, quienes, con su ejemplo de esfuerzo y dedicación, me enseñaron el valor del trabajo y la constancia. Su apoyo y sus consejos han sido mi guía en cada paso de este camino, y sus enseñanzas estarán siempre presentes.

A mis hermanos, Diego, Duvan y Valentina, por ser mis compañeros de vida y quienes siempre han estado ahí para mí. Gracias por compartir conmigo cada logro, cada desafío, cada aprendizaje y por ser mi inspiración en los momentos de dificultad.

A mis gaticas, Valkiria y Rayas, por su compañía y ronroneo reconfortante que me han acampado en mis jornadas de estudio.

Finalmente, dedico también este trabajo a cada persona que se cruzó en mi camino durante estos años. Sus palabras de aliento, sus consejos y su apoyo incondicional han sido fundamentales para mí. Cada uno de ustedes ha dejado huella en mi vida y en este trabajo, su ayuda ha sido esencial.

### **Agradecimientos**

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad Industrial de Santander por ser mi hogar académico durante estos años y por brindarme la oportunidad de realizar esta investigación apoyándome con los recursos necesarios para llevar a cabo este trabajo.

A mi director y a mis codirectores de trabajo de grado, les agradezco infinitamente su guía, paciencia y conocimientos. Sus valiosas orientaciones han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Su apoyo y sus perspectivas enriquecedoras han contribuido significativamente.

A mi familia, mi fuente de inspiración, les agradezco su amor, su paciencia y apoyo incondicional. Su confianza en mí ha sido mi motor para superar los obstáculos y alcanzar mis metas. Siempre han creído en mis capacidades y me han animado a seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles.

Y por último a mis amigos de la universidad, por los momentos de estudio y compañerismo. Gracias por hacer de esta etapa una de las mas enriquecedoras de mi vida.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	10
1. Objetivos .....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco Teórico .....	14
2.1 Fibras Naturales .....	14
2.2 Fique .....	15
2.3 Tasa de deformación.....	17
3. Caracterización mecánica a tracción de los hilos de fique crudos. ....	18
3.1. Descripción de la materia prima.....	18
3.2 Preparación de las probetas.....	18
3.2.1 Moldes de caucho de silicona.....	18
3.2.2 Diseño de las probetas.....	19
4. Ejecución de los ensayos.....	21
4.1 Parámetros de ensayo.....	23
5. Análisis de los resultados de ensayos mecánicos.....	24
5.1 Efecto de la tasa de deformación en los parámetros mecánicos.....	31
6. Conclusiones .....	36
7. Recomendaciones .....	37
Referencias Bibliográficas .....	38

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Datos para los ensayos</i> .....	23
Tabla 2 <i>Propiedades mecánicas de la fibra de fique con <math>\dot{\epsilon}=6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	25
Tabla 3 <i>Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para los hilos de fique ensayados a <math>\dot{\epsilon}=6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	26
Tabla 4 <i>Propiedades mecánicas de la fibra de fique con <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	27
Tabla 5 <i>Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para hilos ensayados a <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	28
Tabla 6 <i>Propiedades mecánicas de la fibra de fique <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	30
Tabla 7 <i>Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para hilos ensayados a <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	30

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Clasificación de las fibras vegetales.</i> .....	15
Figura 2 <i>Ejemplo de la planta de fique.</i> .....	16
Figura 3 <i>Fibra de fique.</i> .....	17
Figura 4 <i>Carrete de hilo de fique crudo.</i> .....	18
Figura 5 <i>Proceso constructivo del molde de caucho de silicona.</i> .....	19
Figura 6 <i>Preparación de las probetas.</i> .....	20
Figura 7 <i>Aplicación de silicona en las ranuras y vertido de la mezcla de resina en el molde.</i> .....	20
Figura 8 <i>Desmolde (a) y corte de las probetas (b).</i> .....	21
Figura 9 <i>Montaje experimental.</i> .....	22
Figura 10 <i>Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a <math>\dot{\epsilon}=6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	25
Figura 11 <i>Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	27
Figura 12 <i>Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a <math>\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}</math></i> .....	29
Figura 13 <i>Deformación unitaria última en función de la tasa de deformación.</i> .....	32
Figura 14 <i>Esfuerzo último en función de la tasa de deformación.</i> .....	32
Figura 15 <i>Módulo de elasticidad en función de la tasa de deformación.</i> .....	33
Figura 16 <i>Energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último en función de la tasa de deformación.</i> .....	34

## Glosario

**Deformación:** cambio en la forma o tamaño de un cuerpo debido a la aplicación de una fuerza externa.

**Deformación unitaria:** relación entre el cambio de longitud de un material y su longitud original.

**Esfuerzo:** fuerza interna por unidad de área que resiste a la deformación de un material.

**Esfuerzo último:** máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de fallar

**Falla:** ruptura o pérdida de la capacidad de un material para soportar la carga.

**Fique:** fibra natural obtenida de la planta de fique, utilizada en productos como textiles y artesanías

**Módulo de elasticidad:** medida de rigidez de un material

**Resistencia a tracción:** capacidad que tiene un material para resistir fuerzas a tracción antes de fallar.

**Tracción:** esfuerzo aplicado a un material.

## Resumen

**Título:** Caracterización mecánica a tracción de hilos de fibra de fique con longitud  $L=250$  mm bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954

**Autor:** Laura Stefani González Pire

**Palabras Clave:** Hilos de fique, fibras vegetales, tasa de deformación, propiedades mecánicas a tracción, esfuerzo último, deformación unitaria última, módulo de elasticidad, energía de deformación.

**Descripción:** Este informe presenta un resumen de las actividades realizadas y los resultados obtenidos durante la pasantía de investigación en Materiales y Estructuras de construcción (INME), como parte del proyecto de investigación VIE-UIS 3954. Las actividades incluyeron la preparación de especímenes de hilos de fique crudo para ensayos a tracción, la ejecución de ensayos a diferentes tasas de deformación para evaluar el comportamiento mecánico bajo diversas condiciones, así como procesamiento y análisis de los datos.

Los ensayos se realizaron utilizando tres tasas de deformación seleccionadas para representar distintas condiciones de carga: una tasa cuasi-estática ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) para deformación lenta y controlada, una tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ) comparable a impactos vehiculares y una tasa alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) que simula efectos de terremotos y choques. El esfuerzo último promedio fue de 155.60, 211.35 y 207.84 MPa, para cada una de las tasas de deformación. La deformación unitaria última osciló entre 2.6% y el 5.5% con valores promedio de 4.0, 4.4 y 4.3%. El módulo de elasticidad promedio para cada tasa fue de 4.4, 5.5 y 5.8 GPa. Este análisis mostró que, a tasas de deformación inferiores a  $1.0 \times 10^{-3}$ , la resistencia de los hilos de fique disminuye, mientras que, a tasas más altas, cercanas a  $1.0 \times 10^{-3}$  y superiores, la resistencia tiende a aumentar. La deformación unitaria, por su parte, se mantiene relativamente constante en las diferentes tasas de deformación. En cuanto al módulo de elasticidad, esta muestra un incremento con el aumento de la tasa de deformación. Con base en estos resultados, se concluyó que las propiedades mecánicas de los hilos de fique crudo varían con la tasa de deformación, afectando su resistencia, deformabilidad, rigidez y capacidad de absorción de energía. Estos hallazgos son útiles para optimizar el uso de los hilos de fique crudos en aplicaciones industriales y estructurales donde las condiciones de carga varían.

---

\* Trabajo de Grado

<sup>11</sup> Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambienta. Codirector 1 German Adolfo Díaz Ramírez. Ph.D. en Ingeniería de Materiales. Codirector 2: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Ph.D. en Ingeniería Civil.

### Abstract

**Title:** Mechanical tensile characterization of fique fiber threads with a length of  $L=250$  mm under different deformation rates within the framework of the VIE-UIS 3954 project \*

**Author(s):** Laura Stefani González Pire<sup>1</sup>

**Key Words:** Fique threads, vegetable fibers, strain rate, tensile mechanical properties, ultimate tensile strength, ultimate unit strain, modulus of elasticity, deformation energy.

**Description:** This report presents a summary of the activities carried out and the results obtained during the research internship in Materials and Construction Structures (INME), as part of the VIE-UIS 3954 research project. The activities included the preparation of raw fique fiber specimens for tensile tests, the execution of tests at different strain rates to evaluate the mechanical behavior under various conditions, as well as data processing and analysis.

The tests were carried out using three selected strain rates to represent different loading conditions: a quasi-static rate ( $6.7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) for slow and controlled deformation, an intermediate rate ( $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ) comparable to vehicular impacts, and a high rate ( $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ) simulating earthquake and shock effects. The average ultimate stress was 155.60, 211.35, and 207.84 MPa, for each of the strain rates. The ultimate strain ranged between 2.6% and 5.5% with average values of 4.0, 4.4, and 4.3%. The average modulus of elasticity for each rate was 4.4, 5.5, and 5.8 GPa. This analysis showed that, at strain rates below  $1.0 \times 10^{-3}$ , the strength of the fique fibers decreases, while at higher rates, close to and above  $1.0 \times 10^{-3}$ , the strength tends to increase.

The ultimate strain, on the other hand, remains relatively constant at the different strain rates. As for the modulus of elasticity, it shows an increase with the increase in the strain rate. Based on these results, it was concluded that the mechanical properties of raw fique fibers vary with the strain rate, affecting their strength, deformability, stiffness, and energy absorption capacity. These findings are useful for optimizing the use of raw fique fibers in industrial and structural applications where loading conditions vary.

---

\* Degree Work

<sup>1</sup>Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Civil Engineering. Director: José Miguel Benjumea Royero. Ph. D. in Civil and Engineering  
Co-director 1: Germán Adolfo Díaz Ramírez. Ph.D. in Materials Engineering. Co-director 2: Ricardo Alfredo Cruz Hernández. Ph.D. in Civil Engineering.

## Introducción

En la XXI Conferencia de las naciones se discutió el uso de la biomasa frente al cambio climático mundial, ya que es un recurso renovable y abundante constituida por plantas y animales. La biomasa lignocelulósica, compuesta por celulosa, hemicelulosa, lignina y componentes orgánicos, tiene la ventaja de ser la materia orgánica más abundante en la tierra y su uso contribuye a la reducción de CO<sub>2</sub> (Bastidas et al., 2022).

Debido al daño irreversible al medio ambiente causado por los materiales sintéticos, ha sido necesario emplear materiales alternativos en la industria de la construcción, como las fibras vegetales (R. Lozada et al., 2023). Estas son biodegradables, renovables, abundantes y poseen buenas propiedades mecánicas (Ernestina et al., 2013).

Un ejemplo de fuente de biomasa lignocelulósica es la planta de fique (Bastidas et al., 2022), planta tropical perteneciente al género *Furcraea*, de la cual se extrae la fibra de fique o cabuya. Se cultiva en la zona ecuatorial, siendo su hábitat natural más reconocido la región andina de Colombia (Navacerrada et al., 2014). Esta fibra es utilizada tradicionalmente en la producción de artesanías y textiles, no obstante, en los últimos años, se ha incrementado el interés gracias a sus perspectivas como material de ingeniería (Muñoz-Blandón et al., 2023).

Esta fibra está compuesta por macromoléculas de celulosa (42.1%), hemicelulosa (13%) y lignina (18.2% en peso) (Bastidas et al., 2022). La primera influye fuertemente en las propiedades mecánicas, debido a que las fibrillas de la celulosa están alineadas a lo largo de la fibra, generando mayor rigidez y, por consiguiente, aumentando su resistencia a tracción (Ortiz & Picón, 2021).

Se han identificado diversos factores que inciden en la resistencia a tracción de las fibras naturales. Entre estos se destaca la tasa de deformación (Madueke et al., 2023). La tasa de deformación se define como la cantidad de deformación experimentada por un material por unidad de tiempo (Khieng et al., 2021).

Varios investigadores han analizado la resistencia a la tracción de las fibras vegetales bajo diferentes tasas de deformación. Al respecto, Madueke et al. (2023) concluyeron que la velocidad de deformación en pruebas de tracción de fibras de coco tiene un impacto significativo en su resistencia final con una resistencia media de  $120.97 \pm 42.30$  MPa. Además, encontró que tanto el diámetro como la longitud de la fibra contribuyen a las variaciones en la resistencia a tracción (Madueke et al., 2023). Por otro lado, Tomczak et al. (2007), realizaron un estudio sobre fibras lignocelulósicas, centrándose en la fibra de carauá brasileña. Examinaron el efecto de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de la fibra, variando la velocidad desde 5 mm/min a 50 mm/min. Estas velocidades se traducen en tasa de deformación que van desde  $1.67 \times 10^{-3}$  a  $4.17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Los autores observaron un aumento en la resistencia última de 178 a 217 MPa al aumentar la velocidad de deformación, sin cambios significativos en el porcentaje de deformación en la rotura (media: 4.57%) y el módulo de elasticidad (media: 48.7 GPa). Compararon estos resultados con estudios anteriores sobre la fibra de sisal de la India, explicando que, a velocidades altas de ensayo, las fibras se comportan de manera predominantemente elástica, mientras que, a velocidades bajas tienen un comportamiento más viscoso (Tomczak et al., 2007).

En base a lo mencionado y considerando el desarrollo actual del proyecto de investigación VIE-UIS 3954, en este trabajo se describen las actividades de apoyo realizadas en la caracterización mecánica de los hilos de fique crudo sometidos a tracción realizadas

durante la pasantía de investigación en el grupo de investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME). A continuación, en la sección 3 se describe la actividad de apoyo en la caracterización física de los hilos de fique. Se inicia con una descripción detallada de la materia prima utilizada, seguida de un resumen detallado del proceso de preparación de las probetas para los ensayos mecánicos. En la sección 4 se resume la normativa y protocolo de ensayos empleados tomando como referencia la norma ASTM 1557. Se detallan las características del equipo de tracción MTS utilizado y se justifica la selección de la tasa de deformación y los demás parámetros de ensayo. En la sección 5 a partir de los datos obtenidos en los ensayos se analizan las características mecánicas de los hilos de fique. Se obtienen curvas de esfuerzo-deformación unitaria, se calcula el módulo de elasticidad, se determina el esfuerzo y deformación unitaria última y se calcula la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último. Por último, en la sección 6 se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

## **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 de longitud de prueba  $L=250$  mm bajo diferentes tasas de deformación.

### **1.2 Objetivos Específicos**

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

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

Contribuir al tratamiento de datos de los resultados obtenidos de los ensayos a tracción de la fibra de fique cruda.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Fibras Naturales

Las fibras naturales son compuestos poliméricos fibrosos obtenidos de fuentes renovables, como plantas y animales (Mohapatra & Kar, 2019). En particular, las fibras vegetales están compuestas por celulosa, hemicelulosa y lignina, siendo la celulosa el componente predominante en un rango del 50 al 70%. La organización de las moléculas de celulosa forma una red rígida, resultando en una estructura compacta (Rocha et al., 2022).

Las fibras vegetales ofrecen diversas ventajas, como su biodegradabilidad, baja densidad, renovabilidad, excelentes propiedades mecánicas y abundancia. Además, se destacan por su producción, que genera menos impactos ambientales y menor consumo energético que las fibras sintéticas. Esto se debe a que el cultivo depende principalmente de la energía solar, requiriendo una cantidad reducida de energía proveniente de combustibles fósiles en los procesos de producción y extracción (Ernestina et al., 2013).

Las fibras vegetales se clasifican en función de la parte específica de la planta de la cual se extraen. Entre estas categorías se encuentran las fibras obtenidas de la cáscara, el tallo, el floema, las hojas, las semillas, la fruta, de la caña y de la madera, como se muestra en la Fig. 1 (R. Lozada et al., 2023).

**Figura 1**

*Clasificación de las fibras vegetales.*

Natural vegetable fibers					
Bast fibers	Seed fibers	Fruit fibers	Leaf fibers	Stalk/Grass /Reed fibers	Wood and reeds
Flax	Cotton	Coir	Sisal	Bamboo	
Hemp	Kapok	Oil palm	Pineapple	Barley	Bagasse
Jute		Milk weed	Abaca	Corn	Softwood
Kenaf		floss	Banana	Oat	Hardwood
Ramie			Henequen	Rice	
Isora			Toquilla	Wheat	
Nettle			straw	Rye	
			Fique	Elephant	

*Nota.* Tomada de R. Lozada et al. (2023)

## 2.2 Fique

El fique es una planta tropical perteneciente al género *Furcraea*, de la cual se extrae fibra de fique o cabuya. Se cultiva en la zona ecuatorial, siendo su hábitat natural la región andina de Colombia (Navacerrada et al., 2014), convirtiéndola en la primera productora de fique en el mundo. Con un estimado de 15.000 hectáreas sembradas para 2019 y una producción anual de 30.000 toneladas de fibra (Muñoz-Blandón et al., 2023) representando la principal actividad económica de 70.000 familias campesinas del país. El fique se cultiva en 10 departamentos del país, siendo Nariño el principal productor con aproximadamente el 38% del total nacional, seguido por Cauca con el 37%, Santander con el 12%, Antioquia con el 11% y la Guajira con 3% (Rendón-Castrillón et al., 2023).

Las características físicas y mecánicas de la fibra de fique están determinadas por factores como el origen, la edad, la especie a la que pertenece y la estructura (Herrera Ortiz Julián Orlando, 2020). La planta de fique (Fig. 2) tiene un tallo de aproximadamente 30 cm de diámetro y alcanza

una altura de 2 a 7 m. Las dimensiones de sus hojas varían entre 10 a 20 cm de ancho y de 1 a 2 m de largo (Rendón-Castrillón et al., 2023).

## **Figura 2**

*Ejemplo de la planta de fique.*



*Nota.* Tomada de Rendón-Castrillón et al. (2023)

La extracción de la fibra de fique (Fig. 3) se realiza a partir de las hojas mediante la técnica de decorticación, la cual puede llevarse a cabo de manera manual o mecánica (Navacerrada et al., 2014). Esta fibra está compuesta por macromoléculas de celulosa (42.1% en peso), hemicelulosa (13% en peso) y lignina (18.2% en peso) (Bastidas et al., 2022). La primera influye fuertemente en las propiedades mecánicas, debido a que las fibrillas de la celulosa están alineadas a lo largo de la fibra, generando mayor rigidez y, por consiguiente, aumentando su resistencia a tracción y flexión (Ortiz & Picón, 2021).

**Figura 3***Fibra de fique*

*Nota.* Tomada de Rendón-Castrillón et al. (2023)

**2.3 Tasa de deformación.**

La tasa de deformación se define como la cantidad de deformación experimentada por un material por unidad de tiempo. Estas tasas desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones. En el ámbito de la ingeniería civil abarca aplicaciones en estructuras civiles con magnitudes que varían desde tasas bajas a muy altas. Por ejemplo, en tasas de deformación bajas ( $0.1 < s^{-1}$ ), se aplica en la fluencia de materiales, la deformación cuasiestática de estructuras y el movimiento dinámico inducido por el viento en edificios de gran altura. En contraste, para tasas de deformación altas ( $>0.1 s^{-1}$ ) se encuentran aplicaciones en la resistencia a impactos en materiales de construcción y los desprendimientos de rocas. En el ámbito de las estructuras civiles, los procesos de fabricación, como la formación de materiales y el mecanizado de alta velocidad, están vinculados con la tasa de deformación (Khieng et al., 2021).

### 3. Caracterización mecánica a tracción de los hilos de fique crudos.

#### 3.1. Descripción de la materia prima.

Las probetas se prepararon con hilos de fique proporcionados por la empresa Coohilados del Fonce Ltda., ubicada en el municipio de San Gil, Santander. Se utilizó un carrete de hilo de fique crudo con una densidad lineal de  $Nm=1050$  m/kg (Fig.4).

#### Figura 4

*Carrete de hilo de fique crudo.*



#### 3.2 Preparación de las probetas.

##### 3.2.1 Moldes de caucho de silicona.

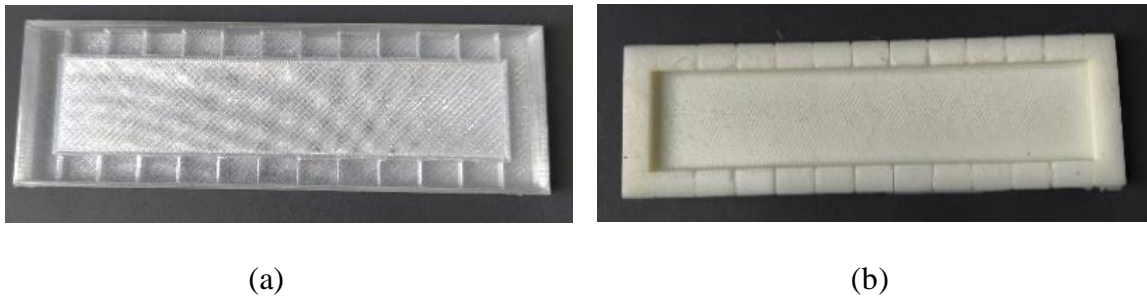
Se fabricó el molde con dimensiones específicas de: 20 cm de largo, 6.40 cm de ancho y 1.20 cm de alto. La parte interna tiene una base elevada de 4 cm de ancho. A lo largo del borde hay unas ranuras espaciadas cada 1 cm, con el fin de que estas ranuras permitan atravesar los hilos de fique por esos espacios.

Una vez se obtuvo este modelo, se procedió a realizar la impresión en 3D del molde. A partir de este molde impreso se generó un nuevo molde hecho de caucho de silicona, como se

muestra en la figura 5. Este molde se obtuvo mezclando caucho de silicona con un catalizador (4% en peso). La mezcla se vertió en el molde 3D y se dejó secar por aproximadamente un día antes de desmoldar. Este proceso se repitió una segunda vez para obtener un molde adicional de silicona.

### Figura 5

*Proceso constructivo del molde de caucho de silicona.*



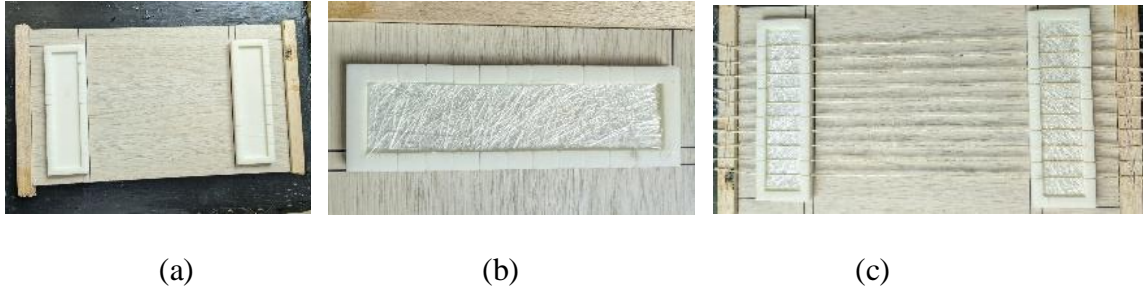
*Nota.* (a) modelo impreso y (b) modelo final en silicón.

#### 3.2.2 Diseño de las probetas.

Para la elaboración de las probetas de hilo de fique, inicialmente se ubicaron los moldes de silicona en una tabla de madera, asegurando que estuvieran separados por una distancia libre de 230 mm. Se tuvo en cuenta que cada molde tiene 10 mm libres adicionales, lo que permitía alcanzar una distancia total de 250 mm. Después, se colocó una lámina de fibra de vidrio en el molde. Una vez la fibra de vidrio estuvo en su lugar, se colocó un hilo de fique en cada ranura, resultando en un total de 10 hilos de fique, para un total de 10 probetas como se muestra en la figura 6.

**Figura 6**

*Preparación de las probetas.*

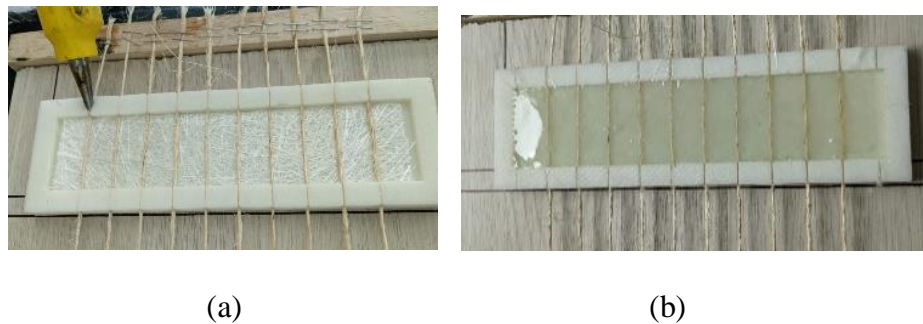


*Nota.* (a) ubicación de los moldes con distancia efectiva de 230 mm, (b) molde de silicona más lamina de fibra de vidrio y (c) molde de caucho de silicona, fibras de vidrio e hilos de fique.

Después de colocar los hilos, para evitar filtraciones de la mezcla de resina a través de las ranuras por donde pasan los hilos, se aplicó silicona caliente en cada ranura. A continuación, se vertió una parte de la mezcla de resina en el molde y se coloca otra lamina de fibra de vidrio. Es importante asegurarse que no queden burbujas de aire grandes entre las capas de fibra de vidrio. Una vez verificado esto, se procedió a verter el exceso de resina hasta llenar completamente el molde de silicona (Fig. 7). Este mismo procedimiento se repite con el segundo molde de silicona.

**Figura 7**

*Aplicación de silicona en las ranuras (a) y vertido de la mezcla de resina en el molde (b).*



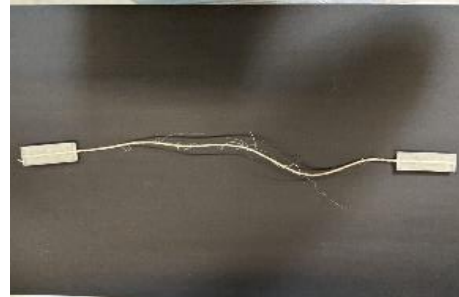
Una vez hechos ambos moldes, se dejan secar hasta que la mezcla de resina se endurezca y pueda desmoldarse con facilidad. Finalmente se desmoldan y, con la ayuda de una segueta eléctrica, se corta el material para obtener un total de 10 probetas de hilo de fique (Fig. 8).

### Figura 8

*Desmolde (a) y corte de las probetas (b).*



(a)



(b)

### 4. Ejecución de los ensayos.

De acuerdo con la norma C1557-20 (ASTM Committee C28 on Advanced Ceramics and is the, 2020) se emplea el método de ensayo que abarca la preparación, el montaje y las pruebas de fibras individuales. Este método está diseñado para determinar la resistencia a tracción y el módulo de Young a temperatura ambiente.

Después de la preparación de la probeta de hilo de fique crudo se realiza el montaje en la máquina de ensayo, asegurando la alineación axial y evitando cualquier torsión o curvatura. Posteriormente, se somete a esfuerzo de tracción hasta la rotura a una velocidad constante de desplazamiento. Se considera que el resultado es válido si la rotura de la fibra no ocurre en la región de sujeción. La máquina registra los datos de la carga máxima alcanzada antes de la ruptura de la fibra y la elongación correspondiente.

Para calcular la resistencia a la tracción, se utiliza la relación entre la fuerza máxima y el área de la sección transversal de un plano perpendicular al eje de la fibra en el lugar donde se produce la rotura. El módulo de Young se determina a partir de la región lineal de la curva de tensión de tracción vs deformación unitaria de tracción.

El equipo utilizado en los ensayos fue la maquina universal de ensayos Landmark MTS Bionix (Fig. 9), perteneciente a la escuela de escuela de ingeniería mecánica, la cual se emplea para determinar las propiedades mecánicas de los materiales. Adicional a esto se ubicó un trípode que permitiera grabar cada ensayo realizado.

### Figura 9

*Montaje experimental*



(a)



(b)

*Nota.* (a) Maquina MTS y (b) trípode

#### 4.1 Parámetros de ensayo.

Se seleccionaron tres tasas de deformación con el fin de abarcar un rango significativo de condiciones de carga. La primera tasa, cuasi-estático ( $6.7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ), se caracteriza por una deformación muy lenta y controlada. La segunda tasa de deformación intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ ) es comparable a los impactos vehiculares. Por último, una tasa de deformación alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ) simula efectos de terremotos y choques inducidos. Estas tasas de deformación son fundamentales para entender el comportamiento mecánico de los hilos de fique en diferentes escenarios de carga, permitiendo evaluar su respuesta bajo condiciones que varían desde aplicaciones con deformación lenta, como en situaciones de carga prolongada o estática, hasta deformaciones más rápidas que podrían simular impactos o condiciones dinámicas.

A continuación, en la tabla 1 se muestran los parámetros que se utilizaron en cada ensayo.

**Tabla 1**

*Datos para los ensayos.*

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

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

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el laboratorio de los 20 ensayos realizados junto con las gráficas de esfuerzo-deformación unitaria. Los datos que se obtuvieron de la máquina de ensayos incluyen la carga (P), el tiempo y el desplazamiento del cabezal de la máquina.

Para determinar las propiedades mecánicas del hilo de fique, como el esfuerzo normal axial ( $\sigma$ ), se utilizó la ecuación (1), en el cual se divide la carga axial (P) entre el área (A). El área de la sección transversal del hilo de fique crudo fue proporcionada por Nicolas Diaz, estudiante de ingeniería civil y pasante del grupo de investigación INME, participante del proyecto VIE-UIS3954. El valor del área transversal para el hilo de fique crudo es de 0.81 mm<sup>2</sup>. Por otro lado, la deformación unitaria ( $\varepsilon$ ) se obtiene dividiendo el desplazamiento axial entre la longitud inicial (250 mm) como se observa en la ecuación (2).

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

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

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

$$E = \frac{(\sigma_{80} - \sigma_0)}{(\varepsilon_{80} - \varepsilon_0)} \quad (3)$$

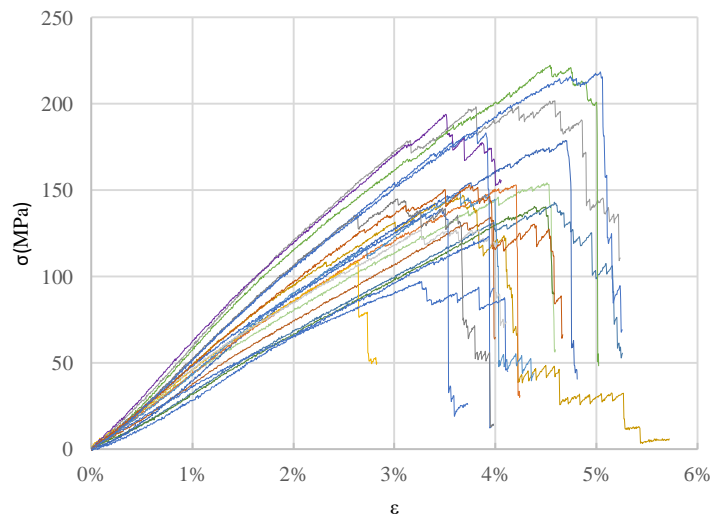
Por último, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último máximo ( $U_r$ ). Para realizar este cálculo se utilizó el método del trapecio, este método permite hallar el área bajo la curva esfuerzo-deformación según la ecuación (4) y se calcula dividiendo la curva en pequeños segmentos trapezoidales y sumando el área de estos segmentos, para obtener la energía acumulado en la fibra de fique hasta alcanzar el esfuerzo máximo.

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

A partir de estos cálculos se generaron las siguientes gráficas y tablas que resumen los resultados de los 20 ensayos realizados para cada tasa de deformación

### Figura 10

*Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a  $\dot{\varepsilon}=6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$*



### Tabla 2

Propiedades mecánicas de la fibra de fique con  $\dot{\varepsilon}=6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Hilo	$\varepsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	4.58	143.02	3.39	3.44
2	3.95	134.33	3.62	2.82

3	4.39	140.52	3.32	3.13
4	4.51	154.24	3.70	3.87
5	3.68	147.04	4.63	3.03
6	4.69	178.65	4.43	4.54
7	4.20	152.95	4.10	3.57
8	4.59	201.80	5.97	5.65
9	2.64	108.92	4.28	1.52
10	3.65	148.26	4.31	2.84
11	3.25	97.11	3.14	1.71
12	3.82	183.27	5.27	3.73
13	3.51	193.84	5.82	3.60
14	3.84	127.30	4.12	2.95
15	4.54	222.28	5.42	5.49
16	3.45	138.94	4.30	2.60
17	3.93	123.20	3.41	2.43
18	3.03	144.84	5.48	2.36
19	3.74	153.07	4.82	3.22
20	5.04	218.46	5.05	6.20

**Tabla 3**

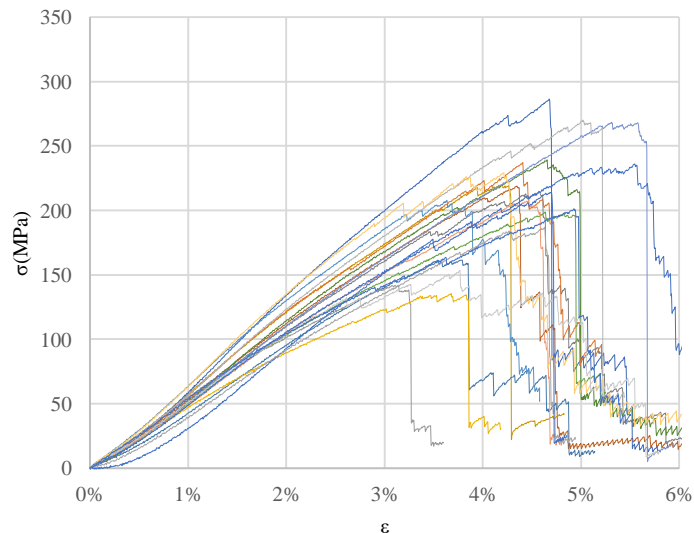
*Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para los hilos de fique ensayados a  $\dot{\epsilon}=6.7 \times 10^{-5} s^{-1}$*

	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
<b>Promedio</b> ( $\bar{X}$ )	3.95	155.60	4.4	3.44
<b>Varianza</b> ( $\delta^2$ )	0.00004	1163.44	0.74	1.53
<b>Desviación estandar</b> ( $\delta$ )	0.006	34.11	0.86	1.24
<b>Coficiente de variación</b> (cv)	16%	22%	19%	36%

En la tabla 2 se presentan los resultados de los 20 ensayos realizados a una tasa de deformación de  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . El esfuerzo último promedio obtenido fue de 155.60 MPa, con una desviación estándar de 34.11 MPa (Tabla 3). Por su parte la deformación última mostro un promedio de 3.95% evidenciando una baja variabilidad entre los ensayos. Esto sugiere que los hilos presentan un comportamiento consistente en términos de elongación antes de la ruptura. A partir de la figura 10, se determinó el módulo de elasticidad considerando la zona elástico-lineal de cada curva. El valor promedio obtenido fue de 4.4 GPa, con una desviación estándar de 0.86 GPa. Por último, se calculó la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último máximo. El valor promedio obtenido fue de 3.44 MPa, con una desviación estándar de 1.24 MPa. Este resultado indica la capacidad promedio de los hilos para absorber energía antes de fallar.

### Figura 11

Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a  $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$



### Tabla 4

*Propiedades mecánicas de la fibra de fique con  $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$*

<i>Hilo</i>	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	4.35	218.82	5.59	5.08
2	4.58	214.12	5.53	5.43
3	4.19	220.14	6.01	5.05
4	3.54	161.44	4.98	2.89
5	4.65	239.22	5.79	5.88
6	4.67	286.43	6.94	7.07
7	4.41	237.08	5.93	5.54
8	3.10	141.71	5.04	2.44
9	3.68	135.53	4.35	2.87
10	3.64	207.67	6.49	4.13
11	4.63	198.77	4.91	5.10
12	5.31	268.35	5.44	7.46
13	4.44	207.15	5.15	4.91
14	5.02	270.08	6.09	7.34
15	4.21	229.05	6.82	5.54
16	5.55	236.03	5.47	7.06
17	3.77	153.39	5.28	3.34
18	4.63	186.84	4.78	4.67
19	4.70	213.97	5.20	5.45
20	4.93	201.24	4.58	5.17

**Tabla 5**

*Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para hilos ensayados*

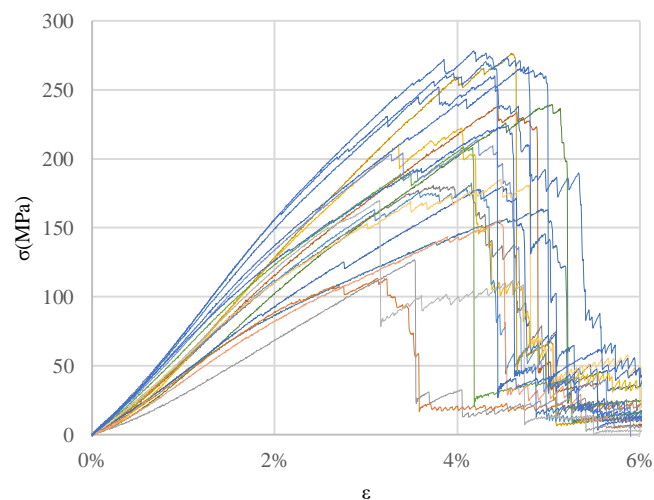
*a Propiedades mecánicas de la fibra de fique con  $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$*

	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
<b>Promedio</b> ( $\bar{X}$ )	4.40	211.35	5.5	5.12
<b>Varianza</b> ( $\delta^2$ )	0.000035	1944.35	0.54	2.39
<b>Desviación</b> <b>estandar (<math>\delta</math>)</b>	0.006	44.1	0.73	1.55
<b>Coficiente</b> <b>de variación (cv)</b>	13%	21%	13%	30%

En las tablas 4 y 5 se presentan los resultados obtenidos para una tasa de deformación de  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  muestran un esfuerzo último promedio de 211.35 MPa, con una desviación estándar de 44.1 MPa. La deformación última, por su parte, alcanzó un promedio de 4.4% con una variabilidad relativamente baja (desviación estándar de 0.006). La figura 11 muestra gráficamente la distribución de los valores de esfuerzo y deformación última evidenciando una mayor ductilidad de los hilos a esta tasa de deformación en comparación con la tasa de deformación de  $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . El módulo de elasticidad promedio fue de 5.5 GPa, con una desviación estándar de 0.73 GPa, lo que sugiere una mayor rigidez en comparación con la tasa de deformación anterior. Por último, la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último alcanzo un promedio de 5.12 MPa, con una desviación estándar de 1.55 MPa. Este resultado indica una mayor capacidad de absorción de energía a esta tasa de deformación.

### Figura 12

Curvas esfuerzo deformación unitaria para hilos ensayados a  $\dot{\epsilon} = 1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$



**Tabla 6****Propiedades mecánicas de la fibra de fique  $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$** 

<i>Hilo</i>	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
1	4.44	237.96	5.80	5.47
2	4.16	182.36	5.44	4.41
3	4.60	276.64	6.91	6.68
4	4.92	163.72	3.84	4.65
5	5.04	239.47	5.40	6.30
6	4.50	179.75	4.46	4.43
7	3.13	113.25	4.63	2.02
8	3.53	126.91	3.70	2.12
9	4.05	222.48	6.86	4.89
10	4.10	178.90	5.58	4.32
11	4.07	208.69	5.99	4.72
12	4.22	213.73	6.71	5.34
13	4.47	155.65	3.95	3.78
14	3.15	170.01	6.19	2.83
15	4.47	185.23	5.32	4.88
16	4.69	265.37	6.42	6.89
17	4.56	224.25	5.65	5.90
18	4.18	278.32	7.79	6.42
19	4.41	260.09	7.78	6.78
20	4.55	273.94	7.36	7.14

**Tabla 7***Medidas de tendencia central y de dispersión de las propiedades mecánicas para hilos ensayados**a  $\dot{\epsilon}=1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$* 

	$\epsilon_u$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{0-80}$ (GPa)	$U_r$ (MPa)
Promedio ( $\bar{X}$ )	4.26	207.84	5.8	5.00
Varianza ( $\delta^2$ )	0.000026	2469.53	1.55	2.30

Desviación estandar ( $\delta$ )	0.0051	49.70	1.25	1.5
Coefficiente de variación (cv)	12%	24%	22%	30%

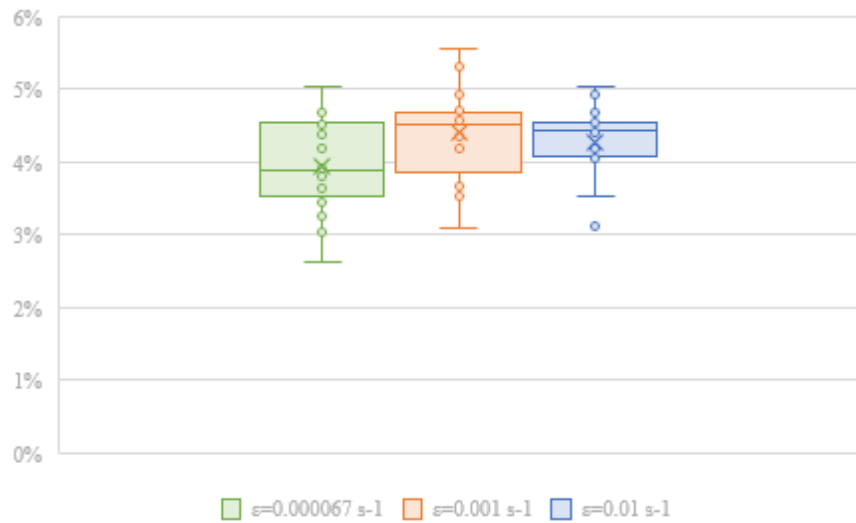
Al incrementar la tasa de deformación a  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ , se observan en la tabla 6 y 7 y se ilustra en la figura 12, se evidencia algunas variaciones en el comportamiento mecánico de los hilos de fique crudos. El esfuerzo último promedio disminuye ligeramente a 207.84 MPa con una desviación estándar de 49.70 MPa, mientras que la deformación última se reduce a 4.26% con una desviación estándar de 0.0051. Estos resultados sugieren una menor ductilidad del material a esta tasa de deformación más alta. Además, el módulo de elasticidad aumenta a 5.8 GPa con una desviación estándar de 1.25 GPa, indicando un incremento en la rigidez del material. La energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo máximo disminuyo presentando un valor promedio de 5.0 MPa con una desviación estándar de 1.5 MPa. Estos resultados sugieren una ligera disminución en la ductilidad y un aumento en la rigidez del material en comparación con la tasa de deformación de  $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ .

### 5.1 Efecto de la tasa de deformación en los parámetros mecánicos.

Para realizar una comparación de las propiedades mecánicas de los hilos de fique crudos a diferentes tasas de deformación, se elaboraron diagramas de caja y bigotes para la deformación última, el esfuerzo máximo, el módulo de elasticidad y la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo máximo. Estos gráficos permiten visualizar la variabilidad y tendencia central de cada propiedad.

**Figura 13**

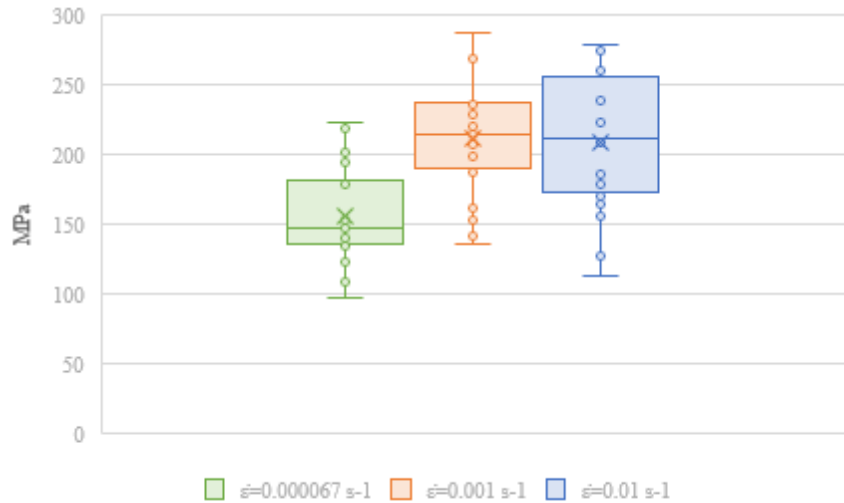
*Deformación unitaria última en función de la tasa de deformación.*



En la figura 13 se observa que la deformación unitaria última permanece cercana al 4% para las diferentes tasas de deformación. Sin embargo, lo que cambia significativamente es la dispersión de los datos. A medida que aumenta la tasa de deformación, la dispersión disminuye, como se evidencia en el tamaño reducido de la caja verde correspondiente a la tasa más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Esto sugiere que, a mayores tasas de deformación, el comportamiento del material se vuelve más consistente y predecible. Lo que indica una menor variabilidad en la capacidad de los hilos de fique para deformarse antes de la ruptura. Por lo tanto, aunque la deformación no aumenta considerablemente, la estabilidad en la respuesta de los hilos mejora con el aumento de la velocidad de aplicación de la carga.

**Figura 14**

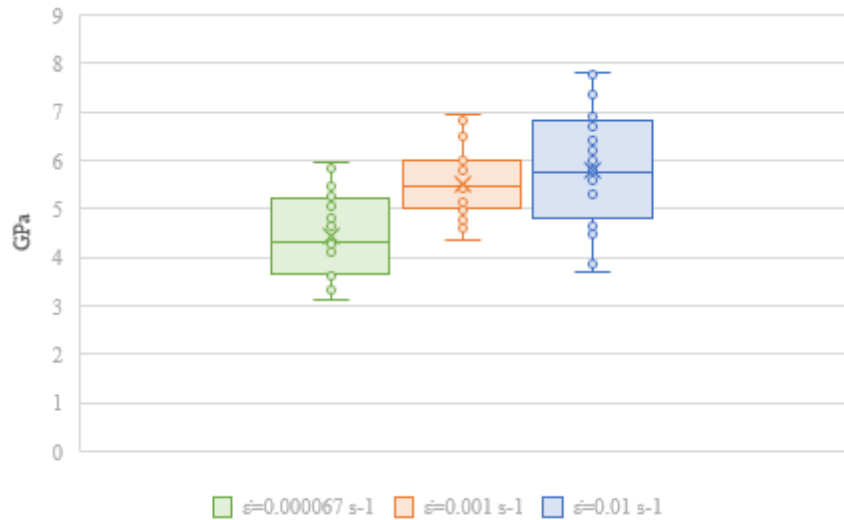
*Esfuerzo último en función de la tasa de deformación.*



El esfuerzo último (Fig. 14) no sigue una tendencia claramente definida a medida que aumenta la tasa de deformación. Aunque se observa un aumento significativo en el esfuerzo último al pasar de la tasa más baja ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) a una tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), con un valor promedio de 211.35 MPa, este valor disminuye ligeramente a 207,84 MPa en la tasa más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Esto indica que no existe una relación directa entre el aumento de la tasa de deformación y el incremento de la resistencia del material. No obstante, a tasas por debajo de  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , la resistencia tiende a disminuir, mientras que, a tasas superiores y sobre todo cercanas a esta, la resistencia a la tracción aumenta. Este comportamiento sugiere que las fibras de fique crudo presentan una complejidad en su respuesta mecánica, lo cual no puede asociarse a una tendencia simple, y esta influenciadas por la interacción entre las tasas de deformación y las características internas de la fibra. La dispersión de los datos refleja la variabilidad en la capacidad de las fibras para resistir tensiones bajo diferentes condiciones.

### Figura 15

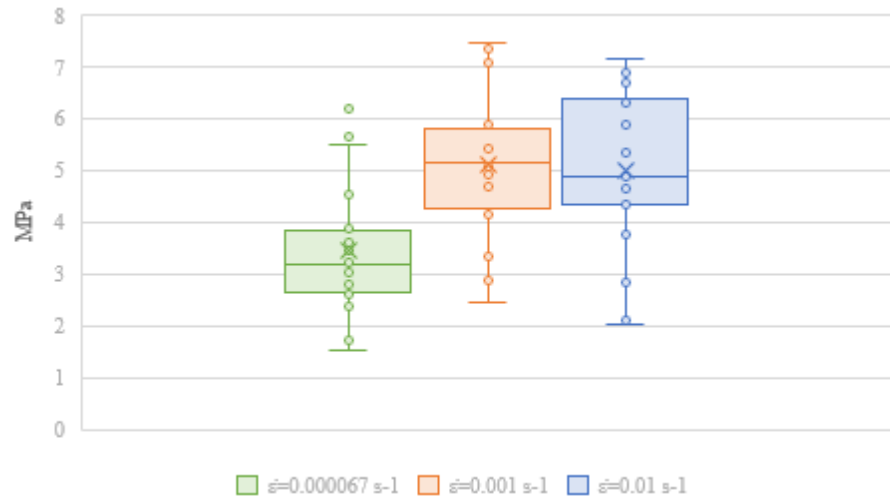
*Módulo de elasticidad en función de la tasa de deformación.*



En la figura 15 se observa una tendencia creciente en el módulo de elasticidad a medida que incrementa la tasa de deformación. Esto sugiere que el material se vuelve más rígido y menos deformable cuando se somete a cargas aplicadas a mayor velocidad. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza viscoelástica de las fibras de fique crudo, donde los componentes viscosos del material tienen menos tiempo para relajarse, bajo cargas rápidas. Como resultado la rigidez del material aumenta.

### Figura 16

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



En la figura 16 se observa que la energía de deformación por unidad de volumen no sigue una tendencia claramente definida con el aumento de la tasa de deformación. Se observa que hay un incremento notable en la energía absorbida al pasar de la tasa más baja ( $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) a la tasa intermedia ( $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ), con un valor promedio de 5.1 MPa, este valor disminuye ligeramente a 5.0 MPa en la tasa más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). Además, en esta última tasa se observa un aumento en la dispersión de los datos, lo que indica que la capacidad del material para absorber energía se vuelve más variable a mayores velocidades de carga.

Este comportamiento podría deberse a la complejidad interna del material, donde a tasas intermedias parece optimizarse la absorción de energía, pero a tasas más altas la respuesta del fique crudo se vuelve menos predecible. El incremento en la dispersión a la tasa más alta sugiere que el fique no siempre responde de manera uniforme bajo cargas dinámicas elevadas.

## 6. Conclusiones

El uso de resina epóxica reforzada con fibra de vidrio garantizó una adecuada sujeción de las probetas durante los ensayos a tracción, minimizando el riesgo de fractura y evitando deslizamiento en la región de agarre

En la caracterización mecánica de los hilos de fique crudos sometidos a tracción, los datos obtenidos muestran que el esfuerzo último, la deformación última, el módulo de elasticidad y la energía de deformación por unidad de volumen hasta el esfuerzo último máximo oscilaron entre 97.1 y 286.4 MPa (CV: 22%, 21%, 24%), 2.6 y 5.5% (CV: 16%, 13%, 12%), 3.0 y 7.7 GPa (CV: 19%, 13% 22%), 1.5 y 7.5 MPa (CV: 36%, 30% 30%), respectivamente. Estos rangos reflejan la variabilidad en el comportamiento mecánico del fique bajo diferentes condiciones de carga.

La deformación unitaria última presenta una dispersión relativamente baja, especialmente para la tasa de deformación de  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ . Esto sugiere que, a esta tasa, la respuesta del material es más consistente y predecible. Además, la deformación unitaria última aumenta con el incremento de la tasa de deformación, lo que indica que los hilos de fique crudos son capaces de soportar una mayor deformación antes de romperse bajo cargas más rápidas.

El esfuerzo último mostró una mayor dispersión a la tasa de deformación de  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ , lo que indica una mayor variabilidad en la respuesta del hilo de fique crudo cuando es cargado rápidamente. El esfuerzo máximo aumentó considerablemente con la tasa de deformación, alcanzando valores más altos en las tasas mayores. Esto sugiere que el fique se vuelve más resistente a esfuerzos a mayor tasa de deformación.

El módulo de elasticidad presentó alta variabilidad tanto en la tasa de deformación más baja ( $6.7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) como en la más alta ( $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Esta variabilidad sugiere que, en estos extremos de tasa de deformación, el material presenta una mayor inconsistencia en su rigidez,

posiblemente debido a la estructura interna del fique, compuesta por fibras con orientaciones y diámetros variados, lo cual afecta su comportamiento a diferentes tasas de carga. A pesar de la dispersión de los datos, se observó una tendencia a que el módulo de elasticidad aumente con la tasa de deformación, lo que implica que el material se vuelve más rígido a mayores velocidades de carga.

Los hilos de fique crudos tienen mayor resistencia, rigidez y capacidad de absorción de energía en tasas intermedias. En estas condiciones, el material soporta mayores esfuerzos antes de la falla, manteniendo buena deformabilidad. A medida que la tasa de deformación aumenta, el hilo de fique se torna más rígido, lo que sugiere un buen desempeño bajo cargas rápidas, como choques o terremotos. En cambio, a tasas más bajas, el material muestra menor resistencia y es más propenso a deformarse sin alcanzar grandes esfuerzos.

## **7. Recomendaciones**

Se recomienda realizar un diseño experimental que incluya la variación del origen geográfico, la edad, la especie y la longitud de la muestra de fique. Además de evaluar el impacto de estas variables en las propiedades mecánicas. También se propone explorar otras variables como tratamiento de las fibras y la humedad durante el ensayo. Estos estudios adicionales permitan ampliar el conocimiento sobre el comportamiento del fique.

### Referencias Bibliográficas

- ASTM Committee C28 on Advanced Ceramics and is the. (2020). *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers I*. <https://doi.org/10.1520/C1557-20>
- 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>
- Ernestina, M., Fidelis, A., Vitorino, T., Pereira, C., Da Fonseca, O., Gomes, M., De Andrade Silva, F., Dias, R., & Filho, T. (2013). *The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003>
- Herrera Ortiz Julián Orlando. (2020). *Desarrollo de un concreto convencional con adición de productos de fique para el empleo de estructuras en ambiente agresivo*.
- Khieng, T. K., Debnath, S., Ting Chaw Liang, E., Anwar, M., Pramanik, A., & Basak, A. K. (2021). A review on mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites under various strain rates. In *Journal of Composites Science* (Vol. 5, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jcs5050130>
- Madueke, C. I., Mbah, O. M., & Umunakwe, R. (2023). A review on the limitations of natural fibres and natural fibre composites with emphasis on tensile strength using coir as a case study. In *Polymer Bulletin* (Vol. 80, Issue 4, pp. 3489–3506). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04241-y>
- 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>

- Muñoz-Blandón, O., Ramírez-Carmona, M., Rendón-Castrillón, L., & Ocampo-López, C. (2023). Exploring the Potential of Fique Fiber as a Natural Composite Material: A Comprehensive Characterization Study. *Polymers*, *15*(12). <https://doi.org/10.3390/polym15122712>
- Navacerrada, M. A., Díaz, C., & Fernández, P. (2014). Characterization of a Material Based on Short Natural Fique Fibers. *BioResources*, *9*(2), 3480–3496.
- 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.*
- R. Lozada, E., Gutiérrez Aguilar, C. M., Jaramillo Carvalho, J. A., Sánchez, J. C., & Barrera Torres, G. (2023). Vegetable Cellulose Fibers in Natural Rubber Composites. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 13). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/polym15132914>
- Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., Pinedo-Rangel, V., Muñoz-Blandón, O., & Trujillo-Aramburo, E. (2023). The Industrial Potential of Fique Cultivated in Colombia. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su15010695>
- Rocha, D. L., Júnior, L. U. D. T., Marvila, M. T., Pereira, E. C., Souza, D., & de Azevedo, A. R. G. (2022). A Review of the Use of Natural Fibers in Cement Composites: Concepts, Applications and Brazilian History. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 10). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14102043>
- Tomeczak, F., Satyanarayana, K. G., & Sydenstricker, T. H. D. (2007). Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III - Morphology and properties of Brazilian curauá fibers. *Composites*

*Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(10), 2227–2236.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.06.005>