

Caracterización mecánica a tracción de hilos de fibra de fique con $L_0=250$ mm mercerizados y modificados superficialmente con óxido de grafeno, bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIE-UIS 3954

Carlos Alberto Sandoval Alfonso

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Ricardo Alfredo Cruz Hernández

Ph.D. en Ingeniería Civil

Codirector 1

Germán Adolfo Díaz Ramírez

Ph.D. en Ingeniería de Materiales

Codirector 2

José Miguel Benjumea Royero

Ph.D. en Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniería Civil

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis padres, por su amor incondicional, su sabiduría y su constante apoyo. Gracias por creer en mí, por ser mi guía y por darme la fuerza para superar cada obstáculo. Su sacrificio y amor me han permitido llegar hasta aquí.

A Stefani, por haber sido una parte importante de mi vida, por tu cariño, paciencia y por acompañarme en momentos de crecimiento. Siempre recordaré con gratitud por todo lo que compartimos que, sin duda dejaron una huella en mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarme los recursos necesarios para realizar este trabajo de manera eficiente y exitosa.

A mi director y codirectores de trabajo de grado, por su constante guía y acompañamiento durante todo el proyecto. Sus consejos y recomendaciones fueron fundamentales para el desarrollo del trabajo y mi crecimiento profesional y personal.

Al equipo del Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular (LEAM) de la Universidad Industrial de Santander, quienes no solo me proporcionaron el apoyo técnico necesario, sino que también contribuyeron de manera significativa en la obtención de materia prima cruciales para el desarrollo del trabajo.

A mis padres y mi hermano menor, por su apoyo incondicional, su aliento constante y su confianza en todo momento. Gracias por su amor y por estar siempre a mi lado.

A Stefani, por todo el apoyo, comprensión y amor que me brindaste durante este tiempo. Gracias por tu paciencia, por estar a mi lado en los momentos más importantes. Por ser un pilar fundamental para el éxito de este trabajo.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico y Antecedentes	15
2.1 Fibras de fique.....	15
2.2 Efecto de la alcalinización en las fibras naturales	17
2.3 Aplicaciones y Síntesis del Óxido de Grafeno para el Mejoramiento de Fibras Naturales	17
2.4 Influencia de la Tasa de Deformación en la Resistencia a Tracción de Fibras Naturales	18
3. Preparación de probetas para los ensayos a tracción	20
3.1 Tratamiento de alcalinización para las fibras de fique.....	20
3.2 Recubrimiento superficial sobre hilos mercerizados usando oxido de grafeno.....	23
3.3 Manejo y disposición de residuos	24
3.4 Metodología para la preparación de probetas	25
3.4.1 Preparación de Moldes.....	26
3.4.2 Adición de Fibra de Vidrio	26
3.4.3 Inserción y Fijación de Hilos	26
3.4.4 Sellado de Ranuras.....	26
3.4.5 Preparación y Aplicación de Resina Epóxica	27
3.4.6 Aplicación de Fibra de Vidrio Adicional.....	27
3.4.8 Desmoldeo y Corte	27

3.4.9 Repetición del Proceso.....	27
4. Ejecución de ensayos a tracción	28
5. Tratamiento de datos de los ensayos mecánicos.....	30
6. Resultados.....	32
7. Conclusiones.....	41
6. Recomendaciones	42
Referencias Bibliográficas.....	44
Apéndices.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Parámetros de respuesta mecánica de la fibra de fique.	16
Tabla 2 Datos del protocolo para ensayos a tracción.....	30
Tabla 3 Propiedades a tracción con $\varepsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}$	40
Tabla 4 Presenta los valores de media X , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV) correspondientes a los parámetros mecánicos $\varepsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}$	40
Tabla 5 Propiedades a tensión con $\varepsilon = 0.001\text{s}^{-1}$	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 6 Presenta los valores de media X , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV) correspondientes a los parámetros mecánicos $\varepsilon = 0.001\text{s}^{-1}$	47
Tabla 7 Propiedades a tensión con $\varepsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}$	48
Tabla 8 Presenta los valores de media X , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV) correspondientes a los parámetros mecánicos $\varepsilon = 0.01\text{s}^{-1}$	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Carrete de hilo de fibra de fique	20
Figura 2 Montaje experimental para el proceso de alcalinización.....	21
Figura 3 Proceso de mercerización y enjuague de los hilos	22
Figura 4 Secado y almacenamiento de las fibras mercerizadas.....	23
Figura 5 Aplicación de óxido de grafeno sobre hilos de fique mercerizados	24
Figura 6 Molde implementado para la fabricación de probetas.....	26
Figura 7 Resultados de los extremos de las probetas.....	28
Figura 8 Máquina MTS.....	29
Figura 9 Curva esfuerzo-deformación unitaria $\epsilon = 0.000067 \text{ s}^{-1}$	33
Figura 10 Curva esfuerzo-deformación unitaria $\epsilon = 0.001 \text{ s}^{-1}$	34
Figura 11 Curva esfuerzo-deformación unitaria $\epsilon = 0.01 \text{ s}^{-1}$	35
Figura 12 Distribución de la deformación unitaria para cada tasa de deformación.....	36
Figura 13 Distribución del esfuerzo último para cada tasa de deformación.....	37
Figura 14 Distribución del módulo de elasticidad para cada tasa de deformación.....	37
Figura 15 Distribución de la energía de deformación para cada tasa de deformación.	38

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A Propiedades a tensión con $\varepsilon = 0.001 s^{-1}$	47
Apéndice B Presenta los valores de media X , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV) correspondientes a los parámetros mecánicos $\varepsilon = 0.001 s^{-1}$	47
Apéndice C Propiedades a tensión con $\varepsilon = 0.01 s^{-1}$	48
Apéndice D Presenta los valores de media X , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV) correspondientes a los parámetros mecánicos $\varepsilon = 0.01 s^{-1}$	48

Glosario

Cristalinidad: Grado de orden estructural en un material que influye en su resistencia y rigidez.

Elongación: Porcentaje que indica cuánto puede estirarse un material antes de romperse.

Hidrofobicidad: Propiedad de un material que repelen el agua, mejorada en las fibras de fique con óxido de grafeno.

Mercerización: Tratamiento con solución alcalina para mejorar la resistencia y adhesión de las fibras naturales.

Módulo de elasticidad: Medida de la rigidez de un material bajo carga, refleja su capacidad para deformarse.

Óxido de grafeno (OG): Compuesto derivado del grafeno que mejora las propiedades mecánicas de los materiales cuando se usa como recubrimiento.

Resistencia a la tracción (TS): Medida de la capacidad de un material para resistir fuerzas que tienden a estirarlo.

Tasa de deformación: Velocidad con la que un material se deforma bajo carga externa.

Tracción: proceso de aplicar una fuerza que estira un material en dirección longitudinal.

Resumen

Título: Caracterización mecánica a tracción de hilos de fibra de fique con $L_0=250$ mm mercerizados y modificados superficialmente con óxido de grafeno, bajo diferentes tasas de deformación en el marco del proyecto VIEUIS 3954*

Autor: Carlos Alberto Sandoval Alfonso**

Palabras Clave: Hilos de fique, Mercerización, Óxido de grafeno, Tasa de deformación, Propiedades mecánicas.

Descripción: Este documento presenta actividades experimentales orientadas a la caracterización mecánica de hilos de fique modificados mediante mercerización y recubrimiento superficial con óxido de grafeno (OG), bajo distintas tasas de deformación. Los experimentos se realizaron en el marco del proyecto VIE-UIS 3954 en el Grupo de Investigación en Materiales y Estructuras de Construcción (INME), y durante una pasantía en el Laboratorio de Espectroscopía Atómica y Molecular (LEAM). Las probetas se prepararon sometiendo los hilos de fique a una alcalinización con hidróxido de sodio al 2% p/v, optimizando la estructura de la fibra para mejorar su resistencia y adhesión en compuestos. Posteriormente, se aplicaron manualmente dos capas de OG. Los resultados mostraron que el proceso de mercerización favoreció la adhesión del OG, logrando hilos con mayor rigidez (módulo de elasticidad) y esfuerzo último a medida que aumentó la tasa de deformación, mientras que la capacidad de deformación unitaria disminuyó, indicando una menor ductilidad en altas velocidades de carga. A una tasa de 0.000067 s^{-1} , el módulo de elasticidad fue de 5.94 GPa, aumentando a 6.25 GPa a 0.01 s^{-1} , con desviaciones de 1.44 y 1.49 GPa, respectivamente. El esfuerzo último incrementó de 225.94 a 268.77 MPa, con desviaciones de 66.22 y 85.54 MPa. La energía de deformación absorbida también aumentó de 4.84 a 6.34 MPa en el mismo rango, con desviaciones de 2.07 y 2.89 MPa. Estos hallazgos sugieren que los hilos de fique modificados son más adecuados para aplicaciones de alta resistencia y almacenamiento de energía, aunque presentan menor ductilidad en comparación con los hilos sin tratamiento.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Programa académico. Director: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango. Codirector: Nombres y Apellidos completos. Título académico completo de mayor rango

Abstract

Title: Mechanical Characterization in Tension of Mercerized and Surface-Modified Fique Fiber Yarns with $L=250$ mm with Graphene Oxide under Different Strain Rates, within the Framework of the VIE-UIS 3954 Project. *

Author(s): Carlos Alberto Sandoval Alfonso **

Key Words: Fique fibers, Mercerization, Graphene oxide, Strain rate, Mechanical properties.

Description: This document presents experimental activities focused on the mechanical characterization of fique yarns modified through an initial mercerization process followed by a superficial coating with graphene oxide (GO), under different strain rates. These activities were conducted within the framework of the VIE-UIS 3954 project in the Research Group on Construction Materials and Structures (INME) during a research internship at the Atomic and Molecular Spectroscopy Laboratory (LEAM). The specimens were prepared by subjecting the fique yarns to an alkalization process with 2% w/v sodium hydroxide, optimizing the fiber structure to enhance its strength and adhesion in composites. Two layers of GO were then applied manually. The results showed that mercerization improved the GO adhesion, resulting in yarns with higher stiffness (elastic modulus) and ultimate stress as strain rate increased, while unit strain capacity decreased, indicating lower ductility at higher loading speeds. At a strain rate of 0.000067 s^{-1} , the elastic modulus was 5.94 GPa, increasing to 6.25 GPa at 0.01 s^{-1} , with standard deviations of 1.44 and 1.49 GPa, respectively. The ultimate stress increased from 225.94 to 268.77 MPa, with standard deviations of 66.22 and 85.54 MPa. The absorbed strain energy also rose from 4.84 to 6.34 MPa within the same range, with standard deviations of 2.07 and 2.89 MPa. These findings suggest that modified fique yarns are better suited for applications requiring high strength and energy storage, although they show reduced ductility compared to untreated yarns.

* Degree Work

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

Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías en materiales compuestos exige la adopción de materiales eficientes que promuevan la sostenibilidad. En este contexto, las fibras naturales han emergido como una alternativa prometedora, ofreciendo ventajas ambientales frente a las fibras sintéticas comúnmente utilizadas en compuestos poliméricos (Mohapatra & Kar, 2019). El interés por estas fibras ha crecido en sectores como la industria automotriz y la construcción, donde su aplicación en materiales compuestos busca optimizar tanto la ligereza como la eficiencia energética (Chokshi et al., 2020).

Entre las fibras naturales, la fibra de fique, tradicionalmente empleada en la producción de textiles y artesanías, ha ganado atención en ingeniería como materia prima para desarrollar materiales compuestos, bio aislantes y soportes para bio separación, entre otros (Muñoz-Blandón et al., 2023). Sin embargo, su carácter hidrofílico y la consiguiente inestabilidad en aplicaciones avanzadas requieren tratamientos de modificación fisicoquímica que mejoren su comportamiento mecánico, especialmente en términos de resistencia a la tracción.

En este sentido, el estudio de la respuesta mecánica de la fibra de fique bajo diferentes tasas de deformación sigue siendo un área clave de investigación. El presente trabajo aborda de manera sistemática el impacto de la tasa de deformación en las propiedades mecánicas de los hilos de fique, con el objetivo de aportar al entendimiento integral de este material y potenciar su uso en aplicaciones tecnológicas futuras.

Este estudio busca explorar el potencial de mejorar la respuesta mecánica a tracción de los hilos de fique mediante la aplicación de un tratamiento con óxido de 3 grafeno. Este

enfoque surge de la necesidad de desarrollar materiales más resistentes y sostenibles que puedan emplearse en la fabricación de productos con mayor desempeño ante la degradación a causa de la humedad.

El objetivo general de este proyecto es caracterizar la respuesta mecánica a tracción de hilos de fique mercerizados y modificados superficialmente con óxido de grafeno, considerando especímenes con una longitud de prueba de 250 mm y bajo diferentes tasas de deformación. Para alcanzar este objetivo, se han planteado tres objetivos específicos: (1) preparar especímenes tratados mediante procesos de mercerización con hidróxido de sodio y recubrimiento superficial con óxido de grafeno, (2) ejecutar ensayos experimentales de tracción bajo tasas de deformación controladas, y (3) analizar y presentar los resultados obtenidos, destacando las mejoras en propiedades mecánicas como la resistencia y elongación de los hilos tratados.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

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

1.2 Objetivos Específicos

Preparar los especímenes tratados con hidróxido de sodio y óxido de grafeno para la ejecución de ensayos a tracción estandarizados.

Ejecutar ensayos experimentales a tracción de los hilos tratados, bajo diferentes tasas de deformación.

Contribuir en el procesamiento y presentación de resultados obtenidos de los ensayos a tracción de los hilos de fique

2. Marco Teórico y Antecedentes

2.1 Fibras de fique

El fique (*Furcraea*), es una planta xerófita de la familia *Asparagaceae*, subfamilia *Agavoidea*, nativa de la región andina que limita entre Colombia y Venezuela. Su relevancia radica en su significativa contribución a la fabricación de productos artesanales alrededor del territorio colombiano, destacándose aún más por ser uno de los países con más producción de fique a nivel mundial (Muñoz-Blandón et al., 2023).

A partir del proceso de desfibrado, la fibra de fique se constituye solo por el 4% de la composición total de la hoja. El contenido de material restante se divide en un 51% residuo líquido y bagazo en 45%, que consta de una amalgama de los fragmentos y tejidos de la hoja (Rendón-Castrillón et al., 2022). En este contexto la fibra de destaca por su elevado contenido en holocelulosa (celulosa y hemicelulosa) en un 74%, el restante corresponde a bajos niveles de lignina y pectina en 14% y 6% respectivamente. Por lo tanto, la celulosa se establece como el componente principal, ocupando un 56%, seguida de la hemicelulosa que consta de un 18% (Muñoz-Blandón et al., 2023).

En este sentido, las propiedades mecánicas relevantes de la fibra de fique se manifiestan en su respuesta a la tracción. Esta respuesta está estrechamente relacionada con su composición química, que consta de fibrillas microscópicas de celulosa. Estas fibrillas aportan resistencia y rigidez a lo largo de su longitud, mientras que la lignina y la hemicelulosa contribuyen a la formación de microfibrillas que adoptan una estructura helicoidal a lo largo de su eje. Es esta disposición helicoidal la que confiere a la fibra su resistencia, ya que desplegar estas microfibrillas requiere una cantidad significativa de energía (Laverde et al., 2022).

Simultáneamente, los fundamentos del comportamiento mecánico de la fibra de fique se pueden enfocar en parámetros como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y el porcentaje de elongación. Dichos indicadores representan la capacidad de la fibra de la respuesta elástica frente a esfuerzos aplicados, resistir fuerzas a tensión y la flexibilidad ante deformaciones elevadas. En la tabla 1 se muestran valores de los parámetros como referencia de diferentes autores en sus investigaciones sobre la caracterización de la fibra de fique (de la Cruz-Velasco et al., 2021; Gomez et al., 2021; Muñoz-Blandón et al., 2023).

Tabla 1

Parámetros de respuesta mecánica de la fibra de fique.

Resistencia a la tracción [MPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Elongación [%]
355.1	11.54	8.7
194.8	4.0	N.A
237.0	8.0	N.A
134,9	1,93	15,51

Nota. Esta tabla muestra los parámetros de respuesta mecánica de la fibra de fique, incluyendo resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y elongación, para diferentes condiciones de prueba.

A pesar de las propiedades únicas, las fibras naturales mantienen un elemento de aleatoriedad en su respuesta mecánica. Se contemplan características como la no uniformidad a lo largo de su longitud, con variaciones en diámetro y sección transversal, junto con factores como el origen de la especie, el método de extracción y la distribución del tamaño de los poros,

establecen una variabilidad considerable en la resistencia a tracción de la fibra, como lo menciona Madueke et al., (2023).

2.2 Efecto de la alcalinización en las fibras naturales

Las fibras naturales tienen otra característica propia de su afinidad con el agua. La propiedad hidrofílica de la fibra imposibilita la opción de obtener adhesiones completas a la matriz de un compuesto, por lo tanto, es necesario el uso de compuestos químicos como el hidróxido de sodio para reducir esta respuesta (Martínez Suárez et al., 2021). Pasando la fibra por un tratamiento de alcalinización, el cual puede consistir en un lavado superficial con la sustancia, permite el cambio de su composición química mejorando sus capacidades mecánicas finales, debido a que los resultados muestran la eliminación de componentes como ligninas y hemicelulosa (Martínez Suárez et al., 2021). Análogamente reduce la capacidad de la celulosa para unir hidrogeno, reduciendo significativamente la adsorción de agua (Guzmán et al., 2018).

En su investigación, Guzmán et al. (2018) demostraron que la modificación de las fibras de celulosa de fique usando una concentración del 2.5% de NaOH afecta la morfología de la fibra. Además, mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) también se pudo evidenciar un incremento en la rugosidad de la superficie. Estos resultados traen consigo un aumento en el área superficial disponible, mejorando la afinidad de la fibra con otros materiales, logrando una adhesión más eficiente en matrices de diferentes compuestos.

2.3 Aplicaciones y Síntesis del Óxido de Grafeno para el Mejoramiento de Fibras Naturales

El grafeno es una lámina de grosor de un solo átomo hecha exclusivamente de carbono. Más allá de ser un excelente conductor eléctrico y térmico, el grafeno es el material más delgado, fuerte y rígido conocido (Urcuyo et al., 2021). Por otro lado, su compuesto, el óxido de grafeno es sintetizado por oxidación y exfoliación química del grafito . La principal diferencia entre el grafito

y el grafeno es la separación laminar de las capas del enrejado, se puede considerar el grafeno como una capa unitaria del arreglo multilaminar que constituye el grafito (Contreras Ortiz, 2021). Entre los métodos para sintetizar óxido de grafeno (OG), destaca el propuesto por Marcano et al. (2010), planteado como una solución al método tradicional de Hummers. La modificación consiste en añadir H_3PO_4 en lugar de usar $NaNO_3$, lo cual elimina la desventaja de la gran emisión de vapores tóxicos amarillos (NO_2) y logrando resultados similares de manera segura, tal como lo expresa Contreras Ortiz, (2021) y Jose Medina Leguia et al., (2023).

Con el objetivo de optimizar el rendimiento de las fibras naturales, Díaz Ramírez, (2023) utilizó nanopartículas de óxido de grafeno reducido (OGr) como recubrimiento. Esta adición mejoró las propiedades de la fibra de fique en hilos y tejidos, influyendo directamente en el comportamiento dinámico- mecánico de los compuestos obtenidos. Los resultados indicaron que, en comparación con el dióxido de titanio, el óxido de grafeno obtuvo un rendimiento superior en el tratamiento de la hidrofobicidad de la fibra. De manera análoga, el óxido de grafeno utilizado como recubrimiento contribuyó al aumento de la temperatura de degradación térmica de las fibras.

2.4 Influencia de la Tasa de Deformación en la Resistencia a Tracción de Fibras Naturales

El efecto de la tasa de deformación refleja la velocidad con la que un material cambia de forma bajo la influencia de fuerzas externas en diversas condiciones de carga. Varios autores han llevado a cabo estudios sobre la resistencia a la tracción en materiales fibrosos, evaluando diferentes tasas de deformación. En el caso de Chokshi et al., (2020), quienes examinaron la resistencia a la tensión (TS) de fibras naturales, sus resultados revelaron un aumento gradual de la TS a tasas más bajas de deformación, en el rango de $0.17 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ a $1.25 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, seguido de una disminución gradual a tasas más altas de deformación.

Por otro lado, un estudio realizado en Brasil por Tomczak et al., (2007) lograron reportar el efecto de la tasa de deformación en fibras de curauá. Al aumentar la velocidad de deformación de las fibras de curauá, la resistencia última aumentó de 178 a 217 MPa. A pesar de ello, el porcentaje de deformación a la rotura (4,57%) y el módulo de elasticidad (48,7 GPa) apenas variaron, indicando que las fibras, bajo pruebas mecánicas rápidas, mantienen propiedades elásticas. Este comportamiento sugiere una absorción predominante de la tensión en la región cristalina, contribuyendo al incremento en la resistencia última a tracción.

3. Preparación de probetas para los ensayos a tracción

3.1 Tratamiento de alcalinización para las fibras de fique

Se recibió un carrete de hilo de fibra de fique como se observa en la Figura 1, con una densidad lineal de 1050 m/kg equivalente a 0.952 TEX donado por la empresa Coohilados del Fonce, el cual fue cuidadosamente almacenado en bolsas sellables para preservar sus propiedades generales desde su fabricación y evitar la degradación durante su manipulación. Este hilo fue seleccionado como materia prima para el proceso de mercerización, un tratamiento previo esencial antes de aplicar el recubrimiento con óxido de grafeno. La mercerización permitió la superficie de las fibras, optimizando su interacción con el recubrimiento y asegurando una mejor adherencia y distribución del óxido de grafeno en etapas posteriores.

Figura 1

Carrete de hilo de fibra de fique



Nota: Carrete hilo de fibra de fique. 1050 metros por cada kilogramo de hilo.

Las fibras se colocaron en un marco de acero inoxidable de dimensiones 18 x 29 cm, lo que permitió su inmersión óptima en las bandejas utilizadas durante la mercerización, Figura 2. Los hilos se amarraron en ambos extremos y se hilaron con una sola vuelta, garantizando una tensión uniforme y una exposición completa de cada fragmento al tratamiento alcalino. Esta configuración favoreció la aplicación homogénea del hidróxido de sodio, asegurando una impregnación efectiva de todos los hilos y preservando la integridad del hilado. El tratamiento con NaOH se llevó a cabo sumergiendo los marcos en una solución de hidróxido de sodio al 2% p/v (20 gramos de NaOH por litro de agua desionizada).

Figura 2

Montaje experimental para el proceso de alcalinización

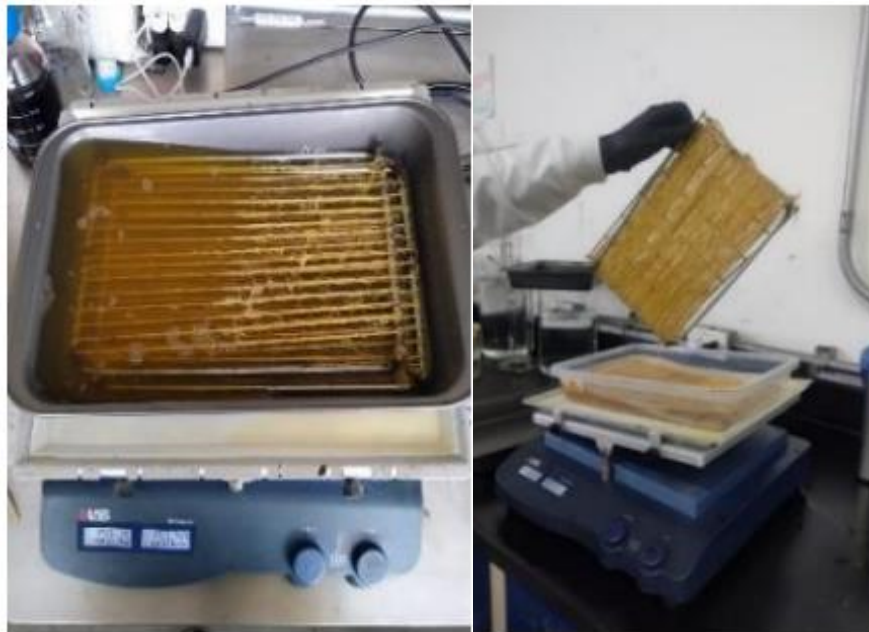


Para garantizar una impregnación uniforme, las bandejas con la solución se ubicaron sobre una plataforma oscilante que mantuvo en movimiento constante la mezcla durante 20 minutos, ver Figura 3. Una vez finalizado este tiempo, se retiró la solución alcalina, y los hilos fueron sometidos

a un proceso de neutralización con agua desionizada. En esta etapa, las bandejas volvieron a colocarse en la plataforma oscilante por otros 20 minutos, asegurando la eliminación completa del exceso de hidróxido de sodio y cualquier residuo que pudiera comprometer las propiedades finales de los hilos. La neutralización efectiva fue un paso crucial para preservar la calidad del producto tratado y garantizar que los hilos mantuvieran las características deseadas tras el proceso.

Figura 3

Proceso de mercerización y enjuague de los hilos



Finalmente, los marcos con los hilos mercerizados se llevaron al horno, donde se secaron a una temperatura constante de 45°C durante 16 horas (Figura 4). Al retirar los hilos del horno, se almacenaron inmediatamente en bolsas sellables para mantener una humedad óptima.

Figura 4

Secado y almacenamiento de las fibras mercerizadas

**3.2 Recubrimiento superficial sobre hilos mercerizados usando óxido de grafeno**

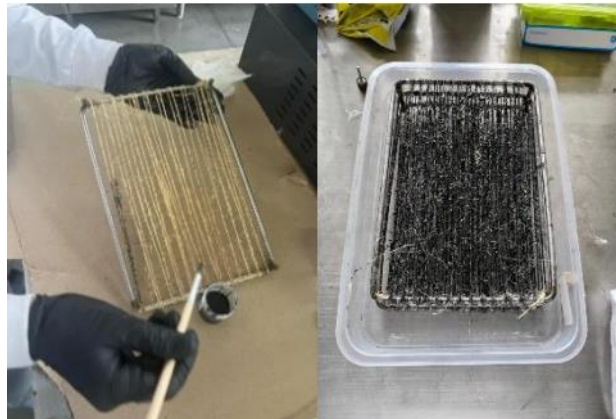
En este estudio, la solución de óxido de grafeno utilizada fue sintetizada empleando la metodología de Hummers o Marcano et al., (2010), suministrada por el laboratorio LEAM. Esta técnica, ampliamente utilizada en la producción de óxido de grafeno, se basa en la oxidación de grafito garantizando alta calidad en la obtención del material.

El recubrimiento de óxido de grafeno se llevó a cabo inmediatamente después del tratamiento con hidróxido de sodio y el secado en horno de los hilos. La solución de óxido de grafeno se preparó disolviendo el material en thinner para poliuretanos, con el propósito de crear una mezcla adecuada para su aplicación como pintura. El proceso de recubrimiento fue realizado de forma manual utilizando un pincel, con el que se pintó cuidadosamente cada hilo mientras estaban tensados en los marcos de acero inoxidable. Esta disposición permitió una manipulación más eficiente y un control preciso durante la aplicación. Para asegurar una cobertura uniforme, los hilos recibieron una primera capa de recubrimiento, seguida de un periodo de secado de 24 horas antes de aplicar una segunda capa.

Durante el proceso, la zona de trabajo fue protegida con papel para evitar que el compuesto afectara la superficie de la mesa, considerando las propiedades del thinner. El ambiente fue preparado para minimizar la contaminación y garantizar un secado adecuado. La figura 5 ilustra cada etapa, desde la aplicación manual con el pincel hasta el aspecto final de los hilos después de la impregnación completa. Este método, aunque artesanal, resultó efectivo para lograr una cobertura homogénea en cada hebra, asegurando que el óxido de grafeno se adhiriera de manera uniforme a lo largo de los hilos

Figura 5

Aplicación de óxido de grafeno sobre hilos de fique mercerizados



3.3 Manejo y disposición de residuos

El manejo de los residuos de hidróxido de sodio (NaOH) y óxido de grafeno se realizó siguiendo las instrucciones de seguridad del laboratorio LEAM, lo que incluyó el uso de equipos de protección personal (EPP) como guantes de nitrilo y gafas de seguridad para proteger al personal durante la manipulación de estas sustancias. Una vez completado el tratamiento, la solución de NaOH fue recolectada en un recipiente resistente a químicos, utilizando un embudo de vidrio para realizar la transferencia de manera controlada y evitar derrames. Este recipiente,

etiquetado correctamente, se almacenó en un área específica del laboratorio hasta su disposición final.

Para el óxido de grafeno, se utilizaron recipientes de plástico adecuados para contener la mezcla disuelta en thinner, evitando posibles incompatibilidades. La cantidad de solución preparada fue mínima para reducir los residuos. Los materiales contaminados, como el papel Kraft y los recipientes usados, se dispusieron en contenedores para residuos peligrosos, siguiendo un protocolo seguro y responsable que minimiza los riesgos ambientales y asegura la correcta gestión de los desechos.

3.4 Metodología para la preparación de probetas

Inicialmente, se diseñó un molde 3D con capacidad para preparar 12 probetas simultáneamente, con una ranura para cada hilo, ver Figura 6. Sin embargo, solo se utilizaron 10 de estas ranuras, ya que las ubicadas en los extremos no permitían obtener piezas de resina con la calidad necesaria para funcionar como zonas de sujeción adecuadas en la máquina MTS. Para evitar la pérdida de resina por las ranuras libres, estas se taparon con silicona. El molde fue diseñado específicamente para producir probetas con dimensiones de 40 x 15 x 4 mm, asegurando una estructura sólida en las zonas de sujeción. El molde se fabricó en caucho moldeable, lo que facilitó la extracción de las piezas de resina una vez secas, evitando deformaciones o daños durante el proceso.

Figura 6

Molde implementado para la fabricación de probetas



El procedimiento constructivo se desarrolló de la siguiente manera:

3.4.1 Preparación de Moldes: Se separaron los moldes de caucho para conservar una longitud libre de 250 mm en cada probeta. Esta medida se toma desde el borde interno de cada molde 3D.

3.4.2 Adición de Fibra de Vidrio: Se colocó una capa de fibra de vidrio en el fondo del molde con dimensiones exactas al molde para asegurar un ajuste perfecto. Esto aumentó la resistencia de agarre de las probetas y redujo el consumo de resina epóxica.

3.4.3 Inserción y Fijación de Hilos: Los hilos recubiertos con óxido de grafeno se introdujeron en las 10 ranuras del molde. Cada hilo se fijó con grapas en los extremos para mantener la tensión y evitar desplazamientos, asegurando la longitud deseada.

3.4.4 Sellado de Ranuras: Las ranuras del molde se sellaron parcialmente con silicona caliente para prevenir la filtración de resina, evitando así alteraciones en las propiedades de la fibra y sus resultados a tracción.

3.4.5 Preparación y Aplicación de Resina Epóxica: Se preparó una solución de resina epóxica combinando 30 ml de resina con 30 ml de catalizador para producir 10 probetas. La mezcla se homogeneizó y se vertió en el molde. Para minimizar burbujas de aire, se aplicó presión manual con un punzón para eliminar las burbujas y se retiró el exceso de resina. Los moldes se dejaron curar durante aproximadamente 12 horas al final del proceso.

3.4.6 Aplicación de Fibra de Vidrio Adicional: Se añadió una segunda capa de fibra de vidrio sobre los hilos para proporcionar refuerzo por el lado opuesto a la posición del hilo.

3.4.7 Aplicación final de resina. Se añadió una segunda capa de resina. Para minimizar burbujas de aire, se aplicó presión manual con un punzón para eliminar las burbujas y se retiró el exceso de resina.

3.4.8 Desmoldeo y Corte: Después del período de curado, se desmoldaron las probetas y se cortaron con una segueta eléctrica, asegurando un ancho de 15 mm para cada probeta, el resultado final se observa en la Figura 7.

3.4.9 Repetición del Proceso: Este procedimiento se repitió seis veces para obtener un total de 60 probetas. Cada probeta se almacenó individualmente en bolsas sellables para preservar su integridad y mantener su nivel de humedad, garantizando así una preparación óptima para los ensayos de tracción.

Figura 7

Resultados de los extremos de las probetas

**4. Ejecución de ensayos a tracción**

Para la evaluación de la resistencia a la tracción de los hilos de óxido de grafeno, se empleó la norma ASTM C1557-20 (*Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers I*, n.d.), que proporciona el método estándar para determinar la resistencia a la tracción y el módulo de Young de fibras individuales.

El protocolo experimental se diseñó para garantizar la precisión y la consistencia en los resultados. Primero, se organizaron las probetas de acuerdo con las diferentes velocidades de deformación. La máquina de ensayo utilizada fue la Landmark MTS SilentFlo 515 Hydraulic Power Unit, perteneciente a la escuela de Ingeniería Mecánica, ver Figura 8. Este equipo fue configurado para realizar ensayos a tres tasas de deformación diferentes, lo que permitió una evaluación completa de la respuesta de las fibras. El equipo utilizado fue la máquina universal de

ensayos Landmark MTS SilentFlo 515 Hydraulic Power Unit de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 8

Máquina MTS



Para evaluar el comportamiento del material estudiado bajo diferentes condiciones de carga, se seleccionaron tres tasas de deformación. En primer lugar, se seleccionó una tasa de 0.01 s^{-1} , esta imita condiciones extremas como terremotos o choques severos, como punto de partida para analizar la capacidad del material en situaciones de alta carga dinámica. En segundo lugar, se seleccionó una tasa intermedia de 0.001 s^{-1} , similar a impactos vehiculares, finalmente, se seleccionó una tasa de 0.000067 s^{-1} , que se considera dentro del rango de condiciones cuasi-estáticas.

El objetivo de evaluar estas tres tasas fue obtener una visión integral del desempeño del material en diferentes escenarios de carga. La capacidad de un material para mantener su integridad bajo estas diversas tasas de deformación es vital para su aplicación en el mundo real. En el

laboratorio, esto implica ajustar los procedimientos de ensayo para simular de manera precisa las condiciones que el material enfrentará en uso. Si el material muestra un rendimiento robusto y consistente a través de estas tasas, se considera que tiene una alta calidad y fiabilidad. Para aplicaciones comerciales, esto significa que el material debe ser capaz de soportar una variedad de condiciones sin comprometer su rendimiento garantizando así su durabilidad y seguridad en aplicaciones finales.

Tabla 2

Datos del protocolo para ensayos a tracción

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

5. Tratamiento de datos de los ensayos mecánicos

Para evaluar el comportamiento mecánico de los hilos de fique modificados con óxido de grafeno, se realizaron cálculos a partir de los datos experimentales obtenidos en los ensayos de tracción. El primer paso consistió en determinar la deformación unitaria (ϵ), que se calcula dividiendo el desplazamiento axial registrado (ΔL) entre la longitud inicial del hilo (L_0), de acuerdo con la ecuación (1). La deformación es un parámetro crucial para caracterizar la elasticidad y ductilidad del material bajo tensión.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (1)$$

A continuación, se calculó el esfuerzo (σ) mediante la ecuación (2), utilizando la fuerza aplicada (F) dividida por el área de la sección transversal del hilo modificado con óxido de grafeno (A), que fue proporcionada por el investigador Nicolás Díaz, con un valor específico de 0.736 mm². Este esfuerzo es clave para entender cómo responde la fibra a la carga aplicada y cómo se distribuye internamente la tensión.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$

El módulo de elasticidad (E) se estimó en la zona elástico-lineal, obtenida entre el 0% y el 80% de los valores de esfuerzo máximo. Este valor se calculó mediante la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en ese rango, utilizando la ecuación (3), lo que permitió definir la rigidez del material. Un módulo más alto indica una fibra menos flexible, lo que es de interés al evaluar la resistencia de hilos reforzados para aplicaciones estructurales.

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

Finalmente, se procedió al cálculo de la energía de deformación (U_r) por unidad de volumen hasta el esfuerzo último, una medida representativa de la capacidad de absorción de energía del material antes de fallar. Este cálculo se llevó a cabo empleando el método del trapecio

para sumar las áreas de los segmentos delimitados por pares consecutivos de puntos en la curva esfuerzo-deformación, según la ecuación (4). La ecuación (5) para la energía es la suma de todas las áreas parciales:

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

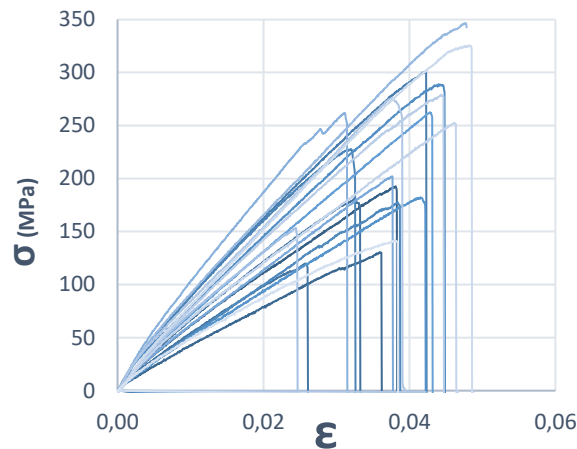
$$U_r = \sum_{i=1}^n \text{Área}_i \quad (5)$$

6. Resultados

En la Figura 9, correspondiente a la tasa de deformación de 1 mm/min, se observa un comportamiento inicial con una pendiente pronunciada, correspondiente a un módulo de elasticidad máximo de 8.56 GPa. Sin embargo, los resultados muestran una notable dispersión en las curvas, lo que refleja la variabilidad inherente de los hilos. El valor máximo de esfuerzo último fue de 346.4 MPa, mientras que la deformación al momento de rotura un 4.8%, lo cual sugiere un comportamiento frágil con una limitada capacidad de deformación antes de la rotura. La energía promedio absorbida fue de 4.84 MPa, indicando una baja capacidad de almacenamiento de energía en esta condición.

Figura 9

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

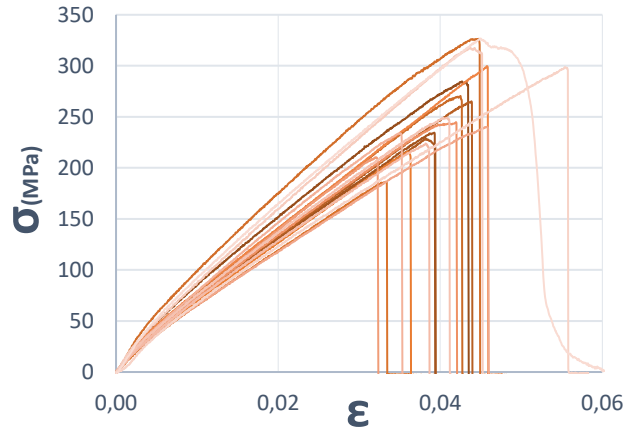


En estudios comparativos de hilos de fibras naturales se puede destacar una diferencia positiva en valores de resistencia última a bajas tasas de deformación, siendo el hilo de lino con el registro más alto de 310 MPa por Chokshi et al., (2020)

La Figura 10, para la velocidad de 15 mm/min, destaca por su mayor consistencia en las curvas obtenidas, con una menor dispersión. Los resultados máximos incluyen un esfuerzo último de 326.6 MPa, un módulo de elasticidad de 7.6 GPa y una deformación de 5.5%, lo que refleja un equilibrio entre resistencia y ductilidad. Este comportamiento es respaldado por la energía absorbida promedio de 5.5 MPa, ligeramente superior a la observada a 1 mm/min, sugiriendo una mayor capacidad de deformación y absorción de energía bajo esta velocidad. En ambas velocidades suele tener bajos porcentajes de elongación máxima hasta la rotura en comparación a estudios enfocados en la fibra de fique natural donde reportan rangos entre 6-10% (Lozano-Rivas et al., 2016; Muñoz-Blandón et al., 2023; Rendón-Castrillón et al., 2022)

Figura 10

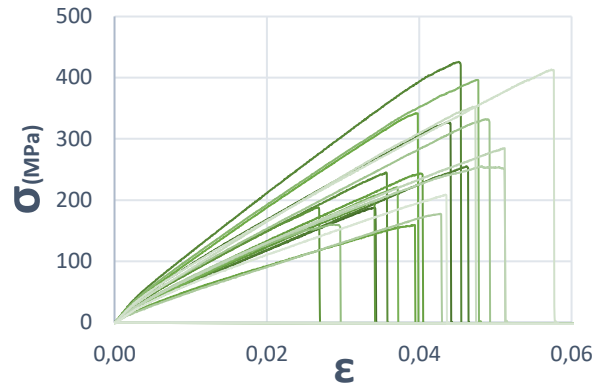
Curva esfuerzo-deformación unitaria $\varepsilon = 0.001 \text{ s}^{-1}$



En la Figura 11, correspondiente a la tasa de 150 mm/min, se observa un incremento significativo en el esfuerzo máximo, alcanzando 425.9 MPa, acompañado de un módulo de elasticidad de 9.5 GPa. Aunque las curvas muestran una mayor dispersión en comparación con la tasa de 15 mm/min, se observa una tendencia clara hacia un comportamiento más rígido y frágil, con una deformación máxima de 5.7% antes de la rotura. La energía absorbida promedio fue de 6.34 MPa, indicando un aumento en la capacidad de almacenamiento de energía, aunque a expensas de una mayor rigidez y menor ductilidad. De acuerdo con el promedio de datos se resalta un crecimiento de los parámetros mecánicos conforme la tasa de deformación aumenta y rompe la particularidad del comportamiento de otros hilos de fibras natural que presentan un decrecimiento (Chokshi et al., 2020; Madueke et al., 2023).

Figura 11

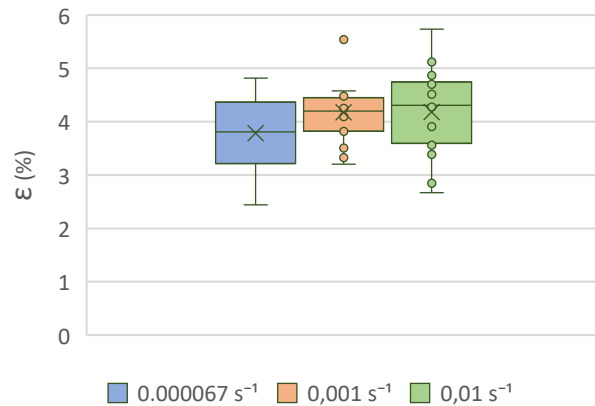
Curva esfuerzo-deformación unitaria $\dot{\epsilon} = 0.01 \text{ s}^{-1}$



Por otro lado, se obtuvieron las siguientes tablas donde se recopilaron los resultados de las propiedades mencionadas anteriormente. La Figura 12 muestra que la deformación máxima presenta una tendencia ligeramente decreciente conforme aumenta la tasa de deformación. A 1 mm/min, la deformación promedio es de 3.8%, mientras que para 15 y 150 mm/min se incrementa levemente a 4.0% y 4.18%, respectivamente. Esto representa un aumento del 5.26% entre 1 mm/min y 15 mm/min, y un incremento total del 10% al comparar 1 con 150 mm/min. Aunque los valores son similares, el incremento de la tasa de deformación produce una ligera reducción en la capacidad de los hilos para elongarse antes de romperse. Este comportamiento puede explicarse por la menor capacidad de los hilos para redistribuir tensiones a altas tasas de deformación, lo que limita su ductilidad (Díaz Ramírez, 2023; Gómez-Suarez & Córdoba-Tuta, 2022).

Figura 12

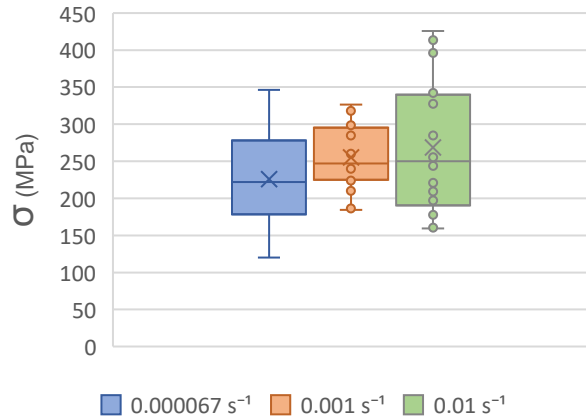
Distribución de la deformación unitaria para cada tasa de deformación.



En la Figura 13 se observa que el esfuerzo último sigue una tendencia similar al módulo de elasticidad, incrementándose conforme se aumenta la tasa de deformación. A una velocidad de 1 mm/min, el esfuerzo promedio registrado es de 225.94 MPa. Este valor se incrementa a 245.1 MPa al aplicar una velocidad de 15 mm/min, y alcanza un máximo de 268.77 MPa bajo una velocidad de 150 mm/min. El aumento relativo es del 8.47% entre las primeras dos velocidades, y llega al 18.95% cuando se compara con la mayor tasa de deformación. Este comportamiento resalta mayor resistencia a la rotura a mayores velocidades de carga. Este fenómeno se debe a la reducción del tiempo disponible para la nucleación y propagación de micro fisuras, lo que permite al material resistir mayores esfuerzos. Sin embargo, esta resistencia mayor no se traduce en una mayor capacidad de deformación, como lo muestra la disminución en la deformación al momento de la rotura.

Figura 13

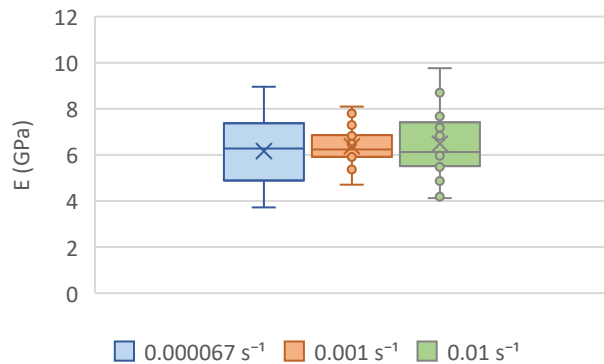
Distribución del esfuerzo último para cada tasa de deformación.



La Figura 14 evidencia que el módulo de elasticidad muestra una tendencia ascendente promedio con el incremento de la tasa de deformación. A una velocidad de 1 mm/min, el módulo promedio registrado es de 5.94 GPa. Este valor sube a 6.11 GPa cuando la velocidad aumenta a 15 mm/min y llega a 6.25 GPa a 150 mm/min. En términos porcentuales, esto representa un incremento del 2.86% entre las dos primeras velocidades, y un total del 5.21% al comparar con la velocidad de 150 mm/min.

Figura 14

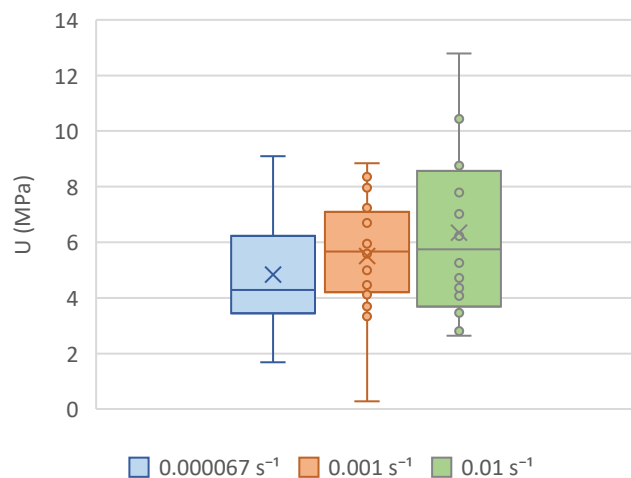
Distribución del módulo de elasticidad para cada tasa de deformación.



El comportamiento observado, donde el módulo de elasticidad muestra un incremento reducido con el aumento de la tasa de deformación, es característico en materiales sometidos a ensayos a tracción. Este parámetro refleja la rigidez elástica del material en la etapa inicial de deformación y es menos sensible a la variación de la velocidad de carga en comparación con el esfuerzo máximo. Esta se puede considerar una respuesta típica, ya que la deformación elástica no está directamente influenciada por la velocidad a la que se aplica la carga, lo que hace que el módulo de elasticidad varíe en menor medida en ensayos con diferentes tasas de deformación. Este aumento en rigidez indica una mayor resistencia inicial del material a la deformación, típico en comportamientos donde los materiales presentan una respuesta más frágil y menos deformable a tasas de carga elevadas. La alcalinización y el recubrimiento con óxido de grafeno parecen contribuir a este aumento en la rigidez, mejorando la capacidad del material para soportar cargas sin deformarse excesivamente (Díaz Ramírez, 2023; Jose Medina Leguia et al., 2023; Martínez Suárez et al., 2021).

Figura 15

Distribución de la energía de deformación para cada tasa de deformación.



Finalmente, la Figura 15 muestra que la energía de deformación también aumenta a medida que se incrementa la tasa de deformación. A 1 mm/min, la energía promedio es de 4.84 MPa, subiendo a 5.5 MPa para 15 mm/min y alcanzando 6.34 MPa a 150 mm/min. Este parámetro refleja la cantidad de energía absorbida por los hilos antes de romperse, lo que sugiere que, bajo condiciones de carga más rápidas, los hilos son capaces de almacenar más energía a pesar de su mayor rigidez. Sin embargo, este aumento de la energía no se traduce en una mayor capacidad de deformación, ya que, como se mencionó, la ductilidad general disminuye. Este comportamiento puede deberse a que la energía absorbida se disipa en forma de tensiones internas, incrementando la resistencia a la rotura en lugar de permitir una mayor elongación.

En los apéndices A y C, se observa un comportamiento consistente en los valores de los parámetros mecánicos a medida que se incrementa la tasa de deformación. En particular, los resultados promedio para la velocidad de 15 mm/min (Apéndice A) muestran una tendencia intermedia tanto en deformación al momento de la rotura como en esfuerzo último, con valores de 4.0% y 245.1 MPa, respectivamente. Además, el módulo de elasticidad (6.11 GPa) y la energía de deformación (5.5 MPa) sugieren una combinación de rigidez y capacidad de absorción de energía que destaca frente a las otras velocidades evaluadas. Es relevante señalar que estos datos presentan una mayor dispersión en comparación con las otras velocidades, como se evidenció en las gráficas de esfuerzo-deformación, donde las curvas asociadas a los ensayos de 15 mm/min se agrupan de forma desordenada. Esto indica una mayor inconsistencia en los resultados experimentales para esta velocidad, facilitando la interpretación de los parámetros mecánicos obtenidos (Tabla 4).

Tabla 3

Propiedades a tracción con $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ s}^{-1}$

<i>Hilo</i>	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	<i>E</i> (GPa)	U_r (MPa)
1	3,81	192,8	5,08	3,96
2	3,60	130,4	3,73	2,54
3	3,25	181,1	5,75	3,56
4	2,57	120,0	4,81	1,69
5	4,22	300,8	7,41	7,01
6	3,20	227,7	7,60	4,12
7	3,84	177,5	4,81	3,63
8	4,40	288,9	6,70	7,21
9	4,15	182,3	4,43	4,45
10	2,84	215,8	7,97	3,40
11	4,29	262,5	6,10	5,91
12	3,76	202,1	5,34	4,03
13	3,11	262,0	8,96	4,55
14	4,77	346,4	7,56	9,09
15	2,44	153,4	6,45	2,05
16	3,77	276,0	7,16	5,50
17	4,43	278,7	6,62	6,23
18	4,61	252,6	5,47	6,22
19	4,82	325,6	7,29	8,57
20	3,80	142,1	4,01	3,08

Tabla 4

Presenta los valores de media \bar{X} , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV)

correspondientes a los parámetros mecánicos $\dot{\epsilon} = 0.000067 \text{ s}^{-1}$

	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	<i>E</i> (GPa)	U_r (MPa)
\bar{X}	3,79	225,9	6,16	4,84
δ	0,703	66,22	1,44	2,07
cv	19%	29%	23%	43%

7. Conclusiones

El presente estudio se enfocó en caracterizar mecánicamente los hilos de fique mercerizados y modificados superficialmente con óxido de grafeno, logrando cumplir con el objetivo general de desarrollar actividades experimentales para evaluar la respuesta a tracción de los hilos bajo diversas tasas de deformación. Este enfoque permitió no solo verificar las propiedades mecánicas del material, sino también explorar su potencial para aplicaciones que requieran alta resistencia y fiabilidad estructural.

En primer lugar, se logró una preparación efectiva de los hilos de fique mediante un tratamiento con hidróxido de sodio y recubrimiento de óxido de grafeno. La mercerización fue crucial para mejorar la superficie de las fibras, facilitando la adhesión del óxido de grafeno y potenciando la resistencia del material. Esta modificación superficial del fique abre la puerta a su uso en materiales compuestos, donde el refuerzo y la integridad de la matriz son esenciales para aplicaciones en sectores como la construcción y la industria automotriz.

Los resultados experimentales revelaron que los hilos de fique tratados presentaron un comportamiento mecánico superior y más rígido a medida que aumentaban las tasas de deformación. A una tasa de 0.000067 s^{-1} , el módulo de elasticidad promedio fue de 5.94 GPa, incrementándose a 6.25 GPa con una tasa de 0.01 s^{-1} . Este aumento indica una respuesta más elástica bajo condiciones de carga rápida, con menor tendencia a la deformación plástica. Este comportamiento es indicativo de un material que puede absorber tensiones rápidas y retornar a su forma original sin deformaciones significativas, lo cual es deseable en aplicaciones que requieren resiliencia frente a impactos o cargas dinámicas.

En cuanto al esfuerzo último y a la energía de deformación, el estudio mostró una clara correlación con el aumento en la tasa de deformación. El esfuerzo último se incrementó de 225.94 MPa a 268.77 MPa, reflejando una mayor capacidad de resistencia a la tracción. Asimismo, la energía absorbida antes de la fractura pasó de 4.84 MPa a 6.34 MPa, subrayando que los hilos de fique modificados pueden almacenar más energía bajo cargas crecientes, lo cual es ventajoso para aplicaciones de alta demanda energética y resistencia estructural. No obstante, cabe señalar que estos materiales presentan menor ductilidad a velocidades de carga altas, un aspecto a considerar en el diseño de aplicaciones que demanden flexibilidad.

En conclusión, el comportamiento mecánico de los hilos de fique modificados sugiere que este material es una opción prometedora en el diseño de componentes que requieren una combinación de rigidez y capacidad de absorción de energía. Este estudio destaca la importancia de adaptar las propiedades de las fibras naturales mediante tratamientos químicos y superficiales, abriendo nuevas perspectivas para el desarrollo de materiales sostenibles y de alto rendimiento.

6. Recomendaciones

Explorar otras técnicas de recubrimiento, para futuras investigaciones podrían experimentar con diferentes métodos de aplicación del óxido de grafeno, como inmersión o recubrimiento por aspersión, para optimizar la uniformidad y adherencia en las fibras de fique. Esto podría mejorar la resistencia y propiedades mecánicas, ofreciendo mayor consistencia en los resultados.

Un análisis térmico y de humedad debido que las fibras naturales son sensibles a la humedad, se recomienda incorporar ensayos de absorción de humedad o ciclos de temperatura para evaluar la durabilidad del material en condiciones ambientales variables. Estos estudios podrían revelar la resistencia a condiciones extremas y facilitar la predicción de su comportamiento en diferentes aplicaciones.

Comparación con otros recubrimientos nanoestructurados, sería útil comparar el óxido de grafeno con otros materiales nanoestructurados, como el dióxido de titanio o las nanopartículas de sílice, para evaluar si el recubrimiento de grafeno proporciona ventajas competitivas en cuanto a resistencia y durabilidad.

Implementación de ensayos dinámicos para ampliar la aplicabilidad del estudio, se sugiere realizar ensayos dinámicos de impacto o fatiga. Esto proporcionaría una perspectiva más integral sobre el comportamiento del material bajo cargas cíclicas y podría demostrar su aptitud para aplicaciones en las que el material está expuesto a esfuerzos repetitivos.

Evaluación de propiedades ambientales, la implementación de pruebas de biodegradabilidad o impacto ambiental podría ser valioso para validar el uso de fibras de fique modificadas en aplicaciones ecológicamente sostenibles. Estas pruebas pueden agregar valor a la investigación, resaltando la ventaja de este material frente a alternativas sintéticas.

Referencias Bibliográficas

- Chokshi, S., Gohil, P., Lalakiya, A., Patel, P., & Parmar, A. (2020). Tensile strength prediction of natural fiber and natural fiber yarn: Strain rate variation upshot. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1218–1223. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.142>
- Contreras Ortiz, S. N. (2021). *Síntesis y caracterización de óxido de grafeno funcionalizado para la remediación de aguas de producción de la industria petrolera*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/9673>
- de la Cruz-Velasco, L., Chamorro-Mejía, J., & Córdoba-Cely, C. (2021). Characterization physico-chemical and mechanical of 4 vegetable fibers used as artisanal raw materials in the department of Nariño | Caracterización fisicoquímica y mecánica de 4 fibras vegetales utilizadas como materia prima artesanal en el departamento . *DYNA (Colombia)*, 88(216), 96–102. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.87958>
- Díaz Ramírez, G. A. (2023). *Influencia de la modificación superficial de fibras naturales y su arquitectura de refuerzo sobre el desempeño de un compuesto polimérico*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14620>
- Gomez, T. S., Zuluaga, S., Jimenez, M., Navacerrada, M. Á., Barbero-Barrera, M. M., de la Prida, D., Restrepo-Osorio, A., & Fernández-Morales, P. (2021). Evaluation of colombian crops fibrous byproducts for potential applications in sustainable building acoustics. *Polymers*, 13(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym13010101>
- Gómez-Suarez, S. A., & Córdoba-Tuta, E. (2022). Materiales compuestos reforzados con fibras de fique-revisión. *Revista UIS Ingenierías*, 21(1), 163–178. <https://doi.org/10.18273/REVUIN.V21N1-2022013>

- Guzmán, R. E., Gómez, S., Amelines, O., & Aparicio, G. M. (2018). Superficial modification by alkalization of cellulose Fibres obtained from Fique leaf. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 437(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/437/1/012015>
- Jose Medina Leguia, C., Camilo Estrada Fernández, A., & John Jairo Rodríguez Molina, C. (2023). *Evaluación de la aplicación de nanopartículas de óxido de grafeno sobre la tensión interfacial de un crudo pesado de un campo colombiano*. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12645>
- Laverde, V., Marin, A., Benjumea, J. M., & Rincón Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials*, 340, 127729. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127729>
- Lozano-Rivas, W. A., Whiting, K. E., Gómez-Lahoz, C., & Rodríguez-Maroto, J. M. (2016). Use of glycosides extracted from the fique (*Furcraea* sp.) in wastewater treatment for textile industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(4), 1131–1136. <https://doi.org/10.1007/S13762-016-0953-Z>
- 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>
- Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W., & Tour, J. M. (2010). Improved synthesis of graphene oxide. *ACS Nano*, 4(8), 4806–4814. https://doi.org/10.1021/NN1006368/ASSET/IMAGES/MEDIUM/NN-2010-006368_0012.GIF

- Martínez Suárez, C., Rojas Montejo, P., & Gutiérrez Junco, O. (2021). Effects of alkaline treatments on natural fibers. *Journal of Physics: Conference Series*, 2046(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012056>
- 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>
- Rendón-Castrillón, L., Ramírez-Carmona, M., Ocampo-López, C., Pinedo-Rangel, V., Muñoz-Blandón, O., & Trujillo-Aramburo, E. (2022). The Industrial Potential of Fique Cultivated in Colombia. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 695, 15(1), 695. <https://doi.org/10.3390/SU15010695>
- Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers 1.* (n.d.). <https://doi.org/10.1520/C1557-20>
- Tomczak, 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>
- Urcuyo, R., González-Flores, D., Cordero-Solano, K., Urcuyo, R., González-Flores, D., & Cordero-Solano, K. (2021). Perspectivas y aplicaciones reales del grafeno después de 16 años de su descubrimiento. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 51–85. <https://doi.org/10.15446/REV.COLOMB.QUIM.V50N1.90134>

Apéndices

Apéndice A

Propiedades a tensión con $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$

<i>Hilo</i>	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	<i>E</i> (GPa)	U_r (MPa)
1	4,26	284,6	6,82	6,69
2	3,82	228,4	5,97	4,72
3	3,93	234,5	5,96	4,99
4	0,81	60,5	8,09	0,28
5	4,39	265,2	6,01	6,24
6	4,25	270,4	6,47	6,22
7	4,48	326,4	7,80	8,35
8	3,86	184,3	4,70	3,70
9	3,33	186,5	5,62	3,33
10	3,60	215,9	5,91	4,12
11	4,58	299,7	6,82	7,23
12	4,20	244,8	6,21	5,73
13	3,20	210,3	6,56	3,61
14	4,56	240,1	5,36	5,95
15	3,50	234,1	6,87	4,47
16	3,82	224,0	5,93	4,62
17	4,09	249,0	6,24	5,59
18	4,37	317,8	7,29	7,46
19	5,54	298,8	5,47	8,84
20	5,54	326,6	7,35	7,97

Apéndice B

Presenta los valores de media \bar{X} , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV)

correspondientes a los parámetros mecánicos $\dot{\epsilon} = 0.001 \text{ s}^{-1}$

	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	<i>E</i> (GPa)	U_r (MPa)
\bar{X}	4,01	245,1	6,37	5,51
δ	0,969	61,26	0,85	2,03
CV	24%	25%	13%	37%

Apéndice C

Propiedades a tensión con $\dot{\epsilon} = 0.01 s^{-1}$

<i>Hilo</i>	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	E (GPa)	U_r (MPa)
1	3,41	187,6	5,50	3,46
2	4,37	327,6	7,49	7,79
3	4,62	255,3	5,48	6,23
4	4,52	425,9	9,75	10,50
5	3,56	245,2	6,92	4,72
6	2,67	188,1	7,13	2,81
7	3,39	197,1	5,77	3,56
8	4,01	243,6	6,11	5,26
9	3,91	159,5	4,13	3,46
10	3,96	342,0	8,74	7,27
11	3,71	220,9	5,96	4,36
12	4,76	396,3	8,70	10,43
13	2,84	160,3	6,13	2,64
14	4,87	332,3	6,82	8,75
15	4,27	177,7	4,19	4,07
16	4,82	255,8	5,54	7,02
17	5,12	284,9	5,67	7,99
18	4,70	352,7	7,67	8,85
19	5,73	413,5	7,19	12,79
20	4,35	209,1	4,86	5,00

Apéndice D

Presenta los valores de media \bar{X} , desviación estándar δ y coeficiente de variación (CV)

correspondientes a los parámetros mecánicos $\dot{\epsilon} = 0.01s^{-1}$

	ϵ_u (%)	σ_u (MPa)	E (GPa)	U_r (MPa)
\bar{X}	4,18	268,8	6,49	6,35
δ	0,769	85,74	1,49	2,89
cv	18%	32%	23%	46%