

Caracterización de tejidos de fibras de plátano usados como refuerzo en materiales compuestos con matriz polimérica fabricados por moldeo por transferencia de resina con vacío asistido (VARTM)

**Juan Carlos Altamiranda Suarez¹, Olga Patricia Mora Solera¹, Dilliwell de Jesús Passos Guerra¹,
Oswaldo Rivero-Romero², Jimmy Unfried Silgado¹**

¹ Grupo de investigación ICT - Innovación, Ciencia y Tecnología, Facultad de ingeniería,
Universidad de Córdoba, Montería, Colombia. jaltamirandasuarez@correo.unicordoba.edu.co

² Grupo de investigación CCComposite, Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín,
Antioquia, Colombia. Rivero.romero@udea.edu.co

Resumen

Este estudio evalúa el uso de tejidos de fibras del pseudotallo del plátano del departamento de Córdoba, Colombia, como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica. Las fibras se extrajeron mediante decortinado manual y secadas a 40°C, se aplicaron tratamientos superficiales como mercerizado y recubrimiento de resina epóxica flexible. Se analizaron las características morfológicas con microscopía óptica y electrónica, y las propiedades químicas con análisis FTIR, estimación de la permeabilidad unidireccional de los tejidos elaborados, fuerza de adhesión de los tejidos y la matriz de resina de poliéster y la fuerza de tracción de los tejidos elaborados. Los resultados muestran un aumento ligero en el diámetro de los hilos tratados, sin cambios significativos en las propiedades mecánicas. En las pruebas de extracción, las fibras mercerizadas y recubiertas exhibieron una menor tasa de extracción (25%) en comparación con las no tratadas (33%), sugiriendo una mejor adherencia interfacial. La permeabilidad de los hilos tratados aumentó, mejorando la infiltración de resina, pero esto comprometió la carga a tracción de los tejidos, que fue de 2.33 kN para hilos de 10 fibras sin tratamiento frente a 1.37 kN para los tratados. Los hilos de 15 fibras mostraron una reducción en la carga a tracción, de 1.55 kN a 0.80 kN. Los tejidos con hilos tratados mostraron una reducción significativa en la carga a tracción y en la fuerza de adhesión con la resina de poliéster, lo que podría indicar un compromiso en la integridad estructural del material. La velocidad de enrollado afectó resistencia a la tensión de los hilos, con velocidades más altas mostrando mayor ángulo de torsión superficial.

Abstract

This study evaluates the use of banana pseudostem fiber fabrics from the Córdoba Department, Colombia, as reinforcement in polymer matrix composites. The fibers were extracted through manual decortivating and dried at 40°C. Surface treatments such as mercerization and coating with flexible epoxy resin were applied. Morphological characteristics were analyzed using optical and electron microscopy, while chemical properties were examined through FTIR analysis. Additionally, unidirectional permeability of the fabricated fabrics, adhesion strength between the fabrics and polyester resin matrix, and tensile strength of the fabricated fabrics were assessed. Results show a slight increase in the diameter of treated threads, with no significant changes in mechanical properties. Pull-out tests revealed that mercerized and coated fibers exhibited a lower extraction rate (25%) compared to untreated fibers (33%), suggesting improved interfacial adhesion. Permeability of treated threads increased, enhancing resin infiltration, but this compromised the tensile strength of the fabrics, with 10-fiber threads showing 2.33 kN for untreated versus 1.37 kN for treated ones, and 15-fiber threads showing a reduction from 1.55 kN to 0.80 kN. Fabrics with treated threads displayed a significant reduction in both tensile strength and adhesion force with polyester resin, indicating a potential compromise in the material's structural integrity. Roll speed influenced the tensile strength of the threads, with higher speeds resulting in increased twist angles.

Keywords: Fabrics; Banana; Reinforcement; Composite; version 2024.1

1. Introducción

Las fibras lignocelulósicas en los últimos años han sido ampliamente estudiadas como posible refuerzo para la fabricación de materiales compuestos con matriz polimérica (Muñoz et al., 2014). Esto debido a que se han convertido en un potencial sustituto de las fibras sintéticas, como las fibras de carbono y de vidrio, debido a su naturaleza biodegradable, su disponibilidad en fuentes renovables, costo, reciclabilidad y bajo peso, junto con sus propiedades mecánicas apreciables (Udaykumar et al., 2020)

Las fibras provenientes del pseudotallo del plátano son originarias de fuentes de residuos agroindustriales (Binal Y & Patel, 2022). Esto último ha sido de gran interés, ya que su aplicabilidad a nivel industrial puede confrontar la problemática de manejo de residuos en las industrias tecnificadas agropecuarias (Yaashikaa et al., 2022). Uno de los problemas en la manufactura de compuestos es la integración de las fibras lignocelulósicas en las matrices poliméricas debido la baja compatibilidad de las fibras por su naturaleza hidrofílica, y su alto contenido de pectinas y sustancias cerosas en su superficie, que dificultan su compatibilidad con matrices orgánicas hidrofóbicas (Oushabi, 2019).

De igual forma, se ha encontrado que una débil interfaz fibra-matriz puede promover un deterioro significativo en las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales compuestos (Basu et al., 2008). Por lo tanto, diversos tratamientos químicos superficiales son implementados con el objetivo de mejorar características fisicoquímicas, térmicas y mecánicas de las fibras (Oushabi, 2019). Los tratamientos químicos pueden mejorar la adherencia entre la matriz polimérica y la fibra natural. Además de reducir la hidrofiliidad de estas últimas, también mejoran la rugosidad de la superficie de la fibra para facilitar el anclaje mecánico entre los componentes y mejorar su mojabilidad (Piña et al., 2021). Uno de los tratamientos químicos comúnmente utilizados es el tratamiento alcalino con hidróxido de sodio (NaOH), también conocido como Mercerizado. Este produce un cambio en la estructura lignocelulósicas, y promueve una remoción de materiales no celulósicos en la superficie de las fibras naturales (Quiceno et al., 2019). Esta modificación permite mejorar la adhesión en la interfaz fibra-matriz, factor importante a la hora de trabajar con procesos como VARTM es garantizar la correcta impregnación de los refuerzos dentro del molde cerrado por lo tanto la mojabilidad se refiere al proceso de interacción entre una superficie sólida (tejido) y un líquido (resina). Algunos autores expresan que la mojabilidad de sólido-líquido es un fenómeno interfacial que a menudo se caracteriza por medir el ángulo de contacto formado entre una gota de líquido

y una superficie sólida (Piña et al., 2021). El objetivo de este trabajo es caracterizar tejidos elaborados a partir de fibras del pseudotallo del plátano para evaluar su potencial uso como refuerzo de materiales compuestos de matrices poliméricas usando vartm.

2. Materiales y métodos

2.1. Georreferenciación y recolección de materia prima

Se utilizaron pseudotallos de plátano de la variedad Hartón en el corregimiento del Retiro de los Indios, Cereté, departamento de Córdoba, Colombia. en las coordenadas 8°86'60.71"N 75°82'47.2"W (8.86071, -75.82472), datos del servicio de geolocalización de Google

2.2. Elaboración de hilos

Utilizando un peine de cerdas metálicas, se realizó un decortinado manual para obtener las fibras, eliminando residuos y reduciendo el contenido de agua en las mismas, ver Figura 1.

Las fibras se sometieron a un tratamiento químico utilizando una solución al 5% de NaOH para mejorar sus propiedades (Jyotishkumar et al., 2022). Después de la inmersión, las fibras fueron lavadas con ácido acético al 50% y enjuagadas con agua destilada para completar el tratamiento superficial y luego ser secadas a 40°C y 90°C. Posteriormente, para elaborar hilos continuos se usó una rueca fabricada mediante impresión 3D. Este dispositivo permitió variar la velocidad de enrollado, facilitando el proceso de hilado.



Figura 1. Proceso de extracción de fibras, a) calceta de plátano. b) limpieza de calceta, c) decortinado, d) fibras de plátano.

Para asegurar la uniformidad y evitar pérdidas de precarga durante el enrollado a un grupo de fibras se le

aplicó un recubrimiento de resina epóxica flexible (CR) utilizando un banco de recubrimiento diseñado por el equipo de trabajo. Esta se comparó con fibras no recubiertas (NR).

2.3. Efecto de la velocidad de enrollado en el Angulo de torsión superficial y resistencia a tensión

Se evaluaron cuatro condiciones de velocidad de enrollado: 180, 250, 320 y 390 rpm, dos tratamientos diferentes: fibras no recubiertas (NR) y recubiertas (CR). Ya que la rueca tiene una velocidad máxima limitada de 390 rpm, se limitó este estudio a esa velocidad. Los ángulos de torsión superficial se evaluaron mediante microscopía óptica para comprender mejor cómo afecta la velocidad de enrollado a las propiedades de los hilos.

2.4. Ensayo de extracción de fibra (Pull Out)

Se emplearon moldes en impresión 3D con cavidades, diseñados para centralizar la fibra. Las pruebas se realizaron en un texturómetro Shimadzu® EZ, extrayendo las muestras a una tasa de 5 mm/min a 23°C para medir fuerza de adhesión y desplazamiento. Este método es clave para evaluar la adhesión interfacial en compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales (Barrera, 2022).

2.5. Medida de Angulo de contacto

Este análisis buscó evaluar cómo los diferentes tratamientos afectan la interacción de las fibras con gotas de agua desionizada, resina epoxi flexible (recubrimiento) y resina de poliéster (matriz). Se realizaron diversos ensayos, incluyendo fibras naturales, fibras mercerizadas, fibras mercerizadas recubiertas, hilos sin tratamiento e hilos con tratamiento. Se empleó un tamaño de gota de 1 µl, el tiempo de deposición de gota de 10 s y un tiempo de asentamiento antes de la medición de 5 s. Este enfoque meticuloso garantizó la comparación de los datos y minimizó la variabilidad experimental, asegurando la fiabilidad de los resultados.

2.6. Microscopia electrónica de barrido (SEM)

Se utilizaron muestras obtenidas de ensayos de tracción y Pull Out para evaluar la calidad del recubrimiento y estudiar la morfología de las fibras e hilos. Las muestras fueron montadas en un microscopio electrónico de barrido JEOL® modelo JSM-7100F, utilizando un detector de electrones secundarios Bruker®.

2.7. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

El FTIR se llevó a cabo usando atmósfera controlada de N₂ a 27°C y 47% de humedad relativa. Para esta prueba, se empleó un espectrómetro Shimadzu IRTracer-100 con un accesorio Specac ATR Quest en modo de reflectancia total atenuada, utilizando cristal de ZnSe.

2.8. Fabricación de tejidos

Se procedió a la construcción de los marcos para tejer. Como muestra la figura 2el marco fue construido con listones de madera de 1x1 pulgadas, con puntillas de acero cada 10 mm a lo largo de su perímetro. Este marco elaborado cuenta con la capacidad para contener dos telares de 300 mm en dirección de la trama y 300 mm en dirección de la urdimbre. Para este estudio se manufacturarán tejidos de tipo plano (tafetán), este tipo de refuerzo fibroso utilizado en materiales compuestos se caracteriza por tener una estructura en forma de cuadrícula o rejilla, lo que le da una alta resistencia a la tracción y flexión (Pachacama, 2023).



Figura 2. Proceso de extracción de fibras, a) calceta de plátano. b) limpieza de calceta, c) decorticado, d) fibras de plátano.

2.9. Cálculo de permeabilidad unidireccional experimental

La tabla 1 muestra los tratamientos para evaluar permeabilidad experimental unidireccional a presión constante, el cálculo de la permeabilidad unidireccional del refuerzo en cada dirección, según el método propuesto por (Muños D, 2016), se logra mediante la interpolación lineal de la posición del frente de avance durante la inyección.

Tabla 1. Diseño experimental para permeabilidad de tejido de fibras del pseudotallo del plátano.

Permeabilidad experimental (K)		
Cantidad de fibras	Tipo de tejido	Capas
10	Sin tratamiento	1 y 3
	Con tratamiento	1 y 3
15	Sin tratamiento	1 y 3
	Con tratamiento	1 y 3

El cálculo de la permeabilidad unidireccional del refuerzo en cada dirección, según el método propuesto por (Muños D, 2016), se logra mediante la interpolación lineal de la posición del frente de avance durante la inyección. Siguiendo la ley de Darcy, la integración de su ecuación para un tiempo determinado permite determinar la permeabilidad en la dirección longitudinal medida usando la ecuación (1).

$$K_{exp} = \frac{X_{ff}^2 \phi \mu}{2 P_{inj} t} \quad (1)$$

Donde X_{ff} es la posición del frente en el momento t , ϕ la porosidad del refuerzo, μ la viscosidad del fluido y P_{inj} es la presión de inyección en la entrada que conduce al frente. La porosidad del refuerzo se relaciona con la fracción en volumen de fibra como $(1-V_f)$, que se calcula a partir de la masa total de fibra m_f de todas las capas del refuerzo, la longitud L y el ancho W del refuerzo, así como la altura h de la cavidad del molde donde se coloca el refuerzo (el espesor del marco separador entre moldes), y la densidad ρ_f de la fibra, de acuerdo con la ecuación (2).

$$V_f = \frac{m_f}{LWh\rho_f} \quad (2)$$

2.10. Prueba de tensión de tejidos

Estos ensayos se realizaron en una máquina universal de ensayos MTS Criterion con capacidad de máxima de 30 toneladas. Se registraron datos de desplazamiento de la cabeza móvil, fuerza y tiempo. La velocidad de ensayo se mantuvo a 300 ± 10 mm/min (12 ± 0.5 in/min) o hasta lograr un tiempo de ruptura de 20 ± 3 segundos, conforme a la norma ASTM D5034.

2.11. Prueba de adherencia

La prueba de adherencia se hace para verificar la tensión desarrollada entre el tejido y la matriz. Este ensayo se realizó en la máquina universal de ensayos MTS® Criterion. Para la recolección de datos se registraron datos de desplazamiento de la cabeza móvil, fuerza y tiempo. La velocidad de ensayo 100 ± 10 mm/min, dimensiones de muestras de 75 mm de ancho y 200 mm de largo, según la norma ISO 241.

3. Resultados y discusión

3.1. Elaboración de hilos tratados químicamente y recubiertos

Se obtuvieron hilos de 10 y 15 hebras mediante el proceso de hilado usando la rueca diseñada con impresión 3D. En general, Los resultados presentados en la figura 3, revelan que las fibras tratadas

(químicamente y recubiertas) experimentaron un ligero aumento en su diámetro. Sin embargo, este aumento no es lo suficientemente notable, lo que sugiere que los diámetros son muy similares.

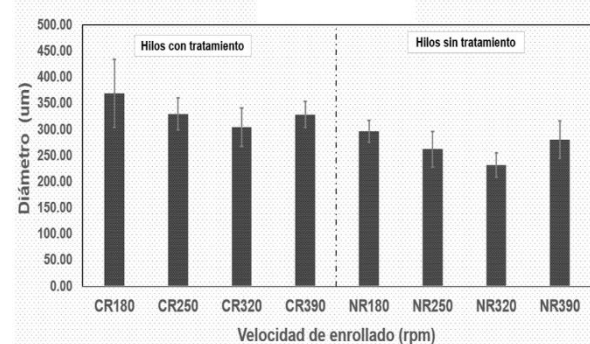


Figura 3. Diámetros de hilos CR y NR a diferentes velocidades de rotación

Se infiere que el recubrimiento aplicado no es lo suficientemente grueso para indicar un exceso en el uso de la resina epóxica flexible como agente aglomerante. Por lo tanto, se obtuvo una aplicación adecuada de la resina, lo que puede ser crucial para mantener las propiedades mecánicas deseadas del material y evitar posibles problemas de fracciones de peso y rigidez (Zuo et al., 2022).

3.2. Prueba de extracción (Pull Out)

Los resultados de esta prueba se muestran en la tabla 2. Se observa que las fibras de plátano tratadas (mercerizadas y recubiertas) muestran un menor porcentaje de extracción, con un 25%, en comparación con las fibras recubiertas sin tratamiento químico con un 33% de extracción. Esto indica que la resistencia a la fractura de las muestras ensayadas es menor que el esfuerzo interfacial entre las intercaras indicativo de una estructura más compacta (Pech, 2021).

Tabla 2. Ensayos de Pull-Out

Combinaciones	Tasa de extracción	% de extracción
Fibra mercerizada recubierta en matriz de poliéster	2 de 8	25%
Fibra sin mercerizar recubierta en matriz de poliéster	2 de 6	33%
Fibra mercerizada en resina epóxica flexible	3 de 10	30%
Fibra sin mercerizar en resina epóxica flexible	1 de 8	12.5%
Hilo mercerizado en resina epóxica flexible	0 de 10	0%

Hilo sin mercerizar en resina epóxica flexible	0 de 10	0%
--	---------	----

Al evaluar la adherencia interfacial entre el recubrimiento con las fibras sin mercerizar y fibras mercerizadas, se observa un 30% y 12,5% de extracción, respectivamente. Lo anterior sugiere que es más conveniente no mercerizar las fibras al aplicar el recubrimiento. Finalmente, al estudiar los hilos enrollados recubiertos de resina epóxica flexible, se observa que el tratamiento químico no influye en el porcentaje de extracción. Esto indica que la adherencia interfacial es mayor que la resistencia a tracción de los hilos, debido posiblemente a puntos físicos de anclaje generados por el enrollamiento del hilo (Ferri, 2017).

3.3. Angulo de contacto

Según los resultados mostrados en la figura 4, se observa una marcada disminución en el ángulo de contacto aproximadamente 30° de diferencia entre los hilos tratados y los no tratados. Esto implica que al tratar los hilos se obtiene una superficie con una mayor capacidad de ser impregnada por el fluido (Muñoz et al., 2014).

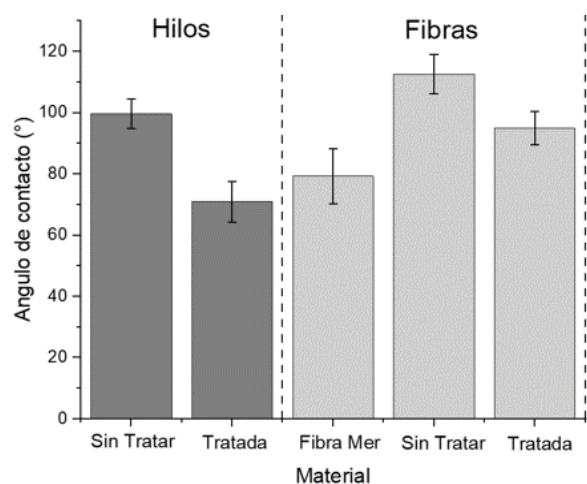


Figura 4. Angulo de contacto usando gota de agua desionizada en diferentes condiciones de hilos y fibras.

De manera similar, para las fibras, se destaca una evidente reducción en el ángulo de contacto al aplicar tratamientos, ya sea mercerizándolas o recubriéndolas, en comparación con aquellas sin tratamiento.

La figura 5 ilustra las mediciones del ángulo de contacto utilizando gotas de resina epóxica flexible. Los resultados muestran que aplicar un tratamiento químico con NaOH a los hilos reduce considerablemente estos ángulos de contacto, de aproximadamente 33° a 19°. Esta reducción garantiza

la correcta impregnación y homogeneidad del recubrimiento a lo largo de todo el hilo (Billah, 2019).

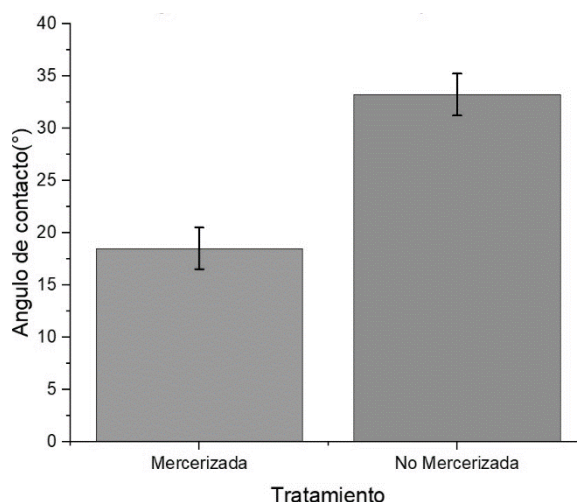


Figura 5. Medición de ángulo de contacto con gota de resina epóxica flexible en fibras tratadas y no tratadas.

En la figura 6, se muestran las mediciones del ángulo de contacto usando gotas de resina de poliéster, con el fin de estudiar el comportamiento entre la interfase formada por los diferentes condiciones de hilos y la matriz del compuesto.

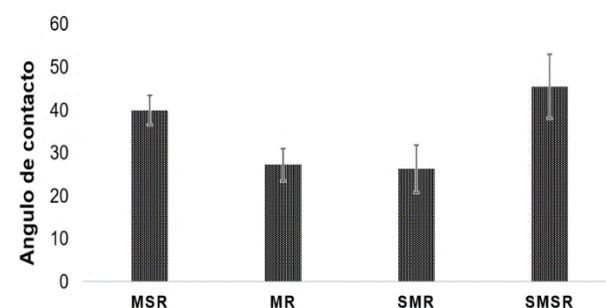


Figura 6. Prueba gota sésil usando gota de resina de poliéster sobre hilos de fibras de plátano con diferentes tratamientos.

De acuerdo con la Figura 6, los hilos sin recubrimiento (MSR y SMSR), independientemente si están mercerizados o no, exhibieron ángulos de contacto entre 40° y 44°, mientras que los hilos recubiertos mercerizados o no (MR y SMR) mostraron ángulos entre 26° y 27°. A partir de estos resultados, se infiere que el tratamiento de mercerizado no influye en la mojabilidad entre el recubrimiento (resina epóxica flexible) y la matriz (resina de poliéster).

3.4. Efecto de la velocidad de enrollado sobre el ángulo de torsión superficial y resistencia a tensión

De acuerdo con la figura 7 los hilos tratados exhiben ángulos de torsión superficial menores en comparación con los hilos no tratados. Este fenómeno puede atribuirse a la mayor rigidez de los hilos tratados, los cuales oponen mayor resistencia al enrollamiento. Los tratamientos químicos con NaOH promueven la pérdida de masa debido a la reacción de la hemicelulosa con el álcali. Esto conlleva a un aumento en la rigidez y resistencia de los hilos (Velásquez et al., 2016). Por otro lado, según (Zuo et al., 2022), a medida que aumenta la velocidad de enrollado, es común que el ángulo de torsión superficial aumente. La figura 8 refleja esta tendencia, mostrando que los hilos tratados indican este patrón a diferencia de los hilos sin tratamiento, donde esta relación no es tan clara.

Un resultado destacado en la figura 7 es que la resina epóxica flexible actúa como agente aglomerante, evidenciado por la disminución en las desviaciones de las mediciones. Esto evidencia mayor homogeneidad a lo largo del hilo, en contraposición a los hilos sin tratar, que tienden a desenrollarse al pasar del tiempo. Lo anterior trae como consecuencia aumento en la variabilidad en los ángulos de torsión superficial (Jawaid et al., 2010).

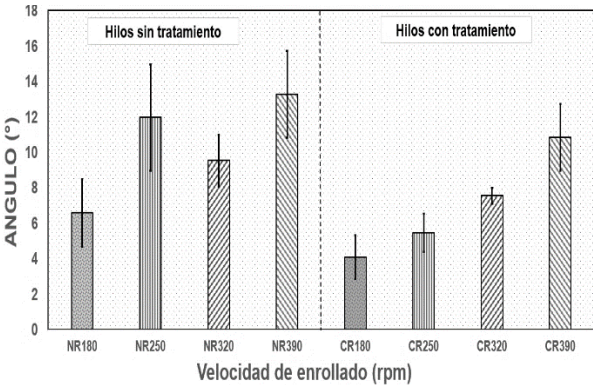


Figura 7. Ángulo de torsión superficial de hilos tratados y no tratados enrollados a diferentes velocidades de enrollado

Los resultados de tensión de hilos se observan en la figura 8. Hay dos tendencias de resistencia a la tensión con niveles progresivos de velocidad de enrollado. La primera tendencia muestra que la resistencia a la tracción del hilo simple aumenta al aumentar la velocidad de enrollada de 180 rpm a 250 rpm. Esto es debido a la mayor fricción entre las fibras con el aumento del nivel de torsión del hilo que evita el deslizamiento de la fibra (Xichen et al., 2021). En la segunda tendencia se muestra una resistencia reducida del hilo en el intervalo de velocidades de enrollado entre 320 rpm a 390 rpm. Esto se debe a que el efecto de la fuerza de unión entre las fibras del hilo es menor a la de la fuerza del hilo después de alcanzar un cierto nivel de torsión (Xichen et al., 2021).

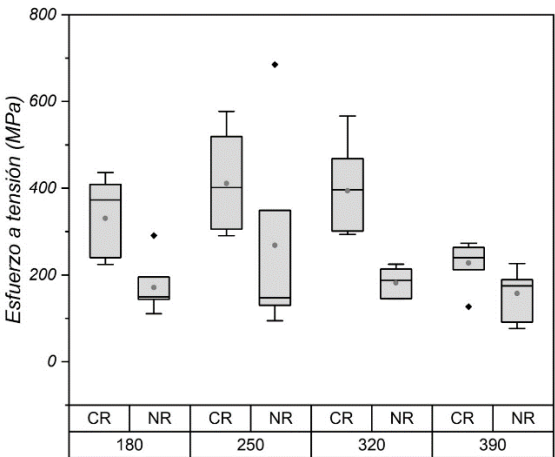


Figura 8. Esfuerzo a tensión de hilos tratados y no tratados enrollados a diferentes velocidades de enrollado.

En la figura 9 se observa que la mayor resistencia mecánica a tracción se alcanza con hilos de 5 hebras. A medida que las hebras aumentan más allá de 5 en cada hilo, se observa una tendencia a la reducción en la resistencia del hilo. Este comportamiento se atribuye principalmente al método de fabricación de los hilos (enrollado simple) (Xichen et al., 2021), al factor de empaquetamiento, que limita la impregnación del recubrimiento dentro del hilo, y a la formación de una cavidad (hoyo) que genera concentradores de esfuerzos en el centro del hilo (Zuo et al., 2022). Como se ilustra en la figura 10 este último defecto fue observado en fibras de 15 hebras.

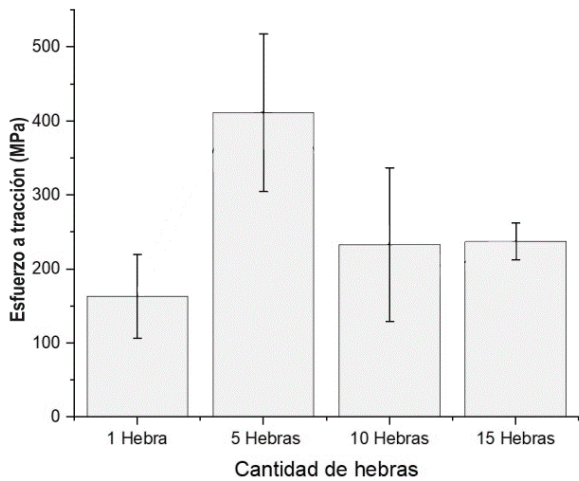


Figura 9. Efecto de la cantidad de hilos en las propiedades a tracción

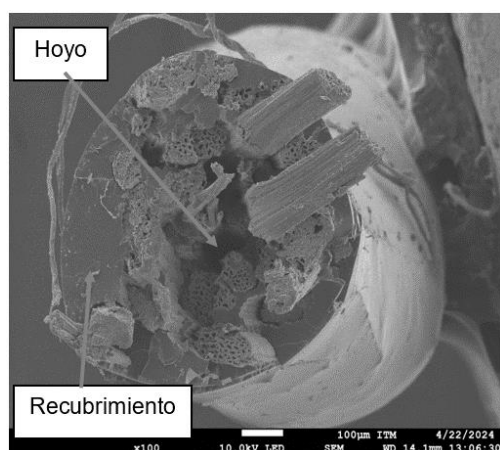


Figura 10. Sección transversal de hilo mercerizado recubierto de 15 fibras Fuente: Autor

3.5. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

En la figura 11, se muestran los espectros FTIR de las fibras de plátano antes y después del tratamiento de mercerizado, aplicación del recubrimiento y muestras de resina epóxica flexible. Se observó una amplia y fuerte banda de absorción centrada alrededor de 3300 cm^{-1} correspondiente a los grupos hidroxilos (OH) y que puede estar atribuida al estiramiento del grupo O-H presente en la celulosa, hemicelulosa y lignina (Kannan & Thangaraju, 2023).

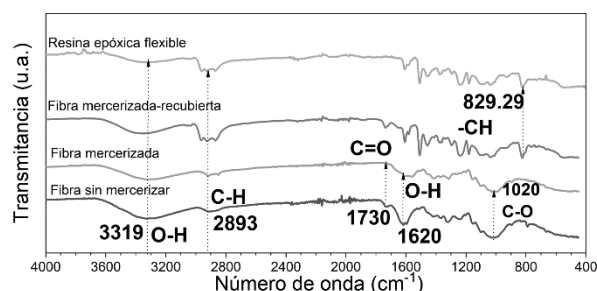


Figura 11. Espectros FTIR de fibras sin mercerizar, fibras mercerizadas, fibras mercerizadas recubiertas y resina epóxica flexible.

Las vibraciones de estiramiento alrededor de 2800-2950 cm^{-1} puede estar asociado a los grupos C-H de la celulosa y la hemicelulosa (Abideen et al., 2023). Para fibras mercerizadas y sin mercerizar la banda de absorción en 1730 cm^{-1} se debe a vibraciones de enlaces del grupo carbonilo C=O, notándose una marcada disminución en la intensidad de esta banda debido a la remoción parcial de lignina y hemicelulosa producida por el mercerizado (Twebaze et al., 2022). En 1620 cm^{-1} se observan grupos O-H, atribuidos a la absorción de humedad para las fibras sin mercerizar y con vibraciones de menor intensidad para fibras mercerizadas (SenthamaraiKannan & Kathiresan,

2018). Vibraciones alrededor de 829 cm^{-1} corresponden a grupos -CH fuera del plano de deformación en aromáticos (Basu et al., 2008), y por último el estiramiento C-O en la celulosa y la lignina en 1020 cm^{-1} (Rodríguez et al., 2015).

3.6. Cálculo de permeabilidad unidireccional experimental

La tabla 3 muestra la permeabilidad de los tejidos del pseudotallo del plátano, tanto sin tratamiento como con tratamiento, y cantidades de fibras de 10 y 15 fibras. De la tabla 3 se puede observar que la permeabilidad de las fibras tratadas (mercerizada y recubierta) es significativamente mayor que la de las fibras sin tratamiento. Este incremento en la permeabilidad sugiere que el tratamiento aplicado sobre los hilos mejora su capacidad para permitir el paso de la resina de poliéster a través del tejido, lo cual podría deberse a cambios en la estructura superficial de las fibras (Muños D, 2016).

Para las fibras sin tratamiento, la permeabilidad disminuye cuando se aumenta el número de fibras, esto puede ser debido a una mayor densidad de fibras que reduce el flujo de la resina debido la capilaridad de las fibras creando zonas de baja permeabilidad en los tejidos (Mbakop et al., 2019) lo contrario ocurre para las fibras con tratamiento, ya que la permeabilidad aumentó con la cantidad de fibras.

Tabla 3. Permeabilidad de tejido de fibras del pseudotallo del plátano

Tipo de tejido	Permeabilidad K (m^2)
10 fibras sin tratamiento	$8,3 \times 10^{-9} \pm 2,06 \times 10^{-10}$
10 fibras con tratamiento	$1,8 \times 10^{-8} \pm 7,16 \times 10^{-9}$
15 fibras sin tratamiento	$4,99 \times 10^{-9} \pm 1,06 \times 10^{-9}$
15 fibras con tratamiento	$6,48 \times 10^{-8} \pm 4,27 \times 10^{-9}$

Teniendo en cuenta los resultados de la tabla 3 el incremento de la permeabilidad de los tejidos con hilos tratados produce mejor infiltración de la resina a través del tejido. Lo anterior supone mejoras en la adhesión entre la matriz y las fibras y esto resulta en una mejora de las propiedades mecánicas del material compuesto (Muños D, 2016).

3.7. Prueba de tensión de tejidos

La figura 12 muestra los resultados del ensayo de tracción de tejidos de fibras del pseudotallo del plátano, comparando fibras sin tratamiento y con tratamiento en muestras de 10 y 15 fibras. Los resultados indican que los hilos sin tratamiento presentan mayores valores de carga a tracción, con 2,33 kN para hilos de 10 fibras, mientras que 1,55 kN para 15 fibras, en comparación con los hilos mercerizados y recubiertos (tratados) con 1,37 kN y 0,8 kN, respectivamente. Esto puede indicar que, aunque se aumenta la permeabilidad, se está comprometiendo la integridad estructural del hilo, afectando sus propiedades mecánicas (Nedjla et al., 2023). Adicionalmente, estos resultados muestran que el tratamiento reduce significativamente la capacidad de carga a tracción, con una disminución del 41% y 48% para los tejidos elaborados con hilos de 10 fibras y 15 fibras, respectivamente.

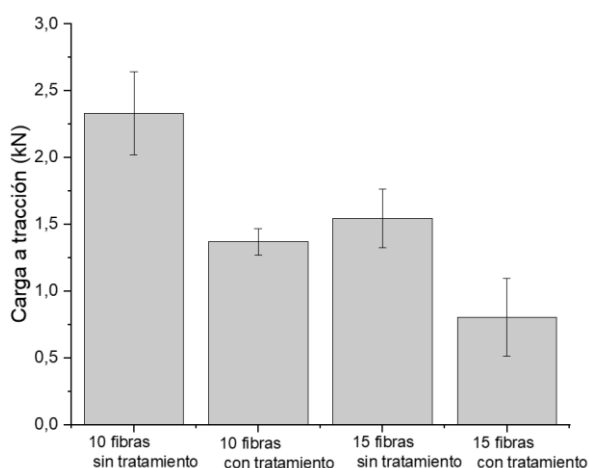


Figura 12. Carga a tracción de tejidos con diferentes cantidades fibras por hilo y tratamiento superficial.

3.8. Prueba de adherencia

La figura 13 presenta los resultados de la fuerza de adhesión de tejidos de fibras del pseudotallo del plátano, comparando tejidos sin tratamiento y con tratamiento. Los datos muestran que las fibras sin tratamiento tienen una fuerza de adhesión considerablemente mayor en comparación con las fibras tratadas. Específicamente, los tejidos de 10 fibras por hilo sin tratamiento muestran una fuerza de adhesión de 87 N, mientras que los tejidos de 15 fibras sin tratamiento presentan una fuerza de adhesión de 21,5 N. Por otro lado, las fibras tratadas, tanto en el caso de 10 como de 15 fibras, no presentaron resistencia a la adhesión debido a una reacción superficial, la cual impidió que la resina de poliéster

aplicada curara adecuadamente, lo cual podría ser atribuido a una posible mala adherencia entre la resina de poliéster y la resina epoxi flexible utilizada en el tratamiento como recubrimiento.

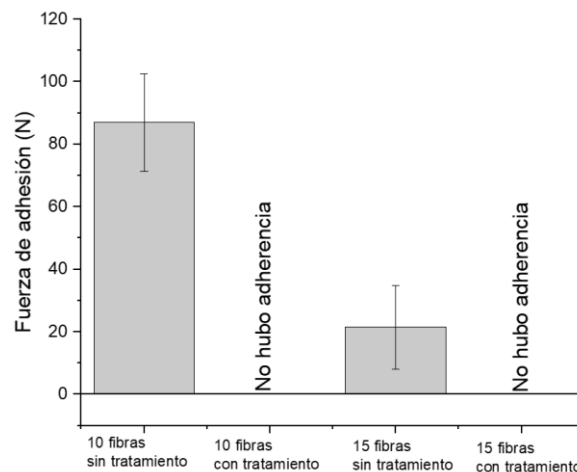


Figura 13. Fuerza de adhesión de tejidos de fibras del pseudotallo del plátano sin tratamiento y mercerizados recubiertos (tratados).

Estos resultados indican que el tratamiento de las fibras afecta negativamente su capacidad de adhesión con la resina de poliéster, lo cual podría comprometer la integridad del material compuesto final. La falta de curado de la resina sugiere que la superficie tratada de las fibras puede inhibir la reacción de polimerización de la resina, resultando en una unión débil o inexistente (Nedjla et al., 2023). Este comportamiento es consistente con estudios previos que muestran que el tratamiento de la superficie de las fibras puede alterar las interacciones químicas y físicas entre la fibra y la matriz, impactando negativamente la adhesión y, por ende, las propiedades mecánicas del material compuesto al final (Huo et al., 2010).

4. Conclusiones

Los resultados de este trabajo llevan a concluir que el pseudotallo del plátano puede formar fibras y refuerzos exitosos para materiales compuestos si se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

Las fibras mercerizadas y recubiertas arrojaron una menor tasa de extracción en comparación con las fibras no tratadas, lo que sugiere que la mercerización y el recubrimiento mejoran la compactación y la adherencia entre las fibras y la matriz, a pesar de que la adherencia interfacial en hilos recubiertos con resina epóxica flexible no se ve afectada por el tratamiento químico. La velocidad de enrollado afecta tanto el ángulo de torsión superficial como la resistencia a la tensión de los hilos. A velocidades más altas, los hilos tratados muestran una mayor resistencia, aunque la resistencia a la tracción puede disminuir a velocidades extremas.

debido a la mayor torsión que afecta la unión entre las fibras.

El mercerizado aumenta la permeabilidad de los hilos, facilitando la infiltración de la resina de poliéster y potencialmente mejorando la adhesión entre la fibra y la matriz. Sin embargo, el tratamiento también puede comprometer la integridad estructural de los hilos, resultando en una menor carga a tracción y una reducción en la fuerza de adhesión con la resina de poliéster.

5. Agradecimientos

Agradecimientos por el apoyo financiero brindado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia a través del Proyecto "Fortalecimiento de la economía circular a través de la generación de valor agregado a partir de residuos agrícolas en los departamentos de córdoba y sucre", con código BPIN: 2021000100052 – SGR.

6. Referencias

- abideen, t. o., oluwole, o. o., olufemi, o., omoniyi, t. e., akhter, p., haris, m., . . . hussain, m. (2023). physico-chemical, thermal and micro-structural characterization of four common banana pseudo-stem fiber cultivars in nigeria. *journal of natural fibers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2167031>
- barrera, f. i. (2022). comportamiento de la adhesión de fibras de plátano y coco tratadas y no tratadas químicamente embebidas en matrices termoplásticas y termofijas. *universidad de córdoba facultad de ingenierías programa de ingeniería mecánica montería, córdoba*.
- basu, s., parimal, m., kasisomayajula, s. v., parameswaran, v., y gupta, n. (2008). improvement in surface degradation properties of polymer composites due to pre-processed nanometric alumina fillers. *iee transactions on dielectrics and electrical insulation*.
- billah, s. (2019). *textile coatings*. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-95987-0_30
- binal y, p., y patel, h. k. (2022). retting of banana pseudostem fibre using bacillus strains to get excellent mechanical properties as biomaterial in textile & fiber industry. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10652>
- ferri, a. m. (2017). fabricación de un tejido composite con fibras de polímeros termoplásticos y fibras naturales para aumentar sus propiedades de resistencia a la llama. *máster en ingeniería, caracterización y procesado de materiales, universidad politécnica de valencia*.
- giovannardi. (2024). *giovannardi*. <https://www.giovannardi.com/it/glossario/adessione>
- huo, s., fuqua, m., chevali, v., y ulven, c. (2010). effects of natural fiber surface treatments and matrix modification on mechanical properties of their composites. *sae technical paper*.
- jawaid, m., abdul khalil, h., y bakar, a. a. (2010). mechanical performance of oil palm empty fruit bunches/jute fibres reinforced epoxy hybrid composites. *materials science and engineering: a, volume 527*(issues 29–30). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.005>
- jiyotishkumar, p., gopi, j., radoor, s., dominic, m., krishnasamy, s., deshमुख, k., . . . sienkiewicz, n. (2022). turning waste plant fibers into advanced plant fiber reinforced polymer composites: a comprehensive review. *composites part c: open access*. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100333>
- kannan, g., y thangaraju, r. (2023). evaluation of tensile, flexural and thermal characteristics on agro-waste based polymer composites reinforced with bananafiber/coconut shell filler. *journal of natural fibers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2154630>
- mbakop, r. s., lebrun, g., y brouillette, f. (2019). effect of compaction parameters on preform permeability and mechanical properties of unidirectional flax fiber composites . *composites part b: engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107083>
- muños d, e. (2016). fabricación y caracterización de green composites con bioresina y tejido de fibra natural de lino mediante moldeo por transferencia de resina. *departamento de ingeniería mecánica y de materiales de la universitat politècnica de valència*.
- muñoz, m. f., r. m. a.-s., y mina-hernandez3, j. h. (2014). fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plásticos. influencia de la modificación superficial. *biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, vol 12 no. 2* (60-70).
- nedjla, d., kribaa, o., boussehel, h., guerira, b., jawaid, m., fouad, h., y azeem, m. a. (2023). effect of fiber surface treatment on the mechanical, morphological, and dynamic mechanical properties of palm petiole fiber/ldpe composites. *springerlink*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13399-023-04197-7>

- oushabi, a. (2019). the pull-out behavior of chemically treated lignocellulosic fibers/polymeric matrix interface (lf/pm): a review. *composites part b: engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107059>
- pachacama, v. p. (2023). diseño y construcción de un retrovisor utilizando un material compuesto por resina epoxi y refuerzo de tejido plano de cabuya mercerizada. *tesis de maestría-escuela superior politécnica de chimborazo*.
- pech, g. e. (2021). efecto de la incorporación de fibras de henequén sobre las propiedades mecánicas a flexión de un material compuesto espumado de poliuretano. *centro de investigación científica de yucatán, posgrado en materiales poliméricos*.
- piña, g., rodríguez-lelis, j. m., y solano perez, j. j. (2021). determinación de la energía libre superficial del líquido sinovial humano en biomateriales. *ciencia ergo sum*. <https://doi.org/10.30878/ces.v28n3a5>
- quiceno, j. n., vélez r, j. m., cadena ch, e. m., restrepo-osorio, a., y santa, j. f. (2019). *improvement of mechanical properties of pineapple leaf fibers by mercerization process*.
- rodríguez, l., fangueiro, r., y orrego, c. (2015). efecto de tratamientos químicos y de plasma dbd en las propiedades de fibras del seudotallo de plátano. *rev. latinam. metal. mat*.
- senthamaraiannan, p., y kathiresan, m. (2018). characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fiber from coccinia grandis.l. *carbohydrate polymers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.072>
- twebaze, c., zhang, m., zhuang, x., kimani, m., zheng, g., y z. wang. (2022). banana fiber degumming by alkali treatment and ultrasonic methods. *journal of natural fibers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2079581>
- udaykumar, v., saindane, soni, s., y menghani, j. v. (2020). recent research status on synthesis and characterization of natural fibers reinforced polymer composites and modern friction materials – an overview. *materials today: proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.334>
- velásquez, r. s., pelaéz, a. g., y giraldo v, d. h. (2016). uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica: una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos. *informador técnico (colombia)*.
- xichen, y., fan, w., azwar, e., g, s., xia, c., sun, y., . . . lam, s. s. (2021). twisting in improving processing of waste-derived yarn into high-performance reinforced composite. *journal of cleaner production*, 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128446>
- yaashikaa, p. r., senthil kumar, p., y varjani, s. (2022). valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: a critical review. *bioresource technology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126>
- zuo, q., salleh, k. m., wang, c., liu, s., lu, c., wang, l., . . . zakaria, s. (2022). prediction and analysis of properties of ramie fiber staple yarn reinforced unsaturated polyester composite based on fiber packing density. *composites part b*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109869>